

BİLGEM TEKNOLOJİ

Ocak 2021 / Sayı:11

TÜBİTAK BİLGEM Kurumsal Dergisi. Yılda 2 kez yayınlanır. Parayla satılmaz.

TÜBİTAK
BİLGEM





SAFİR Ürün Ailesi'ne IDC Türkiye'den İki Ödül!

IDC Türkiye tarafından düzenlenen '2020 Yılı Bulut Teknolojileri Ödülleri' kapsamında TÜBİTAK BİLGEM SAFİR Ürün Ailesi, SaaS - Bulut Yazılım Hizmetleri ve Buluta Geçiş Kategorilerinde iki ödül kazandı.

Birincilik Ödülü

SaaS - Bulut Yazılım Hizmeti Kategorisi

TÜBİTAK BİLGEM B3LAB tarafından geliştirilen Safir Depo ürününün kullanıldığı "Safir Depo Akademik Projesi" **birincilik** ödülüne layık görüldü.



İkincilik Ödülü

Cloud Transition - Buluta Geçiş Kategorisi

TÜBİTAK BİLGEM B3LAB tarafından geliştirilen Safir Bulut ürününün kullanıldığı "Safir Bulut - Blokzincir Araştırma Ağı Projesi" **ikincilik** ödülüne layık görüldü.



Başkandan



Merhaba

T ranzistorun keşfi ile başka hiçbir sektörde görülmeyen bir hızla gelişen elektronik sektörü, günlük yaşantımıza en yaygın etkiyi oluşturmuş ve her alanda iş yapış şeklimizi değiştirmiştir. Şahit olduğumuz bu elektronik devrimin lokomotifini, yarı iletken teknolojisi oluşturmuştur. İnsanoğlunun yaratıcılığı ve pazar baskısı ile her iki yılda bir yeni teknoloji geliştirilerek daha yüksek tümleştirilmeye sahip, daha hızlı ve daha yüksek işlem kabiliyetinde mikroçipler üretilmiştir.

Yüksek performanslı mikroçiplerle genişleyen elektronik sektörünün pazar hacmi, ileri yarı iletken teknolojileri geliştirmek için gerekli olan yüksek yatırıma kaynak sağlamıştır. Böylelikle elektronik sanayiine bileşen üreten yarı iletken teknolojisi, ileri bağ etkisi ile haberleşme, ulaşım, gıda, savunma, sağlık gibi tüm sektörlerde önemli girdiler sağlamaktadır.

Ülkemizde son yirmi yılda yarı iletken teknolojilerinde araştırma geliştirme faaliyetlerine çok önemli destekler verilmiş ve geniş cihaz parkına sahip çok sayıda araştırma merkezi, üniversitelerimiz bünyesinde kurulmuştur. Yakın gelecekte bu teknolojiyi özümsemiş kritik kütlelin ülkemizde oluşacağı ve yarı iletken teknolojisinin hızla sanayileşeceği konusunda beklentimiz yüksektir.

BİLGEM ve Tümdevre Üretimi

BİLGEM, Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE) bünyesinde bulunan Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (YİTAL) tarafından geliştirilen özgün CMOS teknolojileri ile, bilgi güvenliği cihazlarında kullanılan kriptoloji tümdevreleri milli olarak 20 yıldır üretmektedir. Başka bir deyişle ülkemizde

CMOS teknolojisi ile endüstriyel standartlarda tümdevre üretimi (yaygın kullanımı ile mikroçip üretimi) BİLGEM'de yapılmaktadır.

UEKAE bünyesinde milli kriptoloji algoritmaları geliştirilmekte ve bu algoritmalar, özgün CMOS teknolojisi ile uygulamaya özgü tümdevre olarak (ASIC - Application Specific Integrated Circuits) YİTAL'de üretilmektedir. Donanım bazlı kriptolojinin temel süreçlerinin BİLGEM bünyesinde tamamlanıyor olması ile de daha güvenli haberleşme ağı kurulabilmektedir.

Fotodedektör ve Hücre Kütüphanesi

Tümdevre üretimine ilave olarak milli olarak geliştirilen fotodedektör teknolojileri ile detektörler de YİTAL'de 8 yıldır üretilmektedir. CİRİT, LUMTAS, TEBER, MAM-L ve MAM-C gibi mühimmatlarda kullanılan fotodedektörlerin tüm tedariki YİTAL tarafından karşılanmaktadır.

YİTAL'in uzun yıllardır uzmanlaştığı sayısal CMOS ve Fotodedektör teknolojilerine ilave olarak üzerinde çalışılan bir diğer çalışma alanı, 0,25 µm SiGeC BiCMOS Hücre Kütüphanesi geliştirilmesidir. Savunma Sanayi Başkanlığı Ar-Ge Dairesi tarafından desteklenen ve Yürütücülüğünü ASELSAN'ın yaptığı bu proje tamamlanırken, başta faz dizili radarların çekirdek tümdevreleri üretiminde olmak üzere, farklı haberleşme uygulamalarında yaygın olarak kullanılması planlanmaktadır.

Dergimizin bu sayısında YİTAL bünyesinde geliştirilip üretilen tüm bu teknolojilerle ilgili kapsamlı bir dosya oluşturulmaya çalıştık. Emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarımıza teşekkür ederim. Bir sonraki sayımızda bu konuşmak üzere, sağlıklılıkla kalın.

Dr. Öğr. Üyesi Ali Görşin

İÇİNDEKİLER

01 Başkan

04 Mühendislik
Sistem Mühendisliği

08 Lazer Teknolojileri
LİDAR Teknolojileri Hayatın İçinde

14 Proje
Teknoloji Rehberliği

20 Yarı İletken Teknolojileri
Dr. Aziz Ulvi Çalışkan:
YİTAL, Ülkemiz için Stratejik Öne Sahiptir!

26 Yarı İletken Teknolojileri
Foto-Maskeler

32 Yarı İletken Teknolojileri
Epitaksiyel Silisyum

08 Lazer Teknolojileri
LİDAR Teknolojileri Hayatın İçinde

38 Yarı İletken Teknolojileri
Tümdevre Üretiminde Temizlik Süreçleri

42 Yarı İletken Teknolojileri
Kimyasal Mekanik Düzleme / Aşındırma (CMP)

46 Yarı İletken Teknolojileri
Yüksek Sıcaklık İşlemleri ve YİTAL Uygulamaları

52 Yarı İletken Teknolojileri
Tümdevre Üretimi Aşındırma Süreci

58 Yarı İletken Teknolojileri
YİTAL'de Tümdevre Üretim Planlama ve Kontrol

62 Yarı İletken Teknolojileri
CMOS Okuma Tümdevreleri

66 Yarı İletken Teknolojileri
Yarı İletken Teknolojisinde Fotolitografi Süreci

72 Yarı İletken Teknolojileri
YİTAL'de Tümdevre Tasarımı

76 Yarı İletken Teknolojileri
SiGe:C BiCMOS Teknolojisi ve
Proses Tasarım Kiti (PTK)

82 Yarı İletken Teknolojileri
HBT Tasarım İncelikleri

88 Yarı İletken Teknolojileri
Akıllı Kartlar: Kritik Verilerimizin Adresi

92 Elektronik İmza
e-imza Test Suit Çalışması

96 Siber Güvenlik
Gömülü Sistemlerde Siber Güvenlik

102 Elektronik Harp
Elektronik Destek Sistemlerinde Veri Analizi

106 Gıda
"Kendim Ettim, Kendim Buldum"

110 Portre
Doç.Dr. Aslı Uğur Katmış:
"Bilim ve sanat, çevremizdeki dünyayı anlama ve tanımlama çabalarının doğasıdır..."

112 Şiir
*Nereye?
*Birim Vektör



| Danışma Kurulu | Sahibi (TÜBİTAK BİLGEM adına) |
|---|--|
| Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt Utku Mustafa Kemal İşler Cemil Sağıroğlu Dr. Demet S. Armağan Şahinkaya Erdal Bayram Prof. Dr. Alikram Nuhbaloğlu Gürcan Okumuş İsmail Doğan Doç. Dr. Mesut Gökten Dr. Mustafa Çetintaş Dr. Orhan Muratoğlu | Dr. Öğr. Üyesi Ali Görçin Genel Yayın Yönetmeni Mehmet S.Ekinci Yazı İşleri Müdürü (Sorumlu) Dr. Aziz Ulvi Çalışkan Sanat Yönetmeni Ceren Olga Eke Editörler Dr. Ezgi Ayyıldız Demirci Dr. Umut Uludağ Dr. Levent Balamir Tavacıoğlu Şerafettin Şentürk Cenk Gökberk Levent Hakkı Şenyürek Dr. İbrahim Soner Karaca Abdülbaki Zengin Güliz Gerdan Onur Özçelik Doğan Tunca Arık Ahmet Kezik M. Burcu Hıdımoğlu |
| Yayın Kurulu | |
| Dr. Aziz Ulvi Çalışkan Bilal Kılıç Erkan Yalçın Dr. Hamza Özer Dr. İzzet Karabay Mehmet S.Ekinci Tolga Mataracıoğlu | |



20 Yarı İletken Teknolojileri

BİLGEM UEKAE Yarı İletken Teknolojileri Araştırma
Laboratuvarı (YİTAL) Sorumlusu Dr. Aziz Ulvi Çalışkan:
YİTAL, Ülkemiz için Stratejik Öne Sahiptir!



92 Elektronik İmza
e-imza Test Suit Çalışması

İletişim Adresi
BİLGEM Teknoloji Dergisi
P.K. 74, 41470 Gebze KOCAELİ

Telefon
(0262) 648 1000

Web
www.bilgem.tubitak.gov.tr

e-posta
bilgemteknoloji@tubitak.gov.tr

Baskı
Şan Ofset
Tel: (0212) 289 24 24

Baskı Tarihi
Aralık 2020
ISSN 2717-9273

Dergide yayımlanan yazı ve görsellere kaynak gösterilerek
atıfta bulunulabilir. Dergide yayımlanan yazıların sorumluluğu
yazarına aittir, TÜBİTAK BİLGEM sorumlu tutulamaz.
BİLGEM Teknoloji Dergisi,
Basın Ahlak Yasası'na uymayı taahhüt eder.

Sistem Mühendisliği

Ersin EVİN - Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

“**Sistem çağının ayırt edici özelliği, öncelikle bileşenlere bakmak yerine sistemleri yukarıdan aşağı bir yaklaşımla (top-down approach) tasarlamaktır. Buna parçalardan önce “büyük resmi görmek” de diyebiliriz.**”

Türk Dil Kurumu'nun Güncel Türkçe Sözlüğü'nde mühendis kelimesi şöyle tanımlanmıştır: “İnsanların her türlü ihtiyacını karşılamaya dayalı yol, köprü, bina gibi bayındırlık; tarım, beslenme gibi gıda; fizik, kimya, biyoloji, elektrik, elektronik gibi fen; uçak, otomobil, motor, iş makineleri gibi teknik ve sosyal alanlarda uzmanlaşmış, belli bir eğitim görmüş kimse.” [1] Mühendislik ise, yine aynı sözlüğe göre “mühendis olma durumu” olarak tarif edilmiş.

Tanımda sözü geçen bayındırlık, fen, teknik ve sosyal alanları kısaca “bilim ve teknoloji” ifadesiyle özetlersek, mühendisliği şöyle tarif edebiliriz: “Bilim ve teknoloji yoluyla elde ettiğimiz bilgi ve yöntemlerin, insan yapımı ürünlerin gerçekleştirilmesi için kullanılması.” Elektronik, elektrik, mekanik, yazılım, vb. alanlara ait tasarım mühendislikleri için yukarıdaki tanım anlaşılabilir. Ancak bu tanımın sistem mühendisliğine uygulanması durumunda şu iki soru aklımıza takılabilir:

- ▶ Tasarım mühendislikleri; elektronik, elektriksel, mekanik, yazılım vb. ürünleri ele alır. Sistem mühendisliği neyi ele alır?
- ▶ Tasarım mühendislikleri bir bilime dayanır. Sistem mühendisliği pratiklerini hangi bilime dayandırıyoruz?

Sistem Kavramı

Yukarıdaki ilk sorunun cevabı, sistem mühendisliği “sistemleri” ele alır şeklinde verilebilir elbette. Ancak sistem terimi bugün pek çok anlamda kullanılmaktadır. Bu nedenle daha belirgin bir tanıma ihtiyacımız var. Sistemi şöyle tanımlayabiliriz: “Sistem, ortak bir amaca ulaşmak veya bir misyonu yerine getirmek için birlikte çalışan, birbiriyle ilişkili bileşenler kümesidir.” [2] Bu tanımdan, iki önemli karakteristik özellik çıkartılabilir:

- ▶ Sistem, bileşenlerden oluşur.
- ▶ Bir sistem bileşeni, parçası olduğu sistemin bir amacını tek başına gerçekleştiremez. Ancak diğer bileşenlerle etkileşerek bunu yapabilir. Aksi halde o sistemin bileşeni değildir.

Örneğin “bisiklet” bir sistem olarak düşünülebilir. Bisiklet, bir biniciyi varış yerine kadar taşımak için görev yapan birbiriyle ilişkili parçalardan (gidon, tekerlekler, gövde, sele, vb.) oluşmuştur. Bu durumda bisikletin misyonu biniciyi taşımaktır.

Sistem kavramının diğer bir özelliği, sistemin, bileşenlerinin de kendi amaçları kapsamında bir sistem olmasıdır. Bu özellikten faydalanırsak, bir sistemi tanımlamak için kullanacağımız yöntemleri, onun bileşenlerini tanımlamak için de kullanabiliriz. Sistemi bileşenlerine ayırdıkça bileşenlerin işlevi (misyonu) somutlaşmaktadır. Bisiklet örneğine devam edersek, bisikletin ana işlevi biniciyi taşımaktır. Onun bir bileşeni olan gidonun amacı, bisikletin ön tekerleğini sağa veya sola yönlendirmektir. Burada biniciyi taşıma işlevi, tekerleği yönlendirmek işlevinden daha soyut (üst düzey) bir işlevdir ve birden çok tasarım teknolojisiyle ancak tasarlanabilir. Oysa tekerleği yönlendirmek işlevi, örneğin sadece makine mühendisliği teknikleriyle tasarlanabilir. Sistem, bileşenlerine ayrıştırıldıkça sistem mühendisliğinden tasarım mühendisliğine geçiş yapılır (Şekil 1).

Sistem hiyerarşisi içerisinde bileşenler, karakteristik bir seviyededir. Bileşenler, operasyonel sahada insanlar tarafından kullanılabilen, değiştirilebilen veya bakımı yapılabilen sistem elemanlarıdır. Bu seviyenin üstündeki sistem ve alt sistemlerin tasarımında, bütünüyle sistem mühendisliği yöntemleri kullanılabilir. Bu seviyenin altında, bütünüyle ilgili tasarım disiplininin pratikleri ve yöntemleri kullanılabilir. Bileşen seviyesinde ise sistem mühendisliği yaklaşımı kullanılmaya devam edebilir. Bu sebeple bu seviyedeki mühendislik faaliyetleri donanım/yazılım sistem mühendisliği olarak adlandırılabilir.

Sistem Bilimi

İlk bölümde sorduğumuz ikinci soru “sistem mühendisliği hangi bilime dayanıyor” şeklindeydi. Bu sorunun cevabını sistem bilimi (systems science) olarak verebiliriz. Bazen sistem düşüncesi (systems thinking) veya sistem yaklaşımı (systems approach) terimlerini de duyarız.

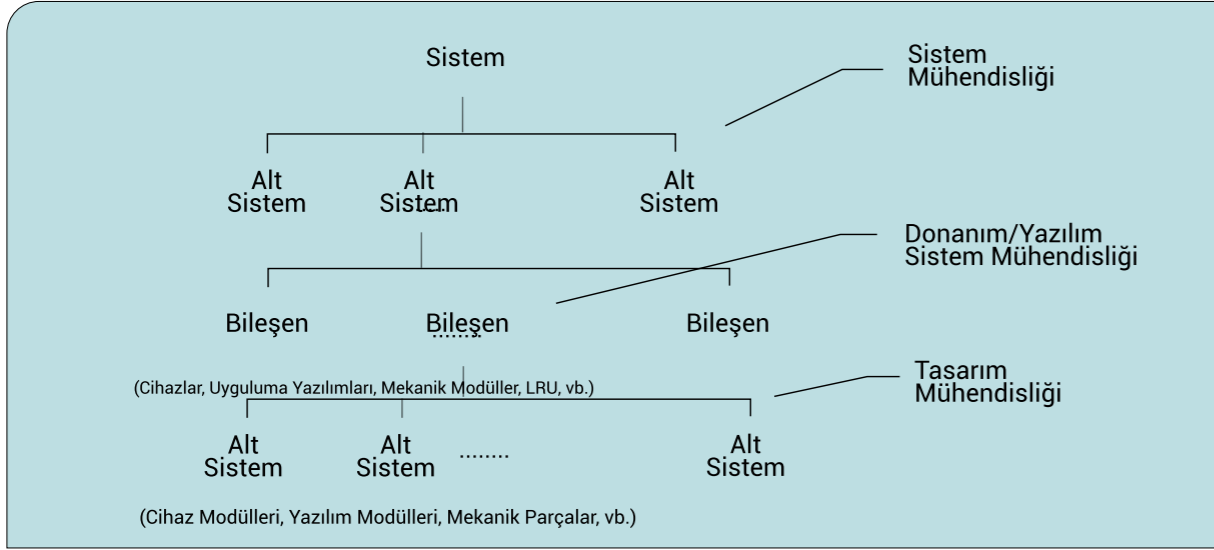
Sistem biliminin izleri 18'nci yüzyıla kadar sürülebilir. Bu devirde özellikle doğal ve fiziksel bilimlerdeki bilgi dağarcığı hızlı bir artış göstermiştir. Sistem biliminin gelişmesinde makina çağı ve sistem çağı olarak adlandırabileceğimiz iki önemli aşama vardır. Bu aşamalar doğrudan sistem mühendisliği alanının oluşmasını ve gelişmesini sağlamıştır [3].

“**Sistem, ortak bir amaca ulaşmak veya bir misyonu yerine getirmek için birlikte çalışan, birbiriyle ilişkili bileşenler kümesidir.**”

Makina çağı büyük oranda indirgemeciliğe (reductionism) dayanır. İndirgemecilik, sistem davranışının tamamen sistem bileşenleri ile açıklanabileceği düşüncesidir. Makina çağında daha önce insan eliyle yapılan işler teker teker makinalar vasıtasıyla yapılmaya başlanmıştır. Buhar makinaları ve araç-gereç yapımındaki ilerlemeler buna birer örnektir. Gittikçe daha çok makina insanın yerini almış ve daha önce sistem bileşenleri sadece insan iken bu çağda makina ve insan birlikteliğinden oluşan sistemler ortaya çıkmıştır. Bu çağın temel yaklaşımı şöyle özetlenebilir: “Bileşenleri geliştirip bunları tümelştirerek (integration) daha büyük sistemler yapabiliriz.” Bu yaklaşım “aşağıdan-yukarı süreç” (bottom-up process) olarak adlandırılır.

Sistem bileşenleri arasında makinaların payının zamanla hızla artması sonucunda çok daha karmaşık sistemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Üstelik bileşen olarak





Şekil 1. Sistem mühendisliğinin sınırları

bakıldığında makinelerin teknolojik karmaşıklığı da artmıştır. Sonuçta görülmüştür ki bu karmaşık sistemlerde, tasarlanan bileşenler tam olarak tariflerine uygun davrandığı halde bu bileşenlerin oluşturduğu sistem istendiği gibi davranmayabilmektedir.

Karmaşıklık (bileşen sayısı ve aralarındaki ilişkiler yumağı) arttıkça sistemin davranışı beklendiği gibi olmayabilir. Aşağıdan-yukarı tasarım anlayışında her sistem bileşenini ayrı tasarlayıp sonra sistemi oluşturmak için bunları tümleştirmek çoğu zaman sistem seviyesinde optimum olmayan sonuçlar doğurur.

Özünde bu sebeplerden dolayı makina çağında karmaşık sistemlerin ortaya çıkmasıyla birlikte indirgemecilik düşüncesi yetersiz kalmıştır. Zamanla sistem tasarımı, makina çağının alt seviyesinden sistem çağına evrilmiştir. Sistem çağında, bir sisteme tümleşik bir bütün olarak bakılır. Sistemin bileşenleri, aralarında etkileşerek sistemin amaçlarını gerçekleştirir. Sistem çağının öne çıkan karakteristiği, öncelikle bileşenlere bakmak yerine sistemleri yukarıdan aşağı bir yaklaşımla (top-down approach) tasarlamaktır. Buna parçalardan önce "büyük resmi görmek" de diyebiliriz. Zaman içerisinde, karmaşık sistemlerin tasarımında sistem mühendisliği standart bir yaklaşım olmuştur.

Sistem Mühendisliği Yaklaşımı

Sistem mühendisliği yaklaşımı (yöntemi) başlıca şu aşamaları içerir:

- ▶ Misyona analizi
- ▶ Operasyonel analiz
- ▶ Gereksinim analizi
- ▶ Mantıksal tanımlama
- ▶ Ön tasarım

Sistem mühendisliği, hem ihtiyaç sahibi hem de

tedarikçi (geliştirici) tarafında icra edilebilir. Özellikle ilk iki aşama ihtiyaç sahibi tarafında yürütülür.

Misyona analizi

Bu aşamanın ana sorusu şudur: Misyona nasıl yerine getirilir ve aksaklıklar nelerdir? Burada ihtiyaç makamının kendi misyonu kastedilmiştir. Aslında ihtiyaç sahibinin misyon süreçleri zaten tanımlı olmalıdır. Ancak bazı durumlar için bu tanımların yeniden yapılması gerekebilir.

Örnek olarak, su numunelerini analiz etmekle görevli bir kurumun işleyişi şöyle olsun:

- ▶ Müşteri analiz için başvurur. Başvuruyu bir personel karşılar ve numune kabını müşteriye verir. (Problem: Müşteri başvuru için kuruma gelmek zorunda kalıyor.)
 - ▶ Müşteri su numunesini kaba koyar, yeniden kuruma gelir ve teslim eder.
 - ▶ Laboratuvar personeli su numunesini alır ve elle yürütülen bir yöntemle (çeşitli kimyasallar ve mikroskop incelemesiyle) numuneyi analiz eder. Sonuçları yazılı bir rapor haline getirir ve müşteriye raporun hazır olduğuna dair bilgilendirir. Müşteri kuruma gelir ve yazılı raporu teslim alır. (Problem: Elle yapılan analizler yavaş olabiliyor ve hata ihtimali yüksek oluyor. Müşteri sonuçları almak için kuruma gelmek zorunda kalıyor.)
- Aşamanın sonuçları, işletim kavramı (CONOPS: Concept of Operations) belgesi olarak yazılır.

Operasyonel analiz

Bu aşamanın ana sorusu şudur: Kullanıcılar yeni sistemden ne bekliyor? Bu aşamada, kurum faaliyetlerinden hangilerinin sistem tarafından destekleneceği kararlaştırılarak bir operasyonel kavram oluşturulur. Daha önceki aşamada belirlenen problemler, operasyonel olarak çözüme kavuşturulur. Önceki örneği devam ettirirsek:

“ Mühendisliği şöyle tarif edebiliriz: Bilim ve teknoloji yoluyla elde ettiğimiz bilgi ve yöntemlerin, insan yapımı ürünlerin gerçekleştirilmesi için kullanılması. ”

- ▶ Müşteri kuruma gelmeden analiz için başvurabilir.
- ▶ Sistem, başvuruyu otomatik kaydetsin ve numune kabını müşteriye göndersin.
- ▶ Müşteri, su numunesini koyduğu kabı bulunduğu yerden kuruma göndersin ve kuruma girişi yapısın.
- ▶ Laboratuvar personeli, su numunesi analizini tam otomatize bir cihaz kullanarak yapsın, raporu sistem hazırlasın ve müşteriye kuruma gelmesine gerek olmadan bildirsın.

Bu ifadeler ayrıca gereksinim formunda kaydedilir. Aşamanın sonuçları, operasyonel kavram tanımı (OPSCON: Operational Concept Description) ve paydaş gereksinimleri belgesi olarak yazılır.

Gereksinim analizi

Bu aşamanın ana sorusu şudur: Operasyonel kavramı ve ilişkili paydaş gereksinimlerini karşılamak için sistem ne yapacak ve ne gibi özelliklere sahip olacaktır? Bu aşamada paydaş gereksinimlerini karşılayacak teknik bir çözüm belirlenir ve bu çözümün teknik gereksinimleri tanımlanır.

Örnek üzerinden devam edersek:

- ▶ Sistem, web tarayıcı ile erişilebilecek bir ortam sunacak ve analiz başvurularını bu şekilde alacaktır.
- ▶ Sistem, başvuru ile ilgili kurum personeline mesaj atacak ve iş listesine ekleyecektir. Personel tarafından üzerine alınmadığı sürece görev hatırlatması yapacak ve tüm zaman istatistiklerini tutacaktır. Kurum personelinin görevi üstlenmesiyle birlikte bir analiz etiketi oluşturacak ve etiket basım makinesinden çıktı alacaktır.
- ▶ Sistem, müşteriden gelen kaptaki su numunesi üzerinde yapılan talebe uygun olarak A, B ve C analizlerini uygulayacaktır. Analiz esnasında oluşan atıkları özel bir kabine gönderecektir.
- ▶ Sistem, analiz sonuçlarını içeren bir dosya oluşturup web sitesinde müşterinin erişimine açacaktır.
- ▶ Sistem, analiz verilerinin gizliliğini, bütünlüğünü koruyacaktır. Sistem, müşteri başvurusunun ve rapor teslimatının yapıldığına dair bilgilerin inkâr edilemezliğini temin edecektir. Aşamanın sonuçları, sistem gereksinimleri belgesi olarak yazılır.



Mantıksal tanımlama

Bu aşamanın ana sorusu şudur: Teknik gereksinimlerini karşılamak için sistem nasıl bir işleyişe sahip olacaktır? Bu aşamada teknik gereksinimleri karşılayan bir sistemin alt işlevleri belirlenir ve her bir alt işlevi icra edecek sistem elemanları tespit edilir. Bu elemanlar, sistemin birbirinden bağımsız ama iletişim halindeki sistem bileşenleridir. Her bileşen, kendine atanmış olan işlevleri yürütecek işlem gücüne, performansa, belleğe ve diğer kalite unsurlarına (güvenilirlik, sürdürülebilirlik, vb.) sahip olmalıdır.

Bu aşamada belirlenen sistem elemanları kavramsal ve teknolojik kararları içermez. Mantıksal yapı, zaman içindeki teknolojik gelişmelere karşı ön tasarıma kıyasla daha uzun ömürlüdür. Bu aşamanın sonuçları bir rapor içerisinde yazılır.

Ön tasarım

Bu aşamanın ana sorusu şudur: Sistem, hangi teknolojik bileşenlerden oluşacak ve inşa edilecektir? Bu aşamada, mantıksal tanımlama sırasında belirlenmiş olan sistem bileşenlerini hayata geçirmek için kullanılabilecek en uygun (optimum) teknolojik elemanlara (bilgisayarlar, cihazlar, mekanik parçalar, yazılımlar, vb.) ve bunlar arasındaki arayüzlere karar verilir. Bu aşamanın sonucu, ön tasarım dokümanlarıyla kaydedilir.

Kaynakça

- [1] Türk Dil Kurumu, Güncel Türkçe Sözlük, 2020. <https://sozluk.gov.tr/>.
- [2] R. Cloutier, C. Baldwin ve M. A. Bone, Systems Engineering Simplified, CRC Press, 2015.
- [3] D. Liu, Systems Engineering, Design Principles and Models, CRC Press, 2016.

LİDAR Teknolojileri Hayatın İçinde

Dr. Rasül Torun – Araştırmacı, Dr. Erkan Demirci – Başuzman Araştırmacı, Dr. İsa Kiyat – Başuzman Araştırmacı,
Dr. Mehdi Yavuz Yüce – Başuzman Araştırmacı, Dr. Mustafa Eryürek – Uzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE



LİDAR (Işık Algılama ve Menzil Saptama) lazer ışığı kullanarak bir hedefin mesafesini ve hızını ölçmeyi sağlayan bir teknolojidir.

LİDAR (Light Detection and Ranging-Işık Algılama ve Menzil Saptama) çalışma prensibi RADAR (Radio Detection and Ranging) teknolojisi ile benzerdir. Ancak, kaynak olarak radyo dalgaları yerine elektromanyetik tayfın daha yüksek frekans (daha kısa dalga boyu) bölgesinde bulunan kızılötesi veya görünür ışığı kullanır. Dalga boyunun kısa olması, LİDAR teknolojisinin daha yüksek çözünürlükte ve doğrulukta görüntüleme yapmasını sağlar. Bu sayede radarların gözden kaçırabildiği küçük objeleri şekilleriyle birlikte tespit edebilir. Şekil 1'de trafikte oluşan bir senaryonun LİDAR teknolojisi ve yüksek çözünürlüklü RADAR teknolojisi ile görüntüleme sonuçları görülmektedir.

Öte yandan, radyo dalgasından ışığa geçiş bazı avantajları ve dezavantajları beraberinde ge-

tirmektedir. Lazer ışınları hem uzaysal hem de zamansal uyuma (coherence) sahiptir. Uzaysal uyumları sayesinde çok düşük demet dağılma açısına sahip olan lazerler, hedefin yüksek çözünürlükte taranabilmesini mümkün kılar. Zamansal uyum ise ışığın gidişi ve dönüşü süresince kaynaktaki ışığın aynı özellikte kalmasını sağlar. Bu sayede evreyumlu (coherent detection) algılama yapılmasına olanak sağlar. Bu sayede hem daha düşük geri yansımalar algılanabilir hem de hedefin hızı ölçülebilir. Ancak, lazer ışınlarının su buharı tarafından soğurulması ve saçılmaya uğrayabilmesi, LİDAR teknolojisinin yağmur, sis, pus ve kar gibi kötü hava koşullarında çalışmasını sınırlar. Bu sebeple otonom sürüşten hava trafik yönetimine, uzay araştırmalarından askeri uygulamalara kadar birçok alanda kullanılabilir verinin sürekliliğini ve güvenilirliğini

sağlamak için LİDAR ve RADAR sistemleri birlikte kullanılmaktadır.

Çalışma Prensibi

LİDAR sistemleri, çalışma prensiplerine göre ikiye ayrılır. Geleneksel yöntem (Pulsed Time of Flight), hedefe bir lazer atımı yollar ve hedeften yansıyan veya saçılan ışığın ne kadar zamanda geri döndüğünü elektronik olarak kaydeder. Ölçülen bu uçuş zamanı (Δt) ışık hızı ile çarpılarak toplam uçuş yolu (2D) ve hedefin mesafesi (D) hesaplanır.

$$D = \frac{c}{2} \Delta t$$

Öte yandan AMCW (Amplitude Modulated Continuous Wave: Genlik Modülasyonlu Sürekli Dalga) kullanılan LİDAR sistemi, bir sürekli dalga lazerinin parlaklığını modüle edip (ω_{mod}) hedeften geri dönen ışığın uçuş süresince kazandığı fazı ($\Delta \phi$) ölçer. Bu ölçüm için elektronik veya optik faz dedektörleri kullanılabilir. Optik alanında evreyumlu algılama (coherent detection) hedeften geri dönen ışığı referans ışık (local oscillator) ile karıştırarak ortaya çıkan girişimden faz farkını hesaplar. Ölçülen bu faz farkından uçuş zamanı (Δt) ve hedefin uzaklığı (D) hesaplanır.

$$\Delta \phi = \omega_{mod} \Delta t \text{ ve } \Delta t = \frac{2D}{c} \rightarrow D = c \frac{\Delta \phi}{2\omega_{mod}}$$

Diğer bir sürekli dalga metodu olan FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave: Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga) kullanılan LİDAR sistemi ise bir lazerin frekansını zamanla doğrusal olarak değiştirir. Hedeften geri dönen ışık ile referans ışık evreyumlu dedektör ile algılandığında ara frekans (Δf) oluşur ve bu ara frekans uçuş zamanı (Δt) ile

LİDAR teknolojisi, dalga boyunun kısa olması sayesinde daha yüksek çözünürlükte ve doğrulukta görüntüleme yaparak radarın gözünden kaçabilen küçük objeleri şekilleriyle birlikte tespit edebilir.

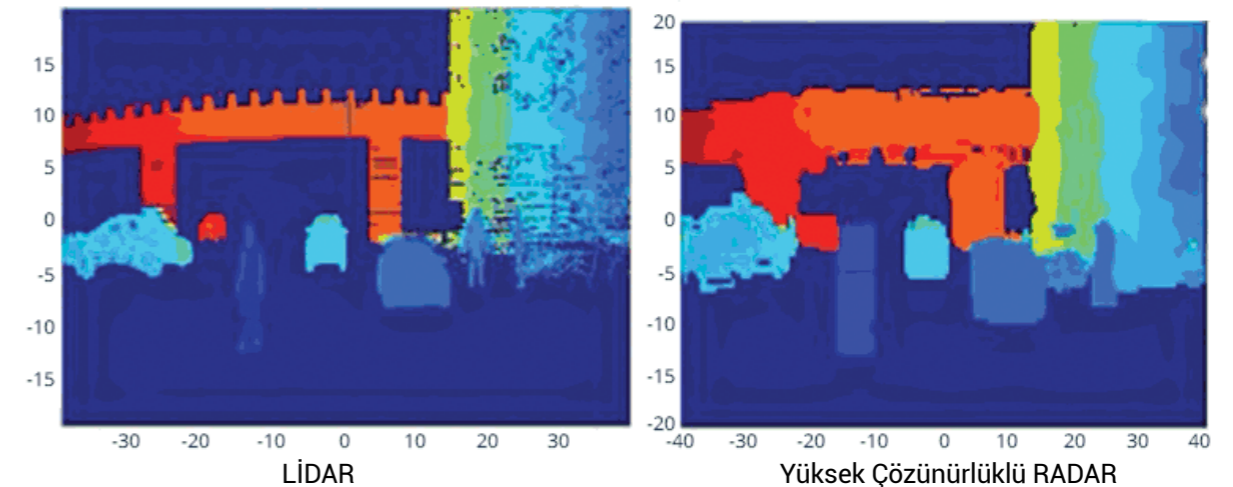
doğru orantılıdır. Çünkü uçuş süresinde referans ışığın frekansı doğrusal olarak γ Hz/s hızıyla değiştirilmiştir.

$$\Delta t = \frac{\Delta f}{\gamma} \rightarrow D = c \frac{\Delta f}{2\gamma}$$

Eğer hedef hareketli ise geri dönen ışık Doppler etkisi sebebiyle ekstra frekans kayması yaşar. Bu durum mesafe ölçümünde hataya sebep olacak bir etmen gibi gözükse de sürekli dalga kullanılması, mesafenin farklı frekanslarda ölçülmesini ve sonuçların işlenerek hem mesafe hem de hız bilgisinin elde edilmesini sağlar.

Doppler Etkisi ve Doppler LİDAR

Doppler etkisi, dalga kaynağı herhangi bir cisimden yayılan dalgaların frekans ve dalga boyunun bir gözlemci tarafından gözlenen cismin görece konumuna ve hareketine göre farklı algılanması olayıdır. Bu duruma örnek olarak yoldan geçen ambulansın sirenini yaklaşıırken tiz (yüksek frekans), uzaklaşıırken pes (düşük frekans) olarak duymamız verilebilir (Şekil 2). Bu frekans kayması (Δf_D) kaynağın frekansına (f_0) ve gözlemci – gözlenen arasındaki göreceli hıza (Δv) bağlıdır. RADAR ve LİDAR sistemlerinde genelde kaynak ve algılayıcı aynı yerde bulunduğu için dalga Doppler etkisini hem hedefe giderken hem de geri dönerken tecrübe eder.



Şekil 1. Trafikte oluşan bir senaryonun LİDAR ve yüksek çözünürlüklü RADAR ile görüntüleme sonuçları [1]

Bu sebeple iki kat frekans kayması gözlenir. Öte yandan formüldeki (c), kaynağın yaydığı dalganın (ses, elektromanyetik vs.) ortamdaki hızı olup LİDAR sisteminde ışık hızını temsil eder.

$$\Delta f_D = 2 \frac{\Delta v}{c} f_0$$



Şekil 2. Doppler olayının kaynağın konum ve hızına göre frekansa olan etkisi

Evreyumlu algılamada hedeften geri dönen ışık ile referans ışığın girişimi sonucunda ortaya çıkan ara frekans, Doppler frekans kaymasını verir. Buradan hedefin hızı hesaplanır. Sürekli dalga LİDAR sistemi, evreyumlu algılama kullanırken atımlı LİDAR sistemi, referans ile geri dönen ışığın zamanda örtüşmemesi sebebiyle evreyumlu algılamaya uygun değildir. Ancak atımı üretmeden önce sürekli dalga tohum lazerden referans olarak ve atım üretim sürecindeki faz ve polarizasyon değişimleri düzeltilerek evreyumlu algılamaya uygun hale getirilebilir. Bu metod, atımlı yöntem yüksek tepe gücü ile evreyumlu algılamanın yüksek hassasiyetini ve hız ölçme kabiliyetini birleştirilmesi sebebiyle rüzgâr LİDAR sistemlerinde kullanılmaktadır.

Burada LİDAR sistemlerinin optik sistem olarak sınıflandırılmasından bahsettik. Ayrıca, LİDAR sistemlerinde çalıştıkları platformlara göre uydu, hava, kara gibi sınıflandırmalar da mevcuttur.

Uydu platformlarında kullanılan LİDAR sistemleri, genellikle dünyanın, yüzeyinin ve atmosferin görüntülenmesi amacıyla kullanılır.

Hava platformlarındaki LİDAR sistemleri ölçüm yapılan yüzeye göre topografik ve batimetrik olarak ayrılırlar. Topografik LİDAR teknolojisi kızılötesi ışık kullanarak haritalama yaparken batimetrik LİDAR teknolojisi su kütlelerinin derinliğini ve tabanını ölçmek için suya nüfuz eden yeşil ışık kullanır.

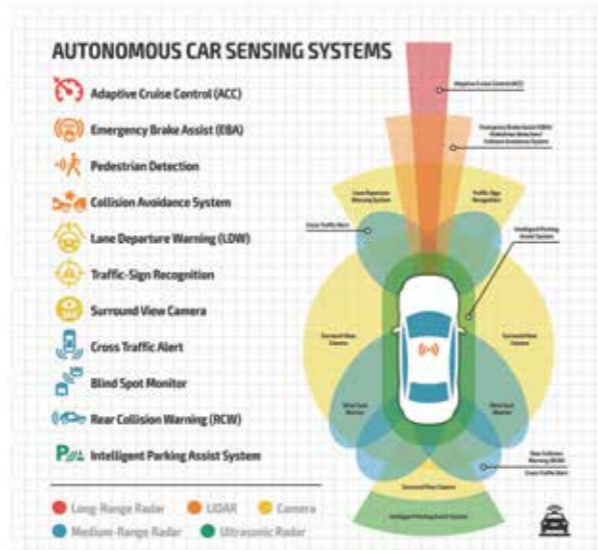
Otonom sürüş için kullanılan mobil LİDAR sistemleri ile madencilik, arkeoloji, mimarlık ve mühendislik alanlarında sıkça kullanılan ve bir yapının 3B modelini yüksek çözünürlükte çıkarmaya yarayan statik karasal LİDAR sistemleri de bulunmaktadır.

LİDAR Uygulama Alanları

Otonom Sürüş Sistemleri

Yeni nesil araçlar sürüş güvenliğini sağlamak ve insan kaynaklı hataları azaltmak için sürücü destek sistemleri ile donatılmaktadır. Park sensörleri, kör nokta gözleme, şerit ihlal uyarı sistemleri bu destek sistemlerinin ilk örnekleriydi. Kamera, RADAR ve LİDAR gibi alıcılardan gelen verileri işleyerek anlamlı hale getiren bu destek sistemler günümüzde daha da çeşitlenerek yarı ve tam otonom sürüşe imkân sağlayacak seviyeye geldi. Bu teknolojiler ve kullanım amaçları Şekil 3'te görülebilir.

LİDAR teknolojisi de yüksek çözünürlükte ve doğrulukta görüntüleme yapabilmesi sayesinde yaya, araç, bisiklet gibi trafikteki unsurları ve hareket yönlerini hızlı bir şekilde tespit edebilir. Bu sebeple yaya tespiti, çarpışma önleme ve acil fren yardımı gibi destek sistemler LİDAR algılayıcı verisini kullanmaktadır.



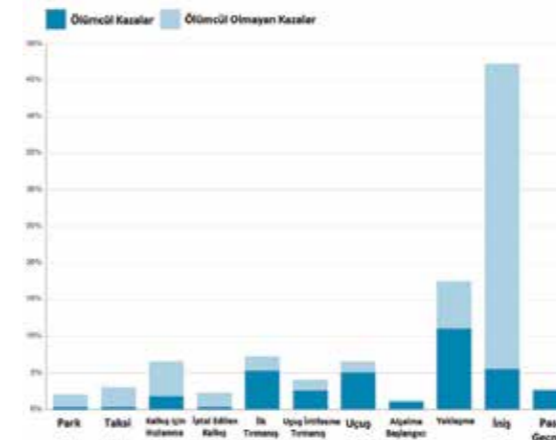
Şekil 3. Otonom sürüş sistemlerinde kullanılan algılayıcılar ve kullanım amaçları

Topografya

Uçak ve helikopter gibi hava platformlarına entegre edilen LİDAR sistemleri şehir planlamasında, tarım arazilerinin denetlenmesinde, orman yoğunluğunun ve kaybının tespitinde kullanılmaktadır. LİDAR taraması sonucunda geleneksel fotogrametrik metotlardan daha doğru daha detaylı topografik modeller elde edilir. Bu sayısal yükseklik modelleri sayesinde hızlı bir şekilde kaçak yapılaşma, arazilerin amacı dışında kullanımı ve yapılaşmanın imar yönetmeliğine uygunluğu denetlenebilmektedir. Hatta ormanlık alanlardaki ağaç tipleri ve tarım arazilerindeki toprak verimliliği de LİDAR sistemleri sayesinde belirlenebilmektedir [2].

Havaalanı Güvenliği

Boeing'in bir araştırmasına göre bir uçuşun en tehlikeli kısmı istatistiksel olarak kalkış ve iniş süreçleridir. Ölümcül kazaların %49'u iniş esnasında olurken %14'ü de kalkış sırasında yaşanmaktadır. Bu durum, iniş ve kalkış esnasında uçağın yere yakın olması sebebiyle pilotların ortaya çıkan problemleri çözmek için sürelerinin az olmasından kaynaklanmaktadır [3-4]. Bu sebeple hava taşıtları, havaalanları etrafındaki hava olaylarını, kuş sürülerini, pist üzerindeki yabancı cisimleri ve apron alanındaki tüm unsurları takip etmek için RADAR, LİDAR ve anemometre gibi çeşitli sistemler ile donatılmıştır.



Şekil 4. Uçuş fazına göre ölümcül ve ölümcül olmayan kazaların oranı [4]

Bu hava olaylarından rüzgâr kırılımı(windshear) ve mikro patlama (microburst) yerelde oluşan

“ Trafikteki yaya, araç, bisiklet gibi unsurları ve hareket yönlerini hızlı bir şekilde tespit edebilen LİDAR teknolojisinin sağladığı veriler, sürücüsüz araçların çarpışma önleme ve acil fren yardımı gibi destek sistemlerinde kullanılmaktadır. ”

ani rüzgâr yön ve hız değişimleridir. Tahmin edilmesi zor olan bu olaylar, özellikle alçak seviyede meydana geldiğinde son yaklaşma sırasında hava taşıtlarının hızını, irtifasını veya yan rüzgâr bileşenini aniden değiştirebilir. Bunlar havacılık açısından oldukça tehlikeli olaylar olup tespit edilmeleri için pilot raporlarının ve nümerik hava tahmin algoritmalarının yanı sıra alçak seviye rüzgâr kırılımı uyarı sistemleri (LLWAS: Low Level Windshear Alert System) kullanılmaktadır. Bu sistem, pist boyunca yerleştirilen anemometrelerden, X-bant polarimetrik Doppler radardan ve 3B Doppler LİDAR sisteminden gelen verileri bir yazılım aracılığıyla değerlendirerek hava kontrol kulesine gerekli bilgileri ve uyarıları iletir.

Anemometreler yerel olarak rüzgâr ölçümü yaparken, RADAR ve LİDAR sistemleri uçakların yaklaşma ve uzaklaşma mesafelerini de kapsayacak şekilde (>10km) uzaktan ölçüm yapabilir. RADAR yağışlı ve sisli havalarda iyi performans gösterirken LİDAR açık ve kuru havada



Şekil 5. Bir mikro patlama olayı (solda) ve pistten çıkmış bir pervaneli uçak (sağda)



Şekil 6. Akıllı telefonlardaki yüz tanıma teknolojisine olanak sağlayan flaş LİDAR

çalışabilir. Uzaktan ölçüm yapabilmenin avantajı, havaalanı etrafındaki hava olaylarını da tespit edip uçaklar için tehlikeli olacak bölgeye gelmeden erken önlem almaktır.

Rüzgâr kırılımı için kullanılan LİDAR sistemleri, havaalanı etrafındaki canlılara, uçakların pilotlarına ve yolcularına zarar vermemek adına göz güvenli (eye safe) lazer kullanırlar. Havadaki gaz moleküllerinden geri yansıma düşük olacağı için yüksek atım enerjisine ihtiyaç duyan bu lazerler, genelde gözün algılayamadığı ve soğurmanın düşük olduğu 1.4-1.8µm aralığındaki dalga boylarını kullanılmaktadır. Dalga boyunun yanı sıra atım genişliği, algılayıcı optiğin tasarımı gibi konular da göz güvenliğini sağlayarak LİDAR performansını artıran optimizasyon alanlarıdır.

LİDAR sisteminin kuru rüzgâr kırılımı tespitindeki performansı, Çin'de bulunan Lanzhou-Zongchuan (ZLLL) havaalanında 2016 yılında 9 ay boyunca test edilmiştir. Bu havaalanında rüzgâr kırılımı olaylarının çoğu 500 metrenin altında ve yağışsız havada yaşandığından hava radarları etkili bir şekilde kullanılamamaktadır. Bu çalışma sonunda LİDAR verisi kullanılarak kuru rüzgâr kırılımı tahmin skoru %25 civarında artırılmıştır. Yan rüzgâr ve türbülans hakkındaki pilot raporları da dikkate alındığında bu skor artışı %50'yi bulmuştur [5].

Akıllı Teknolojiler

Teknolojik gelişmeler LİDAR sistemlerinin daha basit formlarının hayatımıza girmesini sağladı. Microsoft Kinect ve yeni nesil akıllı telefonlar flaş LİDAR teknolojisi kullanarak derinlik bilgisi

elde ediyorlar. Bu şekilde oyun sektöründe yaşanan değişimlerin yanı sıra güvenlik için parmak izi yerine yüzümüz kullanılmaya başlandı. Son olarak da iPad Pro'ya eklenen LİDAR tarayıcı flaş, LİDAR teknolojisine göre daha yüksek çözünürlüğü sayesinde artırılmış gerçeklik alanında yeni olanaklar sağlıyor.

Değerlendirme

Görüldüğü üzere LİDAR sistemleri hayatımızın her alanına girmeye başladı. Uygulama alanı, maliyeti, tasarım ve üretim zorlukları değişse de LİDAR teknolojileri aynı temele dayanıyor. Ayrıca, savunma sanayi ve havaalanı güvenliği gibi bazı alanlarda anahtar teknoloji olması sebebiyle LİDAR teknolojilerinin ülke olarak geliştirilmesinin gerekliliği açık olarak görülmektedir.

Kaynakça

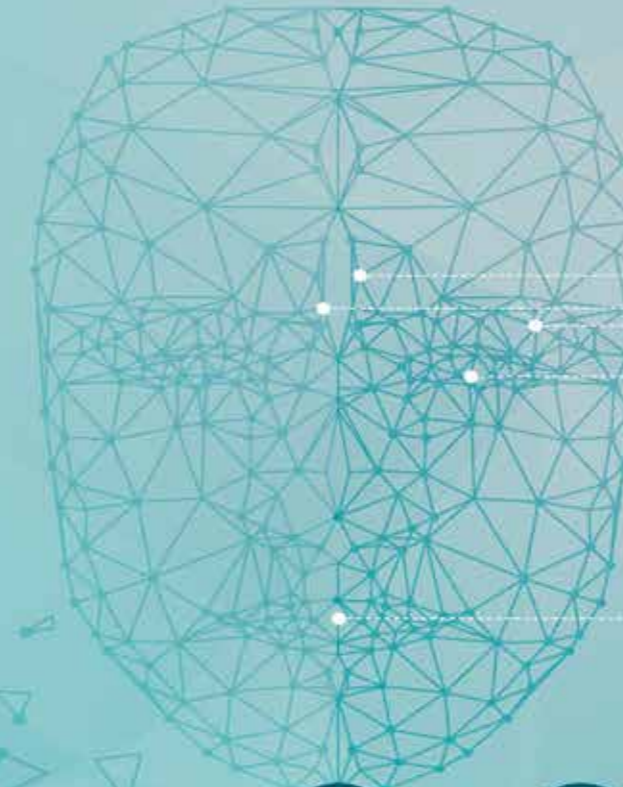
- [1] Pacheco, S. (2018). Autonomous vehicle systems and a connected future. IEEE IoT Summit – RWW 2018. Erişim: 10 Ağustos 2020, <http://site.ieee.org/rww-2018/files/2018/01/Sergio-Palma-Pacheco-RWW2018-presentation.pdf>
- [2] Duran, C., & Daban, F. (2007). Hava lidar (light detection and ranging) verilerin jeomorfolojik ve ekolojik ortam analizlerinde kullanım olanakları. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 30 Ekim-02 Kasım 2007, KTÜ, Trabzon.
- [3] Tang, A., & Morgan, C. (2019). Why airplane takeoffs and landings are so dangerous. Erişim: 10 Ağustos 2020, <https://www.businessinsider.com/why-airplane-takeoff-landing-are-dangerous-flight-2019-12>
- [4] Accidents by flight phase. Erişim: 10 Ağustos 2020, accidentstats.airbus.com/statistics/accident-by-flight-phase
- [5] Thobois, L., Cariou, J. P., & Gulpe, I. (2019). Review of lidar-based applications for aviation weather. Pure and Applied Geophysics, 176(5), 1959-1976.

DerinGÖRÜ

Cognitive Services



TÜBİTAK BİLGEM'den Kurumsal Geliştiriciler için
Ücretsiz Yapay Zeka Destekli Yüz Tanıma
ve Görüntü/Video Analizi Platformu



Biyometrik Yüz
Saptama/Tanıma

Büyük Veri Kümelerinde
Biyometrik Yüz Tanıma

Duygu Durumu
Tanıma

Bakış Açısı
Kestirimi

Cinsiyet Tanıma,
Yaş ve Yaş Aralığı
Kestirimi

Kişi Sayımı ve
Temel Aktivite
Kestirimi

Konuşma
Yazılandırma

El Parmak
Hareketleri
Saptama

OCR
(Optik Karakter
Tanıma)

Teknoloji Rehberliği

Emre Gül – Uzman Araştırmacı / BİLGEM YTE

“ TÜBİTAK BİLGEM Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (YTE) tarafından, Teknoloji Rehberleri Hazırlama Projesi kapsamında, kamu ve özel sektör kuruluşlarının bilişim sistemleri faaliyetlerinde kullanabilecekleri, açık kaynak kodlu teknolojileri konu alan rehberler hazırlanacaktır. ”

Teknoloji, hayatımızı kolaylaştıran ve renklendiren, ihtiyaçlarımızı karşılama ve problemlerimizi çözmede araç olarak kullandığımız, yöntemlere dayalı bilimsel sistem olarak tanımlanabilir. Telefon görüşmeleri, internet bankacılığı işlemleri ve özellikle pandemi döneminde sıklıkla kullanmaya başladığımız çevrim içi toplantılar/eğitimler ile teknoloji hayatımızda daha fazla yer edinmeye başlamıştır.

Bilgi Güvenliği

Gelişen teknoloji ile, bilgiye erişim ve işlemede kolaylıklar sağlanmıştır. Bununla birlikte artan bilginin depolanma ihtiyacı doğmuştur. Teknoloji sağlayıcılarının önemli çalışma alanlarının başında depolanan bilginin güvenliği gelmektedir. İnternet alışverişi yaptığımız bir sitenin müşterilerinin banka bilgilerini koruması, bir hastanenin hasta bilgilerini koruması, iletişim altyapısı hizmeti sağlayan bir kurumun sistemlerine erişim ve yönetim bilgilerini muhafaza etmesi bunlara birer örnektir.

Kurumların bilgi güvenliğini sağlamaları, itibarları bakımından yüksek derecede önceliklidir. Bilgi güvenliğinin sağlanması, bilgiyi barındıran varlıklarının korunması ile mümkündür. Bilgi varlıklarının korunmasını sağlayan temel işlerin başındaysa, varlıkların izlenmesi ve ürettikleri logların analiz edilmesi gelmektedir. Bu motivasyonla; Teknoloji Rehberleri Hazırlama Projesi kapsamında, kamu ve özel kurum/kuruluşlarının altyapı bileşenle-

rinin performans ve diğer kritik parametrelerini açık kaynak kodlu yazılımlar ile izlenebilmeleri, bilişim teknolojileri sistem ve uygulama loglarını merkezi olarak yönetebilmelerini sağlayacak yöntemleri içeren Teknoloji Rehberleri oluşturulacaktır. Kurumlar, çeşitli ağ hizmetlerini, sunucularını ve diğer ağ donanımlarını izlemek ve ürettikleri logları takip etmek için rehber içeriklerinden faydalanabileceklerdir.

Günümüzde, hemen hemen bulunduğumuz her ortamda siber uzayın içinde olduğumuzu söylemek mümkün. Kişisel kullanımın yanı sıra, kurumlarda bilişim sistemleri cihazları ve bu cihazlar üzerinde çalışan uygulamalar, hem yerel hem de geniş ağlarla diğer sistemlerle etkileşimli olarak çalışmaktadırlar. Bu durum, siber güvenlik açısından birçok farklı alanın ayrı ayrı kontrol edilmesi ve geliştirilmesini gerektirmektedir.

Yönetimindeki gelişmeler ve oluşan ihtiyaçlar, bu alanı bilimsel araştırma konusu haline getirmiştir ve bu konuda pek çok farklı yöntem ve standart oluşturulmuştur. Bilgi güvenliğinin sağlanması amacıyla tanımlı standartlar dahilinde, kullanılan sistemlerde log yönetiminin yapılması ve bu sistemlerin performans durumları ile anomali durumlarının izlenmesi zorunlu bir hal almıştır.

Alınan tüm önlemlere rağmen, kasıtlı veya istemsizce yapılan girişimler, sistemsel hatalar veya yazılımdaki hatalı kodlamalar, sistemlerde beklenmeyen/istenmeyen durumlar meydana getirmektedir. Bunların yanında, gelişen teknoloji ile birlikte farklı amaçlar doğrultusunda sistemler üzerinde etkili olabilecek atak vektörleri oluşmaya devam etmektedir. Saldırıya uğrayan sistemler tarafından üretilen loglar ve sistemlerin izlenmesi, bu sistemlerin güvenliğinin sağlanması açısından bu durum bilişim sistemleri altyapısında zafiyet oluşmasına ve yatırımların doğru bir şekilde kullanılmamasına sebep olabilmektedir.

Bilişim sistemleri yönetim süreçlerinin önemli bir bölümünü bilgi güvenliği yönetimi kapsamaktadır. Bilgi güvenliği yönetimi ile bilginin tehlikeye açık halini azaltacak yöntem ve talimatlar oluşturulmaktadır.

Log Yönetimi ve İzlenmesi

ISO 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Standardı içeriğinde log yönetimi ve sistemlerin izlenmesinin önemi ayrıca belirtilmektedir. Farklı sistemlerden alınan logların bir bütün olarak incelenmesi ve bu sistemlerin izlenmesi sonucunda, sistemlerin güvenlik durumlarına ait daha kapsamlı ve farklı bir bakış açısı elde edilebilir.

Geçmişte sistemler tarafından üretilen loglara sadece istenmeyen durumlara meydana geldiğinde veya geçmişe yönelik bir kontrol yapılacağı zaman bakılmaktaydı. Günümüzde bilginin bütünlüğünü, gizliliğini veya erişilebilirliğini bozacak herhangi bir eylem veya saldırının önlenmesi açısından sistemlerin izlenmesinin ve ürettikleri loglarının analizlerinin yapılmasının önemi ve farkındalığı artmıştır.

