

**METAL-YALITKAN-METAL VE METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN
YAPILAR İÇİN İNCE YALITKAN TABAKALARIN ÜRETİLMESİ,
KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMASI**

Berker HÜSAM

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mart 2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Berker HÜSAM, METAL-YALITKAN-METAL VE METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN YAPILAR İÇİN İNCE YALITKAN TABAKALARIN ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

ÖZET

METAL-YALITKAN-METAL VE METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN YAPILAR İÇİN İNCE YALITKAN TABAKALARIN ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMASI

Berker HÜSAM

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mart 2022

Danışman: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Yüksek frekans elektroniği ve GHz-THz bölgede enerji çevrimi uygulamalarında arkma (tünelleme) temelli aygıtlar önem arz eder. Arkma olasılığının yüksek olması için bu aygıtlardaki yalıtkan tabakaların kalınlıkları 10 nm altında üretilmek durumundadır; bu da yaygın kullanımlarına engel teşkil eden çeşitli sorunları beraberinde getirir. Çalışmada bu engellerin neler oldukları ve nasıl ölçülebilecekleri üzerine bilgi verilmiştir. Bu aygıtların işleyişinin anlaşılması için bir benzetim (simulasyon) hazırlanmıştır. Malzemenin özündeki ve aygıt yapısı içerisinde bulunmasından kaynaklı sorunlar açıklanmış; üretim kusurları ve aygıt davranışı incelenmiş; başarılı aygıtlardan GHz bölgede enerji çevrimi uygulaması hazırlanmıştır. Ark diyotun yaygın kullanımı için üretim sorunlarına çözüm önerileri belirtilirken, farklı bir aygıt düşüncesi de sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Ark Diyot, Özoksit, Arayüz Durumu Azaltma.

ABSTRACT

FABRICATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF THIN INSULATOR FILMS FOR METAL-INSULATOR-METAL AND METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR DEVICES

Berker HÜSAM

Department of Physics

Programme in Solid State Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, March 2022

Supervisor: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

In high frequency electronics and GHz-THz regime energy conversion applications, tunneling mechanism-based devices have high significance. To achieve high tunneling probability, insulating layers in these devices should be produced under 10 nm thicknesses; that, though, brings several obstacles which prevent their widespread usage. In this work, information was given on what those problems are and how they ought to be measured. Simulation for understanding the mechanism of these devices was performed. Problems induced by material itself and its presence inside the structure of the device were explained; fabrication deficiencies and device characteristics were investigated; with efficient devices, energy harvesting application in GHz regime was prepared. While solutions were suggested on fabrication problems to widen the tunneling diode usage, a new device concept was presented.

Keywords: Tunneling Diode, Native Oxide, Surface State Decrement.

TEŞEKKÜR

Bu tez, Fedai Altun öğretmene ithaf edilmiştir.

Berker HÜSAM



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Berker HÜSAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Malzeme Seçimi.....	9
1.2. Tuzaklar Üzerine	12
1.3. Ark Akımı.....	16
1.4. Bazı Ark Diyot Çalışmaları.....	18
1.5. Tezin Bölümlerine Kısa bir Bakış	20
2. BENZETİM (SİMULASYON).....	21
2.1. Eşdeğer Devre Çözümlemesi.....	27
3. AYGIT ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ	29
3.1. Üretim	29
3.2. Ölçümün Önemi Üzerine.....	30
3.3. Özdirenç Çözümleme (Empedans Analizi).....	30
3.4. Tepki Süresi.....	38
3.5. Dielektrik Kırılma.....	41
3.6. Raman-Kayması Ölçümü.....	45
3.7. Girişimölçer.....	49

3.8. Katmanölçer	51
4. UYGULAMA	55
5. SONUÇLAR VE GELECEĞE BAKIŞ	58
KAYNAKÇA.....	61
EK 1: MERCEK ÖLÇÜNLEMESİ	66
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Anten ve plazmonik yapının elektromanyetik dalga ile eşleşmesi.....	3
Şekil 1.2. MYM aygıt için yük taşınım türleri	7
Şekil 1.3. Poole-Frenkel etkisi.....	16
Şekil 2.1. İleri ve geri yönde arkma.....	21
Şekil 2.2. Aygıtta ait örnek bir benzetim	22
Şekil 2.3. Yarıiletkendeki kusurların iletme etkisi	23
Şekil 2.4. Arayüz etkisinin düşürülmesi	24
Şekil 2.5. FFT sonucu elde edilen E-k eğrisi.....	26
Şekil 2.6. Eşdeğer devre	28
Şekil 3.1. Üretilen aygıtlar.....	30
Şekil 3.2. Öz direnç ölçüm devresi.....	35
Şekil 3.3. Frekans ve gerilime bağlı eşdeğer sığa.....	36
Şekil 3.4. Arayüz durum yoğunluğu.....	38
Şekil 3.5. Diyotların tepki hızları	41
Şekil 3.6. Dielektrik kırılmanın yaşandığı bir cihazda akım-elektrik alan ilişkisi	43
Şekil 3.7. Dielektrik kırılma ve PF gerilimleri	44
Şekil 3.8. Raman-kayması tayfı.....	47
Şekil 3.9. “Tepe-üstünde-tepe”	48
Şekil 3.10. Girişimölçer ve yüzey yükseltisi	50
Şekil 3.11. Katmanölçer	52
Şekil 3.12. Bir ölçüm düzeneği önerisi.....	54
Şekil 4.1. Örnek uygulama	56
Şekil 4.2. Antenin yakaladığı bağlı güç.....	57
Şekil 5.1. Bir THz kaynak yapısı.....	59
Şekil 5.2. Aygıtın üretilebilirliği.....	60
Şekil 0.1. Ölçün düzeneği.....	66
Şekil 0.2. Merceğe ait odak kayması.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FFT	: Fast-Fourier Transform
IoT	: Internet of Things
JFET	: Junction Field Effect Transistor
LASER	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	: Light Emitting Diode
MEMS	: MicroElectroMechanical Systems
MIGS	: Metal-Induced-Gap-States
MoDem	: Modulator-Demodulator
MOSFET	: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
MYM	: Metal-Yalıtkan-Metal
OpAmp	: Operational Amplifier
PF	: Poole-Frenkel
WKB	: Wentzel–Kramers–Brillouin
XPS	: X-Ray Photoelectron Spectroscopy

1. GİRİŞ

Güneş ışınları neden antenler ile enerjiye çevrilemez? Yarıiletken teknolojisiyle karşılaştırıldığında böyle bir dönüşüm çok daha verimlidir: Bugün haberleşme teknolojisinin başarıyla yürütmesi, bu verimli dönüşüm sayesinde. Yüksek frekanslı işaretler, çok az kayıpla işlenebilmektedir. Hatta bu kayıpların, sadece bir enerji dönüşümü için daha az olacağı da açıktır: Eğer bir haberleşme devresi düşünülürse, işaretten bilgi almak için gereken çoklu ve kayıplı devre ögeleri ve katmanlarına (karıştırıcı, yükseltici, süzgeç) ihtiyaç yoktur. Sadece bu işaretin doğru akıma çevrilmesi yani basit bir doğrultucu diyot gerekir; ya da kayıpsız çevrim için tam dalga doğrultucu devresi yani dört diyot yeterlidir.