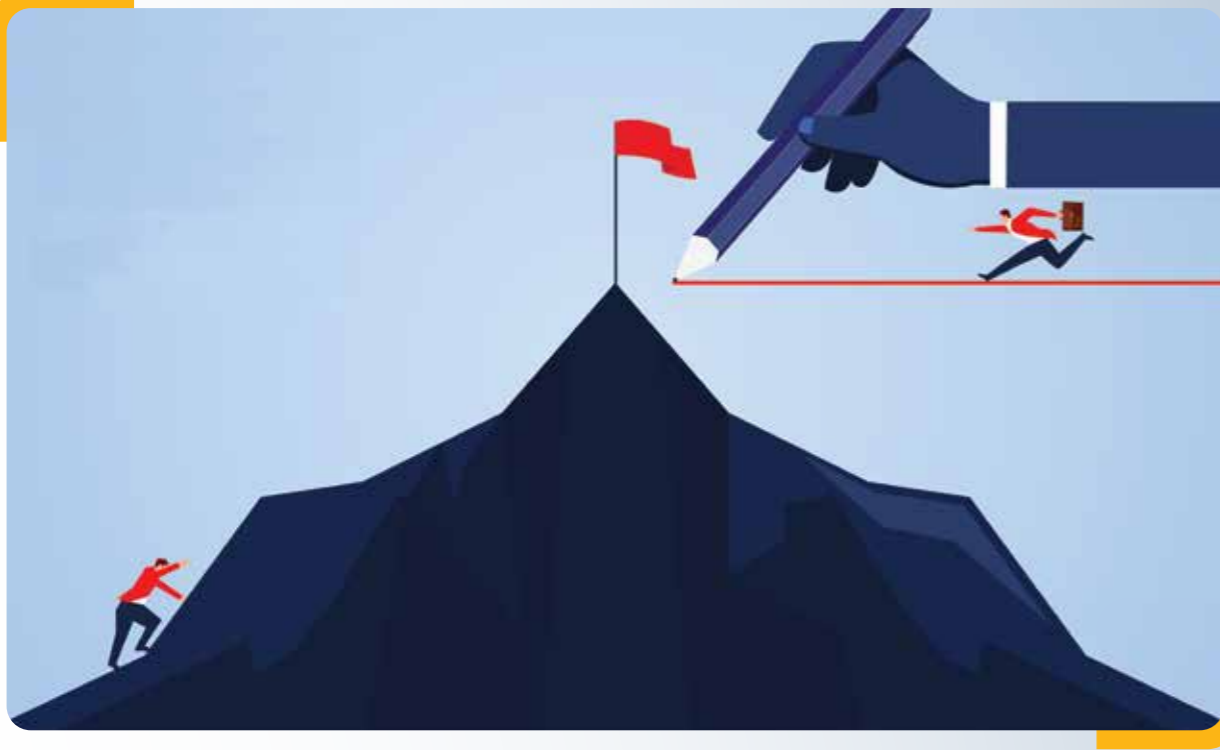
Sistemleri izleme ve bu sistemlerin ürettikleri logların yönetiminin yapılmasını sağlayan birçok araç geliştirilmiştir. İçerisinden açık kaynak kodlu, yüksek performans sağlayan, kullanıcı dostu arayüze sahip ve yaygın olarak kullanılan, ücretsiz Zabbix ve Graylog ürünleri bu alanda ön plana çıkmaktadır.

Ağ donanımları, sunucular, servisler, bulut sistemleri ve uygulamaların izlenmesinde açık kaynak bir ürün olan Zabbix kullanılabilir. Zabbix, sistemlerin sağlığını ve bütünlüğünü izleyen ücretsiz bir yazılımdır. Zabbix ile sistem, servis veya web sitesi üzerinde meydana gelen

“ Teknoloji Rehberleri Hazırlama Projesi'nin temel amacı, açık kaynak kodlu yazılımların yeterliliğine yönelik rehberlikle, söz konusu teknolojilerin tercih edilmesini sağlamaktır. ”

problemler izlenebilir ve bu problemler ile ilgili uyarı e-postaları üretilir. Zabbix, izleme yazılımları arasında düşük kaynak kullanımı, yüksek kaliteli görseller oluşturma, farklı kaynaklardan veri okuyarak çalışabilme, ajanlı veya ajanlı olmayan iletişim, SLA ölçebilme ve mobil cihaz entegrasyonu sağlayabilme gibi özellikleri ile ön plana çıkan komple bir izleme çözümüdür.





Zabbix ile uygulamalardan, sistemlerinizden ve sunuculardan birçok türde veri toplanması mümkündür. Yüksek performanslı ve gerçek zamanlı izleme sağlayan Zabbix ile on binlerce sunucu sanal makine ve ağ cihazları aynı anda izlenebilir. Zabbix ile veri tabanları da izlenebilir.

Zabbix, bir sistemi izlemek için temel olarak iki yöntem kullanır. Birinci yöntem, SNMP protokolü ile izlemektir. SNMP protokolü için tüm izleme sistemlerinin ortak dili denilebilir. SNMP protokolünü izleme yapmak istenilen sistemde aktif hale getirip Zabbix için gerekli ayarlamalar yapıldığında, sistem rahatlıkla izlenebilir. İkinci yöntemse, izlenmek istenen sisteme ajan kurarak izlemektir. Ajan bir yazılım değil, küçük bir servistir. Zabbix uygulamasının yüklü olduğu sunucu ile izlenmek istenen sistem bu servis sayesinde bir port aracılığı ile haberleşir.

Graylog ise; yapılandırılmış veya yapılandırılmamış logların hemen hemen her log kaynağından toplanması, dizine eklenmesi ve analiz edilmesi, anomali gözleme için kullanılan açık kaynak ve ücretsiz bir yazılımdır. Mimarisinde Elasticsearch ve MongoDB bulunmaktadır. Kurulumu ve diğer sistemler ile entegrasyonu gayet basittir. YTE Teknoloji Rehberleri'nde Graylog ve Zabbix ürünlerinin kullanımını ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır.

Bilişim sistemleri altyapısındaki mevcut bileşenlerin, bu sistemlerdeki uygulamaların, sak-

lanan bilginin güvenliği konusunda bu sistemler ve uygulamaların ürettikleri logların ve performans değerlerinin izlenmesinin önemli bir yeri vardır. Log kayıtları adeta bir güvenlik kamerası olarak düşünülebilir. Kim, ne zaman, hangi sisteme giriş yapmış, bu sistemlerde hangi işlemleri gerçekleştirmiş gibi bilgilere sistemlerin ürettikleri loglardan erişilebilir. Sistemlerin izlenmesi ile de verilerin erişilebilirliğinin sürekliliği sağlanmaktadır.

Veriler, korunması gerekli en önemli risk varlıklarından bir tanesidir. Bu verilere erişimin log kayıtlarının alınması ve bu verilerin tutulduğu sistemlerin izlenmesi son derece önem arz etmektedir. Sadece erişim ile ilgili logların tutulması verinin bütünlüğünün korunması hakkında bilgi vermez. Verinin değiştirilip değiştirilmediğinden emin olunması için veritabanlarının da loglarının tutulması gerekmektedir. Yani verinin mevcut olduğu tüm sanal ve fiziksel sistemler ile uygulamaların izlenmesi ve loglarının analiz edilmesi gereklidir. Sistemlerin ve uygulamaların izlenmesi, ürettikleri logların analizlerinin yapılması ve proaktif alarmların oluşturulması olası saldırıların önüne geçecektir.

YTE Teknoloji Rehberleri ile bilişim teknolojileri ve uygulamalarında kullanılacak açık kaynak kodlu ürünler ve bu ürünlerin yetenekleri hakkında bilgiler verilerek, kamu ve özel sektör kurum/kuruluşlarının bu konudaki farkındalıklarının oluşturulması hedeflenmektedir.

Yerlisinyal Demiryolu Sinyalizasyon Sistemleri

YERLİSİNYAL Projeleri, ülkemizdeki demiryolu hatlarında var olan sinyalizasyon eksikliğini gidermeyi ve bu alandaki büyük dışa bağımlılığı ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda sinyalsiz demiryolu hatları, emniyetli ve yerli ürünlerle donatılmaktadır.

Geliştirilen YERLİSİNYAL anlaşılan sistemleri ve trafik kontrol merkezleri, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde toplam 850 km.lik demiryolu hat kesiminde devreye alınmaktadır. 1500 km.lik hat kesimi için ise projelendirme çalışmaları devam etmektedir.

Ürünler-Konvansiyonel Demiryolu Hatları İçin

- ▶ Hatboyu Sinyalizasyon Sistemleri
- ▶ Anlaşılan Sistemleri (SIL4)
- ▶ Saha Ekipmanı Sürme Üniteleri (SIL4)
- ▶ Trafik Kontrol Merkezleri
- ▶ Bölgesel, Yerel Kumanda Masaları

Özellikler

- ▶ Uluslararası standartlara uygunluk
- ▶ Yüksek emniyet seviyesi ve işlevsellik
- ▶ Düşük ilk yatırım maliyeti
- ▶ Düşük bakım ve işletme giderleri
- ▶ Kritik tüm bileşenleri yerli
- ▶ Açık arayüzlere sahip



Yarı İletken Teknolojileri

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 20 | Dr. Aziz Ulvi Çalışkan: YİTAL, Ülkemiz için Stratejik Öneme Sahiptir! | 58 | YİTAL'de Tümdevre Üretim Planlama ve Kontrol |
| 26 | Foto- Maskeler | 62 | CMOS Okuma Tümdevreleri |
| 32 | Epitaksiyel Silisyum | 66 | Yarı İletken Teknolojisinde Fotolitografi Süreci |
| 38 | Tümdevre Üretiminde Temizlik Süreçleri | 72 | YİTAL'de Tümdevre Tasarımı |
| 42 | Kimyasal Mekanik Düzleme / Aşındırma (CMP) | 76 | SiGe:C BiCMOS Teknolojisi ve Proses Tasarım Kiti (PTK) |
| 46 | Yüksek Sıcaklık İşlemleri ve YİTAL Uygulamaları | 82 | HBT Tasarım İncelikleri |
| 52 | Tümdevre Üretimi Aşındırma Süreci | 88 | Akıllı Kartlar: Kritik Verilerimizin Adresi |

BİLGEM UEKAE Yarı İletken Teknolojileri
Araştırma Laboratuvarı (YİTAL) Sorumlusu
Dr. Aziz Ulvi Çalışkan:

YİTAL, Ülkemiz için Stratejik Öneme Sahiptir!

Dr. Aziz Ulvi Çalışkan

Lisans eğitimini İTÜ Elektronik ve Haberleşme Fakültesi'nde 1982 yılında, Yüksek Lisans eğitimini İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 1984 yılında tamamladı. Doktora çalışmasını, SOI CMOS Üretim Süreci Geliştirilmesi üzerine, Prof. Dr. Atilla ATAMAN danışmanlığında, Yıldız Teknik Üniversitesi'nde 1999 yılında tamamladı.

1983 yılında tümdevre üretim mühendisi olarak Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (YİTAL)'nda başladığı çalışma hayatı, kesintisiz devam etmektedir. Halen BİLGEM UEKAE Enstitü Müdür Yardımcısı ve YİTAL Sorumlusu olarak görev yapmaktadır.

Fotoğraflar: Kerem Bora Özbayrak - Uzman Yardımcısı / BİLGEM İGBY

YİTAL, 1983 yılında, TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi'ndeki Marmara Araştırma Merkezi (o dönemde Enstitü) bünyesinde kurulmuştur.

Yayın Kurulu olarak, BİLGEM UEKAE Enstitü Müdür Yardımcısı ve Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (YİTAL) Sorumlusu Sayın Dr. Aziz Ulvi Çalışkan ile bir röportaj gerçekleştirdik. Aziz Ulvi Hocamız, YİTAL'de kuruluşundan bu yana çalışıyor. Ender birikim ve tecrübesiyle aktardığı bilgiler, alanda ülkemiz ve BİLGEM'de yapılanlara ve yapılması gerekenlere ışık tutuyor...

YİTAL, faaliyet alanında ülkemizdeki tek kuruluş. Hikâyesini ve tarihçesini paylaşabilir misiniz?
1998 yılında Marmara Araştırma Merkezi'nden ayrılan Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE)'nde YİTAL'e bilgi güvenliği cihazlarında kullanılan milli kript algoritmalarını içeren tümdevreleri tasarlama ve üretme görevi verilmiştir. Bu görevlendirme ile eğitimlerini ülkemizde tamamlamış araştırmacıların geliştirdiği CMOS teknolojisi ile askeri standartlarda tümdevre üretimi, 1999 yılında UEKAE'de başlamıştır. Böylelikle, bütün olarak ilgili cihazların kript algoritmaları, kript tümdevreleri, güvenilirlik testleri (COMSEC, TEMPEST vb.) milli olarak geniş bir bilgi bütünlüğüyle UEKAE bünyesinde yapılmaya başlanmıştır.

1970'li yılların sonlarında başlatılan ağır sanayi hamlesi çerçevesinde ülkemizde Tümdevre (Integrated Circuit - IC) üretim fabrikası gerekliliği görülmüş ve bu amaçla Ankara'da bulunan TESTAŞ firması bünyesinde Yarı İletken Devre Elemanı Fabrikası (YİDEF) kurulmasına karar verilmiştir. Başlangıç olarak, ABD'deki bir

firmeden 7µm Bipolar teknoloji transferi yapılmış ve yurtdışına eğitim için personel gönderilmiştir.

Bu çalışmalara paralel olarak üretimde çıkması olası problemleri çözmek ve yeni teknolojiler geliştirmek için 1983 yılında YİTAL, TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi'ndeki Marmara Araştırma Merkezi (o dönemde Enstitü) bünyesinde kurulmuştur. YİTAL'de başlatılan ilk proje, TESTAŞ için satın alınan teknolojinin ülkemiz şartlarına uyacak şekilde güncellenmesi olmuştur. Transfer edilen paket içinde bulunan çeşitli analog tümdevreler bu teknoloji kullanılarak YİTAL'de üretilmiştir. 1989 yılında temiz alanı ve cihaz parkı tamamlanan TESTAŞ'da ilk deneme üretimi başarı ile yapılmasına rağmen, yüksek kapasiteli üretime geçilememiştir.

YİTAL, sayısal tümdevre üretmek amacıyla, 'NATO Kararlılık için Bilim Programı'nın sınırlı desteği ile 1992'de 3µm CMOS ve sonrasında 1998'de 1.5µm CMOS teknolojilerini geliştirmiştir. Bu üretim süreçleri ile yerel endüstri için çeşitli, uygulamaya özgü tümdevreler (Application Specific Integrated Circuit - ASIC) üretilmiştir.



YİTAL Yönetimi - Soldan Sağa: Dr. Mehmet Güntekin Kabuli, Ebru Arıkan, Sema İmrahor İlyas, Dr. Nurettin Yaman Özelçi, Dr. Aziz Ulvi Çalışkan



Kripto ASIC (Uygulamaya özgü tümdevre-Application Specific Integrated Circuit)'ler, YİTAL tarafından milli yetkinlikler kullanılarak ülkemize kazandırılmış ve kullanıma sunulmuştur. Günümüzde YİTAL'in kripto ASIC üretimi ve yeni teknoloji geliştirme çalışmaları, düzenli bir şekilde devam etmektedir.

Elde ettiği başarılarla YİTAL'in alt yapısı, 2000 yılında daha yüksek kapasitede tümdevre üretimi için yenilenmiş ve endüstriyel cihazlarla kuvvetlendirilmiştir. Var olan çalışmalara ek olarak, UEKAE'nin desteklediği proje ile YİTAL, 2002-2005 yılları arasında 0.7 µm CMOS üretim sürecini geliştirmiş ve kripto ASIC (Uygulamaya özgü tümdevre- Application Specific Integrated Circuit) üretimine uygulamıştır. Bu çalışmalar sayesinde kripto ASIC'ler milli yetkinlikler kullanılarak ülkemize kazandırılmış ve kullanıma sunulmuştur. Günümüzde YİTAL'in kripto ASIC üretimi ve yeni teknoloji geliştirme çalışmaları, düzenli bir şekilde devam etmektedir. Belirtilen çalışmalara ek olarak YİTAL Tasarım Bölümü, Avrupa Birliği (AB) 6. Çerçeve Programı'nca desteklenen SCARD isimli projede görev almış, yan kanal analizlerine dayanıklı tasarım tekniği kullanarak başarılı tasarımlar gerçeklemiştir.

2006 yılına gelindiğinde ise YİTAL, TÜBİTAK tarafından desteklenen Ulusal Akıllı Kart Tümdevresi Tasarım Projesi'ne başlamıştır. YİTAL tarafından tasarlanıp Asya'daki üretim evlerine üretilen akıllı kart tümdevreleri, Bolu'da 20.000 adet dağıtılarak sahada başarısını kanıtlamıştır. Günümüzde kullanıma geçen kimlik kartlarımızda YİTAL tarafından tasarlanan Akıllı Kart Tümdevreleri bulunmaktadır.

Takip eden 2007-2010 yılları arasında YİTAL, ASIC için 24 V CMOS teknolojisini geliştirilmesinin yanı sıra, fo-

todedektör tasarımı ve üretimine de yönelmiştir. Bu kapsamda, fotodedektör teknolojisi ROKETSAN mühendisleri ile ortak çalışarak geliştirilmiştir. 2012 yılından beri fotodedektör üretimi YİTAL'de devam etmektedir.

YİTAL 2014 yılında SSB Ar-Ge Dairesi'nin desteğiyle, 0.25 µm SiGe:C BiCMOS Hücre Kütüphanesi Geliştirilmesi Projesi'ne başlamıştır. 2018 yılında proje hedeflerine uygun ($F_c:125\text{GHz}$ ve $BV_{CEO}:1.7\text{V}$) SiGe HBT süreci başarı ile geliştirilmiş ve tekrarlanabilirliği kanıtlanmıştır. 2019 yılında bu sürece uygun 0.25 µm CMOS süreci geliştirilmiştir. Devamında bu iki üretim bandı birleştirilerek, SiGe BiCMOS teknolojisi ile RFIC tümdevrelerin ülke içinde gerçekleştirilmesine başlanmıştır. Devam etmekte olan projenin yürütücülüğünü ASELSAN REHİS, projedeki RF Tümdevre tasarım ve proses tasarım kiti (PTK) hazırlama iş paketlerini ise MKR-IC firması yapmaktadır.

Ülke olarak yarı iletken teknolojilerinde neredeyiz, neler yapıyoruz?

Yarı iletken teknolojisi diğer teknolojilerle kıyaslandığında günlük yaşamımıza en fazla etkiyi oluşturmuştur. Tranzistorun keşfi, tüm sektörleri (Haberleşme, Ulaşım, Sağlık, Gıda, Savunma, Eğitim ve diğerleri) kökten değiştirmiştir ve sonuç olarak yaşadığımız dönem, bilgi çağı olarak adlandırılmıştır.

Yarı iletken teknolojisi, elektronik endüstrisine ara sanayi malı üretmekte olup son kullanıcıya sunacağı bir ürünü yoktur. Dolayısıyla, elektronik sanayiinden önemli miktarda yarı iletken bileşen talebi oluşması gerekmektedir. Buna karşılık teknolojiye erişim için gerekli ilk yatırım maliyeti çok yüksektir. Belirtilen durumdan dolayı maa-lesef ülkemizde gelişmiş bir yarı-iletken sektörü bulunmamaktadır. Üretim kapasitesi ve uygulanacak teknoloji yükseldikçe yatırım miktarı katlanarak artmaktadır. Düşük kapasiteli yatırım yapılırsa, ölçek ekonomisi gereği ürün maliyeti yükseldiğinden ürünün rekabet şansı düşecektir.

Bir diğer önemli zorluk ise teknolojinin geliştirilebilmesi ve devamı için çok sayıda iyi eğitilmiş personel ihtiyacı vardır. Ayrıca yarı iletken sektöründe teknoloji, başka hiçbir sektörde görülmeyen hızla yenilenmektedir. Her yeni teknoloji, bir öncekinden daha yüksek performansla tümdevre üretme şansı sunmaktadır. Bu durum çok yüksek rekabeti getirmekte ve yarı iletken sektöründeki riskleri artırmaktadır. 2000'li yılların başında gelişmiş teknolojiyi uygulayan 14 kadar firma faaliyet gösterirken günümüzde 7nm teknolojisi ile üretim yapan ancak iki firma bulunmaktadır.

YİTAL, özel ihtiyaçlar için yerel endüstriye bir çözüm ortağı ve stratejik öneme sahip bir laboratuvar olarak öne çıkmaktadır. YİTAL Silisyum teknolojisi ile devre elemanı üretme konusunda geliştirdiği üretim süreçleri ile saha-ya/endüstriye ürün sunabilen 40 yıllık deneysel bir tecrübeye sahiptir. Bu birikim çekirdek olarak kullanılarak özgün teknolojilerimizle ülkemizde güçlü bir yarı iletken sektörü oluşturulabilir. YİTAL çalışanları olarak, teknik açıdan başarılı ve güçlü pazarı olan tümdevrelerimizin çeşitliliğini ve sayısını artırmak için çalışmalarımızı sürdürmekteyiz.

YİTAL'in Ülkemiz İçin Önemi

YİTAL olmasa ne olurdu? Ülkemiz için stratejik önemi nedir ve YİTAL'in geliştirdiği ürünler, hâlihazırda hangi alanlarda kullanılmaktadır?

YİTAL, yurtdışından temini edilmesi anlamlı ve güvenli olmayan tümdevreleri tasarlamak ve üretmek amacıyla çalışmalarını sürdürmektedir. Milli kripto algoritmaları işleyen tümdevrelerin tasarımını ve üretimini gerçekleştir-

si, bu amaca tipik bir örnektir. Güvenli ve sürdürülebilir bir haberleşme için kripto algoritmalarının donanım temelli gerçekleştirilmesi gerektiğinde, bu algoritmaların milli tümdevreler ile üretilmesi en güvenli çözümdür. YİTAL bu görevi başarı ile yerine getirmektedir.

Günümüzde devletin vatandaşına sunduğu hizmet, artık kâğıt üzerinden akıllı kartlara geçmiştir. Dolayısıyla, yurt dışından temin edilen akıllı kartlardaki tümdevresi temin edilmesi, sunulan hizmetlerin güvenliği düşünüldüğünde önemli bir konudur. Tamamladığı projelerle akıllı kart tümdevre tasarımları üzerinde uzmanlaşmış olan YİTAL, yurt dışından temin edilen ürünlere alternatif bir çözüm sunmuştur. Bu kapsamda ülkemiz ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde kullanılan kimlik kartlarının bir kısmında, YİTAL tarafından tasarlanmış tümdevreler kullanılmaktadır. Bu konuda özgün çözümler geliştirerek daha yaygın etki oluşturmak amacıyla YİTAL, tasarım ekibini güçlendirmiştir.

Yarı-iletken devre elemanlarının günümüzdeki elektronik cihazlarındaki maliyet payı %15 seviyelerindedir. Bu nedenle ülkemizdeki üreticiler, yüksek yatırım ve riskler içeren yarı-iletken devre elemanı üretiminden uzak durmaktadırlar. Birim fiyatı makul seviyelerde olan yarı iletken bileşenlerin ve tümdevrelerin yurt dışından tedarik edilmesi doğal bir sonuçtur. Elektronik sistemlerin performansı, kullandıkları tümdevrelerin işlem hızı, bellek kapasitesi gibi özellikler ile belirlenmektedir.

Rekabetçi bir üründe kullanılacak bir tümdevrenin yurtdışından temini, standart tümdevrelerde olduğu gibi kolaylıkla ve makul fiyatlarla olmayabilir. Bu duruma ek olarak, eğer bu ürünler savunma sanayiinde kullanılacak ise, tümdevrenin temini sürdürülebilirlik açısından daha da yüksek riskler içerecektir. Günümüz şartlarında bir şişe suyun değerini onun fiyatı belirlemektedir. Benzer durum tümdevrelerin değeri için de geçerlidir. Dolayısıyla savunma sanayiinde kullanılacak bir tümdevre ile ticari kullanıma sunulan bir tümdevrenin durumu ve değeri birbirinden farklı olacaktır; tıpkı bir şişe suyun değerinin çöl şartlarında farklı olduğu gibi. Bu gibi durumlarda yerel endüstriye bir çözüm ortağı olarak YİTAL, stratejik öneme sahip bir kurum olarak öne çıkmaktadır.



Belirtilen teknolojilerin yerli imkânlarla üretilebilmesinin önemi, karşılaştırmalı örneklerle açıklanabilir. Örneğin 10 yıl önce medyaya "Fransa'nın tanksavar füzesi kurusıkı çıktı" başlığı ile yansıyan haberde (1), çok düşük isabet oranı ve geç teslimat nedeniyle ERYX füzelerinin yurt dışından temininin iptal edildiği bilgisi paylaşılmıştır. Uluslararası mahkemede bu füzelerdeki kusurun üretici hatasından kaynaklandığının gösteriminde, BİLGEM danışmanlarından Sayın Muharrem Demirbaş'ın geliştirdiği sistem kullanılmıştır. Bu sayede firmaya yapılacak yüksek bir ödeme iptal edilmiş olsa da önemli bir ülke kaynağı heba olmuştur (1).

Günümüzde ise, ROKETSAN'ın geliştirdiği lazer arayıcı başlıkların tamamında, YİTAL 'de üretilen fotodedektörler kullanılmaktadır. Bu fotodedektör teknolojisi ROKETSAN mühendisleri ve YİTAL'in ortak çalışması ile geliştirilmiştir. Bu yetkinlik ile milli anti-tank füzelerinin vurma doğruluğunda ya da teslimatlarında herhangi bir sıkıntı yaşanmaması, ülke olarak son yıllardaki önemli kazanımlarımız arasındadır.

YİTAL'de geliştirilen özgün ve milli fotodedektörleri SİHA'larda yer alan MAM-L, MAM-C, helikopterlerde kullanılan CİRİT ve LUMTAS gibi mühimmatların tamamında kullanılmaktadır. Bu ürünlerde elde edilen başarıların bir sonucu olarak, benzer konularda TÜBİTAK SAGE ve ASELSAN'la da çalışmalara başlanmıştır.

YİTAL'in Hedefleri

YİTAL'in yakın, orta ve uzun vadeli hedefleri nelerdir? Örneğin elektrikli araçlarda YİTAL'in geliştireceği ürünleri kullanmak mümkün olacak mıdır? Son 6 yıldır üzerinde yoğun bir şekilde çalıştığımız SiGe BiCMOS teknolojiyle radyo frekansındaki tüm-

“Günümüzde kullanıma geçen kimlik kartlarımızın bir kısmında YİTAL tarafından tasarlanan Akıllı Kart Tümdevreleri bulunmaktadır.”

devreleri (radio frequency integrated circuit- RFIC) üretmek ve en kısa süre içinde kullanıma sunmak, yakın vadeli hedefimizdir.

Başarısını sahada kanıtlamış olan fotodedektörlerimiz ile hızlı ve hassas mesafe ölçüm yapan sistemler geliştirilmiş ve kullanıma alınmıştır. Bu sistemler aracılığıyla kazanılan tecrübe ile otonom sistemler için maliyet etkin özgün çözümler geliştirmek, bir diğer yakın vadeli planımızdır.

YİTAL olarak uzmanlaştığımız algılayıcı üretimini, SiGe BiCMOS süreci ile birleştirip tek bir tabanda çözüm sunmak, orta vade hedeflerimizdendir. Bu hedef sayesinde, algılayıcı, işlemci ve haberleşme birimleri tek bir silisyum taban üzerinde üretilebilecektir. Böylelikle ilgili ürünlerin var olan özelliklerinden feragat edilmeden maliyeti, kırk mık alanı, güç tüketimi düşürülebilir ve ilgili pazarda benzer örneklerine göre daha fazla tercih edilebilecektir. Bu amaçla üniversitemiz ve geniş pazarlara sahip ihracatçı firmalarımız ile projeler hazırlanmaktadır.

Bu teknik çalışmalara ilave olarak YİTAL'in temel hedefi, geliştirdiği teknolojiler ile yerel endüstriye daha yaygın hizmet verebilecek şekilde sanayileşmektir. Ancak yüksek hacimli üretim ile daha fazla katma değer oluşacağından, bir devlet laboratuvarı olan YİTAL'i yüksek hacimli üretim yapan fabrika seviyesine ulaştırmak, yıl-



lardır üzerinde çalıştığımız hedefimizdir. Bu hedef için YİTAL'de projeler yapılmış, yol haritaları hazırlanmıştır.

Ülkemizde yaygın olarak taraftar bulan "devlet bu teknolojiye yatırım yapmalı" düşüncesi yerine, teknik açıdan başarılı ve güçlü pazarı olan milli yarı iletken devre elemanlarının sayısının artması ile sanayileşmenin gerçekleşeceği düşüncesindeyiz. Başarılı ürün gerçekleştirmek için ise "birlikte daha güçlüyüz" yaklaşımının yaygınlaşmasını zorunlu görmekteyiz.

YİTAL, faaliyet alanı ve altyapısı açısından BİLGEM'in diğer birimlerinden farklı bir konumda. Bu durumun avantajları ve dezavantajları nelerdir? YİTAL'de ihtiyaç duyduğunuz çalışan profili hakkında bilgi verebilir misiniz? Yarı iletken teknolojisi üzerine sadece teorik olarak değil aynı zamanda laboratuvarında deneysel olarak da çalışıp çalışmalarının sonucunu somut ürünler olarak görmek isteyen, meraklı ve tutkulu kişiler için YİTAL, cennetten bir parçadır adeta. Ayrıca YİTAL, Silisyum teknolojisi ile devre elemanı üretme konusunda 40 yıllık deneysel ve sahaya/endüstriye ürün sunabilen bir tecrübeye sahiptir. Bu birikim ve tecrübe, aramıza katılan yeni çalışanlarımıza Türkçe dilinde aktarılmaktadır.

YİTAL, 0.25 µm SiGe BiCMOS teknolojisini uygulayabilecek alt yapıya ve güçlü bir cihaz parkına sahiptir. Bu cihazlar, 1000 m2 alanlı 10, 100 ve 1000 sınıfı bölgelerden oluşan temiz-alanda kurulmuştur. Temiz alanda gerçekleştirilen süreçler; maske üretimi, Silisyum pul işleme (wafer processing), pul verim haritası, tümdevre kılflama ile fonksiyonel ve yorma (burn-in) testleridir. Pul işleme sürecinde yarı iletken teknolojisinde kullanılan (kimyasal temizlik, yüksek sıcaklıkta oksitleme, düşük basınçta gaz fazdan film depolama (LPCVD), plazma destekli film depolama (PECVD), fiziksel film depolama (PVD), iyon ekme, litografi, plazma destekli

aşındırma (RIE, ICP, kimyasal mekanik düzleme (CMP) gibi) bütün teknikler uygulanmaktadır.

Belirtilen cihazlarla ilgili süreçleri yapabilmek, sıkı temiz alan kuralları, özel tulumlar ve çalışma koşullarına uyum gerektirmektedir. Bu koşullara genç yaşta uyum sağlamak daha kolay olmaktadır. Çok başarılı istisnalar olmakla birlikte, başka alanlardaki tecrübelerden sonra bu çalışma koşullarına uyum sağlamak, zorlayıcı olabilmektedir.

33 adet maske ve 300 üretim adımı bulunan YİTAL'e ait 0.25 µm SiGe BiCMOS sürecinde istenilen teknoloji hedeflerine ulaşabilmek için, çift vardiya disiplini uygulanmaktadır. Yıllık pul işleme kapasitesi 2500 adet olan YİTAL'de 24'ü tümdevre tasarımında, 48'i üretimde, 8'i test ve kılflamada olmak üzere toplamda 80 personel görev almakta olup, personelin %75'i araştırmacıdır. Ayrıca, YİTAL'de farklı disiplinlerdeki teknikler uygulandığı için elektronik, kimya, malzeme, makina ve fizik-mühendisleri görev almaktadır.

Tümdevre üretiminde, rutin uygulanan süreçlerde dahi alınan her karar çok önemlidir; çünkü kullanılan kimyasal ve gaz kaynaklar zehirli, yanıcı ve yakıcıdır. Bu sebeple istenilen teknolojiye güvenli ve verimli bir çalışma ortamı ile ulaşabilme, ancak iletişimi kuvvetli bir ekip çalışması ile mümkün olabilmektedir. Ayrıca YİTAL, personelinin çoğunluğunun okuldan mezun olduktan sonraki ilk iş yeri durumundadır. Dolayısıyla YİTAL ekibi, sadece endüstriyle iç içe bir kurumsal çalışma ortamı değil, aynı zamanda interaktif bir "YİTAL ailesi" ortamı sunmaktadır.

Referans

(1) <https://www.milliyet.com.tr/siyaset/fransiz-fuzeleri-hazineyi-vurdu-1134694>

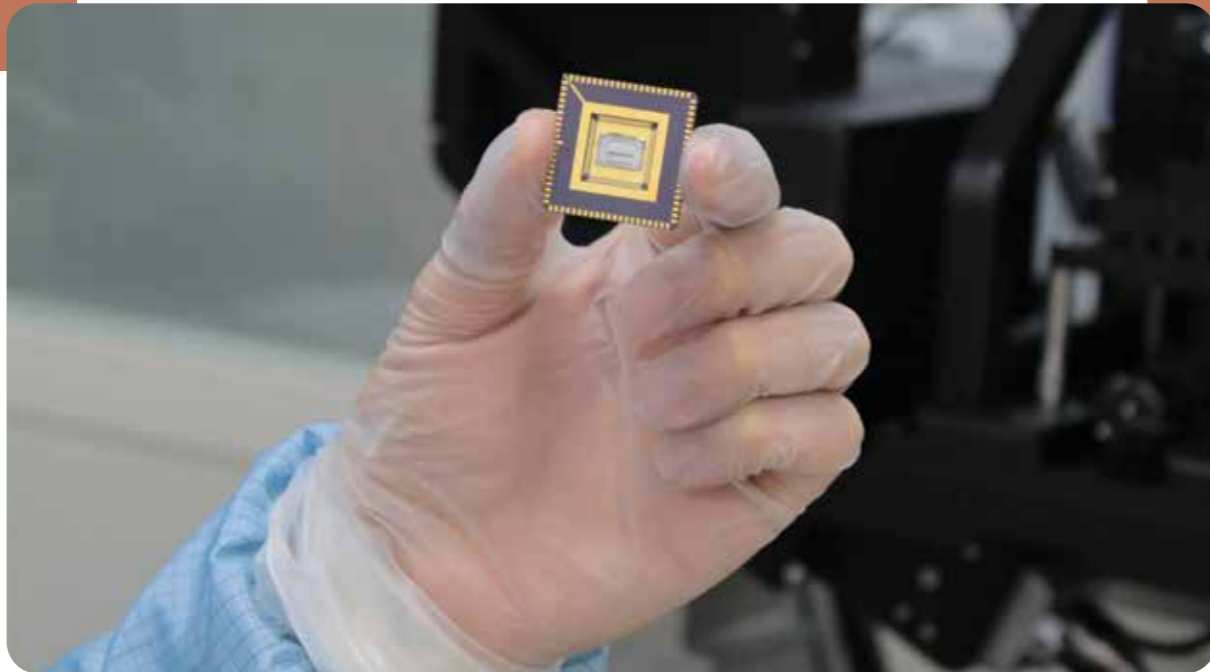


Foto-Maskeler



“ Mikro ve nano elektronik yongaları (çip) üretiminde kullanılan optik kalıplara foto-maske ismi veriliyor. ”

Dr. Ahmet Unutulmaz – Başuzman Araştırmacı, Hasan Kaydırma – Uzman Araştırmacı,
Emre Sarı – Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

Son yıllarda mikro ve nano elektronik tümdevre, akıllı telefonlar sayesinde hemen herkesin hayatında önemli bir yer tutmaya başladı. Tasarımcının bilgisayarında sanal ortamda hayat bulmaya başlayan tümdevreler uzun süreçler sonunda fiziksel bir yapıya bürünüyor. Günümüzde hemen her ürün gibi tümdevreler de ticari kaygılarla tasarlanıyor ve tasarımcı tarafından çizilen bir devre tasarımından binlerce, hatta milyonlarca tümdevre üretilmesi hedefleniyor. Üretilecek her yongaya tasarım verisinin lazer veya elektron demeti ile yazılması oldukça zaman alıcı ve maliyetli olacağı için bir çeşit kalıp çıkartmak ve bu kalıbı kullanarak üretim yapmak gerekiyor. Otomobil endüstrisi ile bir analogi oluşturursak milyonlarca kez kullanacağınız bir parçayı 3D yazıcı ile yazmak yerine bir kez kalıbını çıkartıp kalıpla üretmek çok daha akıllıca olacaktır.

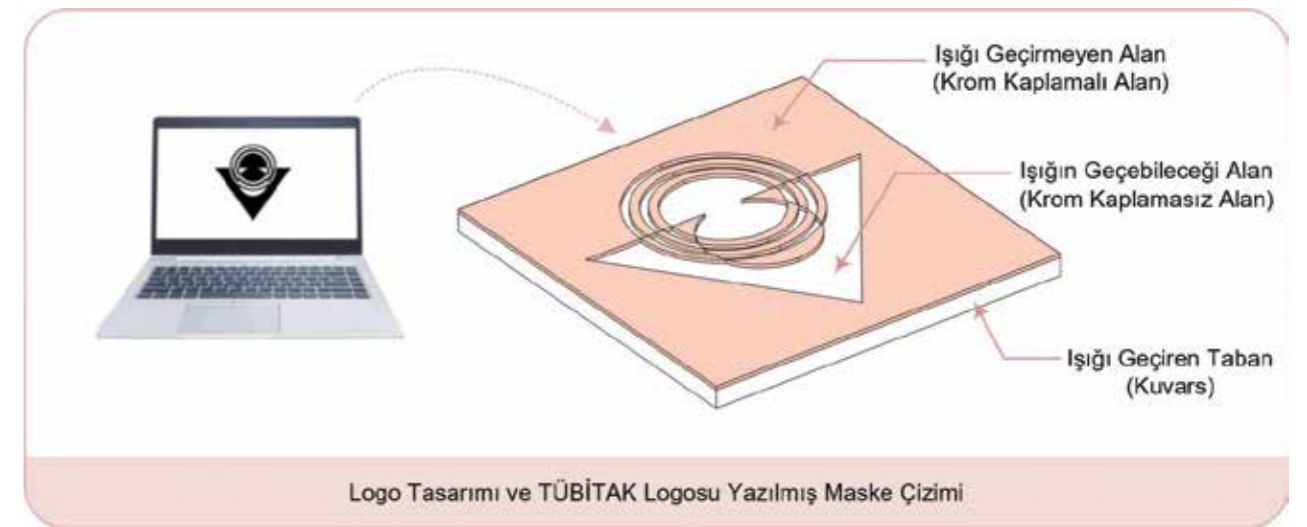
Mikro ve nano elektronik yongaların üretiminde kullanılan optik kalıplara foto-maske (photomask/reticle) ismi veriliyor. Tasarım verisi uzun süren ve pahalı yöntemler (lazer veya elektron demeti yöntemi) aracılığıyla bir kez maskeye yazıldıktan* sonra yazılı maske bir kalıp gibi defalarca kullanılmak üzere litografi sistemine yükleniyor.

Maske litografi sisteminde nasıl kullanılır?

Hazırlanan maske bir litografi sistemine yüklenerek maske üzerindeki görüntü, pula (wafer) aktarılıyor. Yani, maske yüklendiğinde litografi sisteminin optik bir parçası oluyor. Yazılmak istenen en küçük yapının boyutuna (kritik boyut) göre farklı litografi sistemleri tercih ediliyor. Pul üzerindeki kritik boyut 5

µm'den büyük olduğunda, düşük maliyetli temaslı hizalama cihazları iyi bir seçim olacaktır. Bu sistemlerde maske ve pul birbirine çok yakın konumlandırılır ve maske görüntüsü birebir pula yansıtılır. Pul üzerindeki kritik boyut 1 µm veya daha küçük ise veya seri üretimin düşünüldüğü durumlarda, bir adımlayıcı (stepper) veya daha gelişmiş bir tarayıcı (scanner) sisteminin kullanılması gerekecektir. Bu sistemler temaslı hizalama cihazlarından farklı olarak maske-deki görüntüyü küçülterek pula yansıtma imkânı sunuyor. On kata kadar küçülten sistemler mevcut ise de endüstride çoğunlukla 4 kat küçülten sistemler kullanılıyor.

Aydınlatma sistemleri açısından adımlayıcı ve tarayıcı sistemlerin hemen hepsi ya derin ultraviyole (DUV) ya da aşırı ultraviyole (EUV) kaynaklar ile besleniyor. DUV litografi sistemlerinde çoğunlukla geçirgen 6 inch krom kaplı kuvars maskeler kullanılıyor. Kuvars maskeler termal genişleme katsayısının çok düşük olması nedeni ile Soda-Lime ve Borosilikat maskelere göre daha çok tercih ediliyor. Teknolojinin sınırlarını zorlayan 20 nm altı şekillendirmelerde kullanılan EUV litografi sistemlerinde ise çok katmanlı (tekrar eden ince Molibden-Silikon katmanlardan oluşan) tabana sahip yansıtıcı maskeler kullanılıyor.



Logo Tasarımı ve TÜBİTAK Logosu Yazılmış Maske Çizimi

*Tasarımcının çizdiği şekiller maske üzerindeki kroma işleniyor, böylece maske üzerinde optik özellikleri farklı -ışığı geçiren ve geçirmeyen- alanlar oluşuyor.



Maske yazımı için hangi teknolojiler kullanılıyor?

Yazma işlemi günlük hayatta kullandığımız yazıcılarda olduğu gibi taranarak yapılıyor. Yani, bir anda maske verisinin sadece ufak bir bölümü yazılıyor. Maske yazma işlemi kritik boyuta ve kullanılan cihaza bağlı olarak saatler, hatta günler sürebiliyor. Litografi sistemleri için gereken maskeler temel olarak iki farklı yazıcı ile yazılıyor: lazer kullanan veya elektron demeti (e-beam) kullanan yazıcılar.

YİTAL'de, maskedeki kusurları tespit etmek için yapay zekâ destekli bir yazılım geliştiriyoruz.

Lazerli sistemler, maske üzerindeki kritik boyut birkaç mikro-metre veya daha büyükse, tatmin edici sonuçlar veriyor. Bu yöntem ile yazılan daha küçük yapıların boyut dağılımı (3σ) artıyor, yani boyut kontrolü zorlaşıyor. Mikron altı boyutlar için genellikle elektron demeti ile yazım yapan maske yazıcılar tercih ediliyor. Çoklu elektron demeti teknolojisini kullanan yeni nesil elektron demeti yazıcılar, eski nesil yazıcıların en büyük sorunu olan yavaşlığı çözümlenerek yüksek yazma hızları sunuyor. Tüm bunlara ek olarak optik maske yerine damga (nano-imprint) kullanarak üretim maliyetini düşürmeye çalışan üreticiler de var.

BİLGEM'de maske üretiliyor mu?

TÜBİTAK-BİLGEM bünyesinde bulunan Yarı İletken Laboratuvarı YİTAL'de DUV litografi sistemleri için maske üretimi yapılıyor. Maske yazmak için mikro-metre çözünürlükte, yüksek hızlarda

(~30mm²/dakika) yazma kapasitesine sahip 405 nm lazer kaynaklı bir yazıcı kullanılıyor. Yazılan 5 inch maskeler i-line (365 nm) bir adımıyla yüklenip maske görüntüleri 5 kat küçültülerek pullara aktarılabilir.

Tasarım, maske verisine nasıl dönüştürülür?

Tasarımcının çizdiği serimin üretimde kullanılabilmesi için, tasarım verisinin üretim süreci göz önünde bulundurularak işlenmesi gerekiyor. Örneğin litografi sistemi alçak geçiren bir filtre gibi davranacak, yani tasarımdaki köşeli yapıları yuvarlayacaktır. Devrelerde bu yuvarlanmalardan kaynaklı hatalar oluşmaması için yuvarlanacak yerler uygun biçimde genişletiliyor. Benzer şekilde serimde ayrı duran yapıların etrafına litografi sisteminin çözünürlüğünden daha küçük eklemeler yapılarak serim yoğunlaştırılıyor. (Bu eklentilerin boyutu sistemin çözünürlüğünden küçük olduğu için pulda görünmeyecektir.) Bu küçük eklentiler aracılığıyla tasarımın odaklama hatalarına hassasiyeti azaltılıyor. Bahsi geçen bu işlemler optik yakınlık düzeltmesi (OPC) olarak adlandırılıyor.

Konuyu daha anlaşılır kılmak için tasarım verisi işlemeye daha fazla örnek verelim: Üretim sürecinde kullanılacak olan kimyasal-mekanik aşındırmanın (CMP) pul genelinde aynı etkiyi göstermesini sağlamak için serimdeki büyük boş alanlara dolgular ekleniyor. Yine, geniş metal hatlarda ortaya çıkabilecek kavrama sorunlarının önüne geçebilmek için serimdeki geniş metal hatların üzerine üretim sırasında oluşacak stresin emilmesine yardımcı olacak yarıklar açılıyor. Üretim sürecinin sonlarına doğru pul bir çeşit testere ile kesilerek kırmıklara (die) ayrılacaktır, bu kesme



işlemi sırasında kırmıkta çatlaklar oluşmasını engellemek amacıyla tasarımın etrafına kesme hattı ekleniyor. Kesme hattına üretim sürecinde gerekli olacak çeşitli hizalama işaretleri ve sürecin doğru ilerleyip ilerlemediğini kontrol etmek için test yapıları yerleştiriliyor.

Sürece göre tasarım verisine uygulanan işlemler farklılık gösterebiliyor. Bütün bu işlemler tasarım verisi üzerinde yapılıyor ve sonuçta maske verisi elde ediliyor. Daha sonra bu veri bir endüstri standardı olan GDS biçimine çevrilerek maskeye yazılmak üzere yazıcı cihaza yükleniyor.

Geçirgen (DUV) maskeler nasıl üretilir?

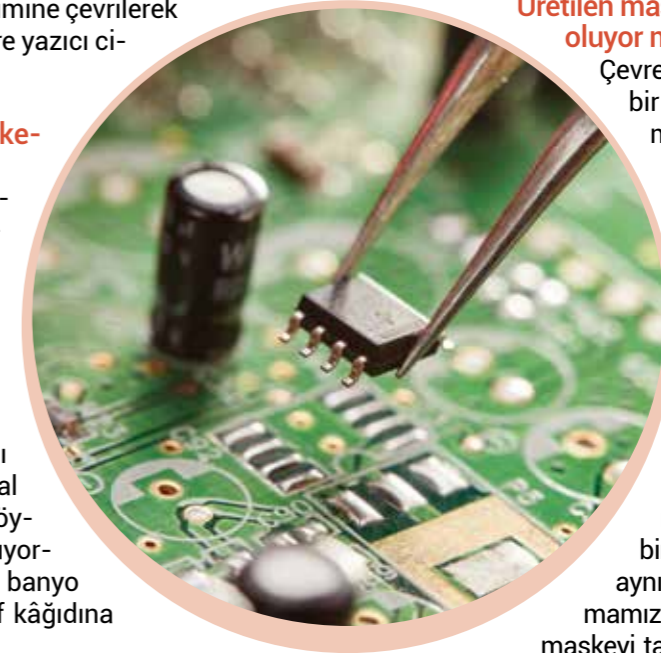
Dijital fotoğraf makinelerinden önce kullandığımız mekanik makinelerin içine ışığa duyarlı filmler takıyorduk. Fotoğrafçı deklanşöre bastığında film ışıklandırılıyor, film üzerindeki ışığa duyarlı kaplamanın kimyasal özellikleri değişiyor, böylece anı yakalamış oluyorduk. Sonrasında film banyo edilip, görüntü fotoğraf kâğıdına aktarılıyordu.

İşte bu fotoğraf filmine benzer şekilde boş maske -krom kaplı kuvars- ışığa duyarlı fotorezist adı verilen bir polimer ile kaplanıyor. Kullanılan yazıcının teknolojisine bağlı olarak -lazer veya elektron bombardımanı- taranan bölgelerde fotorezistin kimyasal özellikleri değiştiriliyor ve bu bölgeler uygun kimyasallar (developer) ile alınıyor. Üzerindeki koruyucu fotorezist tabakasını kaybetmiş krom tabakası, maskenin kalanını kaplayan fotorezist tabakasına zarar vermeyen bir kimyasal ile aşındırılıyor. Bu süreçte fotorezist olmayan alan-

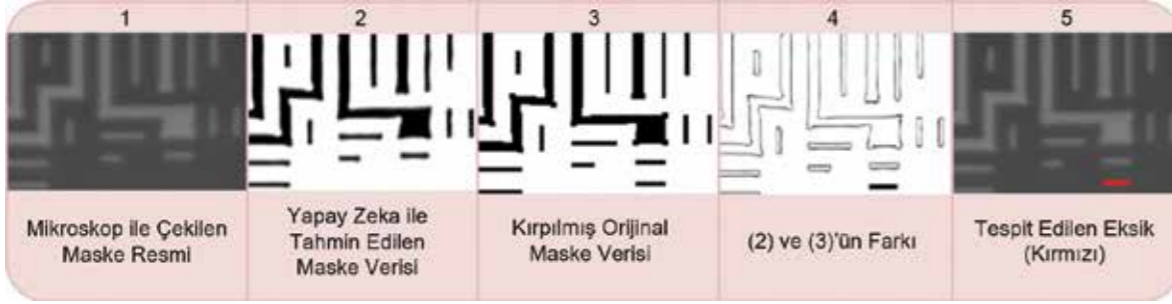
lardaki krom aşınırken fotorezist altında kalarak korunan krom aşınmıyor. Sonrasında maske üzerindeki tüm polimerler temizleniyor. Sonuç olarak, maske verisi kroma işlenmiş oluyor. Daha sonra maskenin üzerine, koruma amacıyla, geçirgen bir zar (pellicle) monte ediliyor. Böylece saatler, hatta günler süren maske üretme işlemi tamamlanmış oluyor. Artık oluşturulan bu optik maske, litografi sistemi içerisinde kullanılarak tasarım saniyeler içinde pullar üzerine aktarılabilir.

Üretilen maskelerde kusurlar oluyor mu?

Çevresi ile etkileşimde olan bir ortamda hiçbir şeyin mükemmel olmasını bekleyemeyiz. Maskeler de onları izole bir ortamda tutmaya çalışsak da çevreden etkileniyor ve maske kusurları oluşuyor. Yazmayı hedeflediğimiz şekiller küçüldükçe ve bu şekillerin sayısı arttıkça kusursuz bir maske yazma olasılığımız düşüyor. Kusursuz bir maske elde etmek için aynı maskeyi defalarca yazmamız gerekebilir veya kusurlu maskeyi tamir edebiliriz. Bunun için öncelikle kusurları bulmamız gerekecektir.



Mikron mertebesinde şekillerin olduğu maskelerdeki kusurları bulmak için optik bir mikroskoptan alınan görüntüleri, maske verisi ile karşılaştırılabilir. YİTAL'de maskedeki kusurları tespit etmek için yapay zekâ destekli bir yazılım geliştiriyoruz. Bu yazılım kapsamında öncelikle mikroskoptan alınan maske görüntüleri yapay zekâ ile işlenerek maske verisi tahmin ediliyor. Tahmin edilen maske verisi ile orijinal maske verisinin farkı alınıyor ve sonuç, ikinci bir yapay zekâ modeline gönderi-



liyor. İkinci model gerçek kusurları, hizalama ve ışıklandırmadan kaynaklanan farklardan ayırıyor. Geliştirilmekte olan bu yazılım, eşik tabanlı görüntü işleme yöntemlerine göre çok daha kararlı çalışıyor.

Mikron altı yapılar içeren maskelerin ise atomik kuvvet mikroskobu (AFM) veya taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmesi gerekiyor.

Kusurların yeri ve tipi tespit edildikten sonra maskenin onarılması veya yeniden üretilmesi gerekiyor. Maskenin ışık geçirmemesi gereken bölgesi ışık geçiriyorsa o bölgeye ışığı geçirmeyecek bir yama-karbon kaplama gibi- yapılıyor. Tam tersi durumda ise ışığı geçirmeyen kusur, bölgesel olarak aşındırılıyor.

Maskeye daha küçük yapılar yazılabilse litografi çözünürlüğü iyileşir mi?

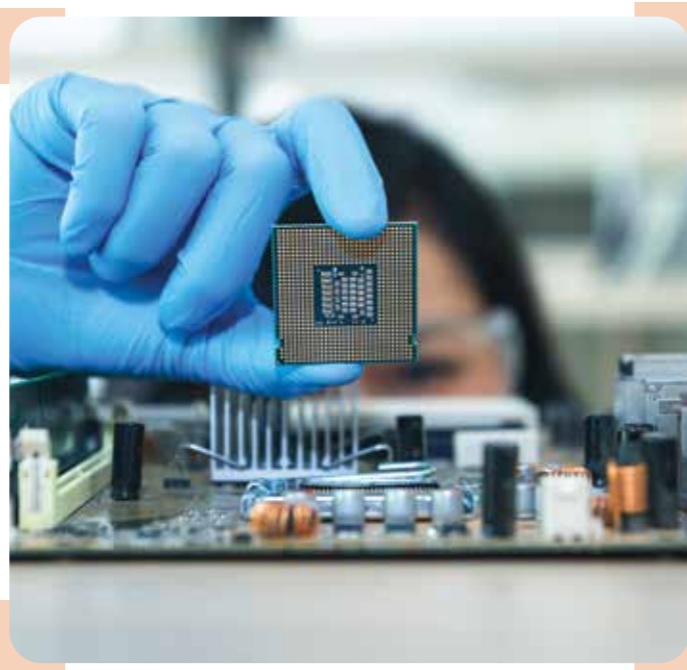
Maske tek başına litografi çözünürlüğünü belirlemiyor. Maskeler, adımlayıcı veya tarayıcı bir litografi sistemi ile birlikte kullanılıyor. Dolayısı ile optik sistemin tamamı, yani litografi cihazının optiği ve maske, çözünürlüğü birlikte belirliyor. Maskedeki boyutlar çözünürlüğü sınırlıyor ise daha küçük yapılar basılarak pul üzerindeki görüntü iyileştirilebilir. Fakat adımlayıcı veya tarayıcı sistemin optik özelliği (sayısal açıklık) çözünürlüğü sınırlıyorsa, maske üzerine daha küçük yapılar basmak, pul üzerindeki görüntüyü bozacaktır.

Maskenin optik sistemin bir parçası olduğu gerçeğinden yola çıkarak çözünürlük iyileştirme tekniklerinden birazcık bahsedelim: Optik sistemin mükemmel olmaması sebebi ile maskedeki görüntü, pul üzerine aktarılırken bozulacaktır. Eğer bir şekilde maske verisini bu bozulmayı göz önünde tutarak değiştirirsek, pul üzerinde hedeflediğimiz görüntüye daha yakın sonuçlar elde edebiliriz. Bunun için, daha önce

de bahsi geçen, hesaplaması nispeten kolay olan OPC veya daha ileri düzey bir teknik olan ve çok fazla hesaplama gücü isteyen ters litografi teknolojisi (ILT) kullanılabilir. Bu teknikler aynı zamanda optik sistemin odak derinliğini, odaklama hatalarına toleransını iyileştirmeyi hedefliyor.

Maske tabanı yani kuvars biraz aşındırılarak geçirgen bölgelerde faz farkları elde edilebilir. Faz kaymalı maske olarak bilinen bu tip maskeler, çözünürlüğü iki katına kadar iyileştirebiliyor. Aynı etki, eksen dışı aydınlatma (OAI) olarak bilinen teknikte, optik sistemde maskeyi aydınlatan ışığın geçtiği göz bebeği denilen yapının şeklini değiştirerek elde edilebilir.

Sistem çözünürlüğünün iyi olması kadar pul üzerine çıkan yapıların boyut dağılımı da çok önemlidir. Çizgi kalınlık pürüzlülüğü (LWR) ve çizgi kenar pürüzlülüğü (LER) kavramları burada önem kazanmakta ve üretim süreci için tasarım kurallarının belirlenmesinde rol oynamaktadır.

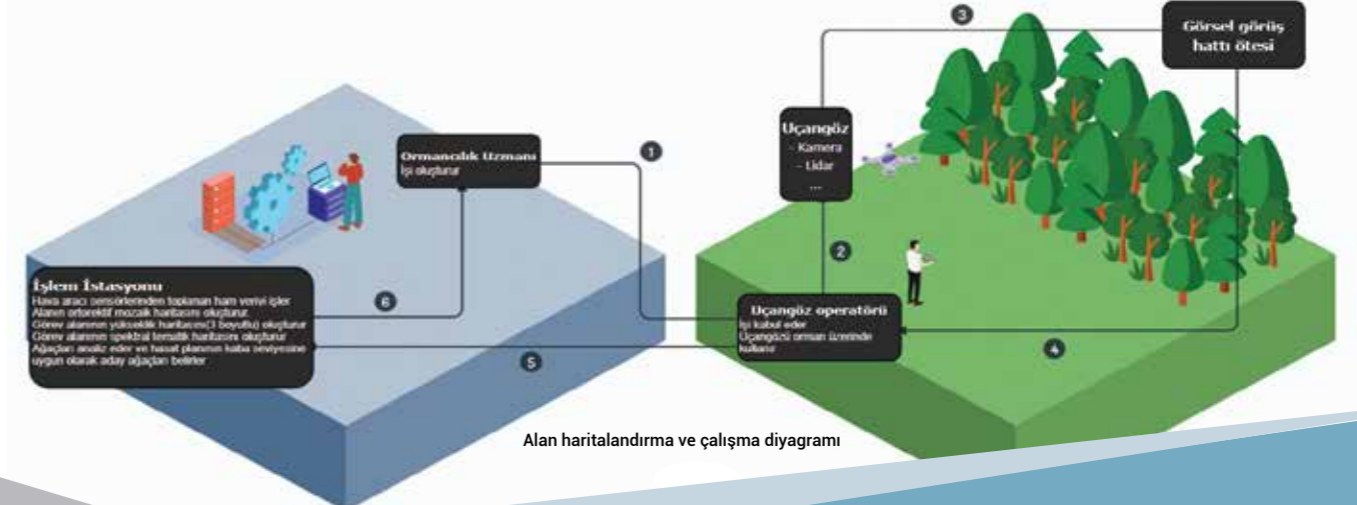
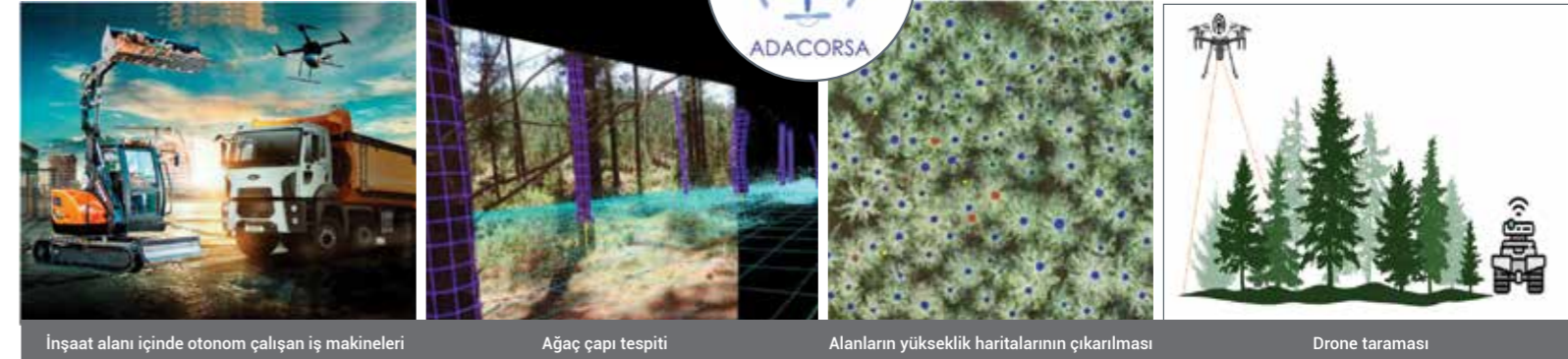


ADACORSA

Esnek Sistem Mimarileri Üzerinde Havadan Veri Toplama

- TÜBİTAK BİLGEM, 12 farklı ülkeden 49 kuruluşu bir araya getiren HORIZON 2020 Çağırısı kapsamında yer alan ADACORSA Projesi'nde ülkemizi temsil eden taraflardan biridir.
- Şantiye içerisinde otonom çalışan insansız inşaat araçlarının drone ile koordineli çalışmasını sağlamak için, içerisinde yapay zekâ teknikleri ile çok-ajanlı yol planlama, araç görev planlama ve zamanlama modüllerini içeren bir algoritma tasarlanacaktır.

- Elektro-Optik ve multispektral (MSI / HSI) kameralarla donatılmış insansız hava araçları kullanımıyla ağaç türlerini belirlemek, yaşlı / ölü ağaçları tespit etmek, orman envanteri ve kereste hacim tahmini yapmak için uzaktan algılama, görüntü işleme analiz teknikleri ve teknolojilerinin yardımıyla derin öğrenme modelleri ve algoritmalarının geliştirilmesi planlanmaktadır.



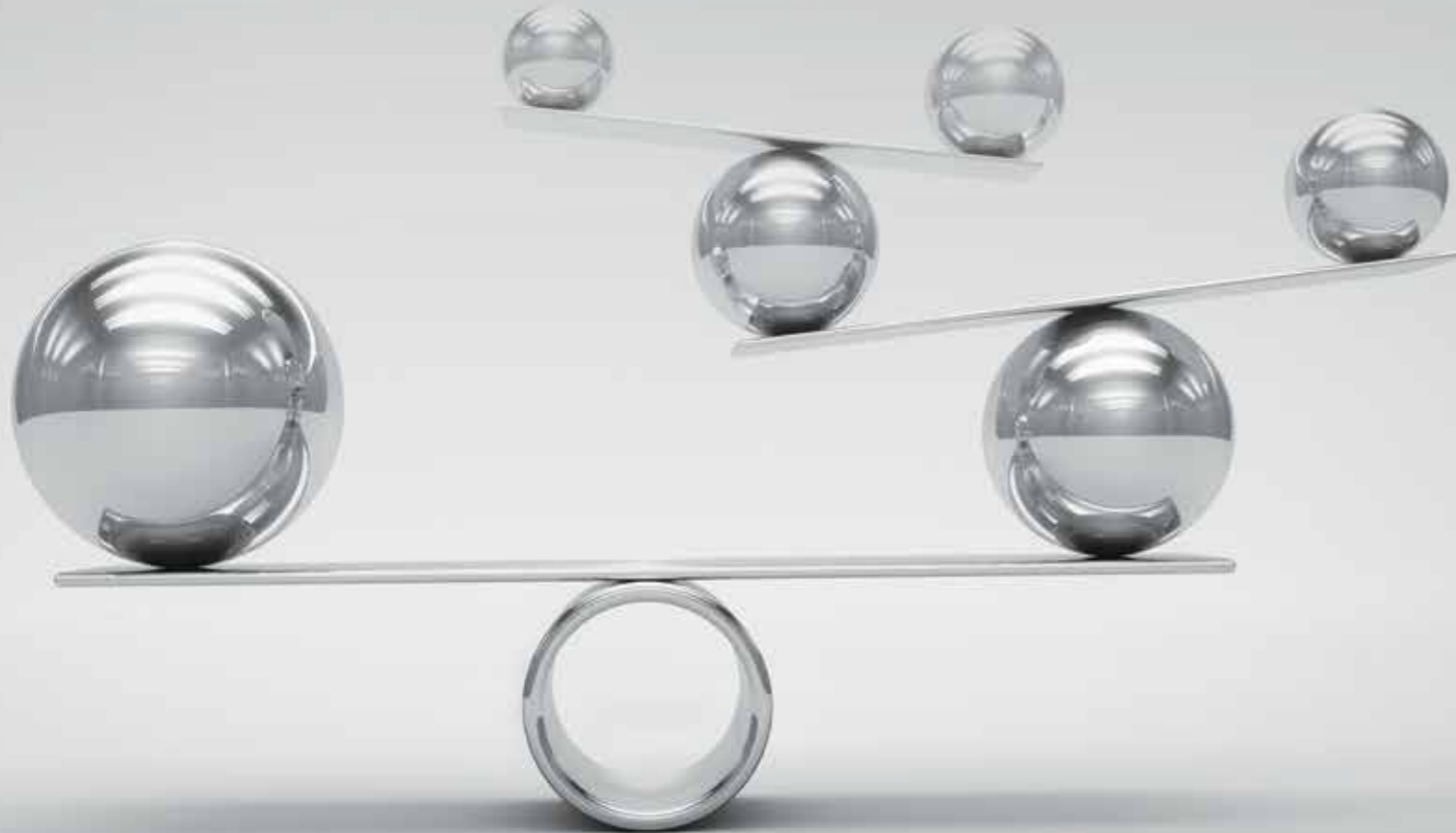
Epitaksiyel Silisyum

“Tüm atomlar tam da olması gereken yerde ve olması gerektiği şekilde...”

Duygu İşler Öksüz – Başuzman Araştırmacı, Bayram Andak - Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

En sevdiğiniz element nedir? Elementler arası bir yarış olsa sıradanlıktan fark yaratmaya tüm asaleti ve alçak gönüllüğü ile yükselerek elektronik devre elemanlarının üretiminde en çok tercih edilen “silisyum” şüphesiz güçlü bir aday olurdu. Bor, fosfor, karbon, germanyum ve arsenik hepsinin ortak özelliği periyodik cetvelde Silisyumun çevresinde konumlanmış olmalarıdır. Atomik yoğunluğu “ 5×10^{22} atom/cm³” olan Silisyum, bu arada kalmışlığı ustalıkla avantaja çevirip kristal yapısına bu atomları belli oranlarda ortak edebildiği ve her biriyle farklı özellikler kazanabildiği için epitaksiyel film büyütme oldukça uygundur.

Bir malzemede atomlar arası tekrarlayan bir örüntü varsa “kristal” diye tanımlanır ve bu örüntünün tekrarlamaya biçimine göre kristal farklı isimlendirilir. Silisyumun kristal örgü yapısı elmas kübik yapıdır. Taban malzemenin (substrate) kristal yapısını bozmadan aynı kristal yapıyı devam ettirerek film oluşturmak; epitaksiyel film büyütme veya tek kristal film büyütme olarak tanımlanır. Konu epitaksi olunca film depolama yerine film büyütme kavramı kullanılır. Bunun sebebi ise, taban malzemeyi aynı örüntüde devam ettirmemizdir. Epitaksi kelimesi Yunanca kökenlidir; epi=üst, taxis=düzenli anlamındadır.



Tüm atomlar tam da olması gereken yerde ve olması gerektiği şekilde... Kusursuz dizilim mümkün olmasa da kristal kusurlar ne denli azsa o denli başarılı bir film elde edilir. Epitaksiyel filmlerin CMOS, HBT, çeşitli dalga boylarına hassas ışınım ölçme dedektörleri, DRAM (dinamik rasgele erişim belleği) gibi uygulama alanları vardır. YİTAL'deki epitaksiyel film uygulama alanımız SiGe:C HBT BiCMOS [Silisyum(Si)-Germanyum(Ge)-Karbon(C) Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken] teknolojisi olduğundan bu işlem üzerinden anlatılacaktır.

CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) ve MBE (Moleküller Demet Epitaksi) başlıca epitaksiyel film büyütme yöntemlerindedir; CVD mikroçip üretim tesislerinde tercih edilirken, MBE daha çok araştırma amaçlı merkezlerde kullanılır. YİTAL'de CVD tekniği ile epitaksiyel film büyütülmektedir. RPCVD (İndirgenmiş Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme) cihazında gaz fazdan yüzeye tutunan atomlar kimyasal reaksiyon sonucu silisyum taban üzerinde film oluşturur.

Homoepitaksi ve Heteroepitaksi

YİTAL-ASELSAN-SSB işbirliği ile yürütülen 0.25 µm SiGe:C HBT BiCMOS (Silisyum-Germanyum-Karbon Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) teknolojisiyle yüksek performans ve tümleştirme avantajları kullanılarak faz dizili radarların alıcı-verici modüllerinde kullanılan düşük güçlü çekirdek tümdevrelerin üretilebilir duruma gelmesi hedeflenmektedir. Bu teknolojide hem CMOS (Complementary Metal Okside Semiconductor) hem de HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) yapıları aynı tümdevre içerisinde yer almaktadır. HBT'nin üç ana bileşeni olan n-tipi kollektör, p-tipi baz ve n-tipi emetör bölgeleri epitaksiyel filmlerden oluşur. YİTAL'de uyguladığımız epitaksiyel büyütme işlemi 4 aşamadan oluşmaktadır.

Cihaz dışı (ex-situ) pul temizliği: Silisyum taban ve üzerine büyüyecek olan epitaksiyel film arası (ara yüzey) oksijen konsantrasyonunun düşürülmesi için; “SC-1 (NH₄OH-H₂O₂-H₂O) > SC-2 (H₂O₂-HCl-H₂O)” seyreltik HF pasivasyonu” çevrimini izleyen pul sonrasında Marangoni kurutma (IPA buharı ile kurutma) yöntemiyle kurutulur. Uygulanan temizlik işleminde kullanılan Deiyonize (DI) su, ppb mertebesinde “suda çözünmüş oksijen” çözünmüş oksijen ve toplam organik karbon (TOC) içerecek şekilde saflaştırılmaktadır.

Reaktör şartlandırılması: Temizlenmiş pul, cihazın yüklem kabineye alındıktan sonra ortam vakumlanır ardından saflaştırıcıdan geçirilmiş N₂ gazı ile tekrar atmosferik basınca getirilir. Bu çevrim en az 5 kere tekrarlanarak ortamın oksijenden arındırılır.

“Ara yüzey kusurları, enerji tuzakları olarak davrandıkları için baz bölgesinde istenmeyen birleşme ve üretim (recombination/generation) olaylarına yol açar.”

rılması sağlanır. Öte yandan RPCVD reaktörü, pul içeriye alınmadan H₂ varlığında yüksek sıcaklıkta (1100 °C'e kadar) şartlandırılıp O₂ ve H₂O safsızlıkları ortamdan uzaklaştırılır. RPCVD cihazının tüm istasyonlarından alınan gaz örnekleriyle anlık olarak H₂O analizi yapılmakta ve filmin kalitesini etkileyen parametreler takip edilmektedir.

Cihaz içi (in-situ) pul temizliği: Temizlenmiş pulun RPCVD cihazına aktarılması sırasında oluşabilecek doğal silisyum oksidin (native silicon oxide) temizlenmesi için pul reaktöre alındıktan sonra H₂ ortamında yüksek sıcaklığa girer.

Film büyütme: Son aşamada gaz akışları, sıcaklık ve basınç değerlerini içeren; büyütülecek epitaksiyel filme göre oluşturulmuş (proses) reçetesi ile epi katman büyütülür.

Bir epitaksiyel yapı, büyütülen filmi oluşturacak atomlar taban atomları ile aynı ise homoepitaksiyel (örn; Epitaksiyel silisyum), farklı ise heteroepitaksiyel (örn; Epitaksiyel silisyum-germanyum) film olarak adlandırılır. YİTAL'de homoepitaksiyel uygulamamıza örnek olarak SiGe:C BiCMOS yapısının “kollektör” bölgesini verebiliriz.

Gömük tabaka iyon ekme işlemi sonrası silisyum aktif üzerine büyütülen epitaksiyel silisyum bölgesel olarak tekrar katkılanır (Kollektör katkısı ve SiC-baz altı kollektör katkısı) ve transistörün kollektör bölgesi oluşturulur. Epitaksiyel silisyum büyütmenin bize sağladığı avantaj, katkısını ayarlayabildiğimiz oksijeni ve karbonu daha düşük kollektöre olanak sağlamasıdır.

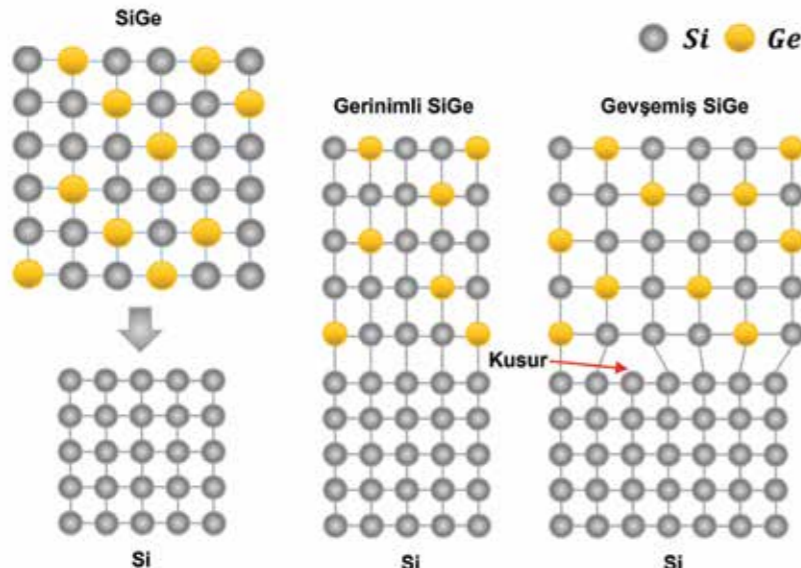
Heteroepitaksi uygulamamıza örnek, SiGe:C HBT BiCMOS yapısının “baz” bölgesidir. Bu film oluşturken RPCVD reaktörüne aşağıda yazılı gazlar beraber verilmek 10-20 Torr basınç aralıklarında p tipi, yaklaşık %15-20 Ge, “1-7E19 at/cm³ B” ve %0.2 C içeren SiGe:C:B baz bölgesi büyütülür.

- ▶ Taşıyıcı gaz: H₂ (Hidrojen),
- ▶ Silisyum kaynağı: SiH₄ (Silan),
- ▶ Germanyum kaynağı: GeH₄ (German),
- ▶ Karbon kaynağı: CH₃SiH₃ (Monometilsilan),
- ▶ Bor kaynağı: B₂H₆ (Diboran),
- ▶ Seçici büyütmenin sağlanması için: HCl (Hidrojen Klorür)

Bu reaksiyonda silisyum taban üzerinde epitaksiyel SiGe:C büyürken; sccm (cm^3/dk) mertebelerinde HCl ilavesinin ile "silisyum dioksit (SiO_2) ve silisyum nitür (SixNy)" yalıtkan bölgeleri üzerinde film oluşmaz. Seçici epitaksiyel büyüme olarak adlandırılan bu işlemde, silisyum ve german kaynağı sayesinde bir yandan film büyürken, bir yandan da HCl gazı ile oluşan film aşındırılır. Bu büyüme-aşınma reaksiyonundan hızlı olan kazanır; Si yüzey üzerinde büyüme hızlı iken yalıtkan kısımlarda aşınma baskın gelir, Si'a seçici film büyütülür. HCl akışını 2-3 sccm düşük ya da yüksek seçmek filmin seçici büyümesini engelleyebilir.

SiGe (silisyum-germanyum) ikilisi bir noktaya kadar oldukça uyumludur. Germanyum da silisyum gibi elmas kübik kristal örgü yapısındadır, atomlar arası mesafeyi tanımlayan "kafes parametresi" ve atom boyutu farklılığına rağmen belli bir kalınlığa kadar sanki aynı yapıya uygun gibi beraber büyürler. (Silisyumun kristal kafes sabiti 5.431 Å, Germanyumun kristal kafes sabiti 5.657 Å)

HBT'nin üstünlüğü de tam olarak bu uyum içindeki uyumsuzluktan gelir. Silisyumun valans bant ile iletkenlik bantı arası enerjiyi ifade eden yasak bant genişliği 1,12 eV iken Germanyumun yasak bant genişliği (Eg) 0,66 eV'dur. Yapıya eklenen her %1'lik Ge ile transistörün baz bölgesinin yasak bant aralığı yaklaşık 7,5 meV düşürülür böylece transistörün akım kazancı artar, hızlı ve daha az gürültülü transistör elde edilir. Ge kafes sabiti %4'e kadar daha büyük olduğu için SiGe katmanı "Si" taban üzerinde büyüdükçe "SiGe" kafes yapısı taban kafes yapısına uyum sağlamak için sıkışır,



Şekil 1 - Gerinimli (strained) ve gevşemiş (relaxed) epitaksiyel filmler

bu da gerinimli (strained) SiGe filminin oluşmasına sebep olur. (Şekil 1)

Bu tarz gerinimli büyüyen filmlere: "pseudomorfik" filmler denir. Gerinimli SiGe filmi, büyütülen film kalınlığı ve film içindeki Ge konsantrasyonunun türü olan efektif gerinim tarafından belirlenen sınırların içinde kalmak koşulu ile termodinamik olarak kararlıdır. SiGe film kalınlığı arttıkça gerinim enerjisi dengeyi koruyamayacak kadar artar ve dislokasyon oluşmaya başlar ve film artık gevşemiş (relaxed) duruma geçer. Ara yüzey kusurları, enerji tuzakları (energy traps) olarak davrandıkları için baz bölgesinde istenmeyen birleşme ve üretim (recombination/generation) olaylarına yol açar. Bu sebeple baz bölgesinde hedefimiz, gerinimli film büyütmezdir.

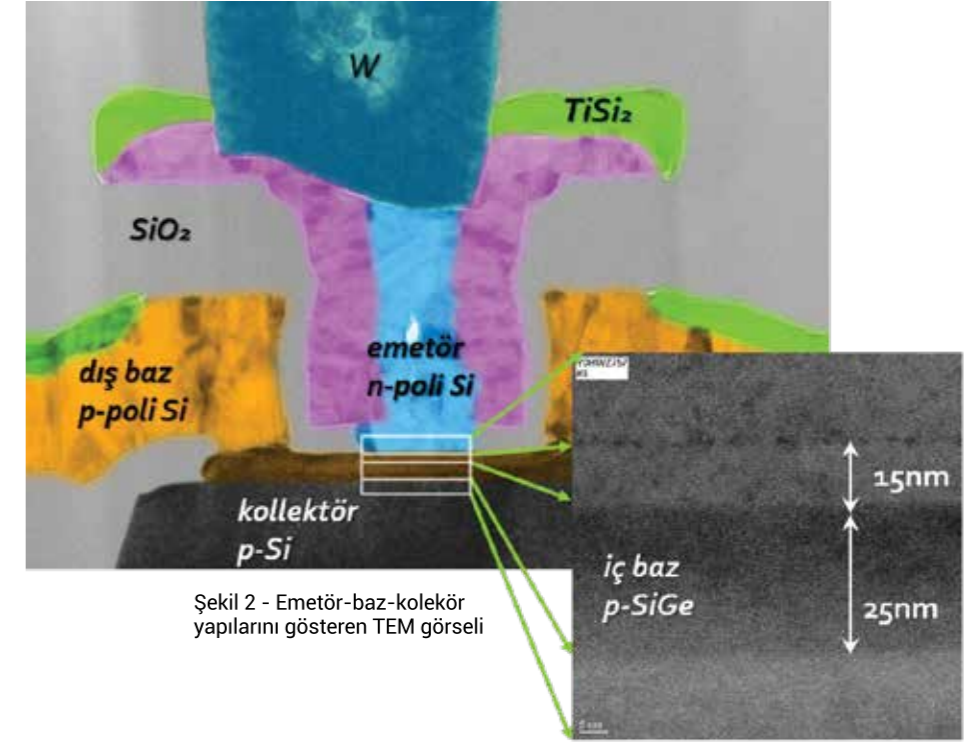
Film büyürken aynı anda bor ile katkılanarak (in situ doping) p tipi baz bölgesi oluşturulur. Karbon ise hem bor, atomlarının difüzyonunu (yayınımını) engeller hem de germanyum ve silisyuma göre küçük olduğu için gerinimli büyümeye yardımcı olur. Karbonun bu iki amaca hizmet etmesi için iki şart vardır: kristal kafes içinde yer alan formda bulunması ve yapıda en fazla "%0.1- %0.2" bulunmasıdır. Bu orandan fazlası kristal kusur eğilimini artırır.

Gerinimli büyümeye bir diğer destek 250 Å SiGe:C filmi üzerine büyütülen "100-150 Å" silisyum filminden gelir. Gerinimli SiGe:C filmi iki silisyum film arasında sandviç yapısına benzer şekilde kalır. Bu kadar ince ayar gerektiren baz bölgesi, karbon-bor-germanyum yüzdesi ve profillerinin transistör içerisindeki durumlarını gösterecek şekilde analiz edilir.

Film yükleme etkisi (loading effect) sebebiyle, transistör de: 0,28 μm x transistör uzunluğu geniş alanda büyüdüğü yapıya göre hem kalınlık hem konsantrasyon olarak farklı sonuçlar verir. Yükleme etkisinin her bir değişken için oranını bilmek ve ona göre geniş alanda çalışmalar yapmak gerekir.

HBT'nin "Emetör" (Yayıcı) kısmı yukarıdaki baz ve kolektör kısmı arından farklıdır. Filmin epitaksiyel büyümesi için tek kristal taban malzemeye ihtiyaç vardır. Emetör filmi-

nin oluşturulmasına sıra geldiği zaman yapıda hem tek kristal hem de silisyum dioksit kısımlar "Emetör filminin oluşturulmasına sıra geldiği zaman yapıda hem tek kristal silisyum hem de silisyum dioksit kısımlar bulunur. Oluşturmaya çalıştığımız yapıda hedefimiz tek kristal baz üzerinde "mono- emetör" dediğimiz epitaksiyel filmi büyütmezdir." Oluşturmaya çalıştığımız yapıda hedefimiz tek kristal baz üzerinde "mono-emetör" dediğimiz epitaksiyel filmi büyütmezdir. Bu büyüme sırasında eş zamanlı olarak silisyum dioksit kısımlarda poli emetör oluşur. Poli filmde düzenli kristaller, rastgele yönelimde oluşmuştur. Kendi içinde düzenli her bir forma "tane"; bu tanelerin birbirleriyle bulunduğu yüzeylere ise "tane sınırı" denir. (Şekil 2)



Şekil 2 - Emetör-baz-kolektör yapılarını gösteren TEM görseli

HBT yapısından alınmış kolektör; baz, emetör-epitaksiyel filmlere ait TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) görüntüsüne aittir. Bütünü oluşturan parçalar bu denli önemli olduğundan malzeme karakterizasyonu epitaksiyel film büyütmede başarının ilk anahtarıdır.

Karakterizasyon Teknikleri

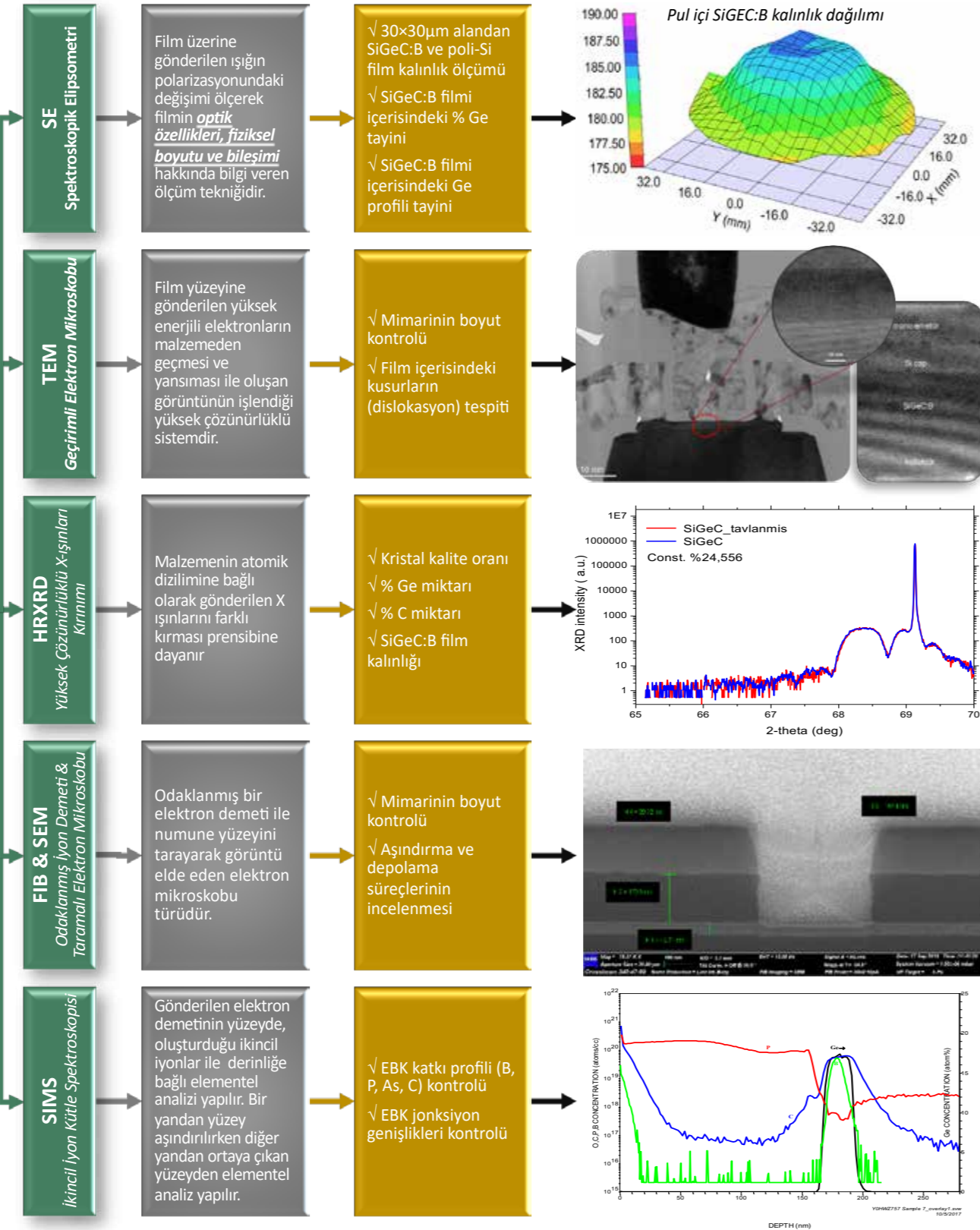
YİTAL'de büyütülen kristal filmlerin boyut, bileşim ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi için Spektroskopik Elipsometre (SE), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Difraksiyonu (HRXRD), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) ve Dört Nokta Probu (4PP) karakterizasyon teknikleri kullanılır. 4PP, depolanan filmlerin tabaka dirençlerinin tespiti için kullanılırken diğer karakterizasyon tekniklerinin kullanım amaçları Şekil 3'te listelenmiştir.

Tümdevre üretiminde bütüne hizmet eden işlem (process) parçalarının tek başına iyi olmaları gereklidir fakat yeterli değildir. Bu sebeple; ana-

lizlerde her şeyin yerinde olduğu kolektör, baz, emetör epitaksiyel filmler bütünü de yeterli değildir.

Önemli olan diğer katmanlarla uyumdur, yapının tüm işlemlerinin tam ve hatasız ilerlemesi ile başarı sağlanır.

SiGe:C BiCMOS yapısı, toplamda 300 temel işlem basamağından oluşur; her bir işlemin de kendi içerisinde en az 10-20 adımdan oluştuğu düşünülürse yarı iletken araştırmacısı olmak için ilk vasıf sabır ilkesidir diyebiliriz. Bir işlemi, en iyi hale getirmek zamana karşı içsel gücü korumayı gerektirir. "Sabretmek, öylece durup beklemek değildir; sabır dikene bakıp gülü, geceye bakıp gündüzü tahayyül edebilmektir" der Şems... Bizler de epitaksiyel filmler üzerine çalışırken ülkemizde üretilen tüm faz dizili radarların çekirdek tümdevrelerini (Core Chip) üretmeyi hedefliyoruz. Aktarmaya çalıştığımız epitaksiyel film büyüme konusu disiplinler arası bir çalışma konusundan fizik-kimya-malzeme-elektronik konusunda uzmanlar olarak aynı konu üzerine çalışıp ilerletmekteyiz. Bu ilerleme serüveninin bir yerlerinde bulunmuş olan; Emre HEVES, Necip SEZEN, Enes CESUR ve Aylin KANGALLI'ya teşekkür ederiz.



Şekil 3 - Epitaksiyel filmlerin karakterizasyon teknikleri, kullanım amaçları ve çıktıları

Çok Boyutlu Telsiz Haberleşme İşaret Analiz Platformu (KAŞİF)

Ülkemizin bulunduğu coğrafi konum itibariyle, askeri telsiz haberleşme işaretlerinin yakalanarak bunlardan birtakım bilgilerin elde edilmesi muharebe açısından büyük öneme sahiptir.

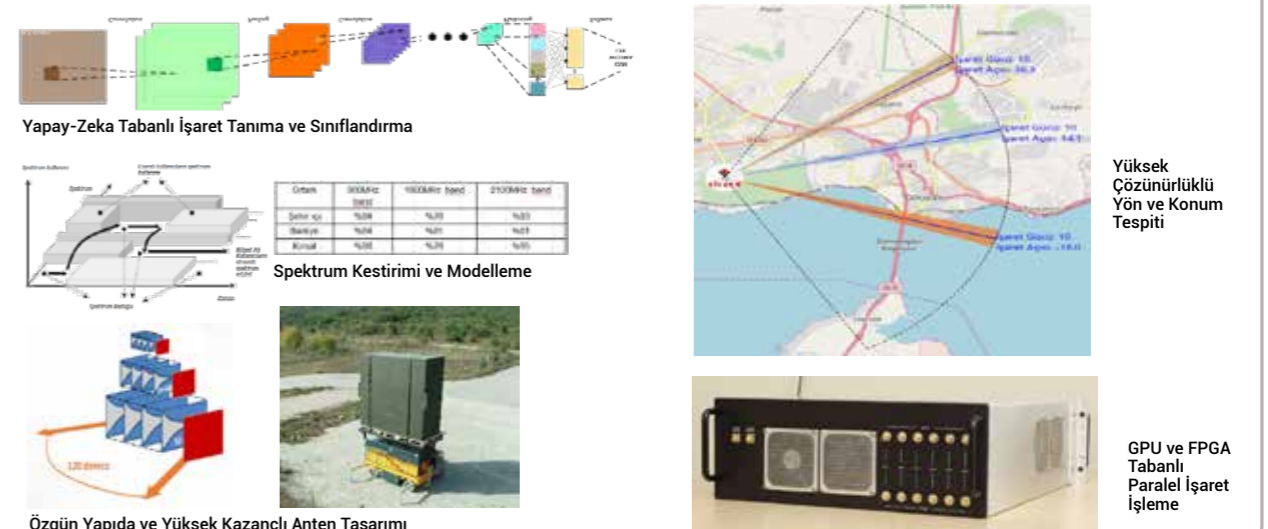
Bunun yanında kamu güvenliği kurum ve kuruluşlarının yangın, cankurtaran ve kamu emniyeti hizmetleri için kullandıkları elektromanyetik spektrumun sürekli olarak kullanılabilir olması ve yalnızca burada yayın yapma yetkisine sahip kişi ve kurumlarca kullanılması zorunludur. Spektrum izleme, burada sözü edilen görevlerin yerine getirilebilmesi için tek çözümdür.

Bu nedenle, TÜBİTAK BİLGEM çatısı altında geliştirilmekte olan çok boyutlu telsiz haberleşme işaret analiz platformu (KAŞİF), yalnızca ilgi

konusu radyo frekans spektrum hiper-uzayının boyutunun işgal edilip edilmediğini değil, aynı zamanda istihdam edilen kanal erişim yöntemleri, hava arabirimleri, erişim teknikleri ve diğer parametrelerle ilgili bilgileri ortaya koyabilme yetisine sahip bir platform olacaktır.

Bu kapsamda geleneksel sinyal işleme algoritmaları ile günümüzde kullanım alanı giderek yaygınlaşan yapay zeka teknikleri de kullanılarak 10Mhz ile 6Ghz arasında haberleşme spektrumunu işgal eden sinyaller için işaret tanıma, yön ve konum bulma ile spektrum modelleme ve kestirimi ana başlıkları bulunan Türkiye'nin ilk yapay zeka destekli sinyal istihbarat platformu, KAŞİF, 2021 yılının ilk çeyreğinde ortaya çıkacaktır.

Çok Boyutlu Telsiz Haberleşme İşaret Analiz Platformu (KAŞİF)



Tümdevre Üretiminde Temizlik Süreçleri

Dr. Alican Vatansever - Başuzman Araştırmacı, Fatma Betül Akgül Taner - Araştırmacı, Tuğba Bilgiç Kelle - Araştırmacı / BİLGEM UEKAE



“Yarı iletken üretimindeki en önemli süreçlerden biri, silisyum yüzeyinin temizlenerek sonraki işlemler için pulun hazır hale getirilmesidir.”

Yarıiletken üretimindeki en önemli süreçlerden biri, silisyum pul yüzeyinin temizlenerek sonraki işlemler için hazır hale getirilmesidir. Temel amaç, yüzeyde bulunan kontaminantları uzaklaştırmak ve yüzeyde kimyasal olarak büyüyen malzemeyi (çoğunlukla silisyum dioksit) kontrol altında tutmaktır. Pul yüzeyindeki kontaminasyonun kontrolü için teknolojiler geliştirilmeseydi, modern tümdevrelerin üretimi mümkün olmazdı.

Pul temizliği, tümdevre üretiminde en sık tekrarlanan adımdır ve dolayısıyla üretimdeki en önemli süreçlerden biridir. Tümdevre ve eleman boyutları küçüldüğünde, yeni cihaz ya da malzemeler üretim sürecine girdiğinde, kirlilik seviyesinin daha da azaltılması

gerektiğinden temizleme işlemi daha karmaşık hale gelmektedir. TÜBİTAK BİLGEM'de tümdevre üretimi gerçekleştiren YİTAL laboratuvarında 0.25 µm devre üretimi kapsamındaki toplam yaklaşık üç yüz adımdan altmış temizlik süreçleridir.

Kural olarak, kirlenmiş parçacık boyutu transistör hat genişliğinin yarısından daha küçük olmalıdır. Yani, 250 nm teknolojsi için 125 nm'den daha küçük boyuttaki, 180 nm teknolojsi içinse 90 nm'den daha küçük boyuttaki partiküller uzaklaştırılmalıdır. Küçük partikülleri uzaklaştırmak daha zordur çünkü daha fazla enerji gerektirmektedir. Temel olarak 4 farklı kontaminasyon tipi ve kaynağı bulunmaktadır;

✓ **Partikül:** Ortamdaki toz, polen, giysi, bakteri vb. kirlenmeye neden olabilir. Çapı 20 mikron üzeri olan parçacıklar yere çökse de 0.1-20 mikron büyüklüğündeki parçacıklar tümdevreleri kirlitebilmektedir.

✓ **İnorganik maddeler:** Tuzlar, çözelti içindeki pozitif-negatif iyonlar, ağır metal atomları inorganik kontaminasyon oluşturan malzemelere örnektir. Bu tip kontaminantlar, özel çözeltiler veya su yardımıyla pul yüzeyinden uzaklaştırılır.

✓ **Organik maddeler:** Is/duman, deri döküntüleri, yağlayıcılar, solvent buharı, borulardan gelen monomerler, organik kontaminant organik kirlenme oluşturabilmektedir. Bu kontaminantlar da gaz veya sıvı fazda oksitleyiciler ile giderilmektedir.

✓ **Safsızlıklar:** Pul yüzeyindeki safsızlıklar, katman depolama veya ısı oksidasyon süreçleri sırasında süreç gazlarından gelen maddelerdir veya yüzeyde biriken reaksiyon artıklarıdır. Bu safsızlıklar katı veya sıvı süreçler ile giderilmektedir ancak yüzeyden uzaklaştırılmadığı durumlar da mevcuttur.

YİTAL'de temizlik işlemleri çoğunlukla katman depolama ve ısı oksidasyon süreçleri öncesinde gerçekleştirilmektedir. Sağlıklı depolama ve oksidasyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için pul yüzeyinin temiz olması gerekmektedir. Pulun temiz olması üretim araçlarının da temiz kalması açısından önemlidir. Bunun yanında üretim sırasındaki bazı adımlardan sonra da reaksiyon artıklarını uzaklaştırmak için yine temizlik işlemleri yapılmaktadır.

Tümdevre Temizliği Nasıl Yapılır?

YİTAL'de, genellikle sıvı-faz temizlik yöntemleri kullanılmaktadır. Başlıca kullanılan kimyasallar ve bu kimyasalların etki ettiği kontaminasyon tipi, Tablo 1'de görülmektedir.

Hassasiyet gerektiren katman depolama ve ısı oksidasyon süreçleri için bazı durumlarda pul yüzeyindeki organik kirlilikler pirana çözeltisi ile ($H_2SO_4:H_2O_2$) alınmaktadır. Depolama ve ısı oksidasyon süreçlerinden ve bazı özel durumlarda şekillendirme süreçlerinden önce parçacık kaynaklı kir ve organik safsızlıklar, $NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ (SC-1) çözeltisi, pul yüzeyindeki metal kaynaklı kir ise $HCl:H_2O_2:H_2O$ (SC-2) çözeltisi kullanılarak temizlenmektedir. RCA (Ratio Corporation of America) temizliği olarak da adlandırılan bu süreçler, megasonic banyo kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir. Megasonic temizlik işlemi, pullara minimum zarar veren hassas bir yöntem olduğu için yarıiletken sektöründe tercih edilen bir temizlik yöntemidir.

Kimyasal buhar depolama veya ısı oksidasyon ile kaliteli bir silisyum dioksit (SiO_2) depolamadan önce silisyum pulların son temizlik sürecine girmesi gerekmektedir. Ön temizliğin amacı silisyum pulların üstündeki doğal veya depolanmış ince SiO_2 tabakalarını aşındırmaktır. Aşındırma işlemi seyreltik HF (1:100-1:200) banyolarında gerçekleştirilmekte ve SiO_2 film oluşturma süreçlerine bu aşamadan sonra devam edilmektedir.

| Temizlik Adı | Kullanım Amacı | Kullanılan Kimyasal |
|--|--|--|
| Ön Temizlik | Organik kirlilikleri uzaklaştırmak | $H_2SO_4:H_2O_2$ |
| Partikül ve Organik Maddelerin Temizliği | Ortam veya ekipman kaynaklı safsızlıkların ve organik maddelerin temizlenmesi | SC-1 çözeltisi ($NH_4OH:H_2O_2:H_2O$) |
| Metal İyonlarının Temizliği | Yarıiletken üretim süreçlerinden gelen çeşitli metal iyonlarını kimyasal reaksiyon ile uzaklaştırmak. | SC-2 çözeltisi ($HCl:H_2O_2:H_2O$) |
| Son Temizlik | Pul yüzeyinde oluşan doğal oksidi veya kimyasal olarak depolanmış oksidi aşındırmak | $HF:H_2O$ |
| Aşındırma Sonrası Temizlik | Aşındırma işlemleri sonucunda oluşan yan ürünlerin/polimerlerin ve fotorezistin kimyasal olarak uzaklaştırılması | $H_2SO_4:H_2O_2$, EKC (ticari ürün), IPA (izopropil alkol), $HF:H_2O$ |

Tablo 1. Temizlik İşlemlerinde Kullanılan Kimyasallar ve Kullanım Amaçları



Aşındırma süreçlerinden sonra fotorezistin yüzeyden sökülmesi ve aşındırma reaksiyonları sonucu oluşan reaksiyon artıklarının uzaklaştırılması için de temizlik işlemleri yapılmaktadır. Pul yüzeyinden yalıtım kaynaklı malzemeler (SiO_2 , Si_3N_4) veya poli-silisyum katmanı aşındırıldığında $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ karışımı (Sulfuric acid- hydrogen Peroxide Mixture-SPM), metal bir katman aşındırıldığında ise ticari EKC ürünü temizlik amaçlı kullanılmaktadır. Bazı durumlarda seyreltik HF çözeltileri ile temizlik de gerçekleştirilebilmektedir.

Islak temizliğin yanı sıra YİTAL'de kuru temizlik işlemleri de yapılmaktadır. Kuru temizlik işlemleri plazma reaktörlerde gerçekleştirilir. Fotorezisti silmek ve aşındırma sonrası oluşan polimerleri uzaklaştırmak için O_2 , doğal oksidi uzaklaştırmak için ise NF_3 gazı kullanılmaktadır. Tüm bu ıslak ve kuru temizlik süreçlerinden sonra pullar yıkanıp kurutulmaktadır.

Bakteriler, organik maddeler, iyonik kirlilikler ve partiküller gibi süreç suyundaki safsızlıklar transistör verimini düşürmektedir.

Pulların yıkanması için ultra saf su kullanılmaktadır. İnorganik veya organik çözücülerin kullanıldığı tüm ıslak temizlik adımlarında, yüzey reaksiyonlarını durdurmak ve yüzeyi yüksüzleştirmek için iyonize olmayan su ile son durulama yapılmaktadır. Silisyum dioksit, katkılı veya katkısız silisyum, nitrür veya poli-silisyum filmler gibi farklı yüzey yapıları, özellikle ıslak temizleme kimyasalları ve yüzeyi yüksüzleştirmek için deiyonize su ile etkilere girmektedir.

Pulların yüzey koşullarına bağlı olarak durulama suyu ile teması için tanka daldırılmalı temizlik, sprey temizliği, yüksek basınçlı püskürtme temizliği, sıcak temizlik gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bir temizlik adımı başına toplam ultra saf su tüketiminin 5 ila 10 litre arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu, mikroelektronik devre üretiminde her bir pul için 1000-5000 litre arası su tüketildiğini ifade eder.

Saflığın İzlenmesi

Yarıiletken temizliği için kullanılan ultra saf suda istenmeyen safsızlıklar hâlâ bulunabilmektedir. Bu safsızlıklar, mikroorganizmalar, mikron altı parçacıklar, silika, iyonik kirlenmeler, organik maddeler, çözülmüş oksijen ve benzeri maddelerdir.

Kirlenici madde yoğunlukları ile transistör verimi arasında bağlantı mevcuttur. Bu yüzden, maliyetli bir üretim hattının su dağıtım sistemindeki kirlilik nedeniyle büyük miktarlardaki transistör üretiminde oluşabilecek zararları önlemek için safsızlık yoğunluğunun hassas bir şekilde izlenmesi gerekmektedir.

Temizlik hattındaki ve kullanım noktasındaki suyun kalitesini izlemek için bir dizi analitik teknik uygulanmaktadır.

İnorganiklerin İzlenmesi: İnorganikler genel olarak metalik safsızlıklar veya Na, Fe gibi belirli maddelerdir ve plazma spektroskopisi ile izlenmektedir. (Günümüz yarıiletken uygulamaları için kabul edilebilir metal yoğunlukları alt ppb aralığındadır. Bu seviye aşılsa üretim derhal durdurulmalı ve Kon-

tainantları üretim alanından çıkarmak için sistem temizlenmelidir.) İnorganik kontaminasyon kapsamında olan iyonik safsızlıkların izlenmesi ise otomatik sıcaklık dengelemeli iletkenlik ölçer içeren direnç ölçümleri ile gerçekleştirilmektedir.

Mikroorganizmalar ve organiklerin İzlenmesi:

Canlı bakterilerin sayımı kültürleme yöntemlerine dayanmaktadır. Bu yöntemler, mevcut bakteri sayısı ile kabaca orantılı ölçüm sonuçları veren epifloresans ek olarak kullanılmaktadır. (Epifloresans ölçümleri, bir boyanın farklı bakteriler tarafından değişiklik gösterebilen alım miktarına dayanmaktadır.) Çok düşük seviyelerde organik parçacıkların izlenmesi gerekiyorsa pirojen testleri de kullanılabilir. (Pirojen testleri tüm tesis genelinde değil, ultra filtreleme üniteleri gibi belirli noktalarda kullanılmaktadır.)

Bakteriler ve organik madde varlığı da kabul edilebilir sınırları aşarsa, sistemin temizlenmesi gerekir ve ek olarak dezenfekte işlemleri gerekli olabilmektedir. Mikrobiyal kirlenmeyi kontrol etmek için ozonlama yöntemi de kullanılabilir.

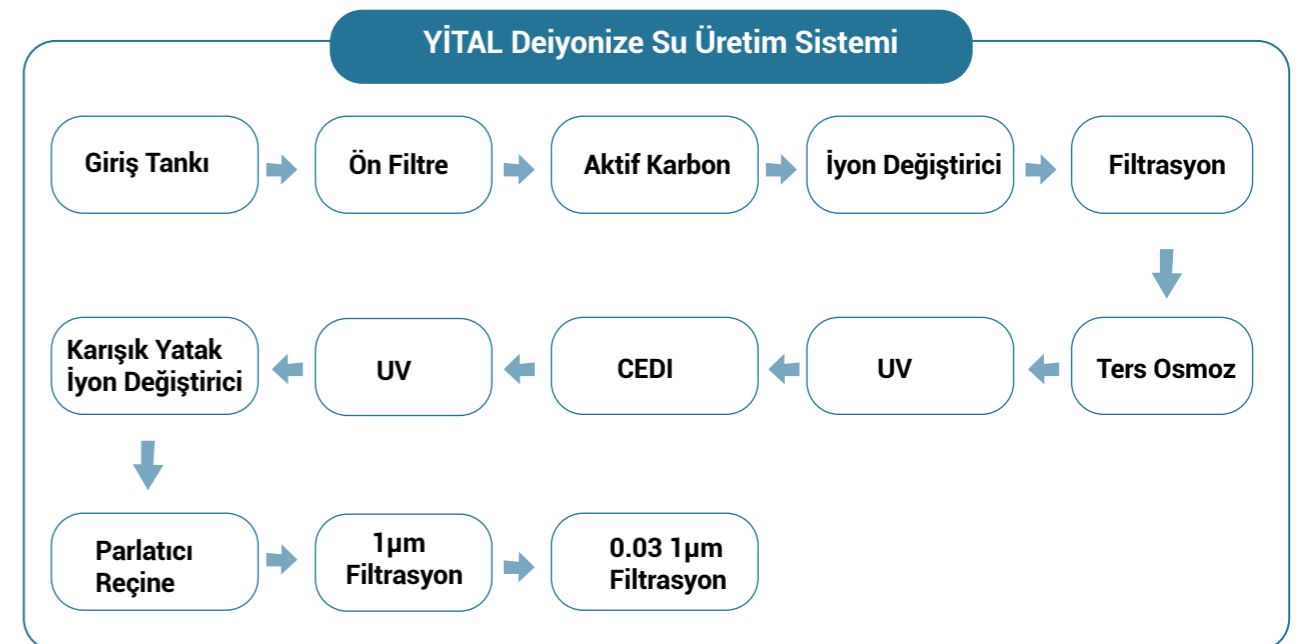
Mikro parçacıkların İzlenmesi: Organik veya inorganik kaynaklı mikro parçacıklar He/Ne lazerleri kullanan bir optik ölçüm sistemi ile izlenmektedir. 0,3 ila 0,5 μm boyutlarındaki parçacıklar günümüz teknolojisi ile tespit edilebilmektedir. Parçacık sayılarını düşük tutmak için sistemin farklı noktalarında 0.1 μm filtreler kullanılmaktadır.

YİTAL'de Saf Su Üretimi ve Kullanımı

Günümüz ve gelecek için belirlenecek standartlara ulaşmak için tesis donanımı ve çalışma süreçlerine ek olarak, su arıtma sisteminin optimize edilmesi de çok önemlidir. Aşağıdaki şekilde, YİTAL deiyonize su üretim sistemi gösterilmiştir. Saf su içindeki safsızlık yoğunluklarını en aza indirmek için çeşitli filtreleme cihazları (Osmoz, 1 μm ve 0.03 μm filtreler), iyon değiştiriciler (aktif karbon, reçine ve karışık yataklı iyon değiştirici) ve mor ötesi ışınım (UV) kullanılmaktadır. Toplam organik karbon ve direnç ölçümleri ile anlık saf su takibi yapılmakta ve inorganik, organik ve parçacık analizleri gerçekleştirilmektedir. Toplam organik karbon değeri teknolojinin gerektirdiği gibi 1 ppb'nin altındadır.

Saflığından emin olunan su, temizlik sürecinin son aşamasında kullanılmak üzere pompa yardımıyla banyolara basılmaktadır. YİTAL su banyolarında, tümdevre temizliğinde kullanılan tanka daldırılmalı temizlik, sprey temizliği, yüksek basınçlı püskürtme temizliği, sıcak temizlik gibi tekniklerin tümü uygulanmaktadır. Yıkama işlemleri, direnç 10 M Ω değerini geçene kadar yapılmaktadır.

Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra, yüzey gerilimi prensibi (Marangoni Tekniği) ile çalışan kurutma cihazı yardımıyla veya sıcak azot üflemleri döner kurutucular ile pullar kurutulmaktadır.





Kimyasal Mekanik Düzleme /Aşındırma (CMP)

Dr. Dilek Alımlı - Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

“ Endüstride kullanımının yaygınlaşması ile yükselişe geçen CMP, günümüzde dünya çapındaki fabrikalarda tümdevre (IC) üretiminde temel bir süreç olarak kabul edilmektedir. ”

Kimyasal Mekanik Aşındırma/Düzleme (CMP); kimyasal ve mekanik kuvvetler kullanılarak yüzeylerin topografisinin düzleme/aşındırma yoluyla kontrol altında tutulduğu, alternatifi olmayan en nadir süreçlerden birisidir. Süreç mimarisini oluşturmak ve kimyasal olarak aşındırması zor olan yeni malzemeleri pul yüzeyinden uzaklaştırmak için tümdevre (IC) üretiminde etkili bir teknik olan CMP, polisilyum aşındırma, siğ çukur izolasyonu (STI), metal öncesi (ILD) ve metaller arası yalıtımda (IMOX) ve özellikle tungsten (W) ve bakır (Cu) gibi metallerin çok katmanlı kullanımında (bazı durumlarda

14 katmana kadar), birçok alanda kullanılan süreçlerdendir.

Optik lens aşındırma yöntemlerinden uyarlanarak (teleskop aynalarının aşındırılması) 1983'te IBM Base Technology Laboratory'de geliştirilen CMP, mikro elektronik cihazlarda metal katman sayısını artırabilmek ve şekillendirilmiş yüzeylere katman depolandıktan sonra oluşan topografi farkını minimuma indirmek amacıyla geliştirilmiştir.(1) Söz konusu iki strateji tümdevre üretim süreçlerinde kullanılmadığında, son derece düzensiz yapılar elde edilmektedir. Bu da şekillendirme (fotolitografi) adımı

odaklanma problemini ortaya çıkarmaktadır. Devrenin kalite kavramını, CMP düzleme/aşındırma performansı belirlemektedir.

Başlangıçta CMP teknolojisi, mikro-fabrikasyonda sadece yüzeyin basit bir şekilde düzlenmesi için kullanılıyordu. Ancak transistörlerin boyutlarının küçülmesiyle daha fazla ara katmana ihtiyaç duyulmuş, böylece çok seviyeli yapılara olanak sağlayan bir teknoloji haline gelmiştir. CMP teknolojisinin;

- ▶ Çoklu metal düzleme
- ▶ Topografi iyileştirme
- ▶ IC üretim verimini artırma
- ▶ Hataları minimuma indirme
- ▶ Fotolitografi performansını yükseltme
- ▶ Diğer işlemlerden kaynaklanan verim sınırlayıcı kusurları azaltma
- ▶ Zararlı gaz kullanmama

gibi avantajları, bu teknolojiyi güvenilir, istikrarlı ve uygun maliyetli üretim odaklı yarı iletken pazarı haline getirmiştir. Endüstride kullanımının yaygınlaşması ile yükselişe geçen CMP, günümüzde dünya çapındaki fabrikalarda tümdevre (IC) üretiminde temel bir süreç olarak kabul edilmektedir.

CMP, yüzey topografisinin düzlenmesinde ve metal, dielektrik, polisilyum gibi belirli bir katmanın yüzeyden uzaklaştırılmasında kullanılan fiziko-kimyasal bir işlemdir. Yani kimyasal ve fiziksel etkilerin bir kombinasyonu ile yüzeyden uzaklaştırılmak istenen malzeme pul yüzeyinden aşındırılmaktadır. Spesifik aşındırma kimyasalı olarak kullanılan süspansiyon (slurry) ile aşındırılacak yüzey arasında kimyasal çözünme gerçekleştirilmekte, aşındırma pedinin relatif hızı ve pul taşıyıcı başlığın pula yaptığı basınç, fiziksel etkiyi oluşturmakta ve yüzeyden alınmak istenen katmanın mekanik olarak uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

CMP Mekanizmaları ve Süreçleri

Aşındırma, mekanizmalarına biraz daha yakından bakmak gerekirse, hidroksil iyonları (OH⁻), oksit CMP'de silisyumdioksit (SiO₂) saldırarak yüzey yumuşamasına ve kimyasal çözülmeye neden olur. Sonuçta reaksiyona girmiş yüzey tabakası, uygulanan basınç ve aşındırma pedinin relatif hızı ile mekanik olarak yüzeyden uzaklaştırılır. Metal CMP proseslerinde ise, süspansiyon metal yüzey ile temas eder ve oluşan oksidantlar metalin çözünmesine ve pasivasyona neden olur (reaksiyonlar metal yüzeyde koruyucu tabaka oluşturur). Nihayetinde kimyasal oksidasyon mekanizması gerçekleşir. Mekanik aşındırma mekanizmasında ise, metal oksit tabakasının süspansiyondaki parçacıklardan mekanik aşındırma ile uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

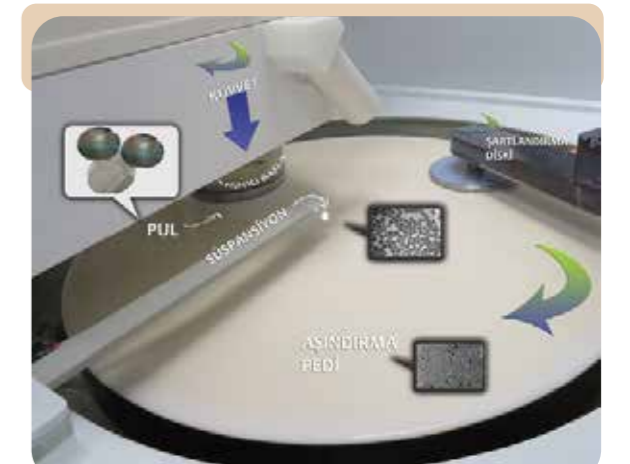
YİTAL'de CMP aşındırma/düzleme süreci IPEC WESTECH 372M CMP cihazında gerçekleştirilmektedir.

“ CMP, yüzey topografisinin düzlenmesinde ve metal, dielektrik, polisilyum gibi belirli bir katmanın yüzeyden uzaklaştırılmasında kullanılan fiziko-kimyasal bir işlemdir. ”

tedir. Cihaz, üzerine aşındırma pedlerin monte edildiği 2 döner tablası, taşıyıcı başlık ve ped şartlandırma diskinden oluşmaktadır. Pul yüzeyine, spesifik bir kimyasal malzeme olan süspansiyon ve poliüretan esaslı mikro gözenekli aşındırma pedi tarafından etki edilir.

Süspansiyon, genellikle hidrotermal seryumoksit ve amorf silika esaslı, aşındırılacak yüzeye oldukça seçici, mikron altı aşındırıcı parçacıklar ve kimyasal malzemeler içeren sulu bir karışımdır ve pedin yüzeyinde merkeze yakın bir noktaya peristaltik pompalar yardımıyla kontrollü bir miktarda gönderilir. Merkezkaç kuvveti sayesinde, pula doğru hareket eder ve ardından atılmak üzere pedin kenarından dışarı çıkar. Pulu pedin içine bastırma için bir kuvvet uygulanır ve taşıyıcı başlık ve ped relatif bir hız oluşturmak için harekete sahip olur. Hareket ve kuvvet, pul yüzeyi boyunca devam ederken, aşındırıcı maddeyi tabana doğru iterek ped porlarının da yardımıyla aşındırma gerçekleşir.

CMP proseslerinde son aşındırma aşaması tamamlandıktan sonra pul, CMP sonrası temizlik cihazındaki süreçlere dâhil olur. CMP sonrası ortaya çıkan partiküllerin uzaklaştırılmasına büyük özen gösterilir. Temizlik sistemlerinin ortak unsurları, pulun polivinil alkol (PVA) malzemeden yapılmış fırçalarla çift taraflı fırçalanması için fırça kutuları barındırmasıdır. Pulun durulama ve ardından kurutma için yüksek devirlerde döndürüldüğü bir döndürme kutusu da başka bir yaygın unsurdur.



Şekil 1: CMP sürecindeki aktif bileşenler

CMP Parametreleri



Şekil 2: CMP girdi ve çıktı parametreleri.

YİTAL'de, CMOS ve SiGe BiCMOS üretim süreçlerinde aşındırılacak ince filme özel kimyasallar ve dinamik reçeteler kullanılarak aşağıda yazılı CMP prosesleri gerçekleştirilmektedir:

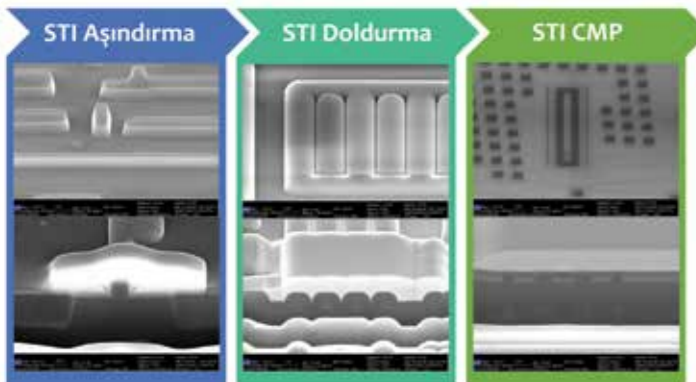
- POLİSİLİSYUM (derin çukur izolasyonunda depolanan polisilisyum tabakasının aşındırılıp düzlenmesi),
- STI (sığ çukur izolasyonunda depolanan LPCVD silisyumdioksit tabakasının aşındırılıp düzlenmesi),
- IMOX (metaller arası yalıtım için depolanan PECVD silisyumdioksit tabakasının aşındırılıp düzlenmesi),
- W (kontakt içlerinin doldurulması için Ti/TiN üzerine depolanan CVD Tungsten (W) tabakasının aşındırılıp düzlenmesi)

Metal öncesi tüm devre üretim aşamalarındaki iyon ekme, depolama ve aşındırma süreçlerinden dolayı pulun topografisinde dalgalanmalar gözlenebilir. Bu topografik etki, metal öncesi ve sonrası depolanan dielektrik malzeme yüzeyine aynen yansımaktadır. Fotolitografinin etkinliği ise mükemmel bir CMP ile mümkündür. Mükemmel bir CMP, gelişen teknolojiyle uyumlu fonksiyonel süspansiyon ve ped gibi önemli bileşenlerin işleme dâhil edilmesinin yanı sıra, dinamik reçetelerin kullanılması ve CMP sonrası temizlik süreçleri gibi etkin parametrelerin kombinasyonu ile mümkündür.

Bu gelişmelerin sürece yansımaları belli parametrelerle ölçülmektedir. Bunların başında düzenlilik, minimum tahribat, maliyet ve CMP'nin farklı disiplinlere uygulanması gibi başlıklar gelmektedir. CMP, yarı iletken endüstrisinde her alanda yer alarak yeni malzemeler içeren ve artan sayıdaki süreç entegrasyon şemalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Kaynakça

1. Krishnan M, Nalaskowski JW, Cook LM. Chemical mechanical planarization: Slurry chemistry, materials, and mechanisms. Chem Rev. 2010;110(1):178-204. doi:10.1021/cr900170z



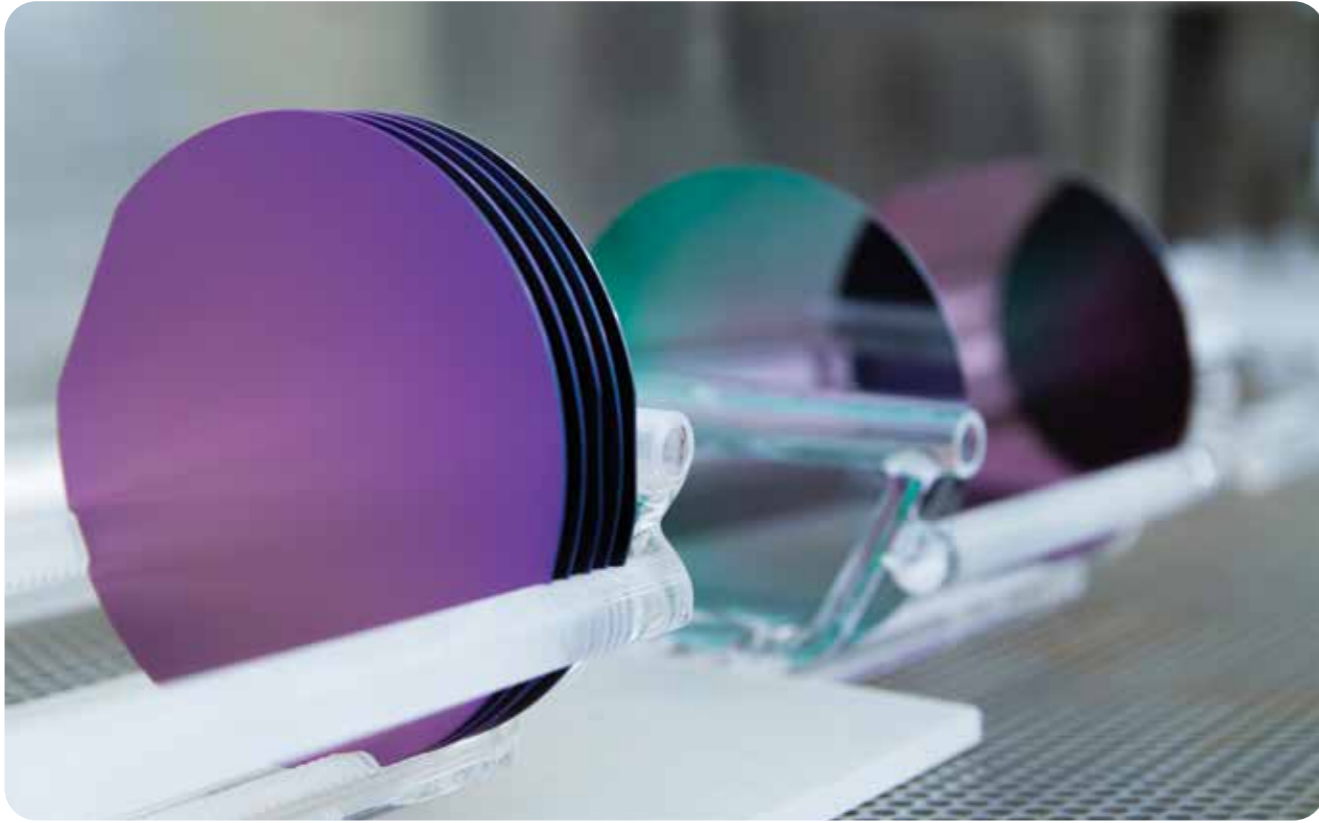
Şekil 3: YİTAL' de gerçekleştirilen STI CMP öncesi ve sonrası pul yüzeyinin ve kesitinin SEM görüntüleri.



MGR, TÜBİTAK BİLGEM ve Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) iş birliği ile geliştirilmiştir. Sivil veya askeri hava trafik kontrolü ve yağış durumu belirleme amacıyla gerçekleştirilen bu temel gözetleme radar (PSR) sistemi bir S-bant Doppler katı hal darbe radarıdır.



Milli Gözetim Radarı



Yüksek Sıcaklık İşlemleri ve YİTAL Uygulamaları

Duygu İşler Öksüz - Başuzman Araştırmacı, Bayram Andak - Başuzman Araştırmacı, Fatma Betül Akgül Taner - Araştırmacı, Rıza Melih Köksallı - Araştırmacı, Ahmet Kartal - Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

Yarı iletkenler, normalde yalıtkan olan ancak ısı, ışık ve manyetik etki altında bırakıldıklarında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronunun serbest hale geçmesiyle iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir.

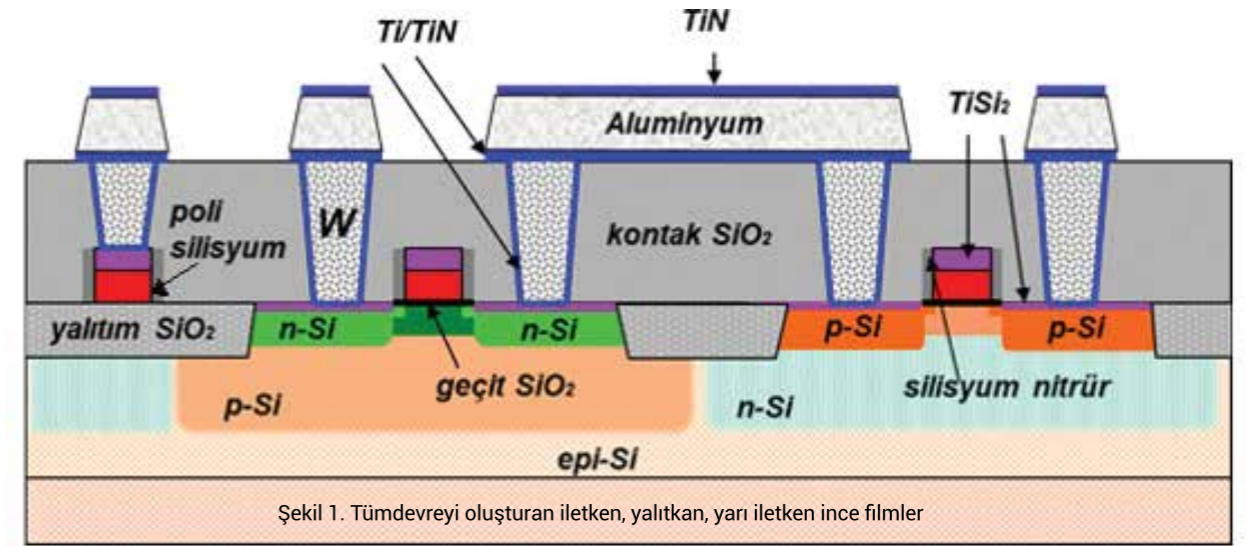
Malzemeler elektriksel olarak iletken, yalıtkan, yarı iletken olarak sınıflandırılır (Tablo 1). İletkenlik, öz direncin tersidir. Öz direnç ne denli düşükse iletkenlik o denli yüksektir. İletkenlerin aksine, yalıtkanlarda atom çekirdeği ve yörünge elektronları arası çekim yüksektir, elektronların hareketine direnç vardır. Yarı iletkenler, normal halde yalıtkan olup ancak ısı, ışık, manyetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronunun serbest hale geçmesiyle iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir.

dığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu (değerlik elektron) serbest hale geçerek iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir. Valans elektronların bulunduğu en dıştaki enerji bandına "Valans Bandı", bir sonraki banda da "İletkenlik Bandı" denir.

Yarı iletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasında yasak bant vardır. Valans bandındaki elektrona boş-

| Elektriksel Sınıflandırma | İletkenlik Seviyesi | Örnek | |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| İletken | 10^4-10^6 ohm-cm | Aluminyum, titanyum, tungsten | |
| Yalıtkan (dielektrik) | $10^{-22}-10^{-10}$ ohm-cm | Silisyum oksit, silisyum nitrid | |
| Yarı iletken | Katkısız | $10^{-9}-10^3$ ohm-cm | Silisyum, germanyum |
| | Katkılı | $>10^3$ ohm-cm | n tipi silisyum, p tipi silisyum |

Tablo 1. Elektriksel olarak malzemelerin sınıflandırılması



Şekil 1. Tümdevreyi oluşturan iletken, yalıtkan, yarı iletken ince filmler

luk bandı seviyesinde enerji verilince, uygulanan bu enerji ile valans elektronu iletim bandına geçer ve madde iletkenlik kazanır. Katkısız yarı iletken içerisinde yük taşıyıcı olarak görev yapacak herhangi bir safsızlık bulunmaz. Kristale uygun safsızlık atomları (bor, fosfor, arsenik) eklenerek katkılı yarı iletkenler oluşturulur.

Bir tümdevre üretiminde iletken, yalıtkan, katkılı-katkısız yarı iletken filmler silisyum taban üzerine depolanır, maskelenir ve aşındırılır. Bu çevrim üretim akışına göre defalarca yinelenir. Şekil 1'de ilk metal hattı tamamlanmış bir CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor/Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken) yapısını oluşturan ince filmler görülmektedir.

Yüksek sıcaklık işlemlerini ifade eden süreçler şu şekilde sıralanabilir:

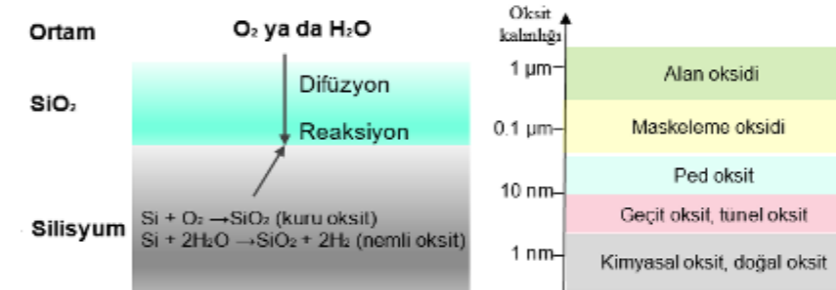
- Silisyumun termal olarak oksitlenmesiyle SiO_2 oluşumu,
- LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition/Düşük Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme) yöntemiyle silisyum oksit, silisyum nitrid ve polisilisyum ince filmlerin yüzeye depolanması,

- Katkılamayla iletkenlik özelliği kazandırılan silisyum içerisinde katkı elementlerinin aktive edilmesi, yayındırılması ve bu ilavelerin silisyum tek kristalinde oluşturduğu kristal kusurlarının giderilmesini kapsayan süreçler.

Termal Oksitleme

Silisyumun oksijene afinitesi (çekim/bağ) çok yüksektir, atmosfere çıkmasıyla birlikte zamanla üzerinde 10-20 Å kadar doğal, koruyucu oksit oluşur. Silisyum oksit, kalınlık ve fiziksel yapısının türü olarak tümdevre üretiminde pek çok yerde kullanılır (Şekil 2). Dielektrik bir film olsa da termal genişleme katsayısı silisyuma yakındır. Silisyumun direncini düşüren katkıların yayılmasını (difüzyonunu) önleyen bir katmandır. Ayrıca aşındırma ve katkılama süreçlerinde maske olarak kullanılır. Tarihte ilk üretilen transistör germanyum tabanlı iken SiO_2 'nin bu özelliklerinin farkındalığı ile "Silisyum Çağı" başlamıştır.

Oksitleyici ortam türüne göre kuru oksitleme ve nemli oksitleme olmak üzere iki tür termal oksitleme vardır. Kuru oksitlemede oksitleyici olarak saf oksijen gazı (%99,999) kullanılır, silisyum ortamdaki oksijen gazı ile reaksiyona girerek yüzeyde amorf silisyum dioksit tabakası oluşturulur. 750-1000 °C sıcaklıklarında çalışılır ve SiO_2 oluşur. Sıcaklık arttıkça aynı sürede oluşacak oksit kalınlığı da artar. Termal oksitlemede birim SiO_2 başına 0.44 birim silisyum tüketilir. Bu da silis-



Şekil 2. Termal oksitleme süreci ve farklı kalınlıklara göre uygulama alanları

yumun oksitlenip ıslak aşındırıldığı zaman yüzeyinin temizlenmesine olanak tanır.

Oksijen gazı sonsuz kaynak olarak alındığında süreç sıcaklığına bağlı olarak belli bir kalınlığa kadar (yaklaşık 1000 Å) reaksiyon lineer bölge kalır, artan oksit kalınlığına bağlı olarak oksijenin ara yüzeye ulaşması güçleşir. Bu durumda reaksiyon artık difüzyon kontrollü hale gelir, oksitlenme hızı parabolik olarak artar. Nemli oksitlemede yüksek saflıkta hidrojen ve oksijen gazı termal oksitleme fırınına gönderilir, H₂O oluşturmak için reaksiyona girerler. OH'ın SiO₂ içinde difüzyonu O₂'den daha hızlı olduğundan, OH'a indirgenen H₂O molekülleri ile oksitleme daha hızlıdır. Bu sebeple 1000 Å üzeri kalınlıklarda nemli oksitleme tercih edilir.

Nemli oksitleme reaksiyonunda oksitlenme reaksiyonu sonucu H₂ çıkışı vardır. Bu H₂ oksit filmi içerisinde tuzaklanabilir. Bu sebeple oksitleme sonrası N₂ ortamında 900 °C ve üzeri sıcaklıklarda oksit filmini tavlayarak olabildiğinde sıkılaştırmak gerekir. Bir termal oksitlemede silisyum tabanını kristal yönelimi, katkı türü ve konsantrasyonu, oksitlenme hızını etkiler. (111) kristal yönelimli silisyum; atomik yoğunluğu (100) yöneliminden daha fazla olduğu için daha hızlı oksitlenir. Ayrıca silisyum tabanının katkı konsantrasyonu arttıkça yine oksitlenme hızlanır.

En hassas termal oksitleme süreci, transistörün geçit bölgesinin tabanında bulunan "Geçit Oksit" adı verilen filmin oluşturulmasıdır. Tabanında geçit oksit bulunan katkılı polisilisyum geçit bölgesine uygulanan düşük voltajla kanalda elektrik alan oluşturulup kaynak savak arası akım yolu açılır. Ka-

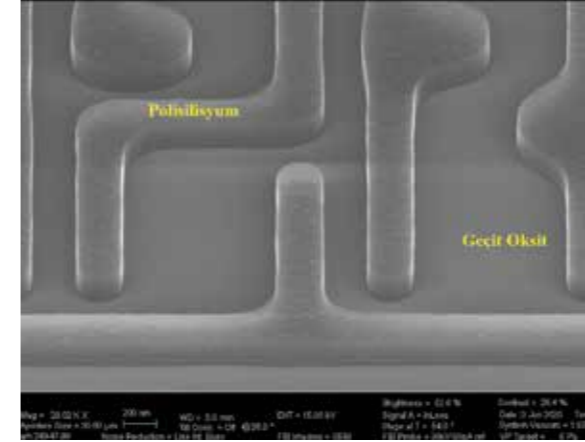
Tarihte ilk üretilen transistör germanyum tabanlı iken SiO₂'nin özelliklerinin farkedilmesiyle "Silisyum Çağı" başlamıştır.

nal genişliği küçüldükçe transistör hızlanır. "Kanal genişliği-geçit oksit kalınlığı-savak/kaynak jonksiyon derinliği" arasında korunan boyutsal oran gereği kanal genişliği, geçit oksit kalınlığının kabaca 45 katıdır. Dolayısıyla küçülen boyutlar daha ince geçit oksitleri gerektirir. Kapasite denklemine göre, oksit kalınlığı ne kadar düşürülürse kapasite o kadar yüksek olur. Böylece transistörün eşik gerilimi düşer, hızı artar. Kalınlığın limitlerinde ise yüksek dielektrik sabitli yalıtkanlar kullanılır.

YİTAL'de 0.25 µm CMOS teknolojisi için 60 Å SiO₂ büyütülmektedir (Şekil 3). Si-SiO₂ ara yüzeyinde bağ yapmamış atomlar, dislokasyon, dizilim hatası gibi kristal kusurlar, metalik kirlilikler gibi faktörlerin varlığı ve mertebesi oksitin elektriksel özelliklerini belirler. Oluşabilecek kusurlar oksit tabakasında tuzak oluşumuna neden olabilmektedir. İstenmeyen ara yüzey yükleri, SiO₂ tabakasındaki sodyum, potasyum, demir gibi iyonik yükler bölgesel bir

| Ölçüm yöntemi | Ölçülen parametre |
|------------------------------------|--|
| V-Q | <ul style="list-style-type: none"> • Si-SiO₂ arayüzey tuzakları • Oksit yükleri • Düz band gerilimi • Eşik gerilimi |
| Micro PCD (Photo conductive decay) | <ul style="list-style-type: none"> • Taban katkı konsantrasyonu • Tünelleme gerilimi |
| | Azınlık taşıyıcı ömrü |

Tablo 2. Yüzey yük analizörü cihazında kullanılan ölçüm yöntemleri



Şekil 3. Geçit polisilisyum ve geçit oksit SEM (Scanning Electron Microscope/Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri

elektrik alan artışına neden olmakta ve geçit oksidin yalıtkanlık özelliğini bozmaktadır. Geçit oksit süreci öncesi oksitleme, fırının ve silisyum pulların temizlik adımları, oluşacak ince SiO₂ filminin kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır.

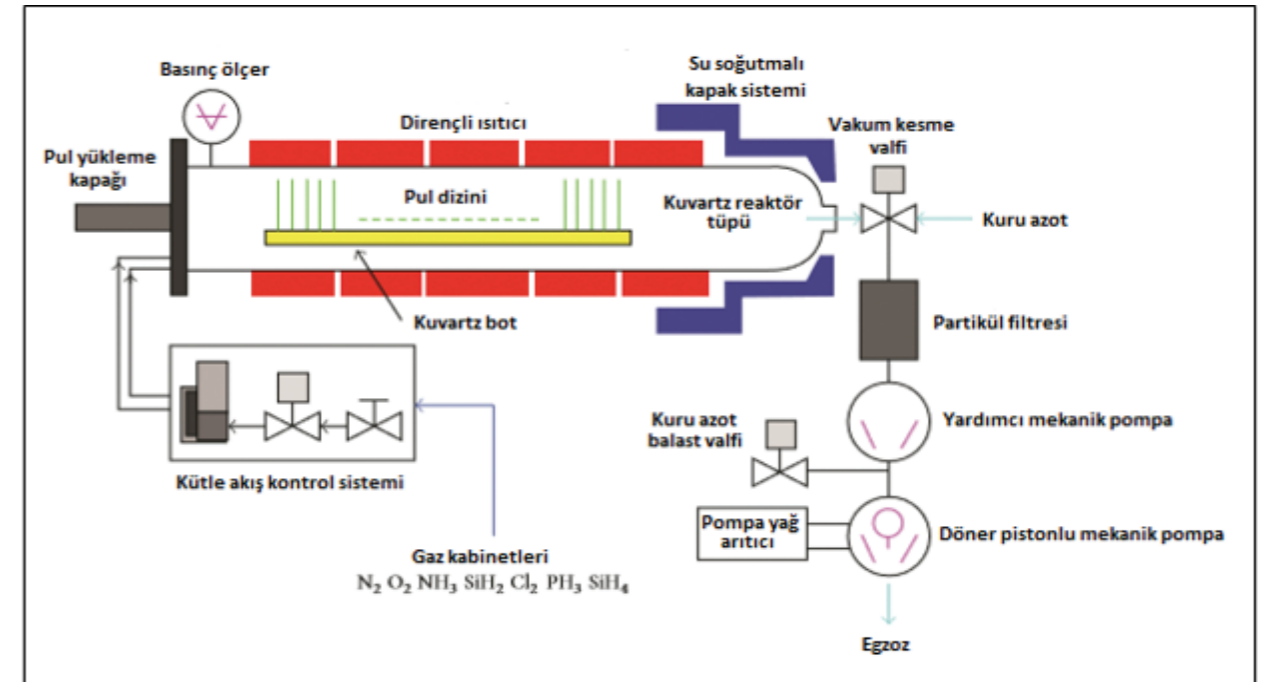
Oluşan oksit filmini karakterize etmek için yüzey yük analizörü karakterizasyon cihazıyla kalınlık dağılımı, Si-SiO₂ ara yüzey tuzakları, oksit yükleri, düz band gerilimi, eşik gerilimi, taban katkı konsantrasyonu ve azınlık taşıyıcı ömrü değerleri ölçülebilmektedir. Yüzey yük analizörü karakterizasyon cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm yöntemi ve ölçüm parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. YİTAL'de 60 Å kalınlığında büyütülen SiO₂ filminde

azınlık taşıyıcı ömrü yaklaşık 300 µs, arayüzey tuzak yoğunluğu ise 2.13x10¹¹ 1/ev/cm² değerinde olup, literatür ile uyum sağlamaktadır.

LPCVD Süreçleri

İnce film depolama tekniklerinden biri olan CVD (Chemical Vapor Deposition/Kimyasal Buhar Biriktirme), buhar halindeki bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan katı bir malzemeye taban malzemenin kaplanmasıdır. Bir CVD sürecinde kalınlık dağılım düzgünlüğü ve süreç kontrolü sıcaklık, gaz akışları ve basınç değişkenlerine bağlıdır. Bir molekülün reaksiyon haznesinde herhangi bir çarpışma yaşamadan aldığı yola "ortalama serbest yol" denir. Serbest yol ne denli yüksekse film kalınlık dağılımı o denli iyi olacaktır. Ortalama serbest yolu en çok etkileyen süreç parametresi basıncıdır. Basınç düştükçe ortalama serbest yol artar. Yatay hazneli bir LPCVD sistemi ve yardımcı ekipmanları Şekil 4'te verilmiştir.

YİTAL'de SiO₂, Si₃N₄ ve polisilisyum filmleri LPCVD yöntemiyle depolanmaktadır. LPCVD'de kimyasal reaksiyonlar, piroliz, redüksiyon, oksidasyon ve nitrürleme olarak dört çeşittir. Polisilisyum sürecinde piroliz reaksiyonu gerçekleşir; SiH₄ sıcaklık etkisiyle silisyuma indirgenir. Silisyum dioksit filmi, O₂ varlığında TEOS kimyasalı ile oluşturulur. Silisyum nitür (Si₃N₄) filmi ise bir nitrürleme sürecidir; SiH₂Cl₂ ile NH₃ gazlarının reaksiyonu sonucu oluşur.

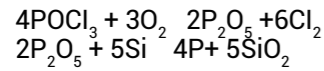


Şekil 4. Yatay hazneli LPCVD cihazı ve ekipmanları



Termal Katkılama, Katkı Aktivasyonu

Silisyum kristal oluşturulurken, epitaksiyel film büyütülürken, iyon ekme ve termal difüzyon süreçlerinde silisyumun katkılması gerçekleştirilir. Bu işlemlerden termal difüzyonla katkılama süreci yüksek sıcaklık uygulamalarının içerisinde yer alır. Difüzyon, konsantrasyon gradyanı boyunca atomun hareketi olarak tanımlanır. Yüksek katkı seviyeleri (>1E20 at/cm³) ve jonksiyon derinliği hedeflenen uygulamalarda termal difüzyon süreci kullanılır. YİTAL'de termal difüzyon süreci olarak POCl₃ (Fosfor Oksiklorit) ile gaz faz katkılması yapılmaktadır. POCl₃'ün fosfor indirgenme reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Ortaya çıkan fosfor yüksek sıcaklık ortamında silisyum pulu difüz eder. Oksit-nitrür gibi difüzyon katsayısı düşük film yoksa pulun hem ön yüz hem de arka yüzüne katkılama yapılabilir. Sıcaklık arttıkça silisyumun içerisinde çözebildiği katkı çözünürlüğü (katı çözünürlük seviyesi) de artmaktadır. 5E22 at/cm³ atom yoğunluğuna sahip silisyum, 900 °C de termal difüzyon süreci ile 1-2E20 at/cm³ fosforu bünyesine alabilir.

İyon ekme yönteminde katkı atomları silisyuma yüksek enerji ile gönderilir. Hızla silisyuma gömülen atomlar, silisyum kristal kafesinde bağlanması gereken noktalarda olmadığından elektriksel olarak aktif değildirler. Ayrıca silisyum kristali bu yüksek enerjili çarpma sürecinden dolayı hasar görür. Hem bu kristal kusurları iyileştirmek hem de katkı ajanlarını elektriksel olarak aktif hale getirmek için, yaklaşık 1000 °C'deki azot ortamında "Aktivasyon Süreci" gerçekleştirilir. Katkılanan yüzeyden dışarıya doğru

“ Bir termal oksitlemede silisyum tabanın kristal yönelimi, katkı türü ve konsantrasyonu, oksitlenme hızını etkiler. ”

katkı difüzyonu gerçekleşerek, silisyumda katkı konsantrasyon düşüklüğü meydana gelebilir. Katkının dış ortama difüzyonunun engellenmesi, aktivasyon sırasında ya da öncesinde silisyum yüzeyinin oksitlenmesi ile sağlanır. Aktivasyon işlemi esnasında toplam katkı atomu yoğunluğu (Q) sabit kalır, yüzeydeki atom yoğunluğu düşer, jonksiyon derinliği artar.

Bir yandan katkı atomlarının aktive edilmesi diğer yandan jonksiyonun sığ kalmasının istenmediği durumlarda RTP (Rapid Thermal Process/ Hızlı Isıl İşlem) süreci tercih edilir. RTP, birkaç saniyede pulun istenilen sıcaklığa (1250 °C'ye kadar) çıkarılabileceği bir ısıl işlem yöntemidir. Hızlı ısıtma (250 °C/s'e kadar) ve hızlı soğutma (125 °C/s'e kadar) özelliğinden dolayı RTP'nin temel avantajı; özellikle iyon aktivasyonu işleminde pulun sıcaklığa daha az maruz kalarak tabakalar içerisindeki katkı profillerinin yayılmamasıdır. Böylece, katkılar buldukları tabaka içerisinde ani bir şekilde aktive edilirken farklı tabakalara difüzyonları da engellenmiş olur.

Bu tür hızlı ısıl işlemlerde ısı kaynağı olarak yüksek yoğunluklu tungsten halojen lambalar veya lazer kullanılır. İşlem öncesinde ve işlem sırasında ısıtma odasına N₂ veya Ar gazı vererek ortam O₂'den temizlenir. Pulun sıcaklığı ise ısı çift (0-800 °C arası) veya pirometre (400-1250 °C arası) ile ölçülür.

Cirit, MAM-L ve HİSAR-Fotodedektör Teknolojisi

✓ Lazer arayıcı başlık uygulamaları için BİLGEM'de özel olarak geliştirilen fotodedektörler, yüksek dirençli silisyum kristali üzerinde, geniş alanlı PIN yapısında üretilmektedir.

✓ Milli fotodedektörlerimiz yurt dışında üretilen emsallerinden daha düşük gürültülü ve yüksek tepkisellik özelliğine sahiptir.

✓ Dedektörlerin üretiminde 55 adımlı gelişmiş yarı iletken teknolojisi kullanılmaktadır.

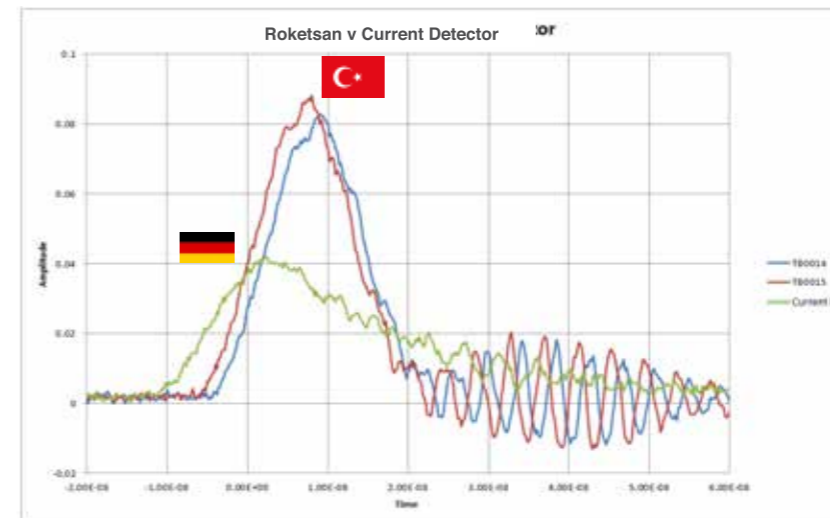
✓ BİLGEM'de üretilen farklı tipteki dedektörler ROKETSAN, TÜBİTAK SAGE ve ASELSAN tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

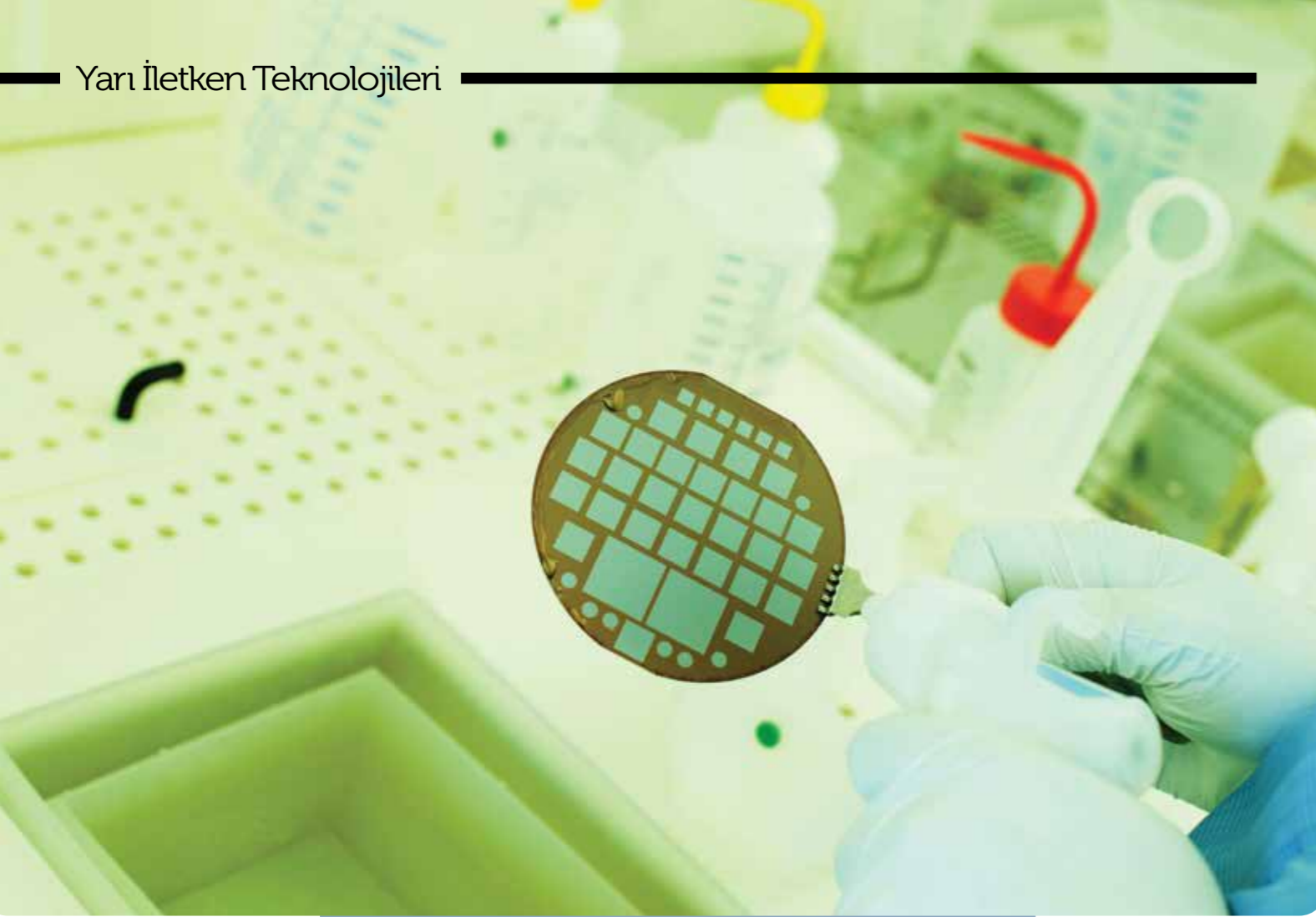
✓ Yerel sanayimizin ihtiyaçlarına paralel olarak 2019 yılında dedektörlerimizin yurtdışına satışına da başlanmıştır.

✓ BİLGEM'de geliştirilen en son fotodedektör, HİSAR Füzesi'nin Lazer Yaklaşma Sensürü'nde başarı ile kullanılmıştır.

YİTAL Fotodedektör Uygulamaları - Hisar Füzesi

- ▶ Lazer yaklaşma sensöründe YİTAL 'de tasarlanıp üretilen dedektör
- ▶ Emsal fotodedektörlere göre çok daha yüksek performans
(Kaynak: Thales UK Ölçüm Sonuçları)





Tümdevre Üretimi Aşındırma Süreci

Dr. Alican Vatansver - Başuzman Araştırmacı, Tuğba Bilgiç Kelle - Araştırmacı,
Semih Çulhaoğlu - Uzman Araştırmacı, Alper Urgan - Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

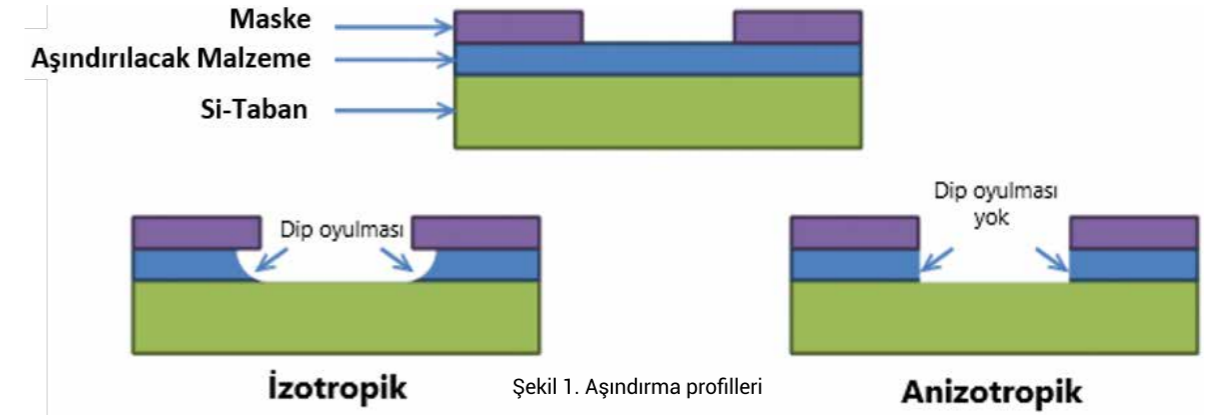
Tümdevre üretimi, bir taban üzerine (çoğunlukla silisyum malzeme) ince filmlerin biriktirilmesi, katkılanması, şekillendirilmesi ve aşındırılması süreçlerinin ardışık olarak uygulanmasıdır.

Tümdevre üretimini, bir taban üzerine (çoğunlukla silisyum malzeme) ince filmlerin biriktirilmesi, katkılanması, şekillendirilmesi ve aşındırılması proseslerinin ardışık olarak uygulanması şeklinde tanımlayabiliriz. Üretimi tamamlanmış bir tümdevreye mikroskopta bakıldığında, katman katman farklı malzemelerden oluşan ve farklı ölçülere sahip 3 boyutlu şekiller görülmektedir. Bu şekilleri oluşturabilmek için öncelikle malzemeler, tabanın tüm yüzeyine eşit bir şekilde kimyasal veya fiziksel olarak depolanmakta ve daha sonra tasarlanan devreye ait maske-model çıkarılmaktadır. Bu maske-model, depolanan malzemelerin belirli bölgelerinin korunmasını sağlamaktadır. Açık kalan kısımlardaki depolanan malzemeler, kimyasal bir çözme işlemi veya fiziksel bir bombardıman ile yüzeyden uzaklaştırılmakta-

dır. Böylece, maskeleme ile oluşturulan modellemeye bağlı olarak depolanmış tabakalardan taban yüzeyine veya var ise alttaki başka katmana pencereler açılmaktadır. Bu şekilde depolanan malzemeleri uzaklaştırma işlemi, "Aşındırma" olarak adlandırılmaktadır.

Aşındırma süreci, çoğunlukla fotorezistle tanımlanan maske desenlerine göre yalıtım malzemeleri silisyum dioksidin (SiO_2), silisyum nitrürün (Si_3N_4), alüminyum (Al), titanyum (Ti), titanyum nitrür (TiN), tungsten (W) gibi metallerin ve polisilisyum (polikristal silisyum) tabakaların yüzeyden uzaklaştırılmasıdır.

Kullanılan aşındırma yöntemlerine göre izotropik veya anizotropik aşındırma profilleri oluşmaktadır. İzotropik profil, aşındırma her yöne eşit bir şekilde ger-



çekleştğinde oluşmaktadır. Şekil 1 incelendiğinde aşındırmanın dikey ve yatay yönde aynı hızda gerçekleştiği görülmektedir. Dolayısıyla her iki yöndeki aşındırma miktarı aynı olmaktadır. Böylece maske malzemesinin altındaki katman da aşınmaktadır.

İdeal bir anizotropik aşındırmada ise sadece dikey yönde aşındırma gerçekleşmekte, yatay yönde aşınma olmamaktadır. Öngörülebileceği gibi izotropik aşındırmada kimyasal işlem baskın iken anizotropik aşındırmada fiziksel işlem baskın olmakta veya yan duvarlar kimyasal reaksiyon sonucu oluşan bileşenler ile korunmaktadır. YİTAL'de yapılan çalışmalarda bu iki tip aşındırmanın hangi aşamalar için kullanıldığına ilişkin örnekler ilerleyen kısımlarda anlatılacaktır.

Aşındırma prosesleri, ıslak veya kuru aşındırma yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. ıslak aşındırmada isminden anlaşılacağı gibi sıvı çözücüler kullanılmaktadır. Bu çözücüler aşındırılması istenen katmanları maskenin açık bıraktığı boşluklardan çözmektedir. ıslak aşındırma kimyasal bir işlemdir ve çözücü maske malzemesinin altına kolayca girebileceği için ıslak aşındırma sonucu tamamen izotropik bir aşındırma profili oluşmaktadır. ıslak aşındırmanın en büyük avantajlarından biri farklı malzemelere karşı seçici bir

aşındırma işlemi gerçekleştirmesidir. Bu sebeple, taban yüzeyine farklı katmanlar depolanmış ve sadece en üstteki katmanın aşınıp alttaki katmanın zarar görmemesi isteniyor ise çoğunlukla ıslak aşındırma tercih edilmektedir. ıslak aşındırma sürecinde yanlara doğru da aşındırma gerçekleştiği için bu adım boyut sınırlamasının olmadığı proseslerde gerçekleştirilmektedir. ıslak aşındırma proseslerinde sıcaklık, konsantrasyon ve süre parametreleri aşındırmayı etkilemektedir.

YİTAL'de gerçekleştirilen bazı ıslak aşındırma işlemleri Tablo 1'de özet olarak sunulmaktadır.

Şekil 2'de SiGe üretiminde ıslak aşındırma prosesi sonrası oluşan yapı görülmektedir. SEM cihazı kullanılarak elde edilen bu görüntüde katman farklılıklarının daha net olması için elektron yollanmadan önce yüzey, platin ile kaplanmıştır. Bu görüntü hem izotropik aşındırmaya hem de ıslak aşındırmanın seçiciliğine örnek teşkil etmektedir. Si_3N_4 katmanının altında tek kristal SiGe film büyütülecek alan oluşturmak için ıslak aşındırma prosesi uygulanmıştır. ıslak aşındırmadan önce tüm yüzey Si_3N_4 katmanı ile kaplanmıştır. Si_3N_4 katmanı plazma ile aşındırılıp yan duvarlarda Si_3N_4 bacak oluşturulmuştur. ıslak aşındırma prosesinde HF çözeltisi Si_3N_4 'e zarar vermeden

| Malzeme | Çözücü | Reaksiyon |
|-------------------------|--|--|
| SiO_2 | HF-NH ₄ F Çözeltisi | $\text{SiO}_2 + 6 \text{HF} \rightarrow \text{H}_2 + \text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Si_3N_4 | H ₃ PO ₄ Çözeltisi | $3\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{H}_3\text{PO}_4 + 27 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 + 9 \text{H}_2\text{SiO}_3$ |
| Al | H ₃ PO ₄ + CH ₃ COOH + HNO ₃ Çözeltisi | $6\text{H}^+ + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{H}_2 + 2 \text{Al}^{3+}$ |
| Si | HF + HNO ₃ Çözeltisi | $3\text{Si} + 4\text{HNO}_3 \rightarrow 3\text{SiO}_2 + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ |

Tablo 1. ıslak aşındırma

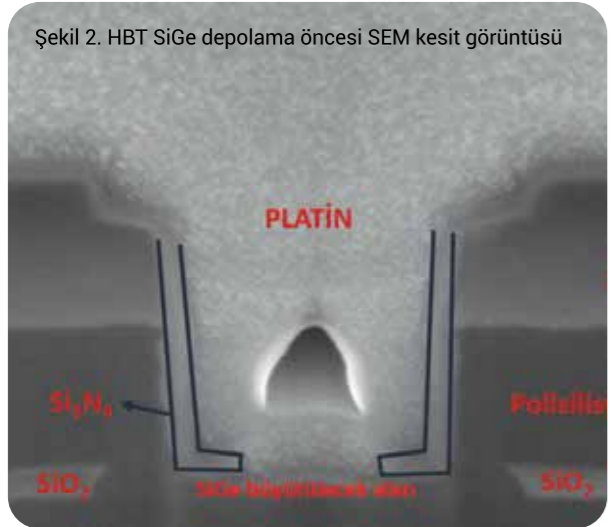


SiO_2 'yi aşındırmıştır (seçicilik). Görüntü incelendiğinde HF çözeltisinin Si_3N_4 altında kalan SiO_2 katmanını da aşındırdığı görülmektedir (izotropik aşındırma).

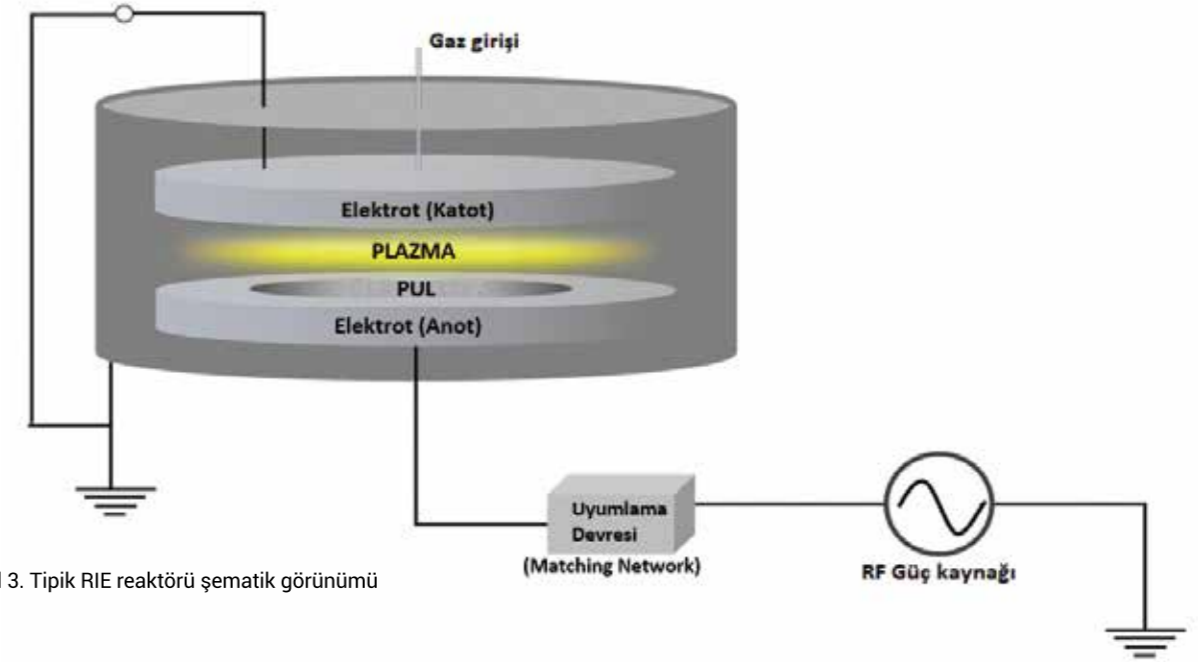
Diğer bir aşındırma yöntemi olan kuru aşındırma, plazma haline getirilen gazlar ile gerçekleştirilmektedir. Kullanılan gazlar ya plazma oluşumu sırasında çarpan elektronların etkisi ile radikal haline gelmekte ve taban yüzeyindeki malzemeler ile kimyasal reaksiyona girerek aşındırma gerçekleştirmekte ya da yine çarpan elektronların etkisi ile

iyonlaşmakta ve taban yüzeyine ivmeyle çarparak tamamen fiziksel bir aşındırmaya sebep olmaktadır. Kimyasal aşındırma, izotropik bir aşındırma sağlamaktadır. Fiziksel aşındırma ise anizotropik aşındırma sağlasa da aşındırma çok yavaş gerçekleşmekte ve aşınan yüzey çok fazla pürüzlü olmaktadır. Kuru aşındırmanın en önemli avantajlarından biri, fiziksel ve kimyasal işlemleri aynı anda gerçekleştirerek hızlı, düzgün yüzeyli, anizotropik profil oluşturan bir aşındırma sağlamasıdır. Ayrıca kuru aşındırma ile aşındırıcı gazların miktar ve oranlarını değiştirerek istenilen açıda yan duvar profili oluşturulabilmektedir.

YİTAL'de 3 farklı çalışma prensibi olan 9 adet reaktör ile kuru aşındırma yapılmaktadır. Tipik olarak reaktörler alüminyum, cam veya kuvarsdan yapılmış, düşük vakuma inebilen cihazlardır. Bu cihazlar temel olarak reaktör haznesi, turbo pompa ve kuru pompadan oluşan vakum sistemi, radyofrekans (RF) güç kaynakları, su veya gaz soğutma-ısıtma sistemleri ve gaz dağıtım sistemlerini içermektedir. Aşındırılacak pullar reaktöre yüklenmekte, kuru pompa ve turbo pompa reaktörü vakumlamakta ve reaktif gazlar reaktöre beslenmektedir. Radyofrekans (RF) enerjisiyle gazlar iyonize edilerek aşındırma için gerekli olan koşullar oluşturulmaktadır. Kuru aşındırma proseslerinin temel parametreleri sıcaklık, basınç, güç, gaz akış oranları ve süredir.



Şekil 2. HBT SiGe depolama öncesi SEM kesit görüntüsü

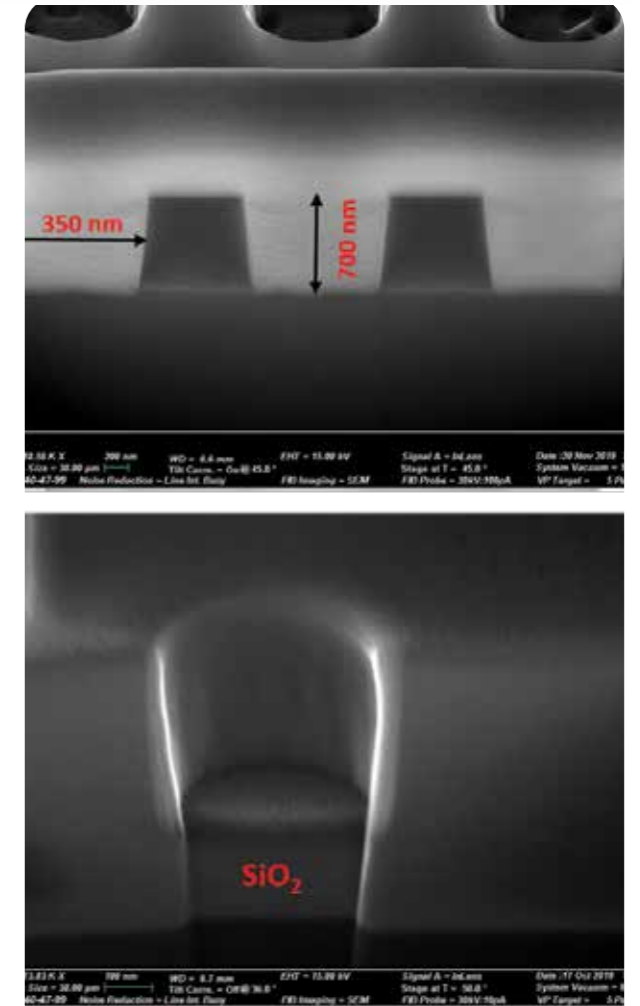


Şekil 3. Tipik RIE reaktörü şematik görünümü

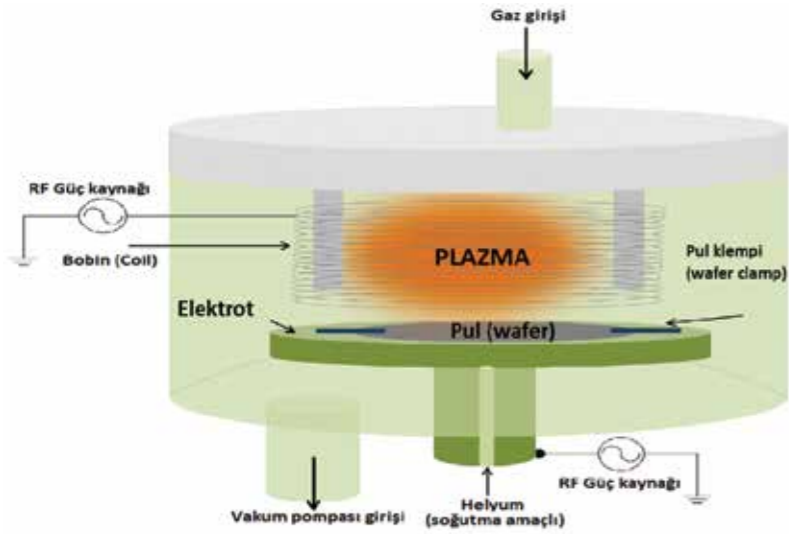
RIE (Reactive Ion Etch, Reaktif İyon Aşındırma) Reaktörü

RIE reaktörü, CCP (Capacitively Coupled Plasma) türü bir reaktördür. Yani reaktöre beslenen gazlar, bir RF enerji kaynağı yardımıyla iyonize olmakta ve kapasitif olarak aktive olan elektronlar ile plazma oluşturulmaktadır. Plazmada bulunan (+) yüklü iyonlar ve radikaller, silisyum pulun yerleştirildiği anoda doğru hareket etmektedir. İyonlar fiziksel etki ile (pul yüzeyine çarparak parça koparmaktadır), radikaller ise kimyasal reaksiyona girerek pul yüzeyini aşındırmaktadır (Şekil 3). RIE reaktöründe yalıtım malzemeleri olan SiO_2 , Si_3N_4 filmleri aşındırılmaktadır. Aşındırıcı gaz olarak CHF_3 (triflorometan), CF_4 (karbon tetraflorür), He (helyum) ve O_2 (oksijen) kullanılmaktadır. CHF_3 ve CF_4 içeriğindeki F (flor), SiO_2 ile reaksiyon vererek asıl kimyasal aşındırma işlemini üstlenmektedir. Silisyum tabana seçiciliğin önemli olduğu durumlarda Si ile daha az reaktif olduğu için CHF_3 tercih edilmektedir. O_2 , besleme oranına göre bazı şartlarda reaksiyonu hızlandırmakta bazı şartlarda da yan duvarlarda birikecek reaksiyon ürünleri oluşturmaktadır (böylece yan duvarların aşınması engellenerek anizotropik bir profil sağlanmaktadır). He ise gaz karışımlarını seyrelterek aşındırma hızını ve seçiciliği kontrol amaçlı kullanılmaktadır.

RIE reaktörlerinde 1 adet RF güç kaynağı bulunmaktadır. Plazmadaki iyon-radikal sayısı ile aşındırılacak pulun yüzeyine çarpacak iyon-radikal sayısı ve hızı,



Şekil 4. Kontak aşındırma sonrası SEM görüntüsü (HBT yapısı).



Şekil 5. ICP reaktörü şematik görünümü

bu RF güç kaynağı ayarlanarak değiştirilmektedir. Elektronlar kapasitif olarak hareket ettirildiği için aşındırma işlem basıncı 50 militordan aşağıya inmemektedir. Vakumlama işlemi kuru pompaya ilave olarak turbo pompanın da devreye girmesi ile gerçekleştirilmektedir. YİTAL'de 3 adet RIE reaktörü bulunmakta ve bu reaktörler tümdevre üretiminin farklı aşamalarında kullanılmaktadır.

Şekil 4'te HBT yapısına ait metal depolamaya hazır, RIE reaktörü kullanılarak aşındırılmış bir kontak bölgesi görülmektedir. Üstteki resimde 350 nm genişliğe, 700 nm derinliğe sahip kontak bölgesinin kesiti görülmektedir. Alttaki resimde ise tam aşınmamış bir kontak bölgesinin kesit görünüşü mevcuttur.

ICP (Inductively Coupled Plasma / Endüktif Eşitlenmiş Plazma) Reaktörü

Bu reaktörde elektronlar endüktif olarak hareket ettirildiği, yani elektronlar dairesel olarak hızlandı-

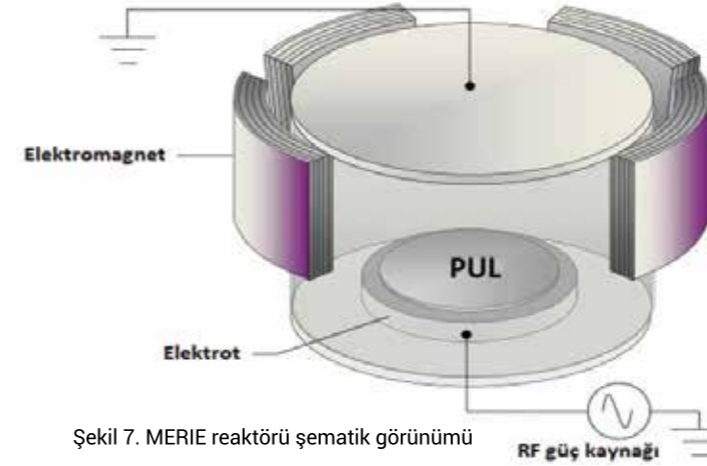
rıldığı için çok daha düşük gaz miktarı ile plazma oluşturulabilmektedir. Böylece 2 mT (militor) gibi düşük basınçlarda reaksiyon yapılabilir. RIE reaktörde olduğu gibi kuru pompa ve turbo pompa vakumlama işlemini gerçekleştirmektedir. Ayrıca bu reaktörde pul yüzeyine çarpacak iyonların hızını ayarlamak amacıyla ikinci bir RF güç kaynağı da bulunmaktadır (Şekil 5). Düşük basınç ve ikinci RF kaynağı, daha seçici ve daha anizotropik bir aşındırmanın gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. YİTAL'de 2 adet ICP reaktörü bulunmaktadır. Bu reaktörlerin birinde poli-silisyum değerinde metal katmanları (Al, Ti ve TiN) aşındırılmaktadır. Aşındırıcı gaz

olarak HBr (hidrojen bromür), Cl₂ (klor), O₂ (oksijen) ve Ar (argon) gazları kullanılmaktadır. HBr ve Cl₂ farklı metallerin ve polisilisyumun aşındırılmasında esas aşındırıcı gazlardır. O₂, RIE'de belirtildiği gibi reaksiyonu hızlandırmakta veya anizotropik bir profil oluşturmaktadır. Ar gazı ise fiziksel bombardıman ile aşındırma yaparak reaksiyon hızına ve seçiciliğe katkı sağlamaktadır.

Şekil 6'da CMOS sürecinde geçit polisilisyum oluşturmak için gerçekleştirilen aşındırmanın SEM görüntüleri verilmiştir. Seçici aşındırma reçetesi uygulanarak polisilisyum(2000 Å) anizotropik olarak aşındırılırken, polisilisyumun altındaki geçit silisyum dioksit tabakası (60 Å) aşındırılmadan bırakılmıştır.

MERIE (Magnetron Enhanced Reactive Ion Etch) Reaktörü

Bu reaktörün çalışma basıncı RIE ile ICP reaktörlerinin çalışma basınçları arasındadır. Reaktör ICP mantığında çalışmaktadır ancak MERIE reaktöründe pulun konumlandırıldığı elektroda bağlı sadece



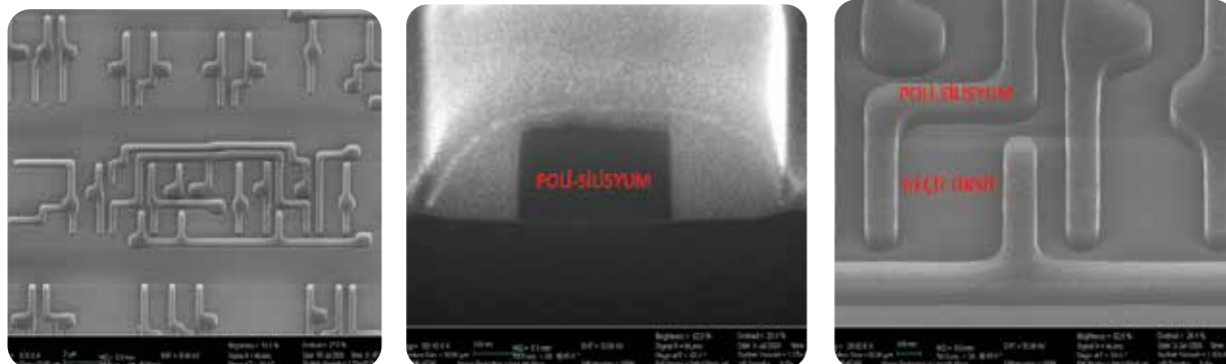
Şekil 7. MERIE reaktörü şematik görünümü

bir RF güç kaynağı vardır. Elektronlar reaktörü çevreleyen manyetik alan ile aktive edilmektedir (Şekil 7). Bu işlem ICP reaktöründe bobin ile endüktif olarak gerçekleştirilmektedir. MERIE reaktöründe manyetik güç, RF gücü, basınç ve gaz oranları ayarlanarak 7 µm derinliğe kadar silisyum aşındırma yapılabilir. Bu reaktörün YİTAL'de temel kullanım amacı, izolasyon için SiO₂ doldurulmak üzere STI (shallow trench isolation) ve DTI (deep trench isolation) çukurları oluşturmaktır. Bu proseslerde HBr, NF₃ (azot triflorür), Cl₂, CF₄, He-O₂ gazları kullanılmaktadır. Bu gazların silisyum ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan bazı yan ürünler, yan duvarlarda birikerek bir depolama işlemi gerçekleştirmektedir. Böylece yan duvarlar korunmakta ve aşınma sadece dikey yönde gerçekleşmektedir. Özellikle He-O₂ gaz karışımının besleme oranı, aşındırılacak çukurun eğimini doğrudan etkilemektedir. He-O₂ gaz oranı arttırıldığında daha düşük eğimli bir profil oluşturulmakta ve konik bir şekil verilebilmektedir. Şekil 8'de HBT proseslerinde MERIE reaktörü kullanılarak oluşturulmuş yaklaşık 7 µm derinliğe sahip DTI ve 0.5 µm derinliğe sahip STI çukurları görülmektedir. Bu çukurların yalıtım malzemesi olan SiO₂ ile boşluksuz doldurulması için eğimli bir profil oluşturulmuştur. Çukur profili, gaz karışım oranlarının, RF enerji kaynağının ve manyetik gücün hassas ayarı ile sağlanmaktadır.

Tüm aşındırma işlemlerinden sonra maske malzemesi olarak kullanılan fotorezisti uzaklaştırmak ve kimyasal reaksiyon sonucu oluşan yan ürünleri-polimerleri (uçuculuğu düşük bileşenler) oksitlemek için O₂ plazma yapılmaktadır. O₂ plazma sonrası kalan polimerleri temizlemek için pirana çözeltisi (H₂SO₄:H₂O₂) ve hidroksiamin (hydroxylamine-HDA) esaslı çözücüler kullanılmaktadır.



Şekil 8. DTI ve STI çukurları (HBT yapısı)



Şekil 6. Polisilisyum aşındırma sonrası SEM görüntüleri (CMOS yapısı)



Duygu Melek Elibol - Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

YİTAL'de Tümdevre Üretim Planlama ve Kontrol

“ Yarı iletken üretim sistemi boyunca ilerleyen bir üretim pulu destesinin, üretim sürecini (kuyruk, proses ve taşınma süresi dahil) tamamlamak için ihtiyaç duyduğu süreye çevrim süresi denir. ”

Elektronik endüstrisi, son otuz yılda dünyanın en büyük endüstrilerinden biri haline gelmiştir. Bu endüstrinin merkezinde ince silisyum pulların üzerine yaygın olarak mikroçip (microchip) olarak anılan tümdevrelerin (Integrated Circuits-IC) üretildiği yarı iletken teknolojisi yer almaktadır. [1]

YİTAL, 1983 yılından beri yarı iletken üretim teknolojilerini geliştiren, 1999 yılından itibaren de tümdevre üretimi alanında faaliyet gösteren bir araştırma laboratuvarıdır. YİTAL'in tümdevre üretimi beş temel aşamadan oluşmaktadır.

- Maske Üretimi
- Pul İşleme (Wafer Processing)
- Verim Haritalama (Wafer Probing)
- Kılıflama
- Fonksiyonel Test ve Yorma Testleri (Burn-in Test)

Pul işleme, tümdevre üretimi içerisinde en maliyetli ve en karmaşık olan aşamadır. Sürecin karmaşıklığına neden olan birçok etken bulunmaktadır. Yeniden girişli (re-entrant) üretim akışları, farklı proses türlerinin karışımı olan çoklu (batch) ya da tekli pul prosesleri, sıraya bağlı kurulum (set up) süreleri, kısa teslim süreleri ve ürün çeşitliliği bu etkenlerdendir. Pul imalatı ayrıca, yüksek sınıflı bir temiz alan ve temiz alanın içerisinde yer alması gereken cihaz parkı için çok yüksek miktarda yatırım maliyeti gerektirmektedir.

Pulların işlenmesi için kullanılan cihazların maliyetinin yüksek olması, kaynak kullanımında sınırlandırmalar gerektirir. Ekipman kullanımının (Machine Utilization) yüksek olması, yarı iletken endüstrisinde genel kabul görmüş bir üretim hedefidir. Bu durum, yeniden girişli üretim akışlarının oluşmasının ana nedenidir. Bu tür bir akış, pul üre-



tim tesislerinde klasik üretim tesislerindeki üretim kontrol problemlerinden farklı sorunlar doğmasına neden olur. Dinamik darboğazların ortaya çıkması buna bir örnektir. Sınırlı sayıdaki cihazların (optik ölçüm cihazları gibi) önünde bekleyen pullar, pul kuyruklarının artması sonucu darboğazlar oluşturur. Bu durum, üretim süreçlerinin tamamlanmasında pul desteleri için uzun bekleme ve uzun akış sürelerine neden olur.[2]

YİTAL bünyesinde, araştırma faaliyeti tamamlanan ürünlerin üretiminin yanı sıra yeni ürün ve üretim teknolojileri için de geliştirmeler yapılmaktadır. Bu durum, üretim aşamasında mühendislik bölümleri ile üretim bölümleri arasında karmaşık bir rekabet yaratır ve üretim hızında yüksek değişkenliğe sebep olur. Test aşamasında karşılaşılan üretim sisteminin diğer bir zorluğu ise test işlemleri sırasının ve test sürelerinin her zaman sabit olmamasıdır. Bu parametreler, son ürün verimlerine veya ürünün olgunluğuna göre değiştirilebilir.

Yakın gelecekte, YİTAL bünyesinde silisyum pul boyutlarında artışlar olacaktır. Ancak pul boyutlarından sağlanan verimlilik kazanımları, daha büyük boyutlu pulların getirdiği maliyet artışları nedeniyle maliyetlerde sağlanmak istenen azaltımların sadece bir kısmını telafi edebilecektir. Yani verim söz konusu olduğunda, kazançlar geçmişte olduğu kadar büyük olmayacaktır. Çünkü verimler zaten yüksektir ve bu durum geliştirme için bize daha az alan bırakmaktadır. Günümüzde operasyonel süreçlerin iyileştirilmesi, gerekli maliyet azaltımlarını gerçekleştirmek için en iyi fırsatı yaratıyor görünmektedir. Bu nedenle, planlama ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi pul işleme için önemini gittikçe artırmaktadır [1].

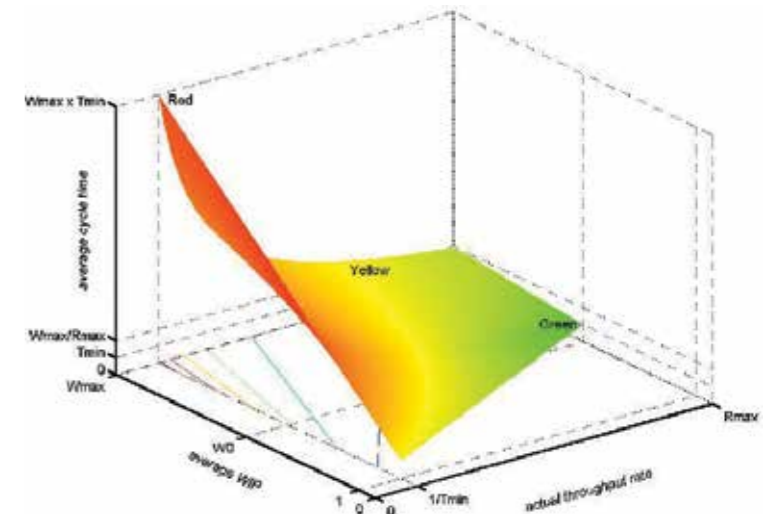
Bir pulun üretim sistemindeki üretim zamanı ortalama olarak tahmin edilebilir. Bu zamanın kontrol edilebilmesi, başarılı bir üretim takvimi için önemlidir. Bu amaç için simülasyon teknikleri kullanılır. Simülasyon (benzetim), gerçek karmaşık sistem-

“ Simülasyon, yarı iletken üretim sistemlerinde çevrim süresi tahmini ve performans analizi için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. ”

lerin davranışını zaman içinde taklit etmeyi ve bir sistemdeki değişkenler arasındaki karmaşık teorik ilişkilere bakış açısı sağlamayı amaçlar. Simülasyon, yarı iletken alanındaki üretim sistemlerinde çevrim süresi tahmini ve performans analizi için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. YİTAL'de de üretim planlama ve kontrol aşamasında çevrim süresi tahmini için simülasyon teknikleri kullanılır.

Yarı iletken üretim sistemi boyunca ilerleyen bir üretim pulu destesinin (YİTAL'de bu deste yirmi-beş adet pul kümesinden oluşur) kuyruk, proses ve taşınma süresi dahil edilerek üretim sürecini tamamlamak için ihtiyaç duyduğu süreyi, Çevrim Süresi (Cycle Time kısaca CT) olarak adlandırıyoruz. Ayrıca, üretim sistemi içinde işlenmekte olan veya işlem için kuyrukta bekleyen pulların sayısı, varış ve ayrılış bilgilerine göre belirlenebilir. Bu pul sayısına Devam Eden Çalışma Düzeyi (WIP) denir.

Kuyruk disiplini (Queuing discipline), bir sunucu kullanılabilir olduğunda hizmet için hangi pulun seçileceğini belirler. Bu disiplin YİTAL için İlk Giren İlk Çıkar (FIFO) kuralı ile sağlanır. Hizmet süresi sabit veya değişken bir süreye sahip olabilir. Sistem içerisinde WIP ve CT genellikle zamanla değişir. Analitik modellerde bu zaman bağımlılığını ele almak zor olduğu için ortalama zaman değerleriyle ilgileniriz. Bir kuyruk sisteminde, sistemin belirli bir durumda olma olasılığının zamana bağlı olmaması Kararlı Durum (Steady-State) olarak adlandırılır. WIP'in ve CT'nin Kararlı Durum değerleri,



Sanal Siber Güvenlik Laboratuvarı

Sanal Siber Güvenlik Laboratuvarı ve Tatbikat Altyapısı; siber güvenlik alanında nitelikli insan gücü geliştirmek, yurtdışı bağımlılığı azaltmak ve açık kaynak ekosistemini desteklemek için geliştirilen bulut temelli bir altyapıdır. BİLGEM Siber Güvenlik Enstitüsü tarafından geliştirilen bu altyapı ile ağ cihazları ve bilgisayarları içeren topolojiler tasarlanabilmekte ve kullanıcının tasarıma uygun ortamlara hızlı bir şekilde erişebilmesi sağlanmaktadır.

Sanal Siber Güvenlik Laboratuvarı ve Tatbikat Altyapısı, siber güvenlik eğitim, test, tatbikat ve analiz projelerinde ihtiyaç duyulacak kullan-at sanal çalışma ortamları için ortak altyapıları hızlı ve düşük maliyetle oluşturabilmektedir.

Günümüzde operasyonel süreçlerin iyileştirilmesi, gerekli maliyet azaltmalarını gerçekleştirmek için en iyi fırsatı yaratıyor görünmektedir. Bu nedenle, planlama ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi, pul işleme için önemini gittikçe artırmaktadır.

zaman uzadıkça oluşan ortalama zaman değerleri olarak kabul edilir.

Kararlı Durum sistemlerini uzun bir zaman dilimi içinde değerlendirdiğimizde, WIP ve CT değerleri sistemin başlangıç koşullarına bağlı olmayacaktır. Aşağıdaki denklem Kararlı Durum koşullarını karşılayan bir üretim sistemi için geçerlidir. λ miktarı, yarı iletken üretim sisteminde Verim (Throughput) olarak karşılık bulur. Verim, zaman birimi başına tamamlanan pulların sayısıdır. Bu denklem, "Little-Yasası (Little's Law)" olarak adlandırılır.[1]

$$WIP = \lambda \times CT$$

Little Yasası, belirli bir eşik WIP seviyesi kullanarak, WIP seviyesini ve üretim pulu destelerinin CT'sini sınırlamak için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. WR (Workload Regulation), CONWIP (Constant Work-in-Progress), CONLOAD (Constant Load) ve daha fazlası, pulların serbest bırakılmasını kontrol etmek için darboğaz oluşturan cihazların WIP seviyesini kullanır. Tüm bu yaklaşımlar, simülasyon deneylerinde tekdüze (uniform) veya rastgele (random) bir salıma karşı üstün performans göstermektedir. %90 ve daha fazla yüksek verim seviyelerinde, en iyi serbest bırakma politikaları WR, CONWIP ve CONLOAD'dur. Bununla birlikte, bu yöntemlerin pul işlemenin gerçekleştiği üretim

tesislerinde gerçekte uygulanabilmesi ve sürdürülebilirliği kolay olmamaktadır.[3]

Son yıllardaki yeni yaklaşımlar, ortalama CT ile CT'nin standart sapmasının en aza indirilmesi ve zamanında teslimatın en üst düzeye çıkarılmasına odaklanmaktadır. Ortalama CT'deki bir düşüşün, tesis performansı üzerinde çeşitli olumlu etkileri vardır. Minimum müşteri yanıt süresi, daha düşük WIP seviyesi ve daha düşük verim kaybı, bu olumlu etkilerdendir. Bununla birlikte, sistemde oluşan darboğazların sistemin kapasitesini sınırladığı varsayıldığından, darboğaz oluşturan cihazlara ait WIP seviyesinin önemli bir performans göstergesi olduğu düşünülmektedir.[3]

Kaynakça

[1] L. Mönch, J. (Professor of supply chain management) Fowler, and S. J. Mason, Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities : modeling, analysis, and systems. Springer, 2013.

[2] N. A. Muhammad, J. F. Chin, S. Kamarrudin, M. A. Chik, and J. Prakash, "Fundamental simulation studies of CONWIP in front-end wafer fabrication," J. Ind. Prod. Eng., vol. 32, no. 4, pp. 232–246, May 2015, doi: 10.1080/21681015.2015.1045562.

[3] J. Lohmer, C. Flechsig, R. Lasch, K. Schmidt, B. Zettler, and G. Schneider, "Order Release Methods in Semiconductor Manufacturing: State-of-the-Art in Science and Lessons from Industry," Sep. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/asmc49169.2020.9185201.

Yetenekler

- Sunucu sanallaştırma altyapısı
- Hızlı, güvenli ve izole laboratuvar erişimi
- Görsel laboratuvar tasarım ara yüzü
- Kullanıma hazır laboratuvar ortamı şablonları
- Uzmanlar tarafından hazırlanan sanal makine imajları
- Yeni sanal makine imajları oluşturma
- Kullanıcı gruplarına göre kota yönetimi

Kullanım Alanları

- Siber güvenlik analiz laboratuvarı
- Adli analiz laboratuvarı
- Uygulamalı eğitim ortamı
- Siber güvenlik yarışmaları ve tatbikatları



CMOS

Okuma Tümdevreleri

Dr. Mustafa Ufuk Demirci – Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

Okuma devreleri, ayırık bileşenler kullanılarak ya da tümleşik olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

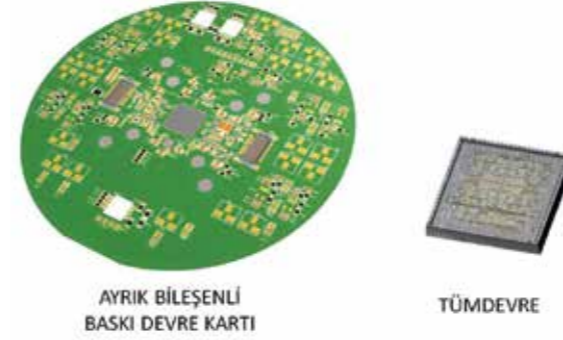
Günümüz teknolojisinde ışık, ses, görüntü, basınç, ivme, kimyasal madde gibi çevremizdeki fiziksel özelliklerin varlığını ve niteliklerini ölçmeyi sağlayan çok sayıda algılayıcı kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar çoğu zaman ölçülen nitelikle orantılı elektriksel bir işaret oluşturur. Örneğin YİTAL (Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı)'de üretilen fotodedektörler, üzerine düşen belirli bir dalga boyundaki ışığın şiddeti ile orantılı bir elektrik akımı üretir.

Algılayıcıların oluşturduğu bu elektriksel işaretlerin, veri olarak kaydedilmesi ve işlenebilmesi amacıyla Analog-Sayısal Dönüştürücü (ADC) devreleri kullanılarak sayısal işarete çevrilmesi gerekir. Ancak çoğu zaman algılayıcı sinyali düzeyleri ve süreleri oldukça düşük kaldığından doğrudan ADC ile örneklemek mümkün olmaz.



Bu nedenle algılayıcı çıkışlarında işaretleri yükseltip ADC kullanımına uygun düzeye getiren Okuma Devreleri kullanılır.

Okuma devreleri, ayırık bileşenler kullanılarak ya da tümleşik olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Ayırık bileşenlerin bir araya gelmesiyle üretilen baskı devre kartlarında İşlemsel Yükselteç (OP-AMP)'ler, gerilim düzenleyiciler, sayısal kontrol devreleri, diferansiyel dönüştürücüler gibi aktif devrelerin yanında çok sayıda direnç ve kondansatör kullanılır. Tümleşik Okuma Devrelerinde ise bu bileşenlerin çoğu tek bir çip (tümdevre/kırımcı/yonga)



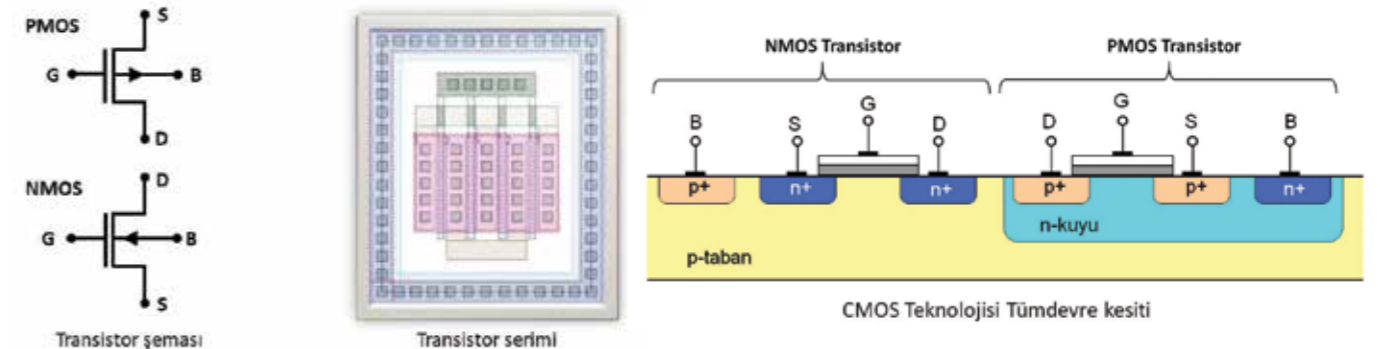
üzerinde birarada üretilerek büyük ölçüde alandan tasarruf sağlanır ve çok daha ufak boyutlarda okuma devresi kartları elde edilir. Hatta ADC'yi de tümdevreye dahil ederek okuma devresinin parçası olarak üretmek mümkündür.

Bileşenleri tek bir tümdevre olarak üretmenin, düşük boyut kazanımı yanında, düşük maliyet, düşük güç tüketimi, eş bileşenler arası daha az değişkenlik gibi çeşitli faydaları vardır. Ayrıca ayırık kartlarda sadece hazır olarak satılan ürünleri kullanma kısıtı varken, tümdevrelerde daha özgür bir tasarım ile yüksek işlevsellik potansiyeli elde edilir.

Dedektör Okuma Tümdevreleri

YİTAL'de üretilen Fotodedektör algılayıcılar saha uygulamalarında halen ayırık bileşenli okuma devreleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu okuma devrelerini tümleştirme yönünde çalışmalar devam etmektedir.

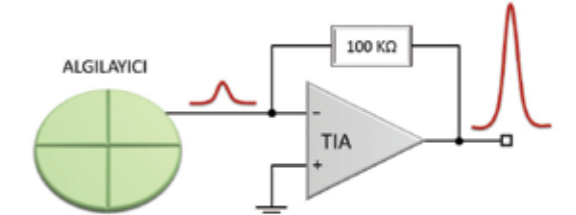
YİTAL'in 0,7µm CMOS tümdevre üretim teknolojisi, Fotodedektör Okuma Devresini tümleştirerek tek bir çip halinde üretmek açısından oldukça uygundur. Bu teknolojiye bulunan bileşenler NMOS ve PMOS transistörler, direnç, kondansatör ve diyotlardır. Bu bileşenlerle okuma devresini oluşturan İşlemsel Yükselteç, Gerilim Kontrollü Yükselteç (VGA), Sayısal Kontrol Devresi, Diferansiyel Dönüştürücü, Akım Aynaları, Gerilim Düzenleyici gibi tüm alt-bloklar tasarlanabilir. MOS transistörler anahtar veya yükseltici olarak kullanılabilir.



Giriş Yükseltici ve Gürültü

Okuma devrelerinde ölçülebilir en düşük işareti belirleyen blok, Giriş Yükseltici'dir. Genel olarak, algılanabilen işaret seviyesini bu yükselticinin gürültüsü sınırlar. Bu nedenle bu kat oldukça düşük gürültü ile tasarlanmalıdır. Bu da girişteki transistörlerin boyutu ayarlanarak gerçekleştirilir. Giriş katı, algılayıcı işaretini büyük ölçüde kuvvetlendirince için, sonraki katların gürültüsünün işarete etkisi ihmal edilebilir.

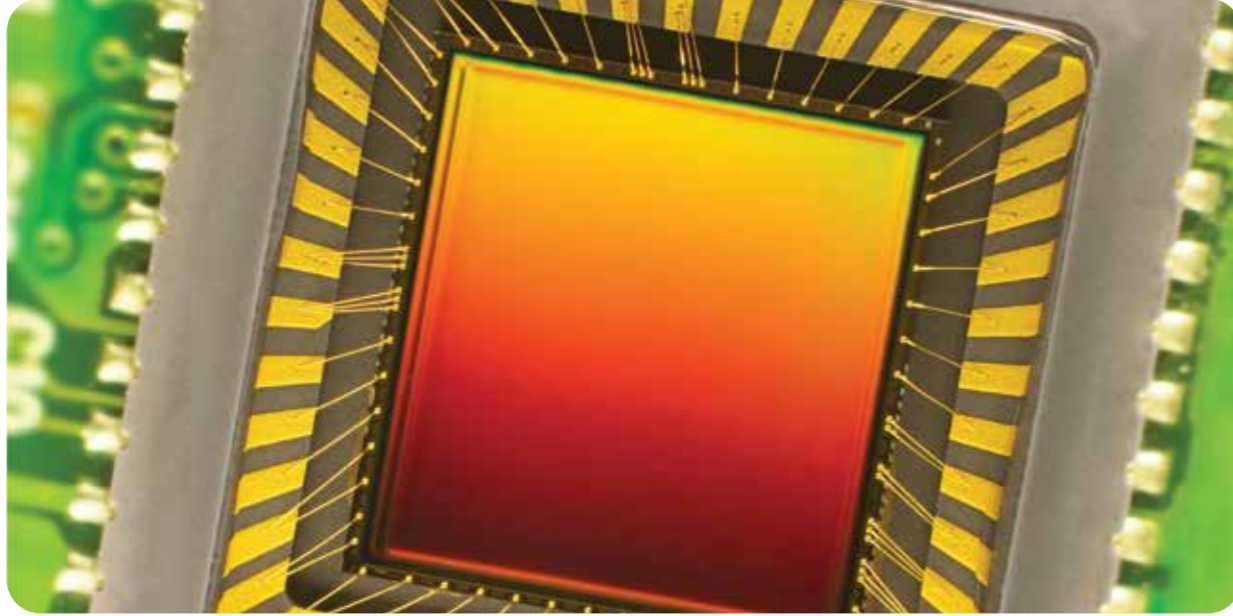
Fotodedektör algılayıcıların çıkış işaretleri akım olduğundan, giriş yükselticileri Akım – Gerilim Dönüştürücü (TIA) olarak tasarlanır. TIA'ların bir özelliği de giriş empedanslarının düşük olmasıdır. Böylece dedektör için gerekli topraklama sağlanmış olur.



Dinamik Aralık

Okuma devrelerinde geniş bir dinamik çalışma aralığı gerekebilir. Örneğin bazı algılayıcılar 0,5µA – 10mA arasında çıkış akımı üretmektedir ki bu 20,000 kat dinamik aralığa eşittir. Okuma devresi çıkış gerilimleri, DC besleme gerilimi ile sınırlıdır, bu da genelde 5V en yüksek genliğe denk gelir. Ayrıca çıkışları fazla gürültü karışmadan ADC'ye aktarabilmek için genlikler 10 mV seviyelerinin üzerinde olmalıdır. Bu da okuma devresini 500 kat dinamik aralık ile sınırlar.

Okuma devresinin çalışma aralığını artırmak için Kazanç Kontrollü Yükselteçler (VGA) kullanılır. İşaret seviyeleri yükseldikçe Kazanç düşürülerek devre çıkış geriliminin 5V sınırına ulaşmış doyması önlenir. Böylece dinamik aralık artırılmış olur. VGA kazancı sayısal kontrol girişleri ile ayarlanır.

**Bant Genişliği**

Okuma devresinin bant genişliği, algılayıcı çıkış işaret gereksinimlerine göre ayarlanır. Bant genişliği ne kadar düşük olursa, gürültü o kadar iyi filtrelenir. Bu nedenle bant genişliği gerekenden fazla olmamalıdır. Öte yandan, işaret darbe şeklinde ise, bant genişliğinin darbenin yükselme/düşme zamanını bozmayacak kadar yüksek olması gerekir. Bu durumda optimum bir bant genişliği seçilir.

Bazı algılayıcılarda faz bilgisi önemlidir ve yükselteçlerin işaret fazını bozmadan aktarması gerekir. Faz hatasının 1 derecenin altında olması için Yükselteç bant genişliğinin işaret frekansından en az 20 kat fazla olması gerekir.

Örneğin, 0,7 μ m CMOS ile 1 GHz Kazanç – Bant Genişliği çarpımı olan yükselteçler tasarlanabilmektedir. Bu durumda kazanç 10 olan bir gerilim yükseltecinin 3dB bant genişliği 100 MHz olur. Daha hızlı devreler için YİTAL'in 0,25 μ m CMOS teknolojisi kullanılabilir.

Kararlılık

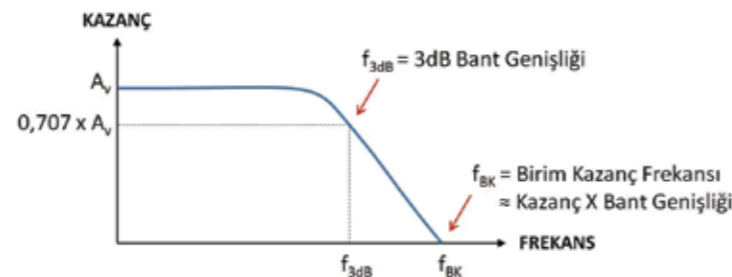
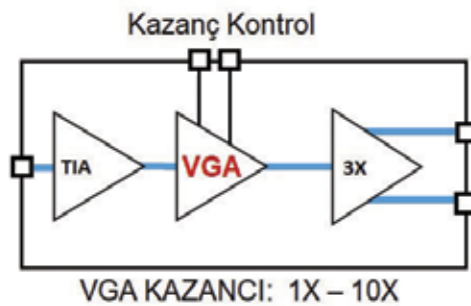
Okuma devresi tasarımlarında dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da yükselteçlerin kararlılığıdır. CMOS teknolojisi ile Açık-Çevrim kazançları

1000 ile 10,000 arası değişen İşlemsel Yükselteçler tasarlanmaktadır. Bu yükselteçler genel olarak geri besleme ile kullanıldığından istenmeyen salınımların oluşma riski vardır. Salınımları engellemek için yükselteçler baskın bir kondansatör kullanarak kararlı olacak bir şekilde tasarlanır. Ayrıca, özellikle çok yüksek kazanç (>100 dB) olan devrelerde giriş ve çıkışların birbirine yakın olmamasına dikkat edilir.

DC Güç Tüketimi

CMOS Teknolojisinin bir faydası da düşük güç tüketimine sahip tasarımlar yapılabilmesidir. Sayısal devrelerde MOS transistörler herhangi bir işlem yapılıyorsa akım çekmezler, sadece sayısal işaret değişimi anında güç harcarlar. Analog devrelerde de MOS transistörlerin yüksek çıkış empedansı sayesinde, yüksek kazançlar elde ederek düşük besleme akımlı tasarımlar yapmak mümkündür. Okuma devresi çıkışındaki büyük kondansatörleri sürmek için gereken yüksek akımlar da sadece işaret yükselme-düşme anlarında güç tüketimine neden olur.

Kısaca CMOS tasarımlarda, genel olarak işaret değişim anlarında anlık güç tüketimi oluşur. Sabit DC besleme güç tüketimi düşüktür, bu da pil ömrünü uzatmaktadır.



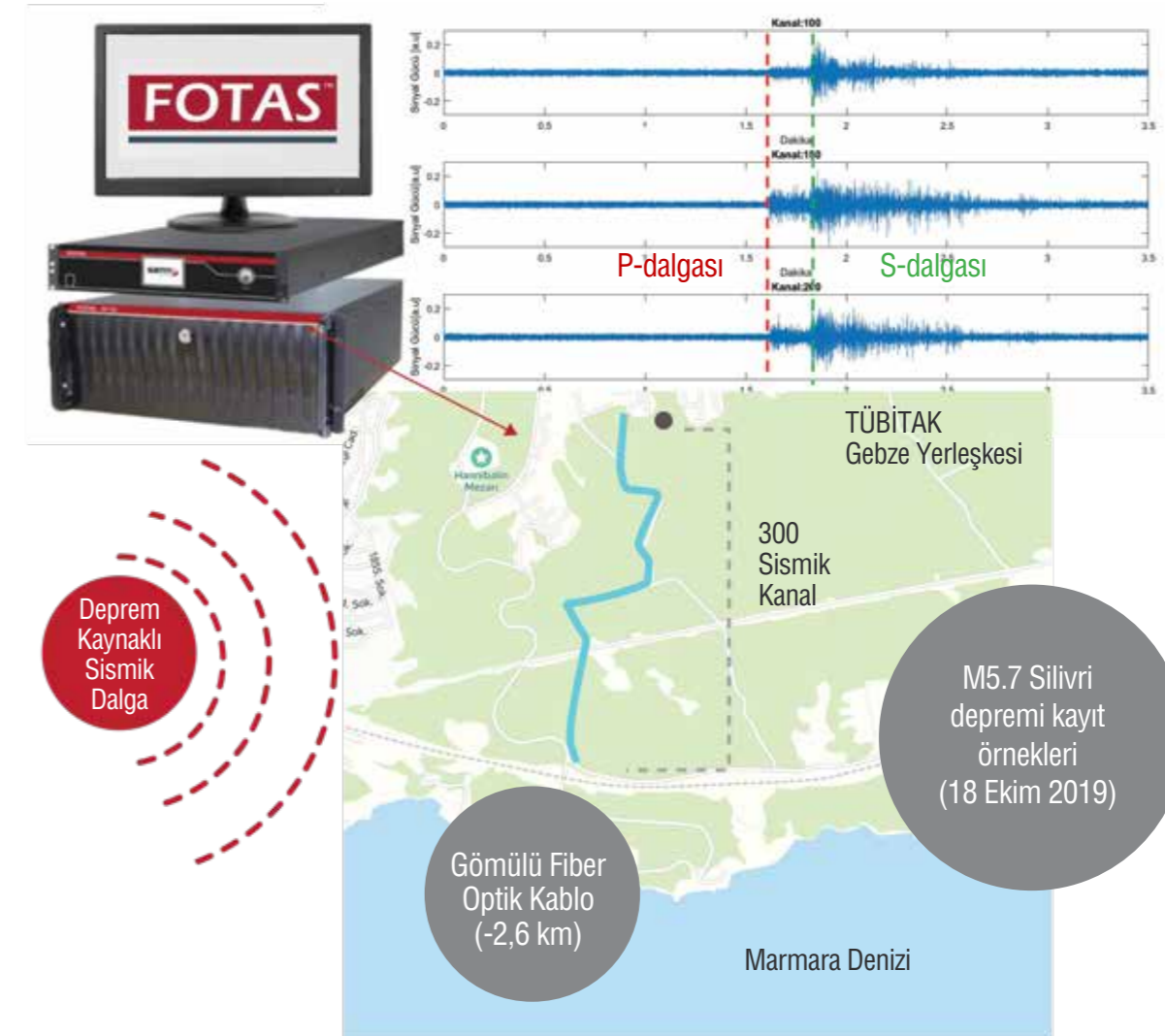
Fiber Optik Tabanlı Akustik Sensör (FOTAS) Projesi

BİLGEM, fiber kablo teknolojisi ile sismik hareketleri ölçüyor. Prototip çalışmalarında sona gelinen Fiber Optik Tabanlı Akustik Sensör (FOTAS) Projesiyle geliştirilen teknolojinin endüstriye kazandırılması için özel sektörle görüşmelere başlandı.

Fiber optik kabloların akustik algılayıcı olarak kullanımı ile kablo güzergahı boyunca akustik titreşime neden olan her türlü insan kaynaklı (yürüme, kazma, delme, patlatma, vb.)

ve doğal (kaya düşmesi, heyelan, deprem, vb.) olayları algılamak mümkün.

Fiber Optik Tabanlı Akustik Sensör (FOTAS) sistemi ile ülkemizde gerçekleşen depremler kayıt altına alınmaya başlandı. FOTAS ile Marmara Bölgesi'ndeki depremler kolay bir şekilde algılanırken, uzak bölgelerdeki depremler de şiddetine göre tespit edilebiliyor.



M5.7 Silivri depremi kayıt örnekleri (18 Ekim 2019)

Gömülü Fiber Optik Kablo (-2,6 km)



Yarı İletken Teknolojisinde Fotolitografi Süreci

Erhan Özduğan – Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

YİTAL, çeşitli çözünürlük geliştirme yöntemleri kullanarak 0.24 µm kritik boyuta sahip transistörler ve devreler üretmektedir.

Haberleşmeden bilişim ve otomasyon sistemlerine kadar geniş bir alanda kullanıma sahip olan yarı iletken aygıtların üretiminde temel adımlardan bir tanesi de fotolitografi sürecidir. Fotolitografi süreci, yarı iletken üretiminde ana itici güç olup bu endüstrinin kalbi konumundadır. Baş döndürücü bir hızla gelişmekte olan yarı iletken teknolojisinin seviyesini belirleyen en önemli ölçütlerden birisi, kritik boyut (CD) olarak adlandırılan tümdevre üzerindeki en küçük boyuttur. Kritik boyutun küçülmesinin hedeflenmesi, fotolitografi sürecindeki gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Fotolitografi sürecinin gelişmesiyle boyutlar küçülmüş, içerisinde milyonlarca yapının yer aldığı devrelerin üretilmesine olanak sağlamıştır. Boyutlardaki küçülmenin temel amacı, daha hızlı çalışan devrelerin üretilmesi olup bunun yanında düşük üretim mali-

yeti, düşük güç tüketimi ve iş kabiliyetinin artması gibi özellikleri de beraberinde getirmektedir.

Fotolitografi ilk olarak Alman bilim adamı Aloys Senefelder tarafından bulunmuştur. Litografi kelimesi, Lithos (taş) ve Graphia (yazmak) olmak üzere iki Latince kelimeden ortaya çıkmıştır. Yapılan ilk baskı, güneş ışınları kullanılarak ıslak aşındırma ile 1827 yılında Lemaître tarafından basılan Cardinal d'Ambosie'nin portresidir [1].

Fotolitografi

Fotolitografi mor ötesi (UV), derin mor ötesi (DUV) veya uç mor ötesi (EUV) ışık kaynağı kullanılarak bir maske üzerindeki modelin çoğunlukla silisyum pul üzerine aktarılması işlemidir. Fotolitografi sürecinde, fotorezist olarak adlandırılan ışığa duyarlı bir

malzeme ile kaplanan numune yüzeyi, ışığa maruz bırakılır ve uygun çözelti ile maruz kalması sonucu model ortaya çıkar. 1960'lı yıllarda 10 µm teknolojisi ile başlayan bu süreç günümüzde 10 µm boyutlarına kadar düşmüş ve düşmeye devam etmektedir [1].



Şekil 1. Cardinal d'Ambosie portresi

Yıl bazında üretilen en küçük boyuttaki transistör ve kullanılan teknolojiler Şekil 2'de gösterilmektedir. Son geliştirilen fotolitografi sistemleri (EUV), CO₂ lazer sistemi kullanarak saatte 100'den fazla pul işleyebilmektedir. 10 µm'den daha küçük yapıların üretilmesini sağlayan EUV fotolitografi sistemlerinde kullanılan lazerin dalga boyu 13,5 µm dir.

Maske üzerindeki veriyi pul üzerine aktarma süreci Şekil 3'deki aşamalardan oluşmaktadır. Fotorezist kaplama işleminden önce pul yüzeyinde bulunan kimyasal artıkların ve toz parçacıklarının temizlenmesi gerekmektedir. Pul yüzeyinde bulunan bu kirlilikler, fotorezist kaplama sırasında homojen boyut dağılımını bozmaktadır. Pullar fotolitografi sürecinden önce mutlaka temizlik aşamasından geçmelidir. Öncelikle fotolitografi sürecinin çalışacağı ortam yani temiz oda genel olarak kabul gören Federal Standart 209E'ye göre en az 10 sınıfta olmalıdır [1,3]. Yani birim ft₃ hava içerisinde 0,5 µm'dan büyük en fazla 10 adet partikül bulunmalıdır. YİTAL'de fotolitografi süreçlerinin yürütüldüğü temiz alan, sınıf 10 kategorisindedir.

Pullar temizlendikten sonra yüzeyin sonraki işlem için hazırlanması gerekmektedir. Fotorezistin yüzeye iyi tutunması için yüzey geliştirici (adhesion promoter) bir kimyasal uygulanmaktadır. Temizleme işleminden sonra pul yüzeyinde OH bağları oluşmaktadır. Öncelikle ısıtma işlemi yapılarak pul

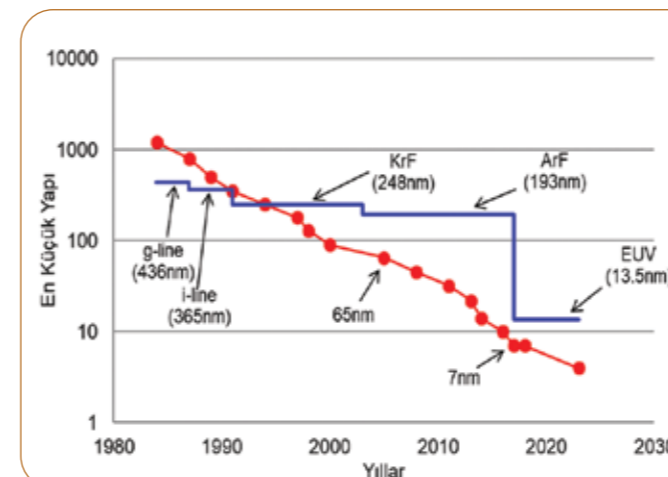
yüzeyinde bulunan nem uzaklaştırılmakta olup ardından Hekzametildisilakzan (HMDS) uygulanarak pul yüzeyi hidrofo-bik bir yapıya dönüştürülmektedir [1,3].

Fotorezist

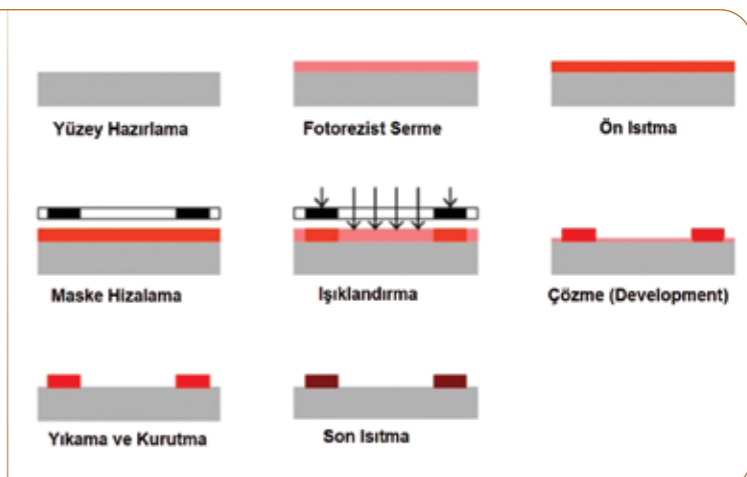
Fotorezist ışığa duyarlı organik bir kimyasaldır. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tip fotorezist bulunmaktadır. Pozitif fotorezist uygulandığında ışığa maruz kalan yerler uzaklaştırılmaktadır. Işık alan bölgedeki kimyasal yapı bazik bir çözeltide çözünebilir hale gelmektedir.

Işık almayan bölgelerde ise herhangi bir kimyasal değişim olmamaktadır. Negatif fotorezist ise pozitif fotorezistin tam tersidir. Işık almayan bölgedeki fotorezist çözünebilir bir yapıya sahiptir. Işık alan bölgelerdeki fotorezist ise çapraz bağlı bir yapıya dönüşmekte ve çözünme mümkün olmamaktadır [1,3]. Fotorezistlerin içerisinde ağırlık olarak %50-90 çözücü, %10-40 reçine, %1-8 ışığa duyarlı kimyasal ve %1'den az katkı maddeleri bulunmaktadır.

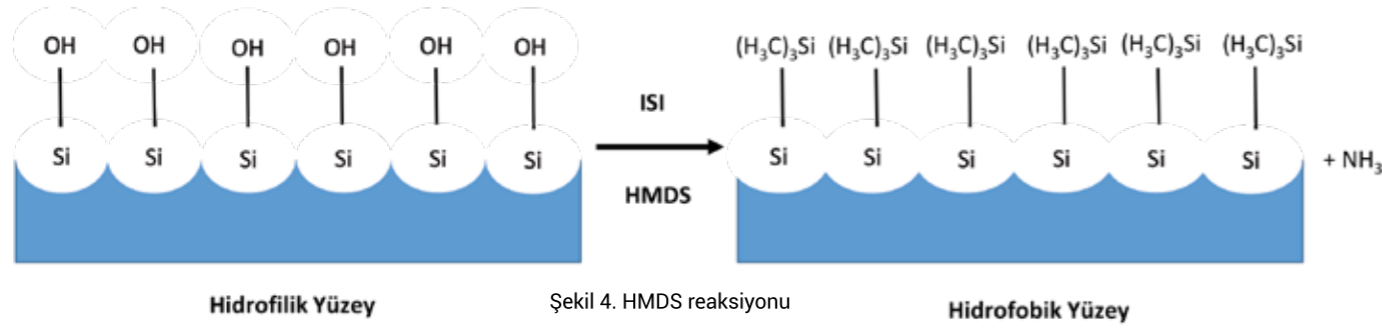
Pozitif fotorezistler için en yaygın kullanılan bileşenler; fenol formaldehit Novolak reçine ve Diazo nafta quinon (DNQ) foto aktif kimyasaldır [1,3]. DNQ, yani foto aktif bileşen, ışıklanma sırasında kimyasal reaksiyona girer, bu olaya fotoliz denir. DNQ'ye ait fotoliz mekanizmasında Şekil 5'de gösterildiği gibi öncelikle azot salınımı ile beraber ketokarben oluşmaktadır. Sonrasında ketokarbenin ketene düzenlenir ve havadaki nem ile beraber karboksilik asit türevinde bir kimyasal meydana gelir. Bu yüzden fotolitografi yapılan ortamın nem miktarı çok önemlidir. Eğer havadaki nem miktarı yeterli gelmezse keten, fotorezist içerisinde bulunan fenol reçine ile tepkimeye girerek alkali çözeltilerde çözünmesi mümkün olmayan çapraz bağlı bileşikler oluşturmaktadır [1,2].



Şekil 2. Litografi gelişim süreci



Şekil 3. Fotolitografi süreci



YİTAL'de temiz alan sıcaklık ve nem değerleri yüksek hassasiyet ile takip edilmekte olup fotolitografi süreci için gerekli şartlar sağlanmaktadır. Ağırlık bakımından en çok oranda bulunan çözücü, fotorezistin sıvı halde bulunmasını sağlamaktadır. Ayrıca çözücü miktarında değişim yapılarak karışımın viskozitesi ayarlanabilmektedir. Viskozite değişimi yapılarak pul yüzeyine kaplanacak fotorezistin kalınlığı değiştirilebilmektedir [1,2].

Fotorezistin, pul yüzeyine istenilen kalınlıkta ve homojen bir şekilde kaplanması gerekmektedir. Bu işlem için birçok teknik kullanılmaktadır. YİTAL üretim sürecinde de yer alan ve günümüzde en yaygın olarak "Spin Coating" adı verilen merkezkaç kuvvetinden faydalanılan teknik kullanılmaktadır. Dönmekte olan pulun tam orta noktasına akıtılan fotorezist, merkezkaç etkisi ile kenarlara doğru itilerek homojen bir kaplama elde edilmektedir [1,2].

Pul yüzeyine fotorezist kaplandıktan sonra içerisinde bulunan çözücünün uzaklaştırılması gerekmektedir. Fotorezist ilk ısıtma işleminin amacı, çözücünün fazlasını uzaklaştırmak yoluyla polimer zincirlerinin belirli bir düzen çerçevesinde sıkışmasını sağlamaktır. Bu teknik kullanılarak yapılan kaplamalarda fotorezist içerisinde %10-35 arasında çözücü kalmaktadır. Genellikle 70-100°C arasında yapılan ön ısıtma sonucunda bu fotorezist içerisinde kalan çözücü miktarı % 5 ve altına düşmektedir. Ön ısıtma işleminin diğer

faideleri; fotorezistin yüzeye daha iyi tutunması, ışıklandırma sırasında azot patlamalarının önüne geçmesi ve maskenin kirliliğini azaltması olarak sıralanabilir [1-3].

Işıklandırma

Fotolitografide en önemli basamak ışıklandırma teknikleri ve teknolojileridir. Yarı iletken teknolojinin gelişmesi yani kritik boyutun küçülmesi, fotolitografi sürecinde kullanılan ışıklandırma teknikleri ve ışık şiddetinin gelişmesi ile gerçekleşmektedir. Şekil 7'de gösterildiği gibi herhangi bir ışık kaynağından çıkan ışınlar maskeden geçerek istenilen yapıları oluşturmaktadır. Burada yer alan maske iki tip alandan oluşmaktadır. Bunlar; mat ve geçirgen yüzeylerdir. Şekil 7'den anlaşılacağı üzere maskenin açık alanından geçen ve pul üzerine düşen ışık şiddeti değişiklik göstermektedir. Fotolitografi cihazlarının doğası gereği oluşan normal dağılım kaçınılmazdır [2,3].

Maskeden geçen ve yayılım yapan ışıklar objektif lense giriş yapar. Yayılım yapan ışıklar x ve y eksenlerini içeren düzleme düşmektedir. Objektif lenslerin boyutları sınırlı olduğu için bütün yayılım yapan ışıklar mercekte toplanamamaktadır. Objektif lensler genel olarak dairesel bir yapıya sahip oldukları için lens girişindeki açıklıkta dairesel olacaktır. Bu açıklığa sayısal açıklık (numerical aperture, NA) denilmektedir. Sayısal açıklık, objektif lensin çapı

ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Sayısal bir denklem ile göstermek gerekirse; maskeden yayılan ışıkların maksimum lense giriş yapma açısının yarısının sinüs değeri ile ifade edilebilmektedir ($NA = n \sin \alpha$) [2,3].

Sayısal açıklık ne kadar fazla olursa mercekte toplanan ışıklar o kadar fazla olur ve pul üzerinde daha kaliteli bir görüntü oluşur. Fotolitografi sürecinde çözünürlük yani pul üzerinde şekillenen en küçük boyut, yaygın olarak aşağıda verilen Rayleigh Kriteri ile tanımlanır.

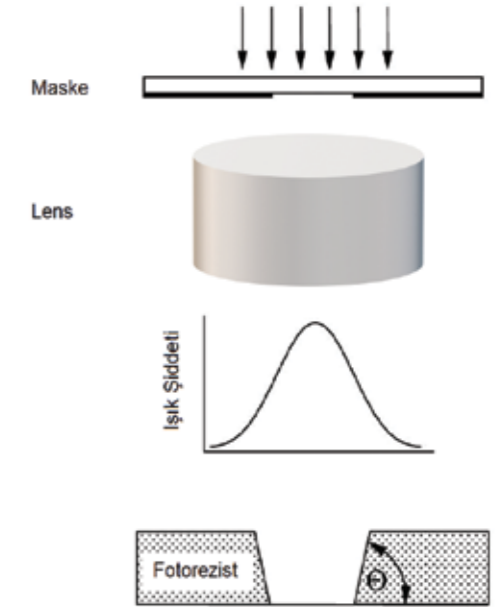
$$R = k_1 \lambda / NA$$

Denklemden yer alan λ (dalga boyu) ve NA değerleri fotolitografi cihazı ile ilgili iken k_1 sabiti ortamın, fotorezistin ve development sürecinin özelliklerine göre değişmektedir [2,3].

Şekillendirme cihazlarının önemli özelliklerinden biri de odak derinliğidir. Şekil 9'daki gösterimden anlaşılacağı üzere odak derinliği (DOF); ideal görüntünün oluştuğu yer ile gerçek durumda oluşabileceği en uç yer arasındaki farkı göstermektedir. Pul yüzeyindeki yükseklik farkından dolayı şekillendirme aşamasında hatalar meydana gelebilmektedir. DOF değerinin büyük olması, fotolitografi sürecinde pul yüzeyinde yükseklik farkından dolayı oluşabilecek hataların tolere edilebileceğini gösterir. Odak derinliği yine Rayleigh tarafından aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir [2,3].

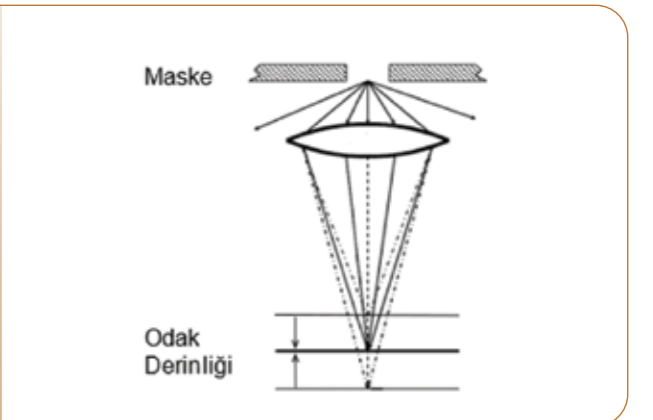
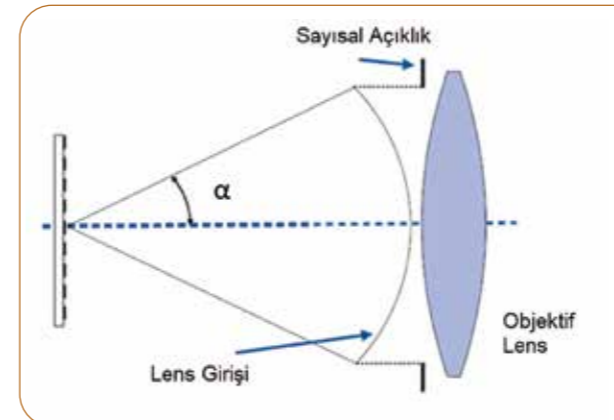
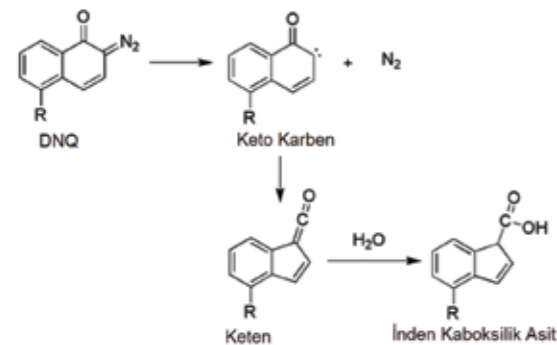
$$DOF = k_2 \lambda / NA^2$$

Fotolitografi sürecinde çözünürlüğü yani kritik boyutu küçültmek için ilk eşitlikten yola çıkarak sayısal açıklığın artırılması gerektiği düşünülse de ikinci eşitlik incelendiğinde odak derinliğini artırmak için sayısal açıklığın düşürülmesi gerekmektedir. İki eşitliğin bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir [2,3].



YİTAL üretim hattında i-line ve g-line dalga boyuna sahip şekillendirme cihazları yer almaktadır. 436 μm (g-line) dalga boyuna sahip olan cıvalı ark lambalı fotolitografi sistemlerinde kritik boyut 0.7 μm iken 365 μm (i-line) dalga boyuna sahip fotolitografi sisteminde kritik boyut 0.35 μm 'dir [1-3]. Ayrıca çeşitli çözünürlük geliştirme yöntemleri kullanılarak kritik boyut düşürülebilmektedir. YİTAL çeşitli çözünürlük geliştirme yöntemleri kullanarak 0.24 μm kritik boyuta sahip transistörler ve devreler üretmektedir.

Adımlayıcı ve tarayıcı fotolitografi sistemlerde ikinci lens sistemi, maske üzerindeki boyutu belirli bir oranda (1:5) küçültürken pul yüzeyine aktarmaktadır. Bu sistemlerde cihaz, kırmık boyu kadar adımlamalar yaparak pulun üzerinde birden fazla yonga oluşmasını sağlamaktadır. Bu adımlama ve ışıklandırma işlemlerinin tekrarı ile pul yüzeyinin tamamı şekillendirilmektedir [2,3].



Şekil 5. Foto Aktif Bileşen Reaksiyonu

Şekil 6. Fotorezist Kaplaması

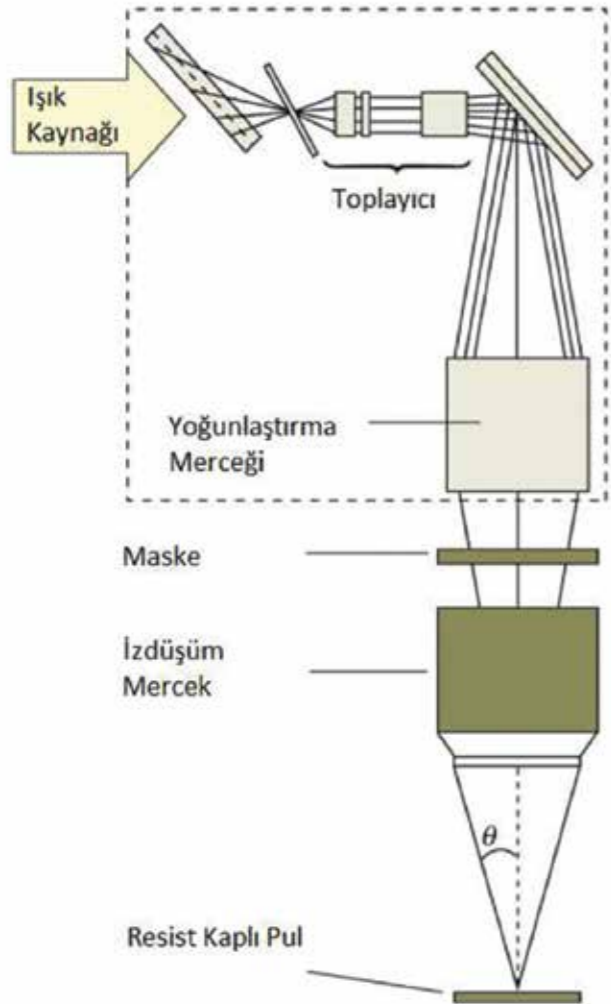
Şekil 8. Sayısal Açıklık

Şekil 9. Odak Derinliği

Adımlayıcıların aydınlatma sistemleri, istenilmeden dalga boylarını filtrelemeli ve istenilen dalga boyunda ışığa geçirgen olmalıdır. Yine bunun dışında ışıklandırma dozunu kontrol edebilmeli ve homojen bir ışık sağlamalıdır. Maskenin ışıklandırması büyük bir alanda homojen olmalıdır. Aydınlatma sistemlerindeki homojenlik, bir dizi merceğin kullanılmasıyla artırılabilir [2,3].

Optik litografi, şekillendirme için belirli bir dalga boyundaki ışık kaynağını kullanırken daha yeni teknolojilerde iyon demeti, elektron demeti gibi kaynaklar kullanılmaktadır. Ayrıca yeni teknolojiler ile maskesiz şekillendirme yapmak da mümkündür [4,5].

Işıklanma sonrası ısıtma işlemi (PEB) yapılarak fotorezist moleküllerinin ısı olarak hareketiyle ışıklanmış ve ışıklanmamış moleküllerin tekrar düzenlenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede duran dalga etkileri engellenmekte, fotorezist yan duvarı düzgünleşmekte ve çözünme daha düzenli olmaktadır.



Şekil 10. Adımlı ve Tekrarla Şekillendirme Sistemi

tır. Uzun süre ve yüksek sıcaklıkta yapılan ısıtma, fotorezistin çözünmesini yavaşlatmakta veya durdurmaktadır [4]. PEB' in etkinliği fotorezistin içerdiği ışığa duyarlı olan bileşenin, foto-aşınma difüzyon sabitlerine, moleküllerinin büyüklüğüne ve ilk ısıtma işlemi sonrasında kalan çözücünün miktarına bağlıdır. PEB sıcaklığı fotorezistin içerdiği reçinenin camı geçiş sıcaklığına bağlıdır ve camı geçiş sıcaklığının, PEB sıcaklığının üzerinde olması önerilmektedir [2,6].

Yarı iletken üretiminde, genel olarak fotorezist uzaklaştırılması için bazik çözeltiler kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan kimyasal ise içerisinde herhangi bir metalik iyon bulundurmayan tetrametil amonyum hidroksit (TMAH) çözeltilisidir. Sodyum ve potasyum hidroksit çözeltileri kapı oksidinin (gate oxide) bütünlüğünü azalttığı için tercih edilmemektedir. Fotorezist uzaklaştırma işlemi; pul yatay konumdayken üzerine tamamen kaplayacak çözelti akıtılarak ve bir süre bekletilerek yapılmaktadır. Fotorezistin uzaklaşması için yeterli süre kadar bekletildikten sonra pul de-iyonize su ile temizlenir ve kurutulur [2,3].

İyon ekme ve aşındırma öncesi fotorezist yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi ile sertleştirilerek kararlı bir yapıya dönüştürülmektedir. Bu işlem sırasında fotorezist içinde çapraz bağlar oluşmakta, kalan nem ve gazlar giderilmektedir. Fotorezistin son ısıtma sıcaklığı camı geçiş sıcaklığı ile sınırlı kalmaktadır. Camı geçiş sıcaklığının üzerinde amorf yapıdaki polimer zincirlerinin moleküler hareketi gerçekleşmektedir. Bu hareket camı geçiş sıcaklığı altında durmaktadır. Camı geçiş sıcaklığı üzerinde, fotorezist akmakta ve şekillendirme profili bozulmaktadır [2,3].

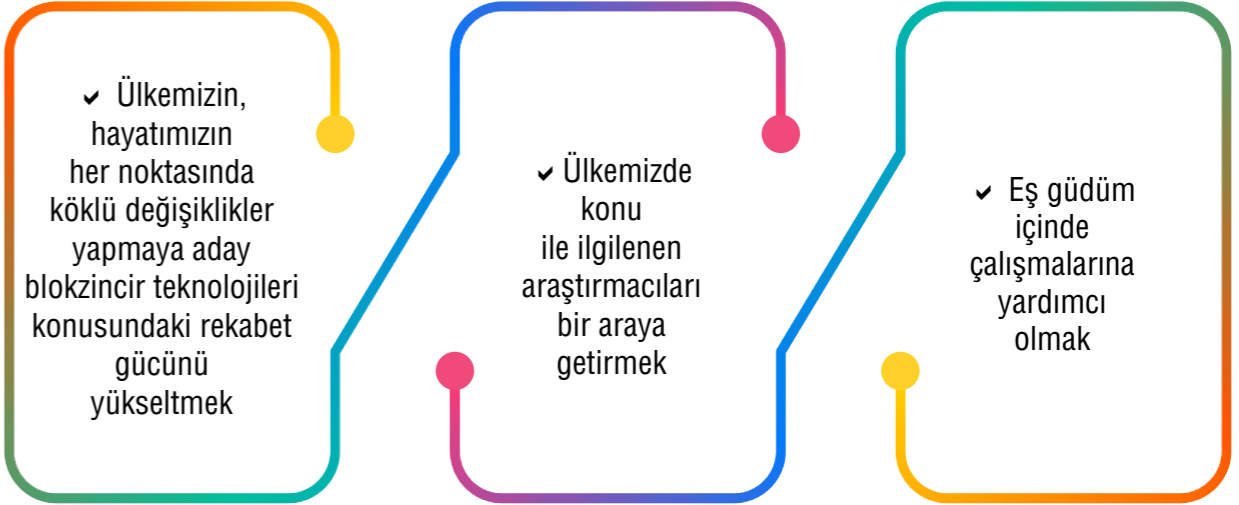
Kaynakça

- [1] Karis, A., "PR Thickness Examination Photolithography in the Manufacturing of Transparent Displays", Thesis, Metropolia University, 2019
- [2] Levinson, H.J. (2010). Principles of Lithography (Third Edition). Washington USA: SPIE Press.
- [3] Mack, C., "Fundamental Principles of Optical Lithography... The Science of Microfabrication" Wiley-Interscience, 2008.
- [4] Menon, R., Patel, A., Gil, D., Smith, H.I. (2005). Maskless lithography. Materials Today, 8, 26-33.
- [5] Tseng, A.A. (2003). Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 26, 141-149.
- [6] Raptis I., Constantions C., Diakoumakos D., "Non Destructive Method for Glass Transition in thin Photoresist Films" 61-62, Microelectronic Engineering, 2002.

Blokzincir Araştırma Ağı (BAĞ):

TÜBİTAK BİLGEM ve Üniversitelerimizin işbirliği ile kurulmuş bir araştırma platformudur.

Amacı;



www.bag.org.tr

BİLGEM BAĞ Koordinatörü TÜBİTAK BİLGEM

Üye Kurumlar



YİTAL'de Tümdevre Tasarımı

Hasan Kaydırma - Uzman Araştırmacı, Dr. Ahmet Unutulmaz - Başuzman Araştırmacı,
Dr. Nurettin Yaman Öznelçi - Başuzman Araştırmacı, Ebru Arıkan - Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

“ YİTAL'de üretilen her ürün, Türkiye'de ilk defa üretilmiş olma özelliğine sahiptir. ”

YİTAL Tasarım Bölümü, YİTAL kurulduğundan beri laboratuvarın üretim koşullarına, üretim teknolojilerine göre tümdevre tasarımı yapmaktadır. YİTAL, yurtdışından temininde sıkıntı yaşanan/yaşanabilecek kritik devrelerin ve elemanların ya da yurtdışında üretilmesi güvenlik açısından sakıncalı devrelerin tasarımını ve üretimini gerçekleştirmektedir. Bu nedenle YİTAL'de tasarlanan tümdevreler YİTAL'de üretilmektedir. Bununla birlikte, yurtdışında üretilmesi sakınca taşımayan ve YİTAL üretim kapasitesinin üstünde miktarlar gerektiren tümdevreler yurtdışı üreticilerin teknolojilerine göre YİTAL'de tasarlanarak yurt dışında üretilmektedir.

Bugüne kadar YİTAL'de tasarlanarak üretimi yurtdışında yaptırılan tek ürün Ulusal Akıllı Kart Tümdevresi (UKTÜM) olmuştur.

YİTAL, Türkiye'de Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İlet-

ken) kelimelerinin baş harfleri ile kısaltılan CMOS teknolojisi ile tümdevre üretme yeteneğine sahip tek yerdir. Bu nedenle YİTAL'de üretilen her ürün Türkiye'de ilk defa üretilmiş olma özelliğini taşımaktadır. YİTAL'de CMOS teknolojisinin geliştirilme aşamasında olduğu 1990'lı yıllarda tasarlanıp üretilen Flaş Analog Sayısal Dönüştürücü tümdevreler (5 bit 15 MHz 3 µm CMOS (1995), 6 bit 50 MHz 1.5 µm CMOS (1998)), 2000'li yıllarda UEKAE ürünü kriptoloji cihazlarında kullanılmak üzere üretilen ve on binlercesi sahaya verilen kriptoloji tümdevreleri bu özelliğe sahip ürünlerdir.

YİTAL'in günümüzdeki teknolojileri 0.7 µm ve 0.25 µm CMOS ile 0.25 µm SiGe BiCMOS'tur. YİTAL'in üretim tecrübesi ağırlıklı olarak sayısal devrelerin üretildiği CMOS teknolojilerine dayandığı için YİTAL tasarım ekibinin tecrübesi de ağırlıklı olarak sayısal tasarım üzerinedir. Fakat sayısal tasarım dışında YİTAL'de analog ve RF (Radyo Frekans) tasarım çalışmaları da yapılmaktadır. Analog tasarım ekibi

“ YİTAL'de tasarlanan işlemci tabanlı tümdevrelerin gömülü yazılımları ile üretim ve tasarım destek yazılımları YİTAL'de geliştirilmektedir. ”

CMOS okuma devreleri, RF tasarım ekibi ise radarların alıcı-verici modüllerinin SiGe BiCMOS teknolojisiyle tasarımı üzerinde çalışmaktadır.

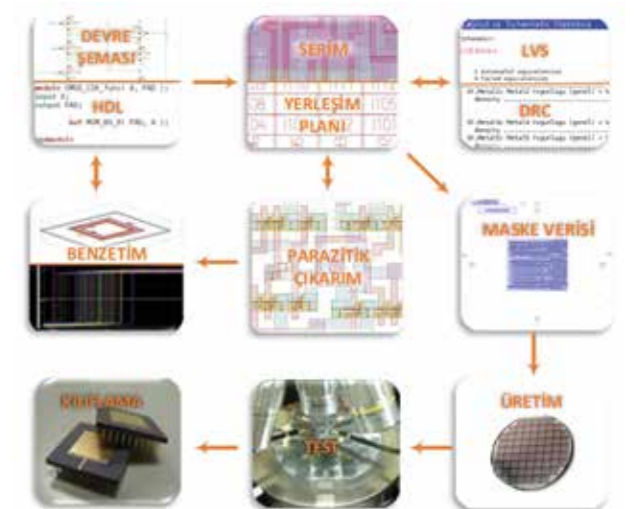
Tasarım Süreci

YİTAL sayısal tasarım ekibi bugüne kadar YİTAL'de üretilen sayısal tümdevrelerin tasarımlarını tam özel tasarım tekniği ile gerçekleştirmiştir. Tam özel tasarım tekniğinde transistör ve kapı düzeyinde bütün şema ve serim tasarımı en alt seviyeden itibaren elle yapılarak en küçük alan, en yüksek hız, en düşük güç harcaması hedeflenmektedir. Bu sayede teknolojinin sınırlarında kullanılması ve pul başına düşen tümdevre sayısının artırılarak en düşük maliyet elde edilmesi sağlanmaktadır. Tam özel tasarım tekniğinin dezavantajı, tasarım süresinin uzun olmasıdır. Bu yüzden çok sayıda transistör içeren tümdevrelerde otomatik tasarım akışını da kullanmak gerekmektedir. Yurtdışında üretimi yapılan tek tümdevre olan akıllı kartın sayısal bloklarının serim tasarımı tamamen tam otomatik tasarım yöntemi ile yapılmıştır.

Tam otomatik tasarım sürecinde, bir donanım tanımlama dili (VHDL, Verilog) kullanılarak elde edilen tasarım kodu, üreticinin sayısal tasarım akışı ile tam otomatik olarak serime dönüştürülür. Bu süreç için sayısal hücre kütüphanesine, fiziksel kütüphaneye ve zamanlama kütüphanesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sayısal hücre kütüphanesi tasarım sürecini hızlandırmak için hazırlanmış mantık fonksiyonlarını

gerçekleştiren temel kapılardan oluşurken, fiziksel kütüphane hücrelerin serim bilgilerini içermektedir. Zamanlama kütüphanesinde ise hücrelerin performans ve güç tüketim bilgileri yer almaktadır.

Tümdevre tasarım yazılımı; ilk olarak VHDL/Verilog tasarım kodunu hücre kütüphanesindeki kapılar cinsinden sentezler. Sentezleme adımından sonra yazılım tarafından zaman kısıtlarına ve yerleşim planına uygun olarak kapıların serimleri yerleştirilir ve ara bağlantıları yapılır. Tam otomatik tasarım yönteminde tasarım süreleri tam özel tasarıma göre çok kısadır. Bu nedenle tasarım değişiklikleri hızlıca serime yansıtılabilmektedir. Buna karşın tam özel ve tam otomatik olarak tasarlanmış bloklar karşılaştırıldığında, tam özel olarak tasarlanmış



Şekil 1. Tümdevre tasarım akışı

blokların genellikle 2-3 kat daha az alan kapladığı görülmektedir.

Güncel olarak YİTAL'de üretilmek üzere çalışılmakta olan milyonlarca transistör içeren özel amaçlı işlemcinin tasarımında hibrit tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Hibrit tasarımda; modüler tekrarlanan yapıya sahip bloklar ve zamanlama açısından kritik yoldaki bloklar tam özel tasarlanırken kontrol blokları gibi modüler olmayan yapılar tam otomatik tasarlanmaktadır. Analog ve RF devrelerin tasarımları da transistör seviyesinde tam özel olarak yapılmaktadır.

Hangi tasarım yöntemi seçilirse seçilsin tümdevre tasarım akışı genel hatları ile Şekil 1'deki gibi ortaktır. Öncelikle şema veya VHDL/Verilog kod tasarımı yapılır ve benzetimlerle beklenen işlevsellik, hız ve güç hedeflerini sağlayıp sağlamadığı test edilir. Tam özel veya otomatik serim tamamlandıktan sonra tasarım kuralı kontrolü (DRC) adı verilen yazılım ile tasarım kuralları doğrulama yapılır. Tasarım kuralları serimdeki tabakaların (layer) birbirlerine olan mesafesi, tabakaların büyüklüğü, bir tabakanın diğer tabakadan ne kadar taşması gerektiği gibi birçok bilgiyi içinde barındırır. Daha sonra, tasarlanan şema veya yazılan kodun çizilen serim ile aynı olup olmadığını anlamak için serim şematik karşılaştırması (LVS) yapılır.

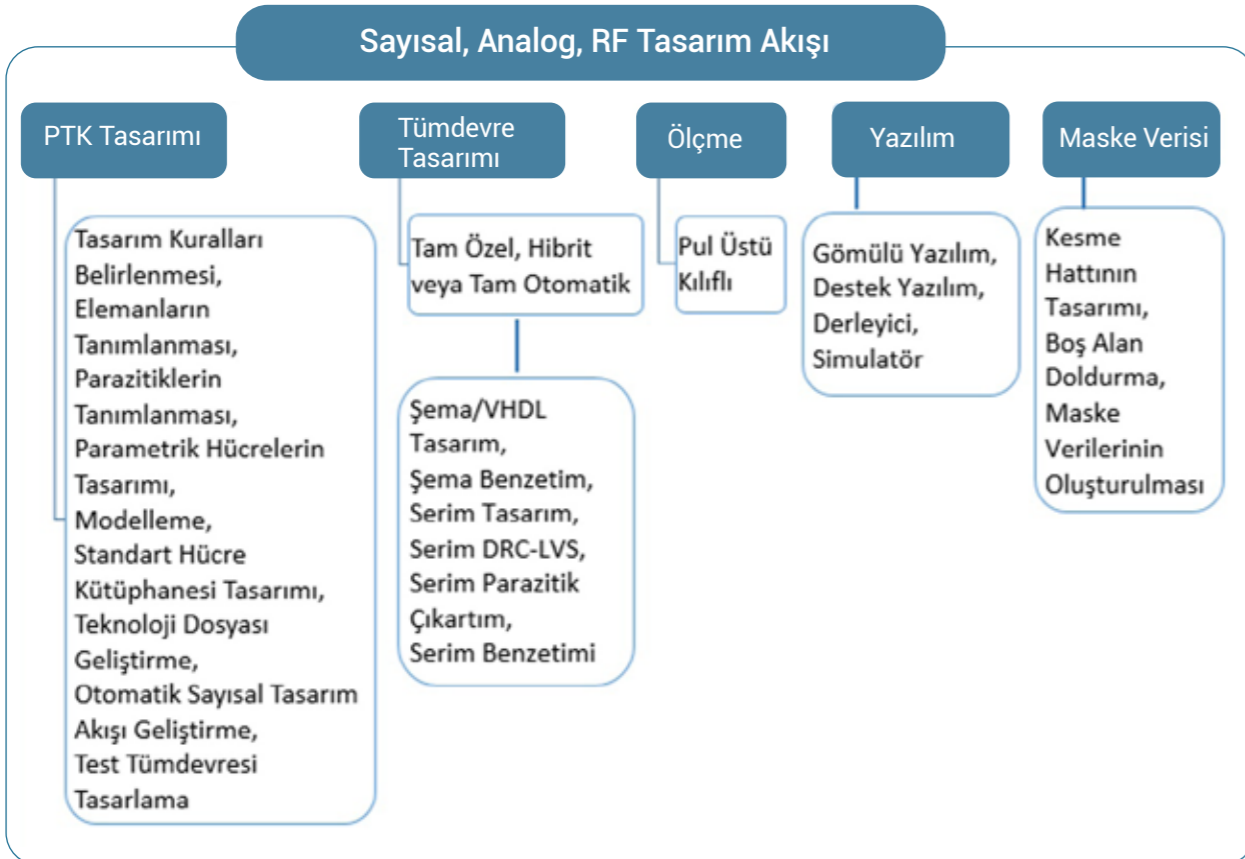
DRC ve LVS yazılımlarıyla yapılan doğrulama ve karşılaştırma işlemlerinden sonra devre seriminden parazitik çıkarım (LPE) yapılır. Parazitik çıkarım; serimi tamamlanan hücrelerde serimden kaynaklanan etkilerin görülmesi için uygulanır ve serimde çizilen hatların parazitik direnç ve kapasitelerini hesaplar. Parazitikleri içerecek şekilde serim sonrası benzetim yapılarak üretim sonrası beklenen performans öngörülür.

YİTAL'in bir diğer tümdevre doğrulama yöntemi FPGA kullanımıdır. YİTAL tasarım ekibinin FPGA tasarım yeteneği ile sayısal tümdevrenin FPGA versiyonu hazırlanıp FPGA ile gerçek çalışma ortamında testler yapılmaktadır. Test sonuçlarında hata bulunması durumunda FPGA hızlı bir şekilde güncellenmekte ve tümdevrenin üretim öncesi doğruluğu test edilmektedir.

YİTAL'de tasarlanan işlemci tabanlı tümdevrelerin gömülü yazılımları, işlemcilere özel derleyici ve simülatör yazılımları, tasarlanan devreleri test etmeye yönelik test yazılımları, tasarım ve üretimde gereksinim duyulan çeşitli destek yazılımları YİTAL Tasarım Bölümü tarafından gerçekleştirilmektedir.

Üretim Süreci

Tümdevre tasarımı tamamlandıktan sonra sıradaki işlem üretim sürecidir. Tasarımın üretim sürecine katılabilmesi için birtakım işlemlere ihtiyaç



Şekil 2. YİTAL tasarım faaliyetleri



Şekil 3. YİTAL tasarım ortamından bir görüntü

duyulur. İlk olarak tasarlanan devrenin sınırları belirlenip kesme hattı eklenir. Eklenen kesme hattı sınıır çizgileri arasına üretim sürecinde gerekli olacak hizalama işaretleri ve ölçüm yapıları yerleştirilir. Kesme hattı eklenen tümdevrenin en dışına maske hizalama işaretleri yerleştirilir. Sığ çukur oksit ile metal hatların üzerindeki oksiti düzleştirme işleminin (CMP-Kimyasal Mekanik Düzleme) homojen olmasını sağlayan kukla yapılar (dummy filler) boş alanlara doldurulduktan sonra tümdevre üretime hazır hale gelir.



Şekil 4. Deniz Taktik Veri Sistemi tümdevresi

Son haline getirilen tümdevreyi oluşturan her bir tabaka için maske verileri üretilerek maske yazma cihazına aktarılır. Maske verileri maske yazma cihazının okuyabilmesi için GDS formatında elde edilir. Maske verileri, kullanılan şekillendirme cihazlarının özelliklerine göre belirli oranda büyütülebilir. Son aşamada veri maske yazma cihazında maske camına yazılır. Böylece tasarım üretim sürecindeki yolculuğuna başlar. Üretim süreci tamamlandığında tümdevreler test edilir. Test sonuçlarına göre tasarımda ya da üretim adımlarında değişiklikler yapılarak devrelerin daha iyi çalışması sağlanabilir.

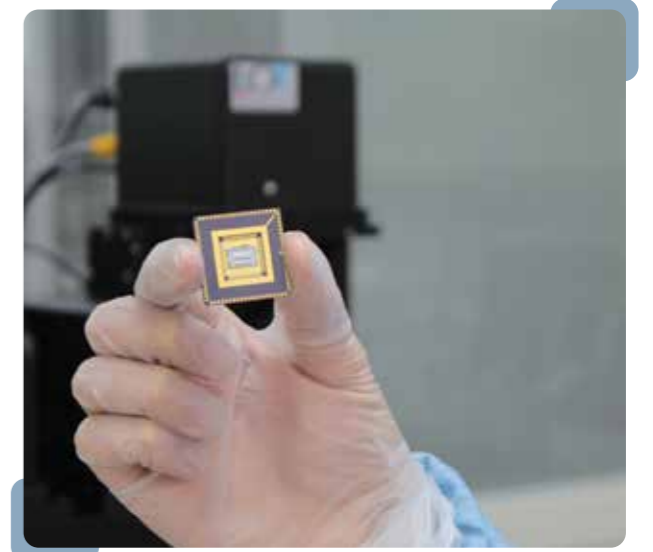
Proses Tasarım Kiti (PTK)

Bir tümdevre tasarımcısının tasarım yapabilmesi için proses tasarım kitine (PTK) ve PTK'nin koştuğu EDA (elektronik tasarım otomasyonu) yazılımına ihtiyacı vardır. PTK; üretim teknolojisine ait bilgiler içeren, EDA yazılımının dili ile yazılmış dosyalar bütünüdür. Teknoloji bilgileri, DRC, LVS kontrolleri, parazitik çıkarımı, benzetimlerde kullanılan eleman modelleri, otomatik sayısal akış, sayısal hücre kütüphanesi ve modelleri, hazır parametrik elemanları içerir.

PTK'nın, üretim evine ve teknolojiye özgü olmasının sonucu olarak YİTAL tasarım ekibinin tümdevre tasarımı dışında PTK geliştirme sorumluluğu da bulunmaktadır. Yeni bir üretim teknolojisi geliştirilirken tasarım ekibi PTK üzerinde yoğunlaşır. YİTAL'de üretilen tasarımlar YİTAL'in geliştirdiği PTK'lar ile gerçekleştirilmektedir. Tasarım kurallarının belirlenmesi, eleman tanımlarının yapılması, teknoloji dosyasının oluşturulması, kütüphane hücrelerinin tasarlanması, kütüphane modellerinin belirlenmesi, DRC, LVS ve parazitik çıkarım kodlarının oluşturulması, otomatik sayısal tasarım akışının oluşturulması ve test tümdevresinin tasarlanması PTK geliştirme sürecinin faaliyetleridir.

Yine bu sürecin bir parçası olarak tasarlanan test tümdevresi; teknolojiyi karakterize eden, tasarım kurallarını test eden yapılar, kütüphane hücreleri, basit devreler, modelleri oluşturulacak elemanlar, parazitik ölçüm yapıları içerir. Bu yapılar ölçülerek ve sonuçlar analiz edilerek elde edilen teknoloji bilgileri PTK'ya işlenir. Tümdevre benzetimlerinin gerçeği öngörme başarısı yarı iletken eleman (HBT, MOS vb.) modellerine bağlıdır. Yarı iletken elemanların elektriksel davranışı ne kadar iyi modellenirse benzetimler o kadar gerçekçi olacağından modelleme faaliyetleri PTK sürecinin en önemli, kritik parçasını oluşturmaktadır. Test tümdevresi üret, ölç ve PTK güncelle döngüsü teknoloji gereksinimleri karşılanana kadar devam eder. Teknoloji hazır olduğunda PTK da hazır olur.

Şekil 2'de YİTAL tasarım ekibinin çalışma alanları ve bu alanlardaki faaliyetleri özetlenmiştir. Şekil 3'de YİTAL tasarım ortamından bir görüntü verilmiştir. Şekil 4'de ise YİTAL'de tasarlanmış, üretilmiş ve kılıflanmış Naval Tactical Data System (Deniz Taktik Veri Sistemi) tümdevresi görülmektedir.



SiGe:C BiCMOS

Teknolojisi ve Proses Tasarım Kiti (PTK)

“ Hem CMOS'un hem SiGe HBT'nin avantajlarına aynı anda sahip olan BiCMOS çözümler, sistem optimizasyonu açısından çok daha gelişmiş sonuçlar sunarlar. ”

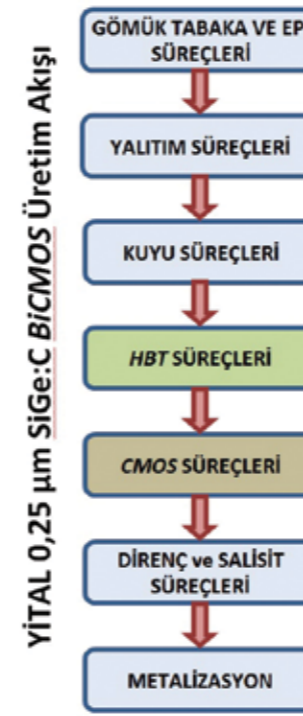
Ebru Arıkan – Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

Silisyum, malzeme özelliklerinin sağladığı avantajlar nedeniyle, BJT ve MOS uygulamaları başta olmak üzere yarıiletken teknolojisinde en çok tercih edilen elementtir. Silisyum; doğada bol bulunması, kusur yoğunluğunun düşük olması, büyük çaplı pul olarak büyütülebilmesi sonucu maliyetin düşmesi, en iyi elektriksel yalıtım malzemelerinden biri olan SiO₂ katmanının, üzerinde kolaylıkla büyümesine izin vermesi gibi nedenlerden ötürü, tümdevre üretilmesi en ucuz ve en güvenilir yarıiletken malzemedir.

Silisyum üzerinde gerçekleştirilen ve yatay yönde boyut küçültme ile sürekli hızlandırılan CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) teknolojisi,

sayısal elektronik uygulamalarda tek çözüm olarak kullanılmaktadır. Yine silisyum üzerinde üretilen BJT (Bipolar Junction Transistor) teknolojisi için yatay ve dikey boyut küçültme ile hızlanma sağlanırsa da günümüz mobil analog uygulamaların hız ihtiyaçlarına yanıt verecek hızlara ulaşımamaktadır. Standart BJT'nin sağlayamadığı hız gereksinimleri SiGe HBT (Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor) teknolojisi ile karşılanabilmektedir.

SiGe, silisyum ve germanyum yarıiletken malzemelerinin alaşımıdır. SiGe HBT standart BJT'nin silisyum olan baz bölgesine germanyum katılarak elde edilir. Silisyum ve germanyumun benzer kristal kafes yapısına sahip olmaları nedeniyle SiGe tek-



Şekil 1. YİTAL BiCMOS akışı.

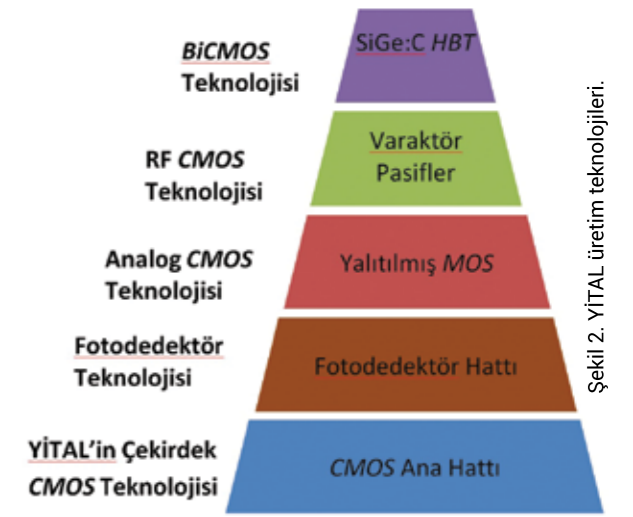
SiGe HBT'nin avantajlarına aynı anda sahip olan BiCMOS çözümler sistem optimizasyonu açısından çok daha gelişmiş sonuçlar sunarlar.

Aslında silisyum ve germanyumun birleştirilmesi, yani heterojonksiyon kavramı eski bir konudur. HBT'nin keşfi 1950'li yıllarda olmasına rağmen, laboratuvarından ticari ürüne geçiş 1987 yılında IBM tarafından yapılmıştır. Bu geçişin bu kadar uzun sürmesinin sebebi yüksek kalitede epi SiGe katmanı büyütme yeteneğinin geç kazanılmasıdır. Yüksek kalitede SiGe katmanı büyütecek cihazların gelişmesi ile ancak 1994 yılında IBM tarafından ilk kez 75 GHz kesim frekanslı (f_T) 200 mm çaplı pulda ticari SiGe HBT üretilmiştir ve bu zamandan beri SiGe performansını artırma çalışmaları hız kesmeden sürdürülmektedir. Avrupa Birliği DOTFIVE projesinde 500 GHz, DOTSEVEN projesinde 570 GHz f_{MAX} değerlerine ulaşılmıştır.

SiGe BiCMOS teknolojileri RF alıcı-vericiler, fiber optik ve telekomünikasyon ağları, otomotiv gibi sayısız yüksek hız uygulamalarında uzun süredir yoğun olarak kullanılmaktadır. Frekansların THz bölgesine yaklaşmasıyla, tıp, THz görüntüleme, 5G gibi uygulamalarda da kullanılmaya başlamıştır.

Radar uygulamalarında ağırlıklı SiGe teknolojisinin kullanılması ve dünya üzerinde bu teknoloji ile üretim yapan fabrikaların kırsıtlı olması nedeniyle, savunmanın millileştirilmesi hedefine uygun olarak, 2014 yılında 0,25 μ m 5 metal SiGe:C BiCMOS teknoloji-

nolojisi, silisyumun yukarıda bahsedilen bütün avantajlarına sahiptir ve CMOS teknolojisine benzer bir süreç ile üretilir ki bu durum SiGe ve CMOS süreçlerinin birleştirilmesine izin verir. SiGe ve CMOS süreçleri aynı pulda birleştirilerek sayısal ve RF uygulamaların aynı kırımda tümleştirilmesine olanak sağlayan BiCMOS teknolojisi elde edilir. MOS transistörler düşük güç harcarlar, yüksek yoğunlukta üretilebilirler. SiGe HBT ise yüksek akım kapasitelidir, yüksek kesim frekansına sahiptir ve düşük gürültüdür. Hem CMOS'un hem

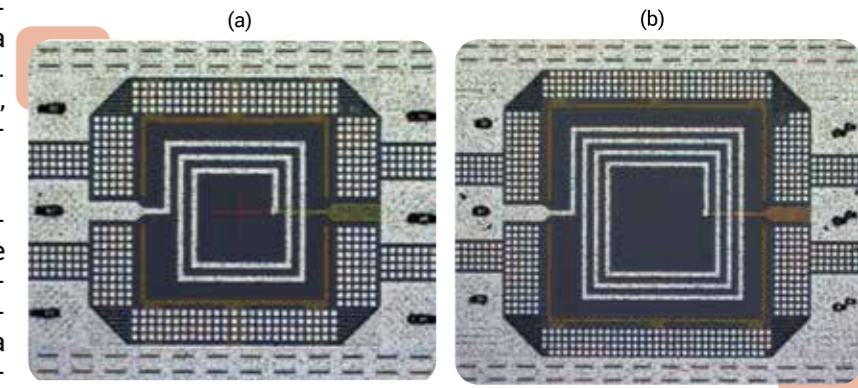


Şekil 2. YİTAL üretim teknolojileri.

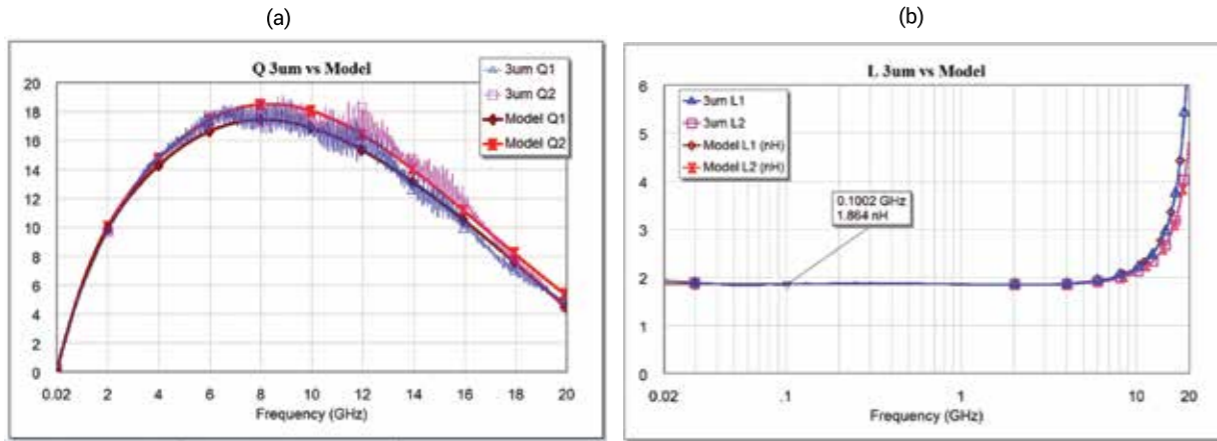
si geliştirme çalışmalarına başlamış olan YİTAL, 2018 yılında 125 GHz kesim frekanslı npn SiGe HBT üreterek X-bandı uygulamaları için RF tümdevre üretimine geçmiştir. YİTAL'in tecrübesi kendi geliştirdiği CMOS teknolojileri ile askeri standartta tümdevre üretimi alanında olduğu için, SiGe teknolojisi var olan CMOS üretim sürecine uyumlu olarak geliştirilmiştir. Dolayısıyla, YİTAL'in SiGe ve CMOS süreçlerinin birleştirilmesi, yani BiCMOS teknolojisi doğal olarak sağlanmıştır. Şekil 1'de YİTAL BiCMOS üretim akışı verilmiştir.

Şekil 2'de YİTAL üretim süreçleri ve ürünleri gösterilmiştir. YİTAL'in fotodedektör, BiCMOS ve analog üretim süreçleri YİTAL'in CMOS ana hattı üzerinde kurulmuştur. YİTAL SiGe BiCMOS teknolojisi ile NMOS, PMOS, HBT dışında, varaktör, bobin ve MIM (metal-insulator-metal) kondansatör ile direnç sunmaktadır.

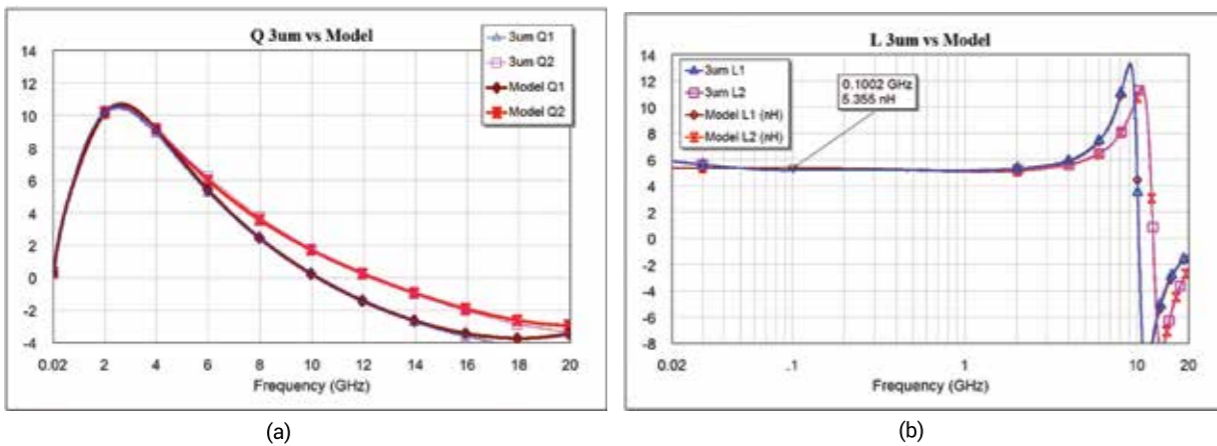
Şekil 3'te YİTAL'de üretilmiş 2 nH ve 5 nH değerlerindeki bobinler görülmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5'te, sırasıyla 2 nH ve 5 nH için ölçüm ve modelleme sonuçları verilmiştir.



Şekil 3. Bobinlerin pul üzeri görüntüleri: (a) 2 nH, (b) 5 nH.



Şekil 4. 2 nH'lik bobin için ölçülen ve modellenen (a) Q kalite faktörü ve (b) endüktans değeri.



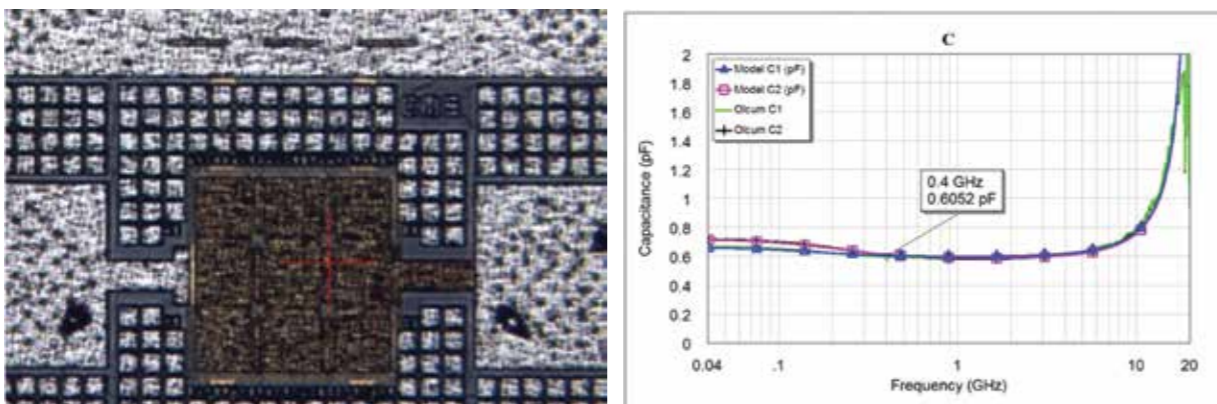
Şekil 5. 5 nH'lik bobin için ölçülen ve modellenen (a) Q kalite faktörü ve (b) endüktans değeri.

Şekil 6'da pul üzeri MIM kondansatör görüntüsü ile kapasite ölçüm ve modelleme sonuçları verilmiştir. Kapasite değeri $0,7 \text{ fF}/\mu\text{m}_2$ 'dir.

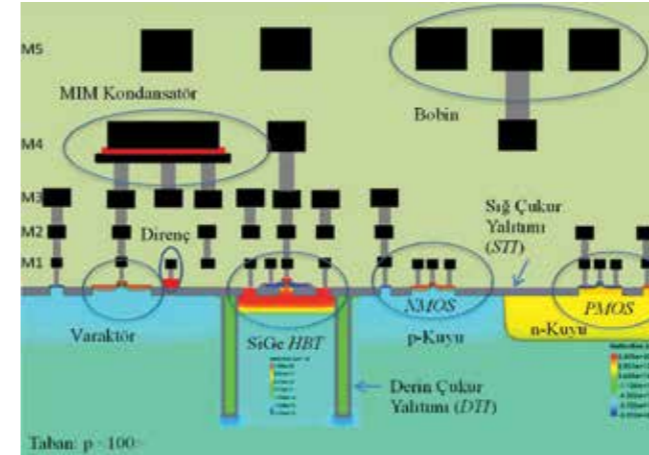
Şekil 7'de YİTAL'in $0,25 \mu\text{m}$ 5 metal SiGe:C Bi-CMOS teknolojisi ile üretilen öğelerin TCAD (Technology Computer Aided Design) benzetim ortamında elde edilmiş kesiti görülmektedir.

Şekil 8'de tipik bir npn HBT yapısının temel öğeleri gösterilmiştir. Emetör, baz, kollektör ve taban, transistörün kontrol kapılarıdır. Şekildeki transistörün bir emetör kapısı (E), 2 baz kapısı (B) ve iki kollektör

kapısı (K) bulunmaktadır. Bazın kontak alınan bölgesine dış baz denmektedir. Emetör ve dış baz bölgeleri polisilyumdur. Bu bölgeler dirençlerinin düşük olması için yüksek katkıdır. Transistörün kendi kapıları arası yalıtım sıç çukur yalıtımı (STI: Shallow Trench Isolation) ve oksit, transistörler arası yalıtım ise derin çukur yalıtımı (DTI: Deep Trench Isolation) ile sağlanır. Yan duvarlar, emetörü dış baz bölgelerinden yalıtır. Kollektörün emetör ve baza göre düşük katkılanması, transistörün akım yolunda seri ve yüksek bir direncin olmasına neden olur. Kollektör katkısını artırmadan direnci düşürmek için aktif kollektörün altında n+ gömük



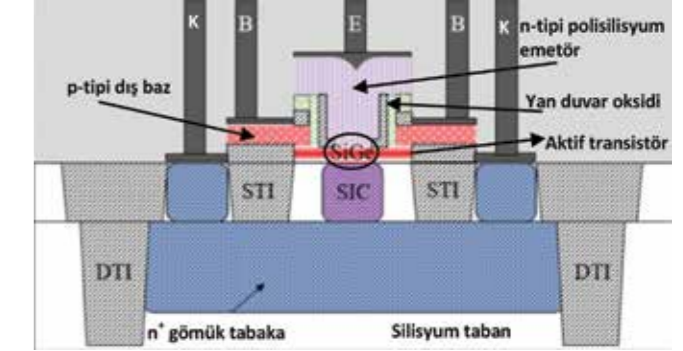
Şekil 6. MIM kondansatörün (a) pul üzeri görüntüsü ile (b) endüktans değeri.



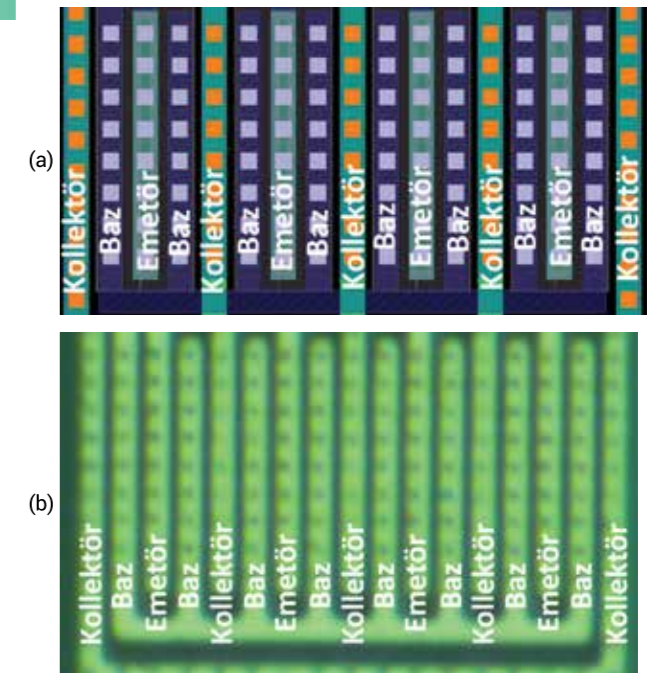
Şekil 7. 5 YİTAL BiCMOS teknolojisi ile üretilen öğelerin TCAD benzetim ortamında kesiti.

tabaka bulunmaktadır. Gömük tabaka, kollektör akımının kontakla ulaşırken izlediği yolda direncin düşmesini sağlar. Kollektör kontak altına yapılan n+ iyon katkılama kollektör direncini düşüren diğer uygulamadır. SIC (Selective Implanted Collector), transistörün performans hedefine göre iyon ekme ile katkılanmış aktif kollektör bölgesidir. Aktif transistör bölgesinde SiGe baz, sandviç gibi, emetör ve kollektör arasında yer almaktadır.

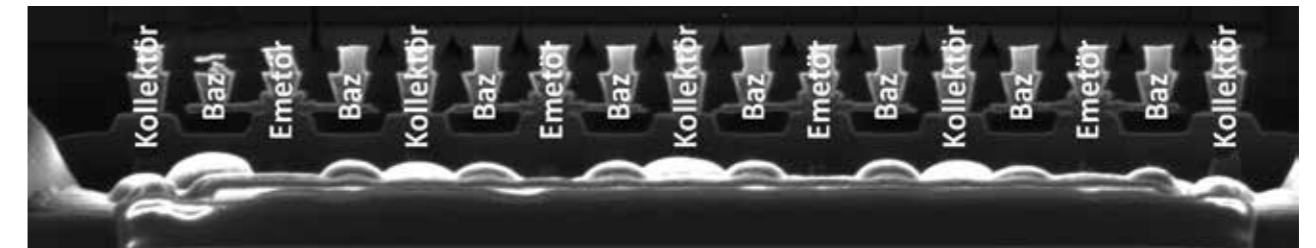
Şekil 9'da 4 parmaklı bir HBT'nin YİTAL serim tasarımı ve YİTAL'de üretildikten sonraki pul üzeri görüntüsü verilmiştir. Şekil 10'da ise aynı transistörün elektron mikroskobu (TEM: Transmission Electron Microscope) ile elde edilmiş kesiti görülmektedir. Şekil 11'de ise kontakları ile birlikte HBT ve aktif HBT bölgesinin yakından verildiği TEM görüntüleri mevcuttur.



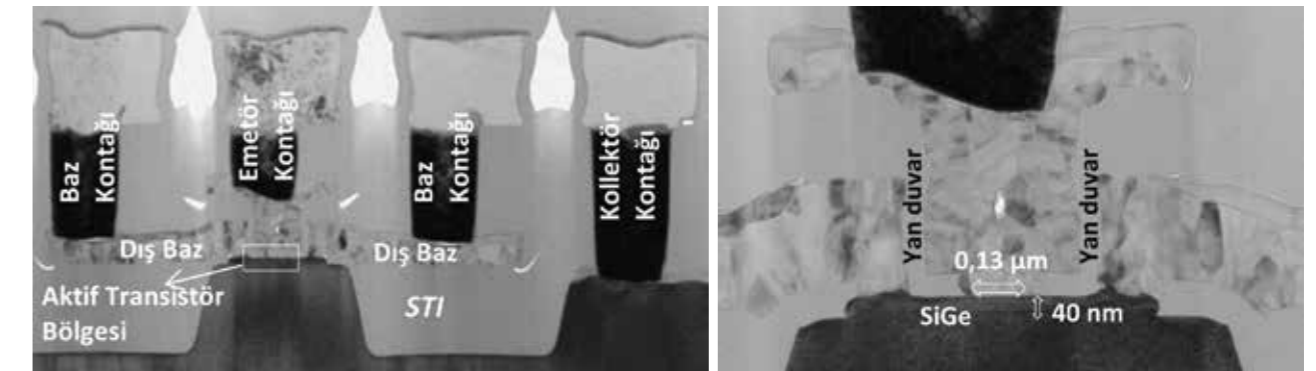
Şekil 8. SiGe HBT yapısı.



Şekil 9. (a) 4 parmaklı HBT serimi ve (b) pul üzeri görüntüsü.



Şekil 10. 4 parmaklı HBT yapısının pul kesidi görüntüsü.



Şekil 11. Çekirdek HBT: (a) TEM görüntüsü, (b) aktif transistör bölgesi.

Baz kantağının silisyum yerine polisilyumdan alınması kollektör bölgesinin emetör-baz bölgesine yaklaşmasını sağlayarak kollektör-baz kapasitesinin önemli miktarda azalmasını sağlar. Hem emetör hem baz polisilyum olduğu için çift poli olarak adlandırılan HBT yapısı, transistörün yüksek frekans performansında önemli gelişmelere izin vermiştir. Ayrıca, emetörün dış baza kendinden hizalı olması sonucunda, dış baz baz-emetöre yalıtımı sağlayan yan duvar kalınlığı kadar yaklaşabilmektedir ki bu sayede dış baz direnci büyük ölçüde azaltılır. Kendinden hizalı prosesin kritik adımı olan yan duvar kalınlığının; emetör ve dış bazın yan duvar altından birbirine kavuşmasını, yani çevresel bir pn jonksiyonunun oluşmasını önleyecek kalınlıkta olması gerekmektedir. Kendinden hizalı çift polisilyum bipolar üretimi, parazitikleri minimize ettiği için en popüler ve ticari olarak kendini ispat etmiş bir tekniktir. YİTAL HBT üretimi, çift poli ve kendinden hizalıdır.

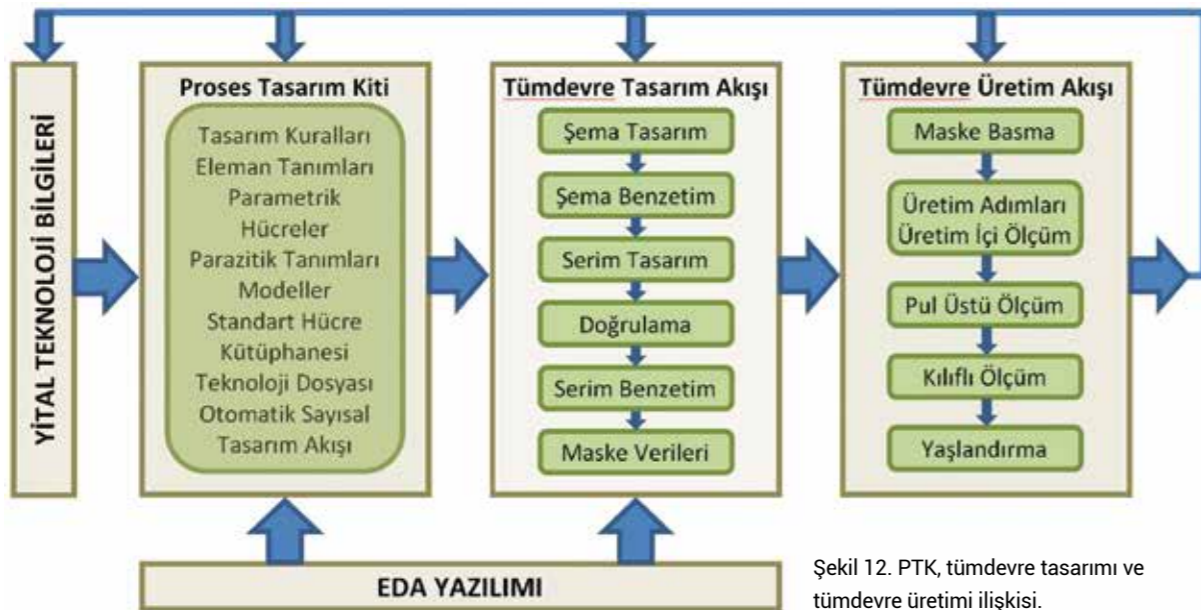
Teknoloji geliştirilirken, bir yandan da o teknolojiye ait proses tasarım kitinin (PTK) geliştirilmesi gerekir. PTK, bir tümdevre tasarımcısının, tümdevre üreticisinin teknoloji koşullarına göre tasarım yapmasına olanak sağlayan dosyalar bütünüdür. PTK olmadan tasarım yapılamaz. PTK, üretim evi tarafından sağlanır ve üretim evine özgüdür. PTK, bir EDA (Elektronik Design Automation) yazılımı kullanılarak geliştirilir. Bir EDA yazılımı için geliştirilen PTK başka bir EDA yazılımı ile kullanılamaz; çünkü her EDA yazılımının kendine özgü bir PTK geliştirme akışı vardır. PTK kullanarak tasarlanan bir tümdevrenin benzetimlerle öngörülen performansı, tümdevre üretildikten sonra ölçülerek elde edilen performansa olabildiğince yakın olmalıdır.

PTK'nin işlevi, üretimde sorun olmadığı sürece, benzetimlerle gereksinimleri doğrulanmış bir tümdevrenin ilk üretimde elde edilmesini sağlamaktır.

Şekil 12'de görüldüğü gibi, PTK tasarım süreçlerinin merkezindedir. Serim ve şema doğrulama, benzetim için gerekli modeller ve parazitik çıkartım, bir PTK'de olması gereken minimum kümedir. Böyle bir PTK tam özel tasarım yapmak için yeterlidir. Ancak, transistör sayısı milyonlar ile ifade edilen sayısal devrelerde tasarım süresini kısaltmak için PTK'de minimum kümeye ek olarak otomatik sayısal tasarım akışının da bulunması gerekmektedir. Otomatik sayısal tasarım akışı içerdiği standart hücre kütüphanesi ve kütüphane hücrelerinin gecikme modelleri ile tamamen yazılımsal olarak devre tasarlanmasını sağlar.

YİTAL'in 0,25 µm 5 metal SiGe:C BiCMOS PTK'si ile hem 0,25 µm CMOS, hem 0,25 µm SiGe:C hem de 0,25 µm SiGe:C BiCMOS tasarım ve üretim yapılmaktadır. YİTAL'in 0,25 µm CMOS teknolojisi ile milyonlar düzeyinde transistör içeren sayısal devre tasarımı ve üretimi yapıldığından 0,25 µm SiGe:C BiCMOS PTK tam otomatik sayısal tasarım akışı içermektedir. YİTAL'in diğer CMOS teknolojilerine ait PTK'ler tam özel tasarım yöntemine uygundur.

YİTAL, 0,25 µm SiGe:C BiCMOS üretim sürecini hedef değerlerinde tamamlamış ve bu süreçle X-bandında RF tümdevre üretimine başlamıştır. RF devre üretme çalışmalarına koşut olarak, yüksek gerilimli HBT ve yüksek performanslı sürümleri ile 0,25 µm SiGe BiCMOS PTK çalışmalarını sürdürmektedir. 2021 yılı içinde 0,25 µm SiGe BiCMOS PTK yayımlanması planlanmaktadır.



Şekil 12. PTK, tümdevre tasarımı ve tümdevre üretimi ilişkisi.

Kripto Cihazları

TÜBİTAK BİLGEM ülkemizdeki stratejik kamu kurumlarının ihtiyaç duyduğu milli kripto cihazları geliştirmektedir. Bilgi güvenliği kapsamında teknolojik dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla tasarımdan tümdevrelerin gerçekleştirilmesine kadar cihazların kritik öneme sahip tüm bileşenleri, BİLGEM UEKAE bünyesinde tasarlanıp gerçekleştirilmektedir.

Ülkemiz, milli kripto algoritmasını tasarlayıp bunu kendi geliştirdiği cihazlarda kullanabilen sayılı ülkelerdendir. Kripto cihazlarımız, güncel COMSEC ve TEMPEST güvenlik standartlarına uygun olarak geliştirilmektedir.

MİLSEC-4 VoIP Kripto Cihazı



IP ağlarda yeni nesil güvenli haberleşme (ses, veri ve görüntü) için güncel bir çözüm sunar.

SIR Kriptolu USB Bellek Cihazı



Kendisine yüklenen verinin tamamını donanımsal yapıyla şifreleyerek güvenli saklayan, tek kullanıcıya hizmet veren bir kriptolu USB bellek cihazıdır. NATO güvenlik sertifikasına sahip tek veri kripto cihazıdır.

IPKC IP Kripto Cihazı



IP ağlarının, güvensiz ağlar üzerinden güvenli biçimde haberleşmesini sağlar.



KAYC-S/N
Kripto Anahtar Yükleme Cihazı



Ebru Arıkan – Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

YİTAL, 2014 yılında 0,25 µm 5 metal SiGe:C BiCMOS teknolojisi geliştirme çalışmalarına başlamış, 2018 yılında da 125 GHz kesim frekanslı npn SiGe HBT üretmek istenen HBT hedeflerine ulaşmıştır. 2018-2020 döneminde HBT üretiminin tekrarlanabilirliği üzerinde çalışılmış ve CMOS ile SiGe:C süreçleri birleştirilerek YİTAL BiCMOS teknolojisi geliştirilmiştir.

HBT'nin temel elektriksel parametreleri akım kazancı, kesim frekansı, maksimum osilasyon frekansı ve belverme gerilimidir. Bu parametrelerin yüksek, transistörün parazitik direnç ve kapasitelerinin düşük olması istenir. Bu yazıda, heterojonksiyon bipolar transistörün elektriksel özellikleri ile boyut, katkı gibi fiziksel özellikleri arasındaki hassas dengeler anlatılmaya çalışılmıştır.

Bir bipolar transistör art arda bağlanmış iki jonksiyondan oluşur. Bu jonksiyonlar, emetör-baz ve

baz-kollektör jonksiyonları olarak adlandırılırlar. Emetör ve kolektörün n, bazın p tipi katkı olduğu transistöre npn; emetör ve kolektörün p, bazın n tipi katkı olduğu transistöre pnp transistör denir. n tipi bir yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar elektronlar, p-tipi yarıiletkenlerde ise deliklerdir. Elektronlar deliklerden daha hızlı olduğu için npn SiGe HBT tercih edilir. YİTAL'de npn SiGe HBT üretilmektedir. Yazı boyunca HBT ile npn HBT kastedilmektedir.

Normal çalışma modunda HBT'nin baz-emetör jonksiyonu iletim, baz-kollektör jonksiyonu ise tıkama yönünde kutuplanır. Emetör en düşük gerilimde, kolektör en yüksek gerilimdedir. Baz genişliği elektronların difüzyon uzunluğundan daha kısa olduğu için, emetörden baz bölgesine ulaşan elektronların çoğu birleşmelerle yok olmadan baz-kollektör jonksiyonuna ulaşır ve tıkama yönünde kutuplanmış baz-kollektör jonksiyonunun yarattığı elektrik alan ile kolektöre sürüklenerek kolektör akımını oluştururlar. Baz akımı, bazdaki delik-elektron birleşme akımı ve bazdan emetöre geçen delik akımından oluşmaktadır. Emetör akımı, baz ve kolektör akımlarının toplamıdır. Kolektör akımının baz akımına oranı transistörün akım kazancını belirler. Baz ve kolektör akımlarının ifadeleri, sırasıyla (1) ve (2) denklemleriyle verilmiştir.

$$I_B = \frac{qAD_p n_i^2}{W_E N_{de}} e^{q \frac{V_{BE}}{kT}} \quad [1]$$

$$I_C = \frac{qAD_n b n_i^2}{W_B N_{ab}} e^{q \frac{V_{BE}}{kT}} \quad [2]$$

Baz akımını emetör bölgesinin, kolektör akımını baz bölgesinin özellikleri belirler. Baz akımı N_{de} emetör katkısı ve W_E emetör derinliğinin; kolektör akımı ise N_{ab} baz katkısı ve W_B baz derinliğinin fonksiyonudur. Baz ve kolektör akımının oranı olan β kazancı da (3) ile verilmiştir.

$$\beta = \frac{D_{nb} W_E N_{de}}{W_B N_{ab}} \quad [3]$$

(3) denklemi, bipolar transistörün temel tasarım kriterlerini açıklamaktadır: Kazanç, emetör ve baz katkı oranlarına bağlıdır. Emetör ne kadar yüksek, baz ne kadar düşük katkılarırsa kazanç o kadar artar. Emetör derinliğinin deliklerin difüzyon uzunluğundan kısa olduğu varsayımı ile emetör derinliğinin artması kazancı artırır. Eme-



HBT

(Heterojonksiyon Bipolar Transistör)

Tasarım İncelikleri

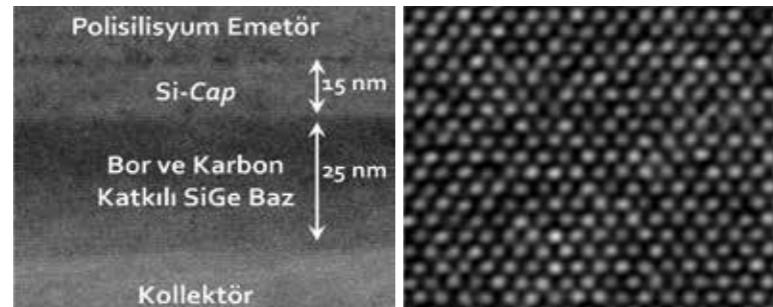
YİTAL SiGe HBT üretim süreci 230 adım ve 21 maske; YİTAL BiCMOS üretim süreci 300 adım ve 33 maskeden oluşmaktadır.



tör derinleştikçe kazanç yükselirken emetör-baz çevre kapasitesi arttığı için kesim frekansı düşer. Emetör derinliği, yüksek kazanç ve yüksek kesim frekansı arasında bir denge konusudur. Baz kalınlığı elektronların difüzyon uzunluğundan kısa olduğundan baz ne kadar ince ise akım kazancı o kadar yüksektir. Dar baz bölgesi elektronların baz geçiş süresininin düşmesini sağladığı için kesim frekansını artırırken, baz direncini yükselttiğinden maksimum osilasyon frekansını düşürür. Baz için dar fakirleşmiş bölge yüksek katkılama ile elde edilebilir, fakat yüksek baz katkısı akım kazancını düşürür. Baz genişliği ve katkısı arasında, kazanç ve yüksek frekans performansı arasındaki dengeyi kuracak hassas bir ayar gerekmektedir.

Kazanç ve kesim frekansı arasındaki bu yarışma, standart bipolar transistörlerde yüksek kesim frekansı elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu noktada SiGe HBT devreye girmektedir. Emetörden baza geçen elektron miktarını iletim, emetöre geçen delik sayısını ise valans bandındaki potansiyel bariyerleri belirlemektedir. Her iki bariyer de baz-emetör gerilimi VBE tarafından kontrol edilmektedir. HBT'nin ana fikri, elektronların gördüğü potansiyel bariyerini deliklerin gördüğü potansiyel bariyerine kıyasla azaltarak akım kazancını artırmaktır. Böylece, delik akımı değişmeden, potansiyel farkının üstel etkisi ile elektron akımında ciddi bir artış elde edilir. Emetör veriminin artması için bipolar transistörün yasak bant genişliğinin değiştirilmesi fikri, emetör ve baz bölgelerinin farklı bant genişliğine sahip malzeme ile üretilmeleri, yani heterojonksiyonlar ile hayata geçirilir. Standart bipolar transistörün baz bölgesi SiGe, emetörü silisyum ile gerçekleştirilerek SiGe HBT oluşturulur. Silisyuma eklenen her %1 germanyum ile yaklaşık 5 meV enerji bandı düşümü elde edilir. Böylece, aynı enerji ile daha çok elektron akımı elde edilir. Yasak bant mühendisliği ile kazanılan bu özgürlük, baz katkısını artırmaya ve böylece baz genişliğini daraltmaya yarar; yani yüksek kesim frekansı elde edilirken aynı zamanda kazancın yüksek olması sağlanır.

SiGe katmanı bir epitaksi tabakasıdır. Kristal bir taban üzerinde büyütülen kristal tabakaya epitaksi (kısaca, "epi") denir. Aynı grupta bulunan silisyum ve germanyum benzer kafes yapısına sahip olmakla birlikte, germanyum silisyuma göre %4 daha büyük kafes sabitine sahiptir. Silisyum kristal taban üzerinde SiGe epi tabakası büyütülürken, silisyum tabanın kafes yapısına uyarak daralan SiGe katmanı gerinimli (strained) olarak adlandırılır. Silisyum üzerinde yüksek kalitede SiGe katmanı üretmek gerinim yaratmadan mümkün değildir. Oluşan bu

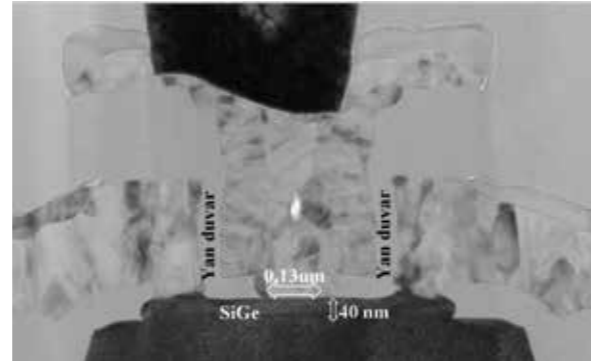


Şekil 2 (a) HBT Aktif baz bölgesinin 5 nm çözünürlükte TEM görüntüsü (b) SiGe baz bölgesinin 1 nm çözünürlükte TEM görüntüsü

HBT'nin ana fikri, elektronların gördüğü potansiyel bariyerini, deliklerin gördüğü potansiyel bariyerine kıyasla azaltarak akım kazancını artırmaktır.

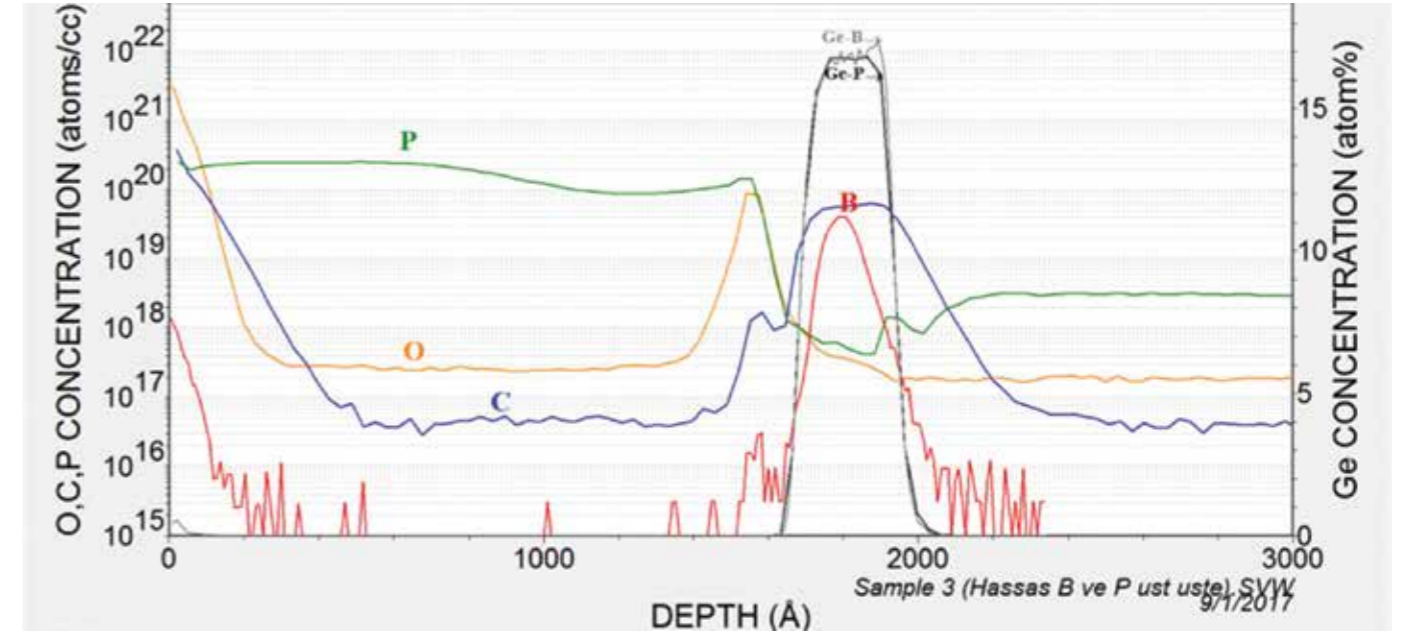
gerinim yasak bant genişliğini modifiye etmektedir. Bu gerinimin korunması için SiGe katmanı kalınlığının kritik bir değeri geçmemesi gerekir. Germanyum miktarına göre SiGe katmanının gerinimli kalabileceği kritik kalınlık değeri değişmektedir. Bu değer geçildiği zaman, SiGe katmanında oluşan kristal kusurları nedeniyle SiGe gevşek (relaxed) olur; gevşek SiGe HBT performansının düşmesine yol açar. Gerinimi korumak için emetör-baz geçişinde az katkılı mono kristal Si Cap bölgesi oluşturulur. Si Cap bölgesi sayesinde gerinim özelliği bozulmadan daha kalın SiGe katmanı büyütülebilmektedir. Si Cap mümkün olduğunca dar yapılmalıdır ki emetör ve baz direnci artmasın.

Şekil 1'de görüldüğü üzere YİTAL HBT yapısında baz bölgesinin kalınlığı 40 nm, aktif emetör genişliği ise 0,13 μm 'dir.



Şekil 1 HBT aktif transistör bölgesinin TEM görüntüsü

Şekil 2'de aktif transistör bölgesinin 5 nm çözünürlükte ve SiGe katmanının 1 nm çözünürlükte TEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde görülen SiGe katmanının kafes yapısı, tabakanın gerinimli olduğunun göstergesidir.



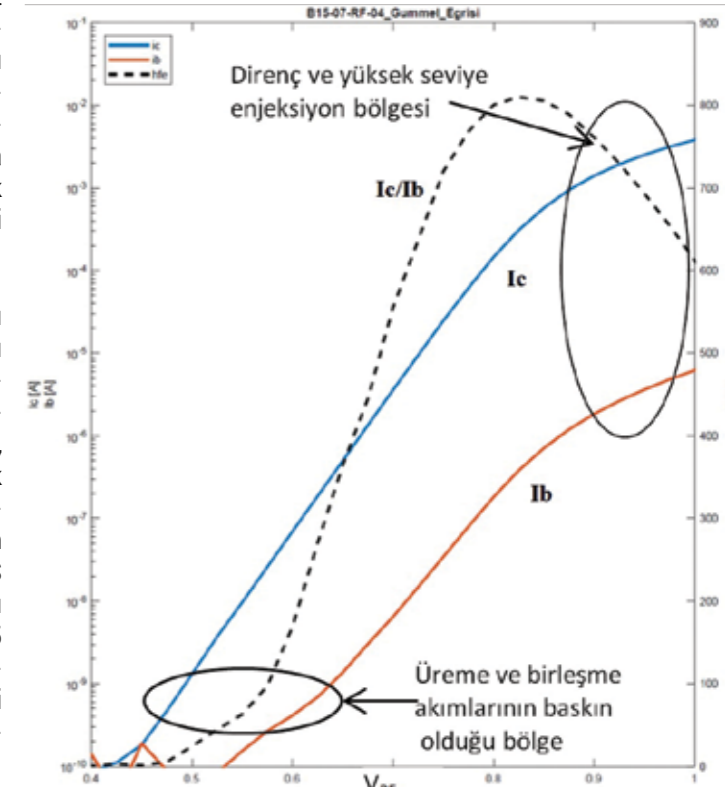
Şekil 3 Emetör ve baz bölgesinin katkı profilleri

SiGe tabakasının HBT üretim süreci boyunca maruz kaldığı ısı işlemleri nedeniyle gerinimliliğinin korunması zordur. Üretim koşullarına ve başarımlı hedeflerine göre doğru SiGe ve Si Cap kalınlığının belirlenmesi ve ısı bütçenin optimize edilmesi kritik adımlardır. SiGe tabakasının ince olması hem tabakanın gerinimli olmasını hem de -elektronların baz yolunu kısalttığı için- transistör hızının artmasını sağlamaktadır. Fakat SiGe bölgesini ince tutmak demek, baz bölgesini p-tipi yapmak için kullanılan bor atomlarını SiGe tabakası içinde tutmak ve üretim boyunca uygulanan ısı işlemlerden sonra baz bölgesinden dışarı yayılmasını engelleyebilmek demektir. Eğer bor, SiGe katmanı dışına taşarsa jonksiyonlar SiGe yerine silisyumda oluşarak parazitik enerji bariyeri oluşur ve kollektör akımı yani kazanç düşer.

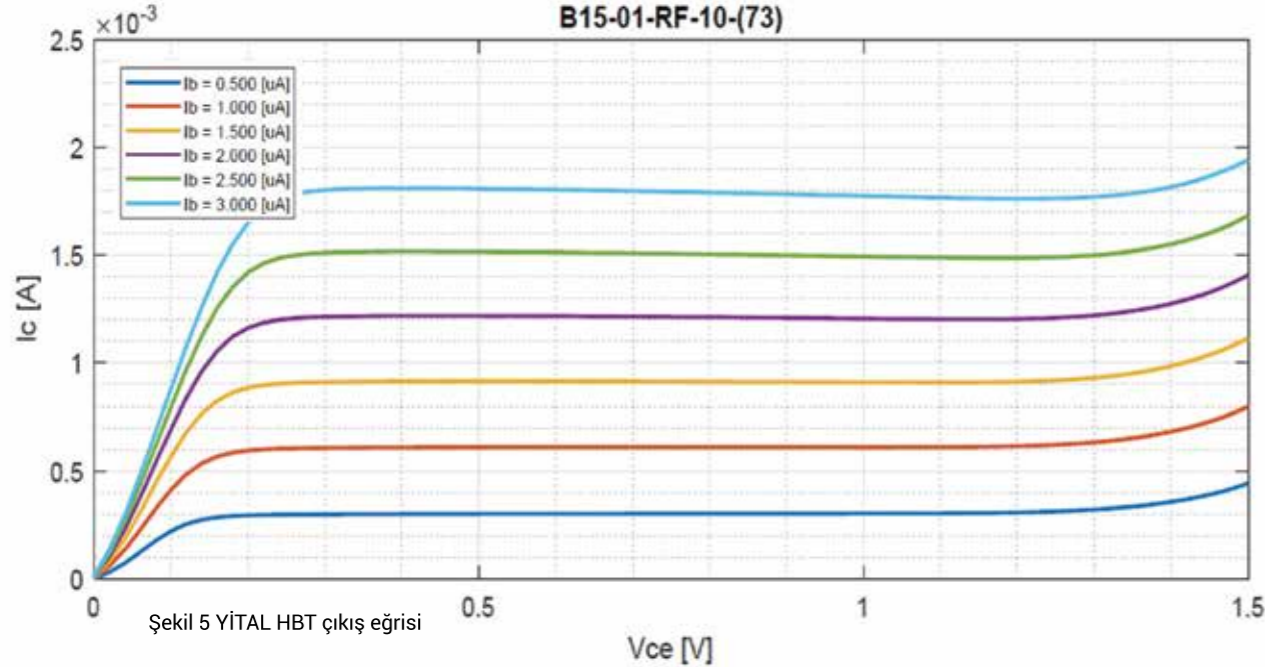
Yüksek sıcaklık işlemlerinde bor katkısının Ge katkısı ile oluşturulan baz bölgesi sınırları dışına yayılmasını baskılayan süreç, SiGe büyütülürken karbon (C) katkısı kullanımınıdır. Bu nedenle SiGe üretimi SiGe:C olarak adlandırılır. Karbon ilavesi ile baz katkı profiline, üretim adımlarına olan duyarlılığı azaltılarak esneklik kazanılır. Şekil 3'te YİTAL SiGe:C HBT yapısının emetör ve baz katkı yoğunluklarının SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) ölçüm sonuçları verilmiştir. SIMS ölçümlerinden borun SiGe katmanının içinde kaldığı görülmektedir. SiGe kalınlığı 25 nm, Si Cap kalınlığı 15 nm'dir. Bor, Ge içinde sadece 5 nm kalınlık içinde depolanır. Karbon katkısına rağmen yüksek sıcaklıktaki süreçlerle borun yayıldığı, fakat 25 nm olan SiGe bölgesinin dışına taşmadığı Şekil 3'te görülmektedir.

Kazanç Değişimi

HBT'nin akım kazancı gerilimle değişir. Düşük VBE gerilimlerinde baz akımı beklenenden yüksek iken yüksek VBE gerilimlerinde kollektör akımı beklenenden azdır. Dolayısı ile düşük ve yüksek akımlarda kazanç azalır. İdealde baz akımı, $\exp(qV_{BE}/kT)$ ile orantılı iken düşük akımlar bölgesinde $\exp(qV_{BE}/mkT)$ ile orantılı değişir.



Şekil 4 YİTAL HBT Gummel eğrisi



Şekil 5 YİTAL HBT çıkış eğrisi

m değeri 1 ile 2 arasında olması istenir. Şekil 4'te verilen YİTAL HBT Gummel eğrisinde düşük akımlarda baz akımının m değeri 2'nin altında ve orta akımlarda 1'e yakındır. Akım kazancı ise 600-800 bandındadır.

Early Olayı

Kollektör-baz jonksiyonu tıkamada iken, ideal olarak, kollektör-baz geriliminin kollektör akımı üzerinde etkisinin olmaması gerekir. Fakat tıkaama yönündeki kollektör-baz gerilimi arttıkça kollektör-baz fakirleşme bölgesi baza doğru genişler ve nötr baz bölgesi daralır. Sonuç olarak, kollektör akımı artar ve bu duruma baz genişliği modülasyonu ya da Early Olayı denir. Early Olayı dar bazlı transistörler için önemli bir konudur. Devre tasarımı açısından kollektör akımının kollektör-baz gerilimi ile değişiminin en azda kalması tercih edilir. Kollektör-baz jonksiyonunun tıkamada olduğu bölgede kollektör akımlarının eğimlerinin x-eksenini kestiği gerilim Early Gerilimi olarak tanımlanır (Şekil 5). İdealde bu gerilimin sonsuz olması gerekir. Şekil 5'te çıkış eğrisi verilen YİTAL HBT için Early Gerilimi 40 V mertebesindedir.

Belverme Gerilimi

HBT'nin kollektör-baz jonksiyonuna uygulanabilecek ters kutuplama gerilimin bir sınırı vardır. Tıkamadaki kollektör-baz jonksiyonundan kontrol edilemeyen çok yüksek bir akımın akmaya başladığı gerilime belverme gerilimi denir. Belverme, elektron-delik çiftlerinin çarpışarak başka elektron-delik çiftleri üretip akımın çok hızlı ve kontrolsüz artmasına neden olan bir mekanizmadır. Kollektör katkı yoğunluğu ile ters orantılıdır. Kollektör-emetör belverme geriliminin baz bölgesi kutuplanmasına göre iki tanımı vardır: VCBO, emetör açık devre ve baz toprakta iken; VCEO, emetör toprakta ve baz açık devre iken ölçülen jonksiyon belvermeleridir. VCEO durumunda akım transistor kazancı ile çarpıldığın-

dan belverme, VCBO gerilimine göre daha düşük bir gerilimde gözlenir. VCEO ile VCBO arasındaki ilişki (4) ile verilmiştir. VCEO, akım kazancı ile ters orantılıdır. Aynı anda yüksek kazanç ve yüksek belverme gerilimi elde edilememektedir. Bu yüzden kazanç ve belverme dikkat edilmesi gereken denge konularından biridir YİTAL HBT VCEO gerilimleri 1,7 V mertebesindedir.

$$V_{CEO} = \frac{V_{CBO}}{n/\beta} \quad [4]$$

Yüksek Kesim Frekansı f_T

Yüksek frekans performansının bir ölçütü olan kesim frekansı f_T , HBT'nin akım kazancının "1" değerine düştüğü frekanstır. İleri yönde geçiş süresi t_e ve transistör parazitikleri, f_T kesim frekansını belirlerler. İleri yönde geçiş süresi t_e , elektronların transistörün farklı bölgelerindeki geçiş sürelerinin toplamıdır:

$$\tau_F = \tau_E + \tau_{EBD} + \tau_B + \tau_{CBD} \quad [5]$$

t_{EBD} , t_B ve t_{CBD} sırasıyla emetör, emetör-baz fakirleşme bölgesi, baz ve baz-kollektör fakirleşme bölgelerindeki azınlık taşıyıcıların geçiş süreleridir. t_{EBD} ihmal edilecek kadar küçüktür. Baz geçiş süresi olarak adlandırılan t_B ileri yönde geçiş süresinin en baskın parçasıdır ve (6) ile tanımlıdır. Baz bölgesinin dar yapılmak istenmesinin temel nedeni B baz geçiş süresini düşürmektir.

$$\tau_B = \frac{W_B^2}{\eta D_{nb}} \quad [6]$$

$$\tau_E = \frac{W_E W_B N_A}{2 N_d D_{nb}} \quad [7]$$

$$\tau_{CBD} = \frac{W_{CBD}}{2 v_{sat}} \quad [8]$$

(7) bağıntısı, yüksek hızlı transistor için sığ emetör, sığ baz ve yüksek emetör katkısı gerektiğini söylemektedir. (8)'e göre kollektör-baz fakirleşmiş

bölgesinin daraltılması kollektör-baz geçiş süresini azaltmaktadır. Kollektör-baz fakirleşmiş bölgesini daraltmak için kollektör katkısının artırılması gerekir ki bu da belverme gerilimini düşürecektir.

Kesim frekansının ileri yönde geçiş süresi ve parazitik dirençler ve kapasiteler ile ilişkisi (9)'da verilmiştir.

$$f_T = \frac{1}{2\pi(\tau_F + R_C C_{JC} + \frac{kT}{qI_C}(C_{JE} + C_{JC}))} \quad [9]$$

(9), kollektör direnci ile C_{JE} baz-emetör ve C_{JC} baz-kollektör fakirleşmiş bölge kapasitelerinin düşük olmasının önemini göstermektedir.

Maksimum Osilasyon Frekansı f_{MAX}

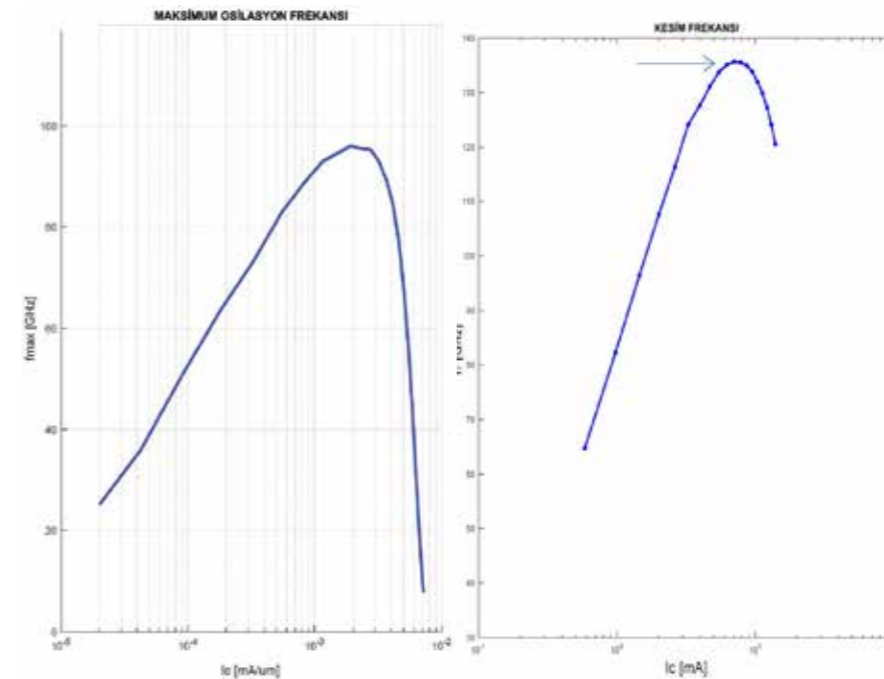
Yüksek frekans performansının diğer bir ölçütü olan maksimum osilasyon frekansı f_{MAX} , HBT güç kazancının "1" değerine düştüğü frekans olarak, (10)'da görüldüğü gibi tanımlanır.

$$f_{MAX} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_C C_{JC}}} \quad [10]$$

Maksimum osilasyon frekansı f_{MAX} parametresini sadece kesim frekansı değil, baz direnci R_B ve baz-kollektör kapasitesi C_{JC} de belirlemektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, YİTAL f_{MAX} değeri 90 GHz, f_T değeri 125 GHz mertebesindedir.

Kirk Etkisi

Yüksek akımlarda; kollektör akımının yükü, baz-kollektör fakirleşmiş bölgesinin kollektör tarafındaki sabit pozitif yükünü azalttıkça ve baz-kollektör fakirleşmiş bölgesinin baz tarafındaki sabit negatif yükünü artırdıkça fakirleşmiş bölge kollektöre doğru kayar. Efektif baz genişliği arttığı için kesim frekansı ve kazanç hızla azalır. Şekil 6'da Kirk etkisinin başlangıcı

Şekil 6 YİTAL HBT f_{MAX} ve f_T değerleri

görülmektedir. Kirk etkisini öteleyebilmek için kollektör katkısını yükseltmek gerekir. Fakat kollektör katkısı arttıkça belverme gerilimi ve baz-kollektör kapasitesi arttığından maksimum osilasyon frekansı düşer. Kendinden hizalı SIC (Selective Ion implanted Collector) yöntemiyle baz bölgesinin hemen altındaki kollektör bölgesinde katkı artırılırken derin kollektör bölgesinde katkı düşük tutulması sağlanır. Böylece kapasite çok artırılmadan katkı artırılarak belverme gerilimi, f_T ve f_{MAX} arasında denge oluşturulmaya çalışılır.

Poli Emetör

Emetör-baz jonksiyonunun çevresine ve tabanına (baza) olmak üzere iki çeşit kapasite bileşeni vardır. Hızlanmak için boyutlar küçüldükçe taban kapasitesi bileşeni küçülmekte, fakat çevre kapasitesi bileşeni taban bileşeni kadar küçülmektedir ve çevre kapasitesi baskın hale gelmektedir. Dolayısıyla, emetör-baz jonksiyon derinliği azaldıkça çevre emetör-baz kapasitesi küçülmektedir. Emetör-baz jonksiyon derinliği azaldıkça kazancın düşmemesi için emetör, polisilyum olarak büyütülür. Böylece polisilyum kalınlığı ve mono kristal fakirleşmiş bölge kalınlığı baz akımını belirlerken; sadece mono kristal fakirleşmiş bölge çevre kapasitesini belirlemektedir. Baz akımı için emetör derinliği azalmamışken, kapasite için derinlik azalmıştır. Polisilyum emetörler kazanç azalmadan emetör-baz kapasitesinin azalmasına izin verdikleri için transistörün hızlanmasını sağlamaktadır.

Emetör bölgesi oluşturulurken dikkat edilmesi gereken konulardan bir diğeri de polisilyum Si Cap arayüzüdür. Polisilyum Si Cap geçişindeki oksit delik akımını azalttığından, kazancın artmasını sağlarken emetörün direncinin artmasına neden olur. Dolayısıyla, emetör direnci ve kazanç arasında denge sağlayacak biçimde arayüz oksitinin kontrol altında olması gerekmektedir.

SiGe HBT teknolojisi, silisyum üzerinde gerçekleştirilen en karışık yarıiletken üretim sürecidir. YİTAL SiGe HBT üretim süreci 230 adım ve 21 maske, YİTAL SiGe BiCMOS üretim süreci ise 300 adım ve 33 maskeden oluşmaktadır. YİTAL SiGe HBT teknolojisi ile entegrasyonu, ilk SiGe BiCMOS üretiminde başarıyla sağlanmıştır. YİTAL'in, askeri standartlarda onbinlerce CMOS tümdevresinin sahada aktif kullanılmasına dayalı yoğun bir CMOS üretim tecrübesine sahip olması, BiCMOS entegrasyonunun ilk seferde tamamlanmasını sağlamıştır. YİTAL SiGe HBT süreci, var olan YİTAL CMOS süreci dikkate alınarak geliştirilmiştir. YİTAL, geliştirdiği SiGe BiCMOS teknolojisi ile X-bandında RF tümdevreler üretmeye başlamıştır.

Akıllı Kartlar: Kritik Verilerimizin Adresi

“ Akıllı Kartlar, manyetik kartlardan binlerce kat fazla veri depolayabilmekte ve farklı uygulamaları aynı anda destekleyebilmektedir. ”



Dr. Giray Kömürçü – Başuzman Araştırmacı, Sedat Soydan – Başuzman Araştırmacı / BİLGEM UEKAE

Akıllı Kartlar, üzerlerindeki mikroişlemci, veri depolama alanları ve şifreleme donanımlarıyla kişisel verilerin belirlenen amaçlar doğrultusunda işlenip saklanması ve gerektiğinde doğrulanmış uygulamalarla paylaşılmasında kullanılan elektronik tümdevrelerdir (IC). İlk olarak 1968 yılında geliştirilmeye başlanan akıllı kartlar, bugün başta kimlik kartı, pasaport, kredi kartı, sim kart, e-bilet ve sağlık kartı olmak üzere birçok üründe kullanılmaktadır.

Üründen ürüne değişmekle birlikte genelde kredi kartı boyutlarında plastik levhalara entegre edilen tümdevreler, kart okuyucularla temaslı ya da temassız olarak iletişim kurabilmektedir. Akıllı kartlar, özellikle bankamatik kartı olarak kullanılan manyetik kartlardan binlerce kat fazla veri depolayabilmekte ve farklı uygulamaları aynı anda destekleyebilmektedir. Akıllı kartlar bu yeteneklerinden dolayı yoğun olarak kullanılmaktadır.

Akıllı kartların genel özellikleri

Akıllı kartlar temel olarak bir mikroişlemci ve çevre birimlerden oluşur. Kullanılacak mikroişlemci hedeflenen performans ve güç tüketimine göre 8bit, 16bit, 32bit gibi farklı mimarilere sahip olabilir. Dış dünyadan gelen komutların yorumlanması, istenen işlemlerin mikroişlemci ve çevre birimleri kullanılarak gerçekleştirilip cevabın uygun formatta gönderilmesi işlevini yerine getiren işletim sistemi akıllı kartların önemli bileşenlerinden biridir. Bu işletim sisteminin depolanacağı uygun büyüklükte bir ROM (Sadece Okunabilir Bellek), işlemler esnasında kullanılacak bir RAM (Rastgele Erişilebilir Bellek) ve kullanıcı verilerinin, sertifika ve anahtar gibi bilgilerin saklanması sağlayacak uçucu olmayan bir bellek de (Flash, EEPROM) akıllı kartın hafıza bileşenlerini oluşturmaktadır.

Akıllı kartlar, yüksek güvenlik gerektiren uygulamalarda kullanıldıklarından Simetrik ve Asimetrik krypto işlemlerini yüksek performansla gerçekleştirmeleri gerekmekte ve buna uygun donanımlar barındırmaktadır. Yoğun olarak kullanılan simetrik algoritmalar arasında DES3 (Data Encryption Standart) ve AES (Advanced Encryption Standard), asimetrik algoritmalar arasında ise RSA (Rivest, Shamir, Adleman) ve ECC (Elliptic Curve Cryptography) yer almaktadır.

Dış dünya ile haberleşmeyi temaslı ve temassız olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştiren akıllı kartlardan bazıları iki arayüzü birden barındırdıkları için çift arayüzlü olarak adlandırılmaktadır.

“ Akıllı kartlar hem son derece kritik verilerin işlenip saklanmasında görev aldıkları, hem de çok yaygın olarak kullanıldıkları için saldırılara açık ürünlerdir. Bunlar arasında yan kanal analizi, hata yaptırma ve tersine mühendislik saldırıları sayılabilir. ”

Temaslı iletişim için ISO-7816, temassız iletişim içinse ISO-14443 standardı kullanılmaktadır. Asıllama (Authentication) işlemleri ve iç güvenlik fonksiyonlarının yoğun olarak ihtiyaç duyduğu rasgele sayıları üreten Gerçek Rasgele Sayı Üretici (TRNG) de kritik öneme sahiptir.

Bunlar dışında akıllı kartlarda Regülatör, Osilatör, PLL (Phased Locked Loop), Band Gap gibi yardımcı donanımlar ile Akıllı Kartlarda Güvenlik bölümünde detaylı olarak anlatılacak Aktif Kalkan, Algılayıcılar, CRC (Cyclic Redundancy Check – Döngüsel Artıklık Denetimi) gibi modüller yer almaktadır.



Akıllı kartlarda güvenlik

Saldırıları

Akıllı kartlar hem son derece kritik verilerin işlenip saklanması görev aldıkları hem de çok yaygın olarak kullanıldıkları için saldırılara açık ürünlerdir. Uygulanan başlıca saldırılar arasında yan kanal analizi, hata yaptırma ve tersine mühendislik saldırıları sayılabilir.

Yan kanal analizi, devrenin çalışması sırasında beslemeden çektiği akımın ya da dışarı yaydığı elektromanyetik yayınının kaydedilip istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek gizli bilgilerin elde edilmesini amaçlayan saldırılardır. Bu saldırılar devrenin çalışmasını bozmadıklarından işgalci olmayan saldırılardır.

Hata yaptırma saldırıları, tümdevrenin besleme gerilimi, ortam sıcaklığı, saat frekansı gibi dış ortam koşullarının izin verilen koşulların dışına çıkarılarak ya da lazer atışı gibi yöntemlerle hatalı çalışmasına yol açılarak gizli bilgilerin elde edilmesini amaçlayan saldırılardır.

Tersine mühendislik saldırıları, tümdevreye fiziksel ya da kimyasal yöntemlerle müdahale edilerek elektron mikroskobu gibi cihazlar yardımıyla incelenmesi ve bilgi toplanmaya çalışılmasına dayanır. Bu saldırılarda tümdevrenin işlevini yitirmesi göze alınabileceği gibi, FIB (Focused Ion Beam – Odaklanmış İyon Demeti) gibi ileri teknoloji ürünü cihazlarla işlevine zarar vermeksizin çalışma esnasında da veri toplamak mümkündür.

Güvenlik önlemleri

Akıllı kartlar tüm bu saldırılara karşı güçlü güvenlik önlemleriyle donatılmış olarak üretilir ve güvenlik testleri yapılarak sertifikalandırıldıktan sonra kullanıma sunulurlar.

Yan kanal analizi saldırıları yapıları gereği işlenen verinin güç tüketimi üzerinde yarattığı etkileri temel aldıklarından bu saldırılara karşı alınan önlemlerin en temel amacı da işlenen veri ile güç tüketimi arasındaki korelasyonun ortadan kaldırılmasıdır. Bu kapsamda kriptografik işlem modüllerinde algoritmaların rasgele sayılarla maskelenerek çalıştırılması, işlem sırasında, öncesinde ve sonrasında sahte işlemler yapılması gibi önlemler alınmakta ve bu sayede tümdevrenin üst düzey saldırılara karşı dahi güvenli olması sağlanmaktadır.

Hata yaptırma saldırılarına karşı alınan önlemlerin başında tümdevrenin çalışma koşullarının belirlenen aralığın dışına çıktığını tespit eden algılayıcıların kullanılması yer alır. Bu sayede bir saldırı anında çalışmanın durdurulması ve bilgi kaçağının önlenmesi mümkün olmaktadır. Bir diğer alınan önlem kritik işleve sahip kütüklerin ve mikroişlemcinin ikişer adet uygulanıp birbirlerini kontrol edecek şekilde tasarlanmalarıdır. Bu sayede lazer saldırısı gibi sebeplerle ortaya çıkacak hatalar anında tespit edilerek doğru çalışma garantisi sağlanmaktadır. Ayrıca mikroişlemci ve kriptomodüllerinde çalışma rasgele durdurularak saldırganın yapmak istediği saldırının zamanlamasını tutturmasını zorlaştırılmaktadır.

“ Akıllı kartların yüksek güvenlik düzeyleri ve resmi işlemlerden finansal operasyonlara, hemen her alanda ihtiyaç duyulan ürünler olmaları nedeniyle, önümüzdeki süreçte de yoğun olarak kullanılmaları beklenmektedir. ”

Hata yaptırma saldırılarının bir amacı da saklanan verileri bozarak hatalı verilerle işlem yaptırmaktır. Bu nedenle RAM, ROM ve Flash Bellekte saklanan verilerin CRC yöntemi ile veri bütünlüğü sağlanmaktadır. Veri bütünlüğünün bozulması durumunda kartın çalışması durdurularak bilgi kaçağı oluşması engellenmektedir. Simetrik ve asimetrik şifreleme işlemleri sırasında yapılabilecek hata yaptırma saldırılarına da algoritmik seviyede önlem alınmakta, işlem sonuçlarının hatasız olarak dış dünyaya iletilmesi sağlanmaktadır.

Tersine mühendislik saldırılarını önleme yöntemlerinin başında Aktif Kalkan gelmektedir. Aktif Kalkan tümdevrenin en üst metal tabakasında yer alan birbirine paralel metal hatlardan oluşur. Bu hatlara rasgele veriler uygulanır ve kartın farklı noktalarından okunarak kontrol edilir. Eğer aktif kalkan bir açık devre ya da kısa devre sezerse çalışma durdurulur. Bu sayede saldırganın devreye fiziksel olarak müdahale edip çalışma esnasında alt katmanlara erişmesi engellenmiş olur.

Verilere erişimin zorlaştırılması amacıyla ROM, RAM ve Flash Bellekteki veriler şifreli halde saklanır. Bu güvenlik önlemi ile saklanan veriler tersine mühendislik yöntemleriyle okunsalar bile güvenlik açığı oluşmasının önüne geçilmiş olur. Ayrıca ROM ve RAM'da saklanan verilerin adresleri de karıştırılır ve sıralı okumaların dışarıdan gözlemlenmesi engellenir. Benzer nedenlerle mikroişlemci ile kriptoblokları arasındaki veri ve adres yolları da şifrelenmişlerdir. Bunların yanında RAM ve Flash Bellek bloklarından veri okunmadığı zamanlarda rasgele okumalar yapılarak hassa verilerin okuma zamanlamasının saldırgan tarafından tespit edilebilmesinin önüne geçilmektedir. Saldırganın bu yolları dinleyebildiği durumda bile hassas verilere erişmesi şifreleme nedeniyle mümkün olmayacaktır.

Akıllı kartlarda alınan hemen hemen tüm güvenlik önlemleri rasgele sayılara dayanmaktadır ve bu sayıların yüksek kaliteli olması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle RNG (Rastgele Sayı Üretici) tarafından üretilen tüm rasgele



sayılar testten geçirilmeli ve belirlenen metrikleri sağlayanlar kullanılmalıdır. Tüm bu güvenlik önlemlerinin yanında tümdevrenin açılış anında mikroişlemci, kriptomodülleri ve TRNG gibi kritik blokların self testleri yapılarak hatasız çalışmaları kontrol edilerek çalışma başlatılır.

YİTAL Akıllı Kart Geliştirme Projesi

2006 yılında YİTAL'de başlayan akıllı kart geliştirme projesinde milli olarak tasarlanan ilk prototipler 2009 yılında üretilmiş ve pilot uygulamalarda başarıyla test edilmiştir. Takip eden dönemde performans olarak iyileştirilen 2 farklı akıllı kart versiyonu üretilmiş ve EAL 5+ güvenlik sertifikası olarak kullanıma hazır hale gelmiştir. Bu kartlardan bir bölümü Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde kimlik kartı olarak dağıtılmış olup aktif olarak kullanılmaktadır. Temaslı ve temassız olmak üzere çift arayüzlü olarak tasarlanan yeni akıllı kart versiyonunun da 2021 yılı içinde kullanıma sunulması planlanmaktadır.

Tüm dünyanın dijitalleştiği ve elektronik ortamın her zamankinden yoğun olarak kullanıldığı günümüzde kişisel verilerin korunumu, mahremiyet, finansal güvenlik gibi konular büyük önem kazanmaktadır. Akıllı kartların yüksek güvenlik düzeyleri ve resmi işlemlerden finansal operasyonlara hemen her alanda ihtiyaç duyulan ürünler olmaları nedeniyle önümüzdeki süreçte de yoğun olarak kullanılmaları beklenmektedir. YİTAL olarak geliştirdiğimiz akıllı kartların kimlik kartı, pasaport, güvenli mikro SD kart, HSM gibi ürünlerde kullanımı hedeflenmektedir.

e-İmza Test Suit Çalışması

“ TÜBİTAK BİLGEM Kamu Sertifikasyon Merkezi (Kamu SM) kurumsal kimliği, tecrübesi ve alanında uzman ekibi ile elektronik imza çalışmalarında etkin rol almakta ve uluslararası standartları takip ederek ülkemizde ortak çalışabilirlik ortamını tesis etmeyi amaçlamaktadır. ”



Dr. Tamer Ergun – Başuzman Araştırmacı, Erhan Turan – Başuzman Araştırmacı,
Meltem Seyirt – Araştırmacı, M. Melis Şimşek - Araştırmacı / BİLGEM KAMU SM

e-İmza uygulamalarının elektronik imza mevzuatında geçen uluslararası teknik standartlara uygunluğu ve uygulamalarla ortak çalışabilirliği, Elektronik İmza Uyum Değerlendirme Hizmeti adı altında Kamu SM tarafından değerlendirilmektedir. Uyum değerlendirmenin başlıca hizmet alanları şunlardır:

- ✓ Elektronik Belge Yönetim Sistemi (EBYS) yazılımları
- ✓ Elektronik Yazışma Projesi (EYP) yazılımları
- ✓ Kayıtlı Elektronik Posta Hizmet Sağlayıcı (KEPHS) yazılımları

Elektronik imza uygulamalarının değerlendirilmesi, e-imza mevzuatında geçen uluslararası standartlara dayanan Kamu SM Elektronik İmza Uygulamaları Test Prosedürleri'ne uygun olarak yapılmaktadır (Şekil 1).

Test Prosedürleri, uyum değerlendirme hizmetinin nitelikli bir şekilde yapılabilmesi adına Kamu SM bünyesinde geliştirilmiş özgün bir çalışma olan Test Suit'i temel almaktadır. Test Suit; imza oluşturma, doğrulama ve arşivleme bölümlerine sahip, detaylı çerçevede tasarlanmış elektronik imza test ortamıdır.

İmza Oluşturma Test Suiti

İmza oluşturma test suiti, güvenilir imza için zorunlu olan zaman damgası ve nitelikli elektronik sertifikayla ilgili senaryoları barındırır (Şekil 2). 73 farklı test sertifikası; sertifikanın iptal olması, geçerlilik süresinin dolması başta olmak üzere siber saldırı ihtimallerini en aza indirmeyi hedefleyerek, elektro-

“ Güvenilir elektronik imzanın oluşturulması için sertifika ve zaman damgası kontrolleri kritik öneme sahiptir. ”

nik imzanın temel aldığı açık anahtar altyapısında oluşabilecek durumları tetikleyecek şekilde oluşturulmuştur. Ek olarak, zaman damgası hizmeti ile ilgili oluşabilecek senaryoların gerçekleştiği zaman damgası sunucuları da Test Suit kapsamında hizmet vermektedir. Amaç, imza oluşturma uygulaması geliştiricilerin, zaman damgası doğrulama mekanizmalarını test edebilmesidir.

Elektronik sertifika, imza sahibinin imza doğrulama verisini ve kimlik bilgilerini birbirine bağlayan elektronik kaydı ifade eder. İfadeden de anlaşılacağı gibi kişinin elektronik ortamda kendisini ispatlaması için kullanılan elektronik kimliktir.



Şekil 2. İmza Oluşturma Senaryoları



Şekil 1. e-İmza Mevzuatı ve Uluslararası Standartlar



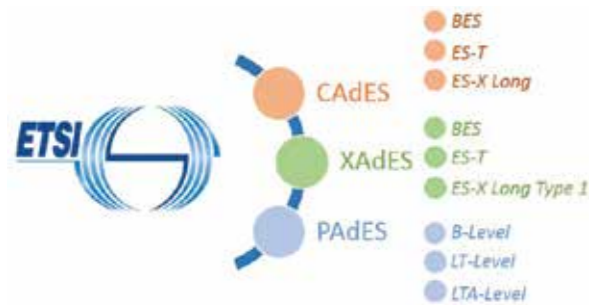
Elektronik imza uygulamalarının, imzalama işlemi öncesi imzacı sertifikası ve zincirdeki tüm sertifikaların geçerlilik kontrollerini yapması gerekmektedir.

İptal ve geçerlilik süresi gibi sertifika doğrulama kontrollerini yerine getirmeyen uygulamalar, yasal olarak geçersiz imza oluşturulmasına sebebiyet verecektir.

Zaman damgası (ZD), bir elektronik verinin; üretildiği, değiştirildiği, gönderildiği, alındığı ve/veya kaydedildiği zamanın tespit edilmesi amacıyla, ESHS tarafından elektronik imzayla doğrulanan kaydı ifade eder. Zaman bilgisinin ispatı için kullanılır.

İmzaya eklenen ve imza zamanını belirten zaman damgası, uzun dönemli imzalar için bulunması zorunlu bir bileşendir. Bu sebeple zaman damgalı imza oluşturan uygulamaların, imzalama işlemi sırasında zaman damgası geçerlilik kontrollerini yapması gerekmektedir.

Güvenilir elektronik imzanın oluşturulması için sertifika ve zaman damgası kontrolleri kritik öneme sahiptir. Elektronik imza uygulamalarının bu kontrolleri eksiksiz bir şekilde yerine getiriyor olması gerekmektedir.



Şekil 3. ETSI e-İmza Formatları

İmza Doğrulama Test Suiti

İmza doğrulama test suiti, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından tanımlanan CAAdES [1], XAdES [2] ve PAdES [3] imza formatları ve bu formatların alt tiplerinde imzalı dosyaları barındırmaktadır (Şekil 3). İmzalı dosyalar; sertifika doğrulama, zaman damgası ve imza tipine özgü geliştirilmiş senaryoları kapsamaktadır.

Test suit kapsamında 1182 adet imzalı dosya bulunmaktadır. Test edilecek uygulamanın desteklediği imza formatlarına göre ilgili dosyalar kullanılarak detaylı değerlendirme yapılmaktadır.

Güvenli elektronik imza uygulamalarının, imza doğrulama test suiti içerisinde yer alan imzalı dosyaları standartlara uygun şekilde doğrulaması gerekmektedir.

İmza Arşivleme Test Suiti

İmza arşivleme test suiti, arşivleme ihtiyacı gerektirecek senaryoları kapsayan imzalı dosyaları içermektedir (Şekil 4).

Arşivleme, sertifika makamına ait sertifikaların geçerlilik süresinin sonuna yaklaşılması, sertifikaların iptal olması, kullanılan algoritmaların geçerliliğini yitirmesi veya kök sertifikasının güvensiz hale gelmesi durumlarında yapılan, zayıflayan imzaya imzadaki tüm eklentileri kapsayacak şekilde bir zaman damgası eklenmesidir. Eklenen bu zaman damgası, arşiv zaman damgasıdır.

Elektronik imzalı dosyaların uzun dönemli ve kriptografik ataklara karşı dayanıklı bir şekilde saklanabilmesi için elektronik imza uygulamalarında gerekli arşivleme altyapısı sağlanmalıdır.



Şekil 4. İmza Arşivleme Senaryoları

e-İmza Test Suit Portalı

Test Suit Portalı, e-imza teknolojileri farkındalığının artırılması, uyum değerlendirme hizmeti öncesi test prosedürlerinin incelenmesi ve uygulamaların testlere hazır hale gelmesini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Uyum değerlendirme kapsamındaki uygulamaların yanı sıra diğer elektronik imza uygulamalarının da bu test ortamından faydalanması ve ortak çalışabilirliğin tüm elektronik imza uygulamalarına yayılması hedeflenmektedir.

- e-İmza Uygulamanız,
- ▶ Sertifika ve zaman damgası geçerlilik kontrollerini yerine getirebiliyor mu?
 - ▶ Geçersiz imzalı bir dosyayı yakalama kabiliyetine sahip mi?
 - ▶ Uzun dönemli saklama için arşivleme senaryolarının tamamını sağlıyor mu?

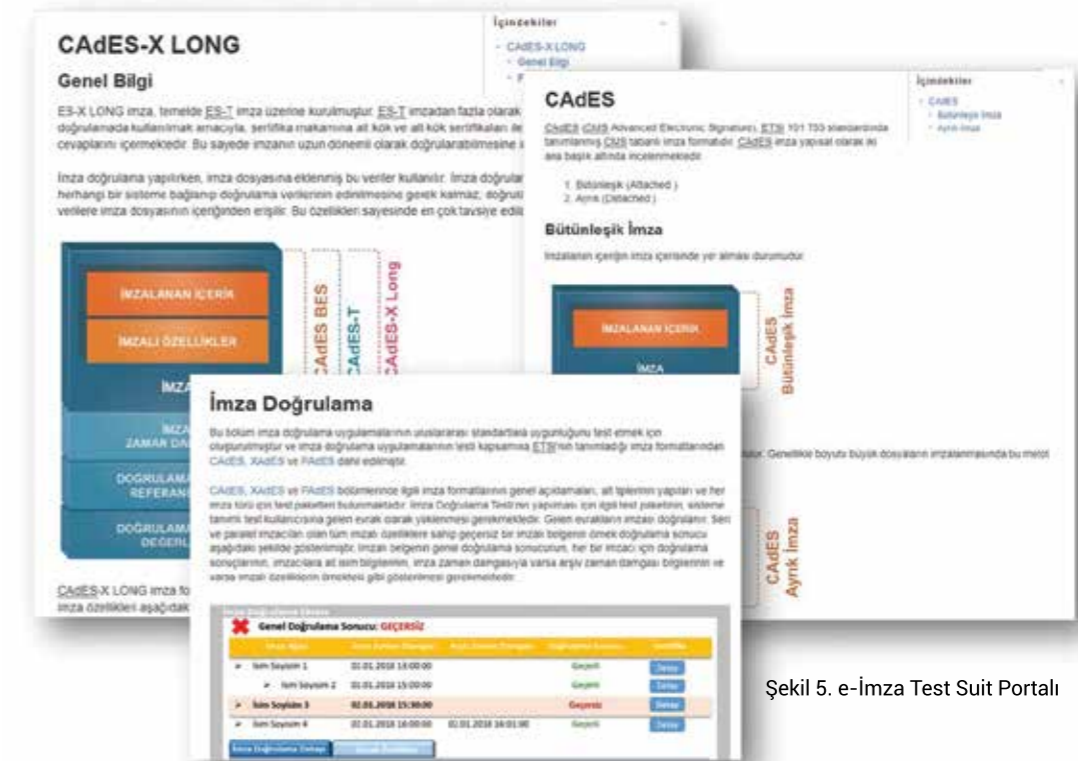
Elektronik imza hakkında tüm bu ve benzeri sorularınızın cevabını e-İmza Test Suit Portalında bulabilirsiniz.

Siz de e-imza uygulamanızın imza oluşturma, doğrulama ve arşivleme bileşenlerinin standartlara uygun çalışıp çalışmadığını merak ediyorsanız Test Suit Portalına şu adresten erişerek testlerinizi gerçekleştirebilirsiniz:

<https://yazilim.kamusal.gov.tr/eit-wiki/doku.php>

Kaynakça

- [1] ETSI TS 101 733, Electronic Signatures and Infrastructures (ESI); CMS Advanced Electronic Signatures (CAAdES) (2009).
- [2] ETSI TS 101 903, Electronic Signatures and Infrastructures (ESI); XML Advanced Electronic Signatures (XAdES) (2010).
- [3] ETSI TS 102 778, Electronic Signatures and Infrastructures (ESI); PDF Advanced Electronic Signatures (PAdES) (2009).

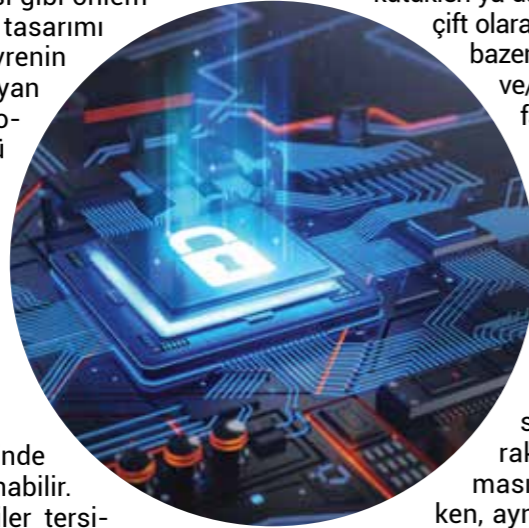


Şekil 5. e-İmza Test Suit Portalı

beple, tasarımı yapılan cihazın kritikliği, içerdiği bilgilerin gizliliği ve önemi doğru analiz edilerek güvenlik tedbirleri bu ölçüde uygulanmalıdır. Örneğin, pil/batarya kullanan ve güç tasarrufunun önem arz ettiği taşınabilir bir gömülü cihazda, ihtiyaç analizi yapılmadan alınmış güvenlik önlemleri, cihazın güç tüketimini önemli ölçüde artıracak ve batarya/pil kapasitesinin daha hızlı tüketilmesine sebep olacaktır.

Donanım Seviyesi-Tedbirler

Saat işaretinin maskelenmesi, zamanlama ve güç tüketiminin rastgeleleştirilmesi, çalışmasının rastgele durdurulması gibi önlemler için mikroşlemcinin tasarımı aşamasında bir sayıcı devrenin kullanılmasıyla, çeşitli yan kanal saldırılarına karşı koruma sağlanabilir. Gömülü sistem içinde saklanacak veriler ROM, RAM, Flash gibi veri saklayan hafıza birimlerinde şifrelenerek saklanabilir ve tek saat darbesinde şifreleme veya şifre çözme işlemi gerçekleştirilebilir.



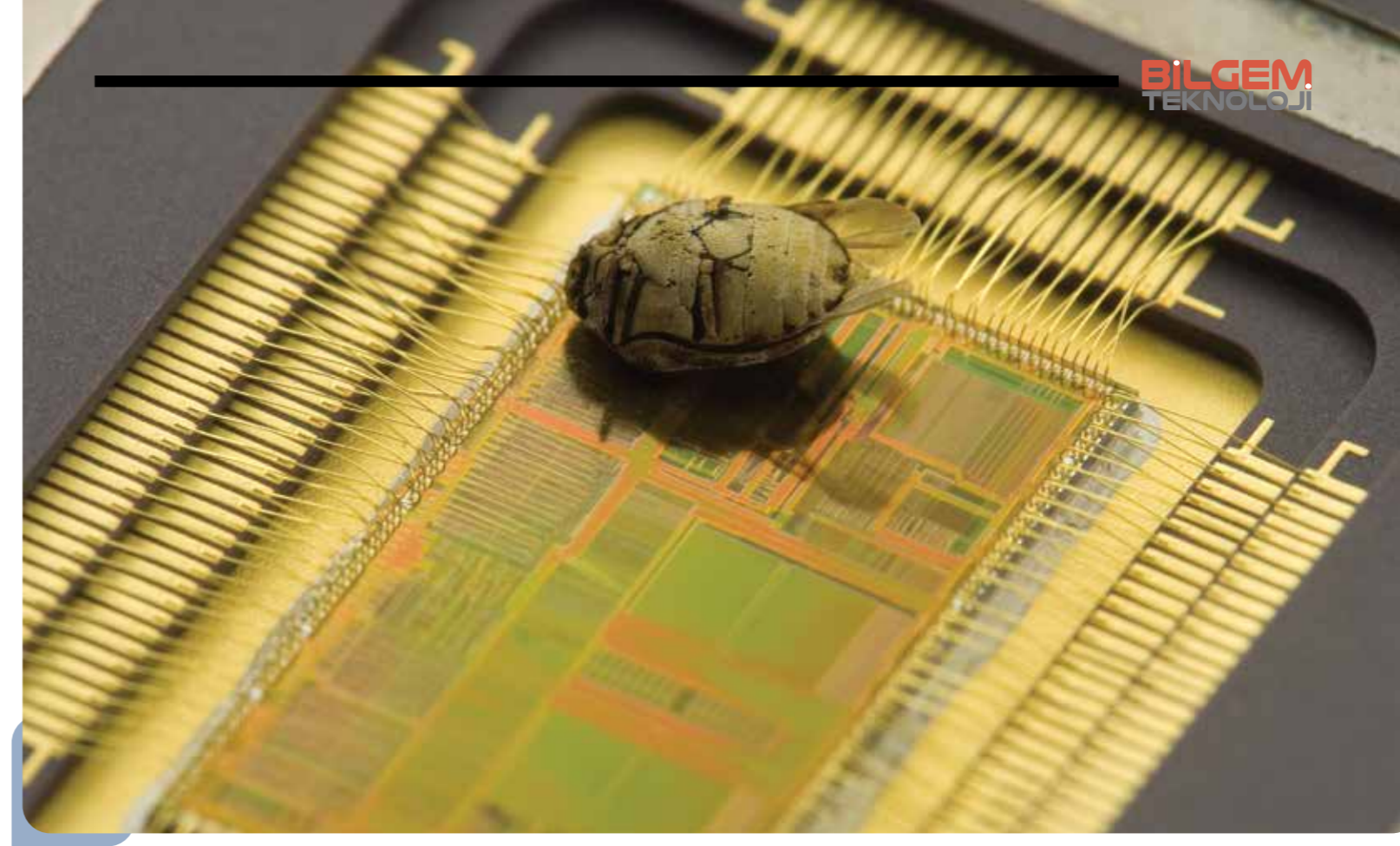
Kritik veriler, bellek üzerinde rastgele adreslerde saklanabilir. Sıralı olarak saklanan verilerin mühendislik saldırılarında saldırganın işini kolaylaştıracağından, özel bir donanım bloğu tasarlanarak adres karıştırma işlemi uygulanabilir.

Veri ve adres yollarının, sabit ya da LFSR (Linear Feedback Shift Register) yardımıyla üretilen bir sayıyla özel fonksiyona (örneğin, XOR) tabi tutulmasıyla da güvenlik artırılabilir. Ayrıca gömülü sistemi oluşturan tümdevrelerde, iki birim arasında iletilen veriler üzerinde bütünlük karşı-

Gömülü sistemlere sıklıkla gerçekleştirilen uygulama seviyesi saldırılarının başında enjeksiyon saldırıları gelmektedir.

laştırması (checksum) yardımıyla veri doğrulanması da yapılabilir. Cihazda, bekleme konumunda da veri ve adres yollarına LFSR gibi bir donanım yardımıyla gürültü basılarak saldırgan yanıltılabilir. Ek olarak, bir gömülü sistem donanımına ait kritik veri kütükleri ya da mikroşlemci gibi donanımlar çift olarak tasarlanıp, bazen eş zamanlı bazen gecikmeli çalışma sağlanarak ve/veya tümleşik devre üzerinde farklı konumlara yerleştirilerek de saldırganlar yanıltılabilir.

Güç harcamasının dengelenmesi için iki kat fazla RAM kullanılabilir ya da özel RAM tasarımı yapılabilir. Mantıksal devre elemanları ve aralarındaki bağlantılar, aynı kapasiteye sahip olacak şekilde çift olarak tasarlanabilir. Sürekli çalışması gereken cihazlar tasarlanırken, aynı işi yapan birden fazla blok kullanılarak işlem sırasında yapılacak oynamayla birinin rastgele çalışması sağlanabilir. Cihazın güç beslemesi tasarlanırken, kullanacağı saat darbesini kendisinin üretmesi sağlanarak, sistemin dışından gelebilecek ataklara karşı güvenliği artırılabilir. Dinleme, lazer atışı ve iyon demeti gibi saldırılara karşı devre bloklarının yerinin tespit edilememesi için, bu blokların üretimde rastgele yerleştirilmesiyle ekstra güvenlik sağlanacaktır.



Pasif kalkan, alt tabakaların görüntülenmesini engellediği gibi lazer saldırılarına karşı koruma sağlar. Metal bir kafes olan pasif kalkanın boşluklu yapıda olması ve bu boşlukların olabileceğince sık bulunması, düşük maliyetle koruma sağlamaktadır. Aktif kalkan ise üzerinden akım geçirilen çok sıkı konumlandırılmış birçok iletken hatla sarılmış bütünleşmiş (entegre) devre bloğu üzerinde bulunan metal bir kafestir. Bu hatlar üzerinde sürekli açık/kapalı devre kontrolü yapılarak gömülü sistem devresine dışarıdan yapılacak kötü niyetli saldırılar engellenmeye çalışılır. Pasif kalkan nazaran maliyetli olmasına karşın daha fazla güvenlik sağlar. Bu bağlantıların, birden fazla noktadan kontrol edilmesi daha iyi bir koruma sağlayacaktır.

Gömülü sistem devresi tasarlanırken belirlenen sıcaklık, frekans aralığı, besleme gerilimi gibi çalışma koşullarını denetleyecek analog sensörler, ya da kullanılabiliriyorsa daha yeni bir yaklaşım olan dijital sensörler kullanılmalıdır. Analog ve dijital sensörlerden gelen veriler gömülü sistem tümleşik devresi içinde değerlendirilerek cihaza harici müdahale olup olmadığı tespit edilebilir. Bu sayede, çalışma koşullarının değiştirilmesiyle yapılan saldırılar sonucunda meydana gelebilecek zafiyetlerin önüne geçilebilir.

Burada bahsedilen önlemlerin ihlali fark edildiğinde kesme ve silme sinyali üretilerek, gerektiğinde derhal kritik bilginin silinmesi ve donanımın durdurulmasını sağlayacak bir yapı tasarlanmalıdır. Bu sayede, saldırganların kötü niyetli girişimlerinin önüne geçilebilir.

Uygulama Seviyesi-Tedbirler

Gömülü sistem yazılımları incelendiğinde, bilişim sistemlerinde yazılım geliştirmek için yaygın olarak tercih edilen Assembly, C/C++, Python, Perl, Lua ve Rust gibi programlama dillerinin kullanıldığı görülmektedir. Kullanılan programlama dillerinin yaygınlığı, işletilen yazılım geliştirme süreçlerinin benzerliği ve sürdürülen faaliyetlerin kritikliği dolayısıyla güvenli yazılım geliştirme süreçlerinin uygulanması, gömülü sistemlerde siber güvenliğin sağlanmasında önem arz etmektedir.

Gömülü sistemlere sıklıkla gerçekleştirilen uygulama seviyesi saldırıların başında Ekleme (Enjeksiyon) Saldırıları gelmektedir. Çoğunlukla Komut Enjeksiyonu olarak karşımıza çıkan bu saldırıları engellemek için güvenilmeyen tüm verilerin ve kullanıcı girişlerinin doğrulandığından, temizlendiğinden ve/veya çıktılarının kodlandığından emin olunmalıdır. Ayrıca, bilinen açıklara karşı koruma sağlamak için çekirdeğin, yazılım paketlerinin ve üçüncü taraf kütüphanelerin zafiyet içermediğinden emin olunmalıdır.

Bu kapsamda, maruz kalınması muhtemel başka bir saldırı olan arabellek ve yığın taşmasını engellemek adına, güvenli olmadığı bilinen fonksiyonlar ve Uygulama Programlama Arayüzleri (Application Programming Interface, API) kullanılmamalıdır. Bunlara örnek olarak, C dili için strcpy (Kopyalama komutu), strcat (Birleştirme komutu) ve scanf (Okuma komutu) gösterilebilir. Bunların tespiti, Buildroot ve Yocto gibi gömülü Linux derleme araçları ta-





Çölde Bulunan Gizli Bir Askeri Üssün Akıllı Saat Kullanıcılarına Ait Isı Haritası İle İfşası

rafından yapılabilmektedir. Güvenli olmadığı bilinen kütüphanelerin ve protokollerin kullanılmaması yalnızca atak yüzeyini küçültmekle kalmayıp tasarım gereği güvenlik (secure-by-design) yaklaşımı açısından da uygun bir faaliyet olacaktır.

MIRAI ve BASHLITE gibi zararlı yazılımların, belirli araçlara (örneğin Busybox) sahip sistemleri hedef aldığı bilinmektedir. Bu kapsamda çeşitli zararlı yazılımlar tarafından kullanıldığı bilinen araçların, geliştirilecek sistemde kullanımları sınırlandırılmalıdır. Ayrıca, kötü niyetli saldırıları önlemek için sistem faaliyetleri (dahili konsol erişimi ve uzaktan web yönetimi gibi) için kullanılan hesapların, kullanıcı hesaplarından farklı olması sağlanmalıdır.

Sızması durumunda müşterileri tehlikeye atabilecek nitelikteki bilgilerin (T.C. kimlik numarası, adres, vb.) toplanması gerekiyorsa, tasarımda gizlilik (privacy-by-design) kavramına uyulmalıdır. Örneğin, kullanıcılarından gelen akıllı saat verilerini anonimleştirerek ısı haritası olarak internet üzerinden erişime açan bir uygulama, Afrika'da çölün ortasında bulunan gizli bir askeri üssün varlığının açığa çıkmasına sebep olmuştur. Yazılımın yayınlanmadan önce, gereksiz/kullanılmayan kodları ve/veya yetkili kullanıcı hesaplarının kaldırıldığından emin olunmalıdır. Ayrıca, şifreleme (kriptografik) yöntemlerinden faydalanılarak güvenilir güncelleme mekanizmaları tasarlanmalıdır. Kriptografik uygulamada kullanılacak tüm iletişim yöntemlerinde, Taşıma Katmanı Güvenliği (Transport Layer Security, TLS) gibi endüstri standardı şifreleme yapılandırmaları tercih edilmelidir. Parola, kullanıcı adı ve özel anahtar gibi bilgiler, yazılım bünyesinde sabit

olarak (hardcoded) tanımlanmamalıdır. Ayrıca, hassas verilerin depolanmasında mümkün olduğunca Güvenilir Yürütme Ortamı (Trusted Execution Environment, TEE) gibi özelliklerden faydalanılmalı ya da güçlü kriptografik yöntemlerle veriler korunmalıdır.

En iyi durum senaryosuna göre, açık metin halindeki tüm hassas veriler, bilgisayar yapısı gereği, geçici olmalı ve yalnızca geçici bir bellekte bulunmalıdır. Gömülü sistem bünyesinde üretilen rastgele sayılar ise canlılık ve/veya kalite testlerine tabi tutularak sistem güvenliği artırılabilir. İlgili testler, gömülü cihazının her açılışında gerçekleştirilebileceği gibi kritik işlem öncesinde de tekrarlanabilir.

Sonuç

Gömülü sistemler, saldırganlar tarafından sıklıkla hedef alındığından güvenlik, öncelikli bir gereksinim olarak kabul edilmelidir. Gömülü sistemlerde siber güvenlik, donanım katmanında alınan önlemlerin uygulama seviyesi önlemlerle desteklenmesiyle sağlanabilir. Bu sistemlerde bilginin; gizliliğini, bütünlüğünü ve erişilebilirliğini korumak yalnızca ilgili seviyeler için uygun tedbirlerin alınmasıyla mümkün olabilir.

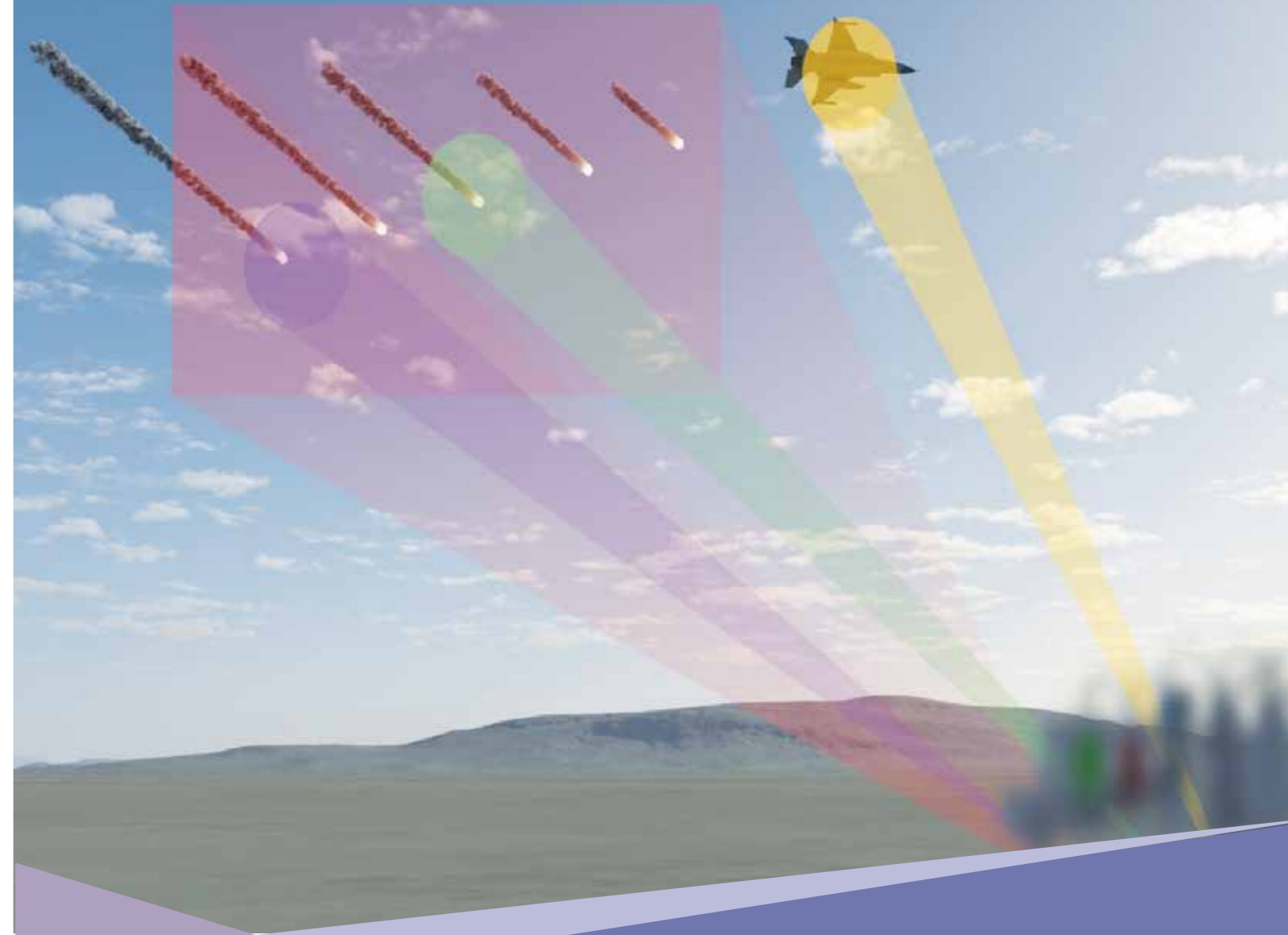
Kaynakça

- ▶ Akalp Kuzu, E. ve Kılavuz, U. R. (2020) COMSEC ve Yan Kanal Analizi Faaliyetleri, Bilgem Teknoloji, 10, 38-42
- ▶ <https://owasp.org/www-project-embedded-application-security/>
- ▶ https://os.kaspersky.com/wp-content/uploads/sites/11/2017/03/KasperskyOS_Product_Presentation_eng.pdf
- ▶ <https://www.iconlabs.com/prod/security-requirements-embedded-devices-%E2%80%93-what-really-needed>
- ▶ <https://www.iafrikana.com/2018/01/28/fitbit-and-strava-are-possibly-revealing-the-locations-of-secret-military-bases-in-afrika/>

Kızılötesi EH Açık Saha Test Sistemleri

Kızılötesi bantta yer alan tehditlerin bertarafına yönelik, Elektronik Harp (EH) teknik ve taktikleri geliştirme faaliyetleri kapsamında, açık saha test, değerlendirme ve analiz yapma yeteneği olan sistemlerdir.

Donanım ve yazılım bileşenlerinin bütünleştirildiği bu sistemler, kullanıcının elektronik harp teknik ve taktiklerinin yüksek sadakat seviyesinde etkinlik değerlendirme ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik çözümler sunmaktadır.



Elektronik Destek Sistemlerinde Veri Analizi

İrmak Özvarış - Uzman Araştırmacı / BİLGEM İLTAREN



“Elektronik Harbin ilk basamağı olan Elektronik Destek kavramı, elektromanyetik spektrumun çeşitli yollarla analiz edilmesini ve tehditlerin belirlenmesini içermektedir.”

Temelleri 1900'lü yılların başlarına dayanan ve günümüzde modern askeri güçlerin büyük ölçüde bağlı olduğu bir bileşen haline gelen radarlar sayesinde elektromanyetik spektrumda gözetim, silah kontrolü, haberleşme ve navigasyon gibi faaliyetler gerçekleştirilmektedir. Elektromanyetik spektrumu kontrol etmek amacıyla askeri alanda yapılan tüm faaliyetlere Elektronik Harp (EH) adı verilmektedir.

Elektronik Harp; Elektronik Destek (ED), Elektronik Taarruz (ET) ve Elektronik Koruma (EK) şeklinde üç sınıfa ayrılır. ED, EH'nin bilgi toplama kısmıdır ve pasiftir; ET ve EK için bir bilgi kaynağı olarak rol oynar ve gelecekte yapılacak EH teknik

ve taktik (TvT) verilerini içeren bilgi bankalarını besler. Hızlı tehdit tanınması veya gelecekte yapılacak askeri faaliyetlerin planlanması ve yürütülmesi amacıyla; istemli veya istemsiz yayılan elektromanyetik enerji kaynaklarının aranması, yakalanması (intersept edilmesi) veya yerinin tespit edilmesi için alınan eylemler bütünüdür.

ED sistemlerinin topladığı bilgi, istihbarat amacıyla da kullanılabilir. Bu bağlamda; sinyal istihbarat (SIGINT) sistemleri, gelen sinyallerden askeri öneme sahip elektronik istihbarat (ELINT) veya haberleşme istihbarat (COMINT) bilgisi çıkarır. ED ve SIGINT sistemleri aynı kaynakları kullansa da tespit edilen bilginin kullanım amacı

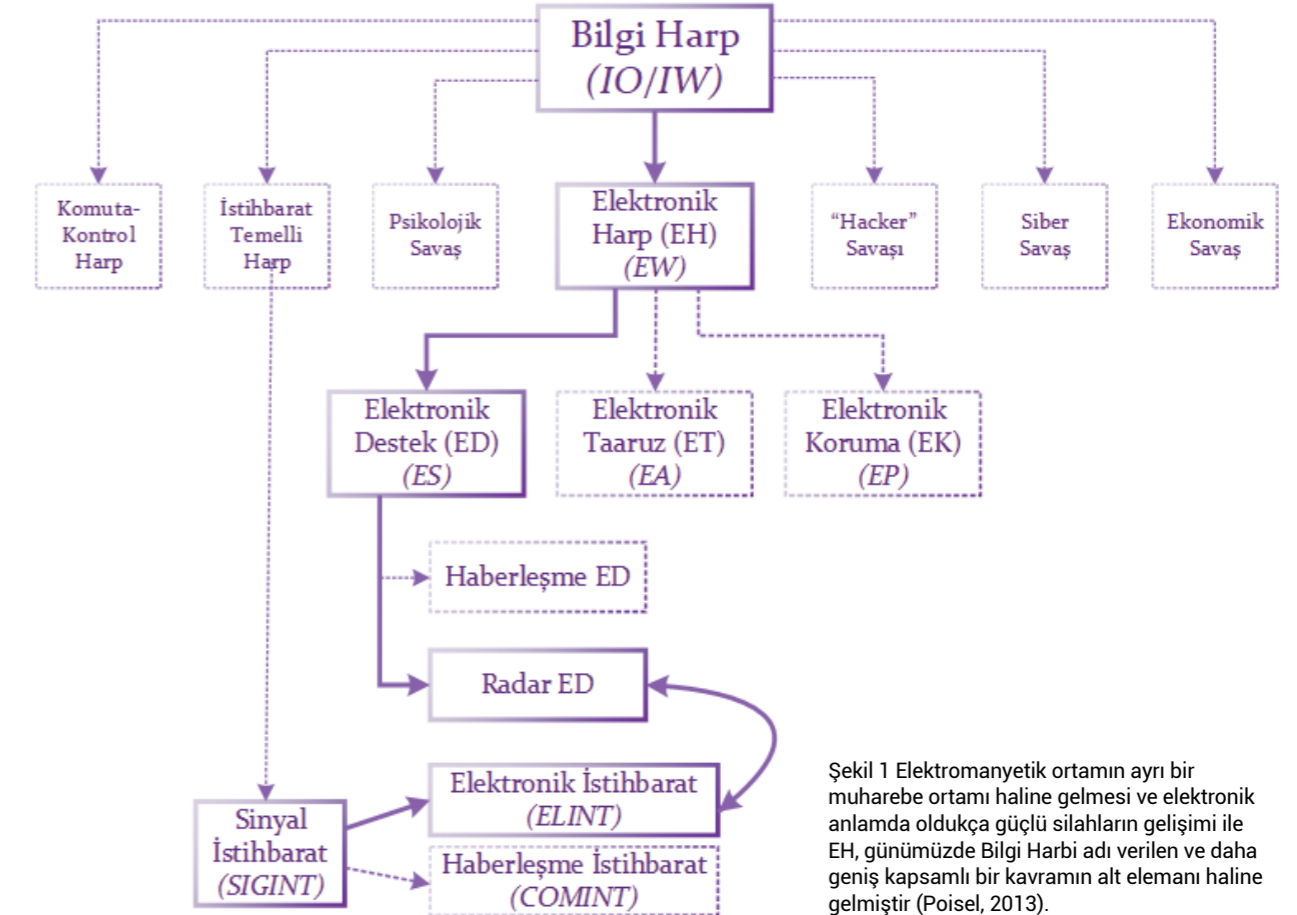
ve detayı bağlamında bu iki eylem birbirinden farklıdır. SIGINT'in amacı yeni tehdit tiplerini bulmak, bu tehdidin yetenek ve hassasiyetlerini belirlemek ve tehdidi kimliklendirmektir. Dolayısıyla zaman çizelgesi daha geniş zamana yayılmış olup, çok daha detaylı bir analiz ve çaba gerektirmektedir. ED ise topladığı bilgileri göreceli olarak daha az bir işlemle geçirerek SIGINT'in de beslediği kütüphanede bulunan bilinen tehdit (emitter) tiplerinin varlığını ve lokasyonunu hızlı bir şekilde tespit eder.

Şekil 1'de bulunan kavramsal ilişkide de görülebildiği üzere ED, çalıştığı sinyallerin tipine göre Haberleşme ED ve Radar ED olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yazının kapsamında haberleşme sinyalleri bulunmadığından ED ifadesi doğrudan Radar ED ifadesini işaret edecektir. Dolayısıyla SIGINT ifadesi yerine ELINT ifadesi genelliği kaybetmeden kullanılabilir. ED ve ELINT iki ayrı kavram gibi görünse de aralarındaki sınır, bazı ED sistemlerine veri depolama özellikleri kazandırılarak birer ELINT sistemi gibi davranmasıyla son yıllarda daha az belirgin hale gelmiştir (Robertson, 2019).

EH ve radar terminolojisinde, ED sistemlerinin yakaladığı sinyallere yukarıda da bahsedildiği gibi

“Modern sistemlerde tehdit tespiti ve özellikle tehdit kimliklendirilmesi, ortamda çok sayıda tehdit sinyalinin bulunması ve parametrelerinin gün geçtikçe karmaşık hale gelmesinden ötürü oldukça karmaşık bir işlemdir.”

“intersept” adı verilmektedir. Birkaç nano/milisaniye süren ani voltaj, akım veya elektromanyetik alan enerjisi değişikliğinden oluşan dalgaya “darbe” (pulse) denir ve darbeleri yayın yapan radarların bulunduğu tipik bir senaryoda, herhangi bir ED sisteminin saniyede beş yüz binden bir milyon darbeye kadar yoğun bir ortamda çalışması söz konusudur. Her bir intersept darbesi analiz edilerek o darbeye dair “öz nitelik bilgileri” oluşturulur. Bu bilgilere Darbe Tanımlama Kelimesi (DTK) denir ve bu bilgiler kullanılarak ED sisteminin görevine yönelik bilgiler elde edilmeye çalışılır. Nihai amaç, tehdidin tespit edilmesi ve olası kimliğinin/kimliklerinin belirlenmesidir.



Şekil 1 Elektromanyetik ortamın ayrı bir muharebe ortamı haline gelmesi ve elektronik anlamda oldukça güçlü silahların gelişimi ile EH, günümüzde Bilgi Harbi adı verilen ve daha geniş kapsamlı bir kavramın alt elemanı haline gelmiştir (Poisel, 2013).



Veri Analizinde Mantıksal Akış

Modern sistemlerde tehdit tespiti-ve özellikle tehdit kimliklendirilmesi-ortamda çok sayıda tehdit sinyalinin bulunması ve parametrelerinin gün geçtikçe karmaşık hale gelmesinden ötürü oldukça karışık bir işlemdir. Tehdidin tipi, konumu ve çalışma şekli (modu) bilgilerinin elde edilmesi için yürütülen işlemlerin genel mantıksal akışı şu şekildedir:

(i) İlk olarak (nispeten) basit görevler ve üst seviye analizler yapılır. Bu görevler, daha kısa süreli interseptleri kullanan veya frekans spektrumunda daha geniş bir bantı kapsayan taramaları içeren görevlerdir. DTK parametrelerindeki frekans, genlik, darbe genişliği ve geliş zamanı gibi parametrelerin çıkarımı işlemi bu aşamadır.

(ii) İlk analizden elde edilen veriler, sinyalden ayrıştırılarak daha az "yoğun" veriler üzerinde daha detaylı analizler gerçekleştirilir (Buradaki yoğunluk kavramı sinyalin taşıdığı bilgi yoğunluğu anlamındadır). DTK parametrelerindeki darbe tekrarlama aralığı, (varsa) darbeler arası ve darbe içi modülasyonlarının çıkarımı; detaylı analiz kapsamına girmektedir. Bu basamak daha fazla zaman alan işlemleri içerir ve dolayısıyla bir önceki basamağa göre daha karmaşıktır.

(iii) Bütün belirsizlikler çözümlene kadar analizler devam eder. Belirsizlikler çözüldüğünde akış tamamlanır.

Mantıksal akıştan da görüldüğü üzere; darbelere ait bilgilerin doğru olarak çıkarılması; analiz işleminin doğru yapılabilmesi ve ED sisteminin görevini en az hatayla yerine getirebilmesi için önemlidir. Dolayısıyla, ED sistemlerinde veri ana-

lizini tam olarak anlayabilmek için temelde DTK parametrelerinin ne olduğunu anlamak gerekir.

DTK Parametreleri ve Parametre Çıkarımı

Bir darbeden oluşturulan DTK yapısı sistemden sisteme değişebilir; ama her bir intersept darbesinden en az frekans, genlik, darbe genişliği ve geliş zamanı bilgileri çıkarılır. Çıkarılan parametre sayısı ve çeşidi, ELINT sistemlerinde ED sistemine göre daha da fazla ve detaylı olacaktır. Bu yazı kapsamında ise ED (ve/veya ELINT) sistemlerinde veri analizi için gerekli olan temel bazı parametrelere yer verilecektir.

Radyo Frekansı (Radio Frequency (RF))

Darbelerden frekans çıkarımı işlemi, sinyalin faz ilişkisine bakarak frekans bilgisini çıkaran alıcılar tarafından sağlanır. Bir radarın tüm darbeleri sabit bir frekansta olduğu gibi değişken frekanslarda da olabilir. Bu duruma Değişken RF (RF Agility) denir ve bu tip radarlar farklı görevleri yerine getirebilmek için farklı frekanslar kullanır.

Darbe Genişliği (Pulse Width (PW))

Bir darbe yüksek bant geçiren filtreden geçtiğinde pozitif ve negatif iki adet ani voltaj değişikliği görünür. Bu iki ani voltaj değişikliği arasında geçen süre darbe genişliğini verir. Ayrıca, analog sinyalin yeterli miktarda örneklenerek dijital ortamda yeniden oluşturulması ile genellikle Şekil 2(a)'da belirtildiği şekilde darbe genişliğinin %50 seviyelerinin arasında geçen süreden de hesaplanır. Genellikle mikrosaniyeler seviyesindedir.

Geliş Zamanı (Time of Arrival (TOA))

Radar darbesinin geldiği mutlak zamanı gösterir. Emilerden gelen darbeler radar alıcısına ulaşmış belirlenen bir eşik değerini geçtiği ilk an, darbenin TOA'sı olarak ölçülür. DTK parametrelerinde TOA bilgisi varsa, darbeler arasındaki TOA ilişkilerine bakılarak aşağıda bahsedilen PRI değerleri hesaplanabilir.

Darbe Tekrarlama Aralığı (Pulse Repetition Interval (PRI))

Darbe tekrarlama aralığı, Şekil 2(b)'de belirtildiği şekilde aynı radar yayınına ait peş peşe gelen iki darbenin geliş zamanları arasında geçen süredir ve hem birden fazla emilerin ayrıştırılması (deinterleaving) hem de kimliklendirilmesi aşamasında önemli bir rol oynar. Bir radar yayını darbeleri arasında sabit PRI kullanabildiği gibi farklı şekillerde farklı PRI değerleri kullanabilir. Farklı PRI değerleri kullanarak radarın menzil belirsizliğinde azalma,

hedeften yansıyan sinyal ile gönderilen darbenin çakışmasını engelleme ve hareketli hedef belirlemede ortaya çıkan kör hızların elimine edilmesi gibi avantajlar sağlanır. Bu tekniğe "Darbeler Arası Modülasyon" denir ve tipleri aşağıdaki şekildedir:

(i) **Sabit PRI:** Tüm darbelerin PRI süreleri aynı ve sabittir.

(ii) **Seğirmeli (Staggered) PRI:** İki'den fazla PRI arasında belirli bir örüntüye göre değişim vardır. Yaygın olarak 3 adet PRI arasında bir örüntü kullanılsa da karmaşık sistemler daha fazla eleman kullanabilir.

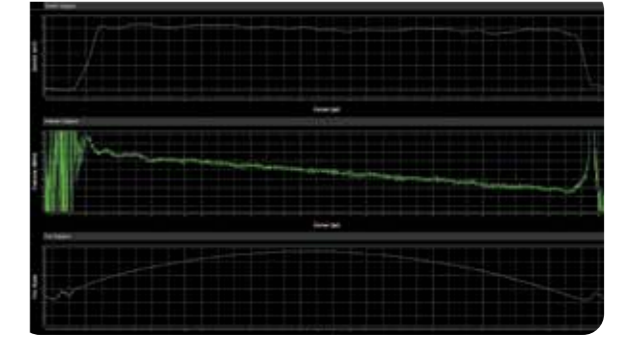
(iii) **Rastgele (Jittered) PRI:** Bir PRI elemanı, ortalama PRI değerinin belirli bir yüzde farkı arasında kalacak şekilde (örn: $\pm\%10$ veya $\pm\%20$), rastgele değişkenlik gösterir. Rastgele PRI kullanımı, deinterleaving işlemini zorlaştıran bir faktördür.

(iv) **Kayan (Sliding) PRI:** Kayan PRI tipi bazı kaynaklarda ayrı bir darbeler arası modülasyon tipi olarak sunulsa da seğirmeli PRI tipinin alt başlığı olarak da düşünülebilir. Bu tipte, minimum PRI değeri ile maksimum PRI değeri arasındaki PRI değerleri sırayla seçilir. Maksimum değere ulaştığında tekrar minimum değere aniden geri döner ve kayma işlemine tekrar başlar.

(v) **Bekleme Anahtarlamalı (Dwell and Switch) PRI:** Bu modülasyon tipinde, ilk olarak bir PRI değerinde belirli sayıda darbe gönderilir, daha sonra başka bir PRI değerine geçilerek yeni PRI değerinde birden fazla darbe gönderimi işlemine "dwell" adı verilir. Bir emilerin çok sayıda dwell kullanımı, ED sisteminin her PRI için ayrı emilerin var olduğuna inandırılarak aldatılmasına neden olabilir.

Darbe İçi Modülasyon (Modulation on Pulse (MOP))

Darbeler arası modülasyon gibi; darbenin genliği (amplitude), frekansı (frequency) ve fazında (phase) da analog modülasyonlar gerçekleştirilebilir. Bunlara "Darbe İçi Modülasyon" denir ve sırasıyla AMOP, FMOP ve PMOP olarak gösterilir. Emiler tarafında, radarın hassasiyetini ve çözünürlüğünü artırarak yaydığı sinyallerin özellikle uzun mesafelerde bozulmadan hedefe ulaşmasını sağlar. ED sistemi tarafında ise bu modülasyonlar emiler özel bir bilgi olduğundan, MOP bilgisinin çıkarımı, analiz edilen darbenin emilerle ilişkilendirilmesi noktasında önem taşır.



Şekil 3 Frekans modülesi bir darbenin genlik, frekans ve faz grafik görüntüsü.

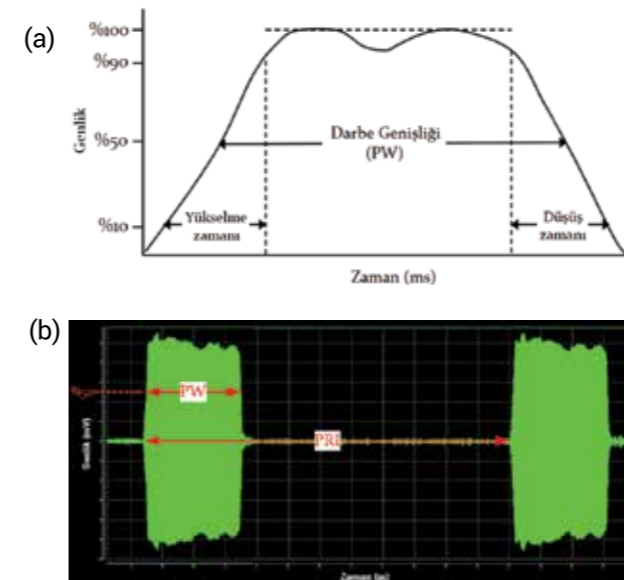
Analiz Yazılımları

Yukarıda bahsi geçen parametreler, en temel DTK parametreleridir ve bir ED sistemi, analiz için her bir darbeden çok daha fazla parametre çıkarabilir. Çıkarıldığı parametreler üzerinde belirli örüntüleri saptayabilir, veri tabanında bulunan (önceki) verilerle karşılaştırma yapabilir ve analiz tamamlandığında DTK dizisinin hangi emilerle ilişkili olduğunu operatöre analiz yazılımları aracılığıyla gösterir. ED sistemi, birtakım algoritmalar aracılığıyla analizleri otomatik gerçekleştirirse de operatör bilgi birikimi ve tecrübesiyle sistemin çıkardığı sonuçlar anlamlı hale gelir ve EH'nin ileriki basamakları için kullanılabilir.

Yüksek bilgi birikimi ve alanında uzmanlaşmış insan kaynağına sahip TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN bünyesinde de operatörlere özel algoritmalar ve analiz yazılımları geliştirilmektedir. Bu yazılımlar aracılığıyla ortamda bulunan tehdidin tipi, konumu ve modu belirlenerek operatörlere sunulmaktadır. Operatörler tarafından bu veriler bilgi bankalarına girilebilmekte ve Silahlı Kuvvetlerimiz ihtiyaçları dâhilinde kullanılabilir.

Kaynakça

- Poisel, R. A. (2013). Information Warfare and Electronic Warfare Systems. Norwood, MA, ABD: Artech House.
- Robertson, S. (2019). Practical ESM Analysis. Norwood, MA, ABD: Artech House.



Şekil 2 (a) Bir radar darbesinin genlik-zaman ekseninde gösterimi ve (b) bir ED sisteminin analiz ekranından darbe görüntüsü.



“Kendim Ettim, Kendim Buldum”

“ Genetiği değiştirilen, gıda maddeleri değil insanoğlunun kendisidir! ”

Abdullah Alpaydın – Başuzman / TÜBİTAK RUTE

Rahmetli Neşet Ertaş'ın “Kendim Ettim, Kendim Buldum” adlı meşhur türküsü, bana nedense insanoğlunun dünya serüveni boyunca başına gelenleri en iyi ifade eden sözlerden biri olarak gelir. Aşağıda değineceğim yeme-içme/beslenme alışkanlıklarımızda ve yemek kültürümüzde yaşanan değişimler ve etkileri de yine en güzel bu sözlerle ifade edilir diye düşünüyorum.

Anadolu insanı, 40-50 yıl öncesine kadar yediği şeylerin çoğunu kendisi yetiştirmekteydi. Nüfusun önemli kısmının en azından kendine yetecek kadar tarlası, bağı, bahçesi, hayvanları vardı. Kırsal bölgede yaşayan halkımız, ekmeğini kendi tarlasında yetiştirdiği buğdaydan elde ettiği katkısız undan; sebzesini, meyvesini kendi bahçesinden; peynirini, tereyağını, yoğurdunu hayvanından sağarak elde ettiği sütte; yumurtasını kümesindeki hayvandan temin ederdi.

Eskilerin anlattığına göre, imkân olduğu halde o devirlerde parayla gıda ürünü satın almak (şeker, tuz gibi temel ürünler istisna olmak üzere) ayıp karşılanır ve şehirlilere mahsus bir davranış olarak görülürmüş. Şehirlerde yaşayanlar da köylünün pazara getirdiği ürünlerden satın alarak doğal ürünlere kolaylıkla ulaşabilirmiş. Şimdi bu lükse sahip olan çok az insan kaldı. Hala elinde bu imkânı olanlar da şehirlere taşındığı için ekip biçmekten vazgeçmiş durumda. Tarım ürünlerinde, ette her geçen gün dışarıya daha çok bağlı hale gelmemizin sebeplerinden biri bu olsa gerek.

Bugün evlerimiz envai çeşit gıda ürünüyle dolu. Damak tadımız, beslenme alışkanlıklarımız hızla değişiyor. Lakin tüketmekte olduğumuz bu ürünlerin çok büyük kısmı işlenmiş/paketlenmiş fabrikasyon ürünler. Bu ürünler endüstriyel/ticari/ekonomik sebeplerden dolayı uzun ömürlü olmak

zorunda olduğu için kaçınılmaz olarak koruyucu benzeri, insan sağlığına zararlı birçok katkı maddesi içeriyor. Meyve/sebze gibi doğal olduğunu düşündüğümüz ürünlerde de benzer kaygılarla hormon ve tarım ilacı kullanılıyor.

Tohum konusu, GDO meselesi ve bu alanda dönen diğer dolaplar apayrı ve bu kısa yazıyla içinden kolayca çıkamayacağımız derin mevzular. Bu konuda sadece şunu söylemek isterim: Genetiği değiştirilen, gıda maddeleri değil insanoğlunun kendisidir!

Gıda Terörü ve Fast Food

Son zamanlarda lüğatimize kazandırılan kavramlardan biri de “gıda terörizmi”. Vatandaşın ekonomik ürün talebini/ihtiyacını sömüren simsarların süt içermeyen peynir ve tereyağı; et içermeyen salam-sosis; bal içermeyen bal ürettiklerini hayretle izliyor, bu adamlar keşke bu yeteneklerini (!) milletin faydasına kullansalar diye hayıflanmadan duramıyorum. Bir taraftan da bu durumun, doğal olanla bağlarımızı koparmanın diyeti olduğunu düşünmeden edemiyorum.

Konu bağlamında bahsedeceğim bir başka mesele, fast-food (hızlı yemek). Hamburger, pizza, kızarmış tavuk gibi ürünlerle başlayan hızlı yemek kültürünün ülkemizdeki mazisi taş çatlasa 30 yıldır. Lakin bugün neredeyse Anadolu'nun en ücra şehrinde bile fast-food zincirlerinin bir şubelerini görmek mümkün. Fast-food anlayışı; döner, köfte, hatta simit başta olmak üzere yerel/geleneksel ürünlerimizin de ben-



zer konseptle zincir şubeler şeklinde yaygınlaşarak sektörleşmesinin önünü açtı. Sektörleşmesine diyeceğimiz bir şey yok elbette ama bu model bize has bir model değil. Demek istediğim, fast-food sadece kendi kültürünü getirmekle kalmadı, geleneksel yemek kültürümüzü de dönüştürdü. Atıştırma, ayakta yeme hep bu kültürün ürünleri.

Kültür emperyalizminin mantığı da böyle işler zaten. Sömürüye elverişli hale getirmek için önce insanların beğenileri, tercihleri, alışkanlıkları, damak tatları tektipleştirilir. Sonra da onlar, hedef ürünlerin gönüllü müşterisi yapılırlar. Türkiye'de de faaliyet gösteren Amerikalı bir fast-food zincirinin dünya genelinde 118 ülkede 34,000'den fazla restoranı olduğu ve bu restoranları günlük ortalama 58 milyon müşterinin ziyaret ettiğini belirterek bu konuyu kapatalım (Kaynak: Bahsi geçen firmanın websitesi).

İnsan Ne Yiyorsa Odur!

Tüm bunların bir maliyetinin olması kaçınılmaz. Elbette başka birçok faktörün yanında bilinçsiz hazır gıda tüketimi, insanları çok genç yaşlardan itibaren kanser, şeker, tansiyon gibi ciddi hastalıklara maruz bırakıyor. Dünya Sağlık Örgütü ve Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'nın verilerine göre 2008 yılında dünya genelinde 12 milyon kişiye kanser teşhisi konulurken 2018 yılında bu rakam 18,1 milyona ulaşmış durumda. 2030 yılında ise 26 mil-

“ Gıda endüstrisi sanki ilaç endüstrisinin değirmenine su taşıyor. ”



yonu aşacağı tahmin edilmektedir. Önümüzdeki yıllarda karşılaşacağımız bu artışın önemli bir bölümü, ne yazık ki - ülkemizin de dâhil olduğu - gelişmekte olan ülkelerde görülecektir (Kaynak: T.C. Sağlık Bakanlığı websitesi).

Türkiye Diyabet Vakfı(TDV) verilerine göre, diyabet tüm Avrupa ülkeleri içinde en hızlı artışı Türkiye'de gösteriyor. Diyabet hastaları sayısında Türkiye, Avrupa genelinde Rusya ve Almanya'nın ardından üçüncü sırada. TDV, Türkiye'de bugün yetişkin nüfusun yaklaşık yüzde 15'inin diyabet hastası olduğunu söylüyor. 1997-1998 yıllarında yapılan Türkiye Diyabet, Hipertansiyon, Obezite ve Endokrinolojik Hastalıklar Prevalans Çalışması (TURDEB 1) ve bu çalışmanın Ocak-Haziran 2010'da yapılan tekrarı olan TURDEB 2'den elde edilen sonuçlar, Türkiye'de diyabet hastalığının nasıl bir hızla arttığını gösteriyor. On yıllık bir süre zarfında diyabet hastalarının oranının yaklaşık yüzde 100'lük artış göstererek yüzde 7,6'dan yüzde 13,4'e çıktığını söylüyor (Kaynak: BBC).

Bu veriler, tehlikenin boyutunu apaçık ortaya koyuyor. Bahsi geçen hastalıklardaki hızlı ar-

tış, insanın aklına ister istemez ilaç endüstrisini getiriyor. Belki biraz komplo teorisi olacak ama gıda endüstrisi (buna temizlik ve kozmetik gibi alanları da ekleyebiliriz), sanki ilaç endüstrisinin değirmenine su taşıyor. Bir taraf insan sağlığını bozan ürünler üretirken, diğer taraf tedavi edecek ürünler üretiyor, tedavi edicilikleri tartışılmalı olsa da! Büyük fotoğrafa baktığımızda ise aslında insanoğlunun doymak bilmeyen daha çok kazanma hırsını görüyoruz. Korkarım ki bu da insan soyunun sonunu hazırlıyor.

Artık yavaş yavaş bilinçlenen tüketiciler durumun geç de olsa farkına vardı ama bu döngüyü/çarkı geri çevirmek zor görünüyor. Birçoğumuzun kendi gıdasını üretme imkânı olmadığı gibi, doğal/organik etiketiyle üretilip satılan ürünler de pahalı olduğu için her bütçeye hitap etmiyor. Her şeye rağmen bu konuda her bir kişiye önemli sorumluluklar düşüyor. Bizi kuşatmış şartlara esir olmadan, tükettiğimiz her gıdayı inceleyerek, araştırarak imkânlarımız çerçevesinde en doğal olanı aramaktan vazgeçmemeli, işlenmiş gıdayı evlerimizden mümkün olduğunca uzak tutmanın yollarını bulmalıyız.

Mayın / EYP'lerin Tespitinde Araca / Robota Takılı ve Elde Taşınabilir Sistemler

- ▶ Elektromanyetik indüksiyon (Metal dedektörü)
- ▶ Yere nüfuz eden radar (GPR)
- ▶ Kablo tespit teknolojileri

Milli Metal Dedektörü (OZAN)

- Uzun yıllar yurt dışından temin ettiğimiz metal mayın tespit dedektörleri kapsamında, kuvvet personelimizin yüksek tespit doğruluğu, hafiflik ve kompakt tasarım ihtiyaçlarını dikkate alarak OZAN-katlanabilir mayın tespit dedektörünü milli olarak geliştirerek KKK'ya teslim ettik.
- Kuvvet personelimizin ihtiyacı olan yük-

sek sayılı metal mayın dedektörü alanında hem yurt dışı bağımlılığın önüne geçmiş olduk hem de yurt içinde birçok alt sanayiye istihdam sağladık.

• Geliştirdiğimiz OZAN dedektörü, bu alanda uzun yıllar ürün geliştiren global firmalar ile rekabet edebilecek, hatta daha ileri seviyededir.

Mayın / EYP Tespit Teknolojileri



Katlanabilir Metal Mayın Dedektörü (OZAN)



Doç. Dr. Aslı Uğur Katmış: “Bilim ve sanat, çevremizdeki dünyayı anlama çabalarının doğasıdır...”

Röportaj: Mehmet S.Ekinci – Uzman / BİLGEM KKYBY



“İnsanın yaşamda sadece tek bir daldaki uğraş içinde olmasının yeterli olabileceğini hiç düşünmedim.”

Her sayımızda, odağımızda bulunan bilim ve teknoloji dışında sanat-kültür-spor alanlarına da yer vermeye çalışıyoruz... Bu sayıda BİLGEM UEKAE'de Başuzman Araştırmacı olarak çalışan Sayın Doç. Dr. Aslı Uğur Katmış ile bir röportaj gerçekleştirdik. Aslı Hocamız, kişisel tecrübesi doğrultusunda sanat ve sporun insan hayatını nasıl zenginleştirdiğini anlattı...

Akademik unvanınız doçent, BİLGEM personeli tarafından kurum içinde verilen konserlerde solisttiniz, yerleşkedeki koşuda da madalya kazandınız. İnsanın temel uğraş alanlarının tümünde bilim, sanat ve sporda varsınız. Bu nasıl mümkün olabiliyor? İşin sırrı nedir?

Çok teşekkür ederim, ancak öncelikle düzeltme yapayım; koşuya katılmadım. Basketbol turnuvasına katılmışım. Tek kadın katılımcı olduğum için, ince bir düşünce ile bir plaket takdim edildi. Teşekkür ediyorum tekrar.

Günümüz dünyasında bilim ve sanatın iki uç noktada olduğu, karıştırılmaması gerektiği gibi yaygın bir anlayış hâkim. Ancak aslında durum bunun tam tersi. Bilim ve sanat, çevremizdeki dünya-

yı anlama ve tanımlama çabalarının doğasıdır. Yöntemler ve hedeflenen kitleler farklılık gösterse de, çoğu durumda motivasyonları ve hedefleri temelde aynıdır.

İnsanın yaşamda sadece tek bir daldaki uğraş içinde olmasının yeterli olabileceğini hiç düşünmedim. Sizi neyin mutlu edeceğini denemeden bilemezsiniz. Ben sporun ve sanatın bizleri mutlu birey-



“Spor, stres atmaya yardımcı ve bedenimizin aktif olmasını sağlayan hayatın vazgeçilmez bir parçası. Sanat ise, benim için “naçizane” insanlarla iletişim kurmanın farklı bir yolu.”

ler yaptığını, ruhumuza ve bedenimize vereceğimiz ödül olarak görülmesi gerektiğini düşünüyorum. Spor, stres atmaya yardımcı ve bedenimizin aktif olmasını sağlayan hayatın vazgeçilmez bir parçası. Sanat ise, benim için “naçizane” insanlarla iletişim kurmanın farklı bir yolu.

BİLGEM’de gerçekleştirdiğimiz konserler sonrası şan derslerine başladım. Burada yaptığımız çalışmalar benim için motivasyon kaynağı oldu. Bunun dışında resimle uğraşmayı da seviyorum. Elimden geldiğince denemeler de yazıyorum. Bu uğraşların iş hayatıma yansadığını düşünüyorum. Daha pozitif kalıp, farklı açılardan yaklaşımlarda bulunmaya olanak sağlıyor. Yapabileceğimin en iyisini yapmak için uğraşıyorum diyelim.

Bu uğraşların her biri sizin için ne ifade ediyor, size ne sağlıyor? Sizi bunları yapmaya iten motivasyon nedir? Bilim insanları sanat ile her zaman iç içe olmuştur. Einstein’ın yaylı çalgılara, Feynman’ın vurmali çalgılara olan merakı, Da Vinci’nin tablolarında kullandığı üstün matematiksel oran ve modern anatomiye çalışmaları gibi örnekler çoğaltılabilir.

Kendim için ilk soruda sanırım bu sorunun da kısmen cevabını vermiş oldum. Ama tekrar bir iki cümleyle şöyle diyebilirim; Bu uğraşlar, iş hayatında yaşadığımız negatif olayların, insan ilişkilerinde içinden çıkamadığımız durumların, kendi içimizde çözemediğimiz sorunların yüksek duvarları ardında kalmadan, bir merdiven dayayıp duvarın öbür tarafına bakmaya, en azından durumun içinde kilitli kalmadan, bir anahtar arayışına yöneliyor.

Bizi durduran, yavaşlatan en büyük sorunlardan biri, anın içinde sıkışıp kalmak sanırım. Ar-Ge yapan bir kurum olarak da, yaratıcı, çözüm odaklı, kafası rahat insanlara ihtiyacımız

Aslı Uğur Katmış

1981 Söke doğumlu olup, 2004 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü’nden mezun olmuştur. 2004-2006 yılları arasında Münih Teknik Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansını ‘tek foton kaynağı’ üzerine yaptığı çalışmalar ile tamamlamıştır. 2007-2012 yılları arasında doktora çalışmalarını güvenli foton kaynağı üretimi ve karakterizasyonu üzerine tamamlayıp, ‘doktor’ ünvanını almıştır.

2012-2015 yılları arasında MIT (Massachusetts Institute of Technology) Kimya ve Makine mühendisliği bölümlerinde Postdoktora yapmıştır. İletken polimerlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmaları bulunmaktadır.

2015 yılından bu yana TÜBİTAK BİLGEM Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE)’nde çalışmaktadır. Aslı Uğur Katmış 2018 yılında ‘doçent’ ünvanını almıştır. Çalışmalarına Yüksek Güçlü Lazer projesinde, başuzman araştırmacı olarak devam etmektedir.



var, değil mi? Bunlar için de ister üreten / eyleyen ister yorumlayan taraf olalım, spor ve sanatın hayatımızda olmaması gibi bir ihtimal düşünmüyorum.

Zaman yönetimi açısından iş-aile-sosyal yaşam-akademik gelişim-kültür-sanat dengesini büyükşehir dinamikleri içerisinde sağlamak mümkün mü? Nasıl?

Biraz özveri göstermeden günümüz büyükşehir koşullarında pek bir şey gerçekleştirmek mümkün olmuyor tabii. Bu durumda zaman yönetimi işin içine giriyor. İş hayatında planlı olmak çok önemli, geciktirmeden işleri tamamlamak ve dinamik olmak sanırım işleri kolaylaştırıyor. Aile içi denge ve eşler arası karşılıklı anlayış sağlanmadan zaman yönetimi daha zor olabilir. Ama mutlu bireyler, sağlıklı ilişkiler konusunda da daha başarılı olacaktır. Destek görmek çok önemli. Ben bu konuda şanslı olduğumu söyleyebilirim. Önemli olan istemek ve emek vermek. Dengeler, ancak bu şekilde büyükşehir dinamikleri içerisinde sağlanabilir.



Aslı Uğur Katmış’a ait yağlıboya tablo

Nereye?

Hepimiz
Kendi kara deliklerimizle
buluşuyoruz günün sonunda
Bazımız 6, 7 saat, bazımızsa
daha fazla

Yeri değişmiyor
bedenimizin ama
Ruhumuz nereye gidiyor,
işte orası muamma

8 milyar insan, farklı
zamanlarda olsa da
Bırakıyor kendini kara deliğe
Kaçamıyor birkaç gün
dayansa da

Ne oluyor orada
Neler söyleniyor bize

Biz hangi bilgileri aktarıyoruz,
kime
Gözlerini kapamadan
düşünmeli herkes

Dikkatlice...



Birim Vektör

Yaşıyor olsaydık iki
boyutlu düzlemde
Adımlarımız da hep
birim vektörle

Ne olurdu bilir misin
Bu vektörler aynı yöne
dönmezse?

Milyon vektörün her biri
Dağılmışsa milyon yöne
İlerleyemezdik bir adım
bile...



Dr. Umut Uludağ
Başuzman Araştırmacı
BİLGEM UEKAE

*Şiirler, Umut Uludağ'ın
Kayıp Hattat 26 adlı
şiir kitapçığında yer
almaktadır.

Ürün Takip Sistemi (ÜTS)

Ürün Takip Sistemi (ÜTS) Türkiye'de üretilmiş veya ithal edilmiş tıbbi cihazların ve kozmetik ürünlerin takibini gerçekleştirmemizi sağlayan bir sistemdir.

Hasta güvenliğinin ve halk sağlığının önemi üzerine inşa edilen Ürün Takip Sistemi aynı zamanda bir e-Devlet uygulaması olarak vatandaşlarımıza tıbbi cihaz ve kozmetik ürünleri sorgulama imkânı sunmakta, tüketici, sorguladığı ürün hakkında geri bildirimlerde bulunarak şikayet ve görüşlerini de Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu'na iletme imkanına sahip olmaktadır. Cerrahi maskelerin güvenilirliği de ÜTS ile sorgulanabilmektedir.

Tüketici Kullanımına Açık Sistem



FODRAD



TÜBİTAK BİLGEM ve Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMi) ortaklığıyla geliştirilen, uçuş pisti üzerindeki yabancı madde kalıntılarını (FOD) 7/24 otomatik tespit ederek uyarı veren bir mm-dalga radar sistemidir.

FOD Tespit Sistemi

- ✓ 7/24 Otomatik Gözetleme
- ✓ mm-Dalga Radar ile Gerçek Zamanlı FOD Tespiti ve Harita Üzerinde Gösterim
- ✓ Optik Sensör ile Gece/Gündüz FOD Görüntüleme
- ✓ Tespit Durumunda Sesli ve Görsel Alarm Üretme
- ✓ Tek Merkezden Kontrol ve İzleme Olanağı
- ✓ Sürekli Veri/Görüntü Kaydı ve İstatistiksel Raporlama
- ✓ FAA (AC150/5220-24 Advisory Circular) Tavsiye Kriterlerini Karşılamanı Tasarım

Uluslararası Antalya Havalimanı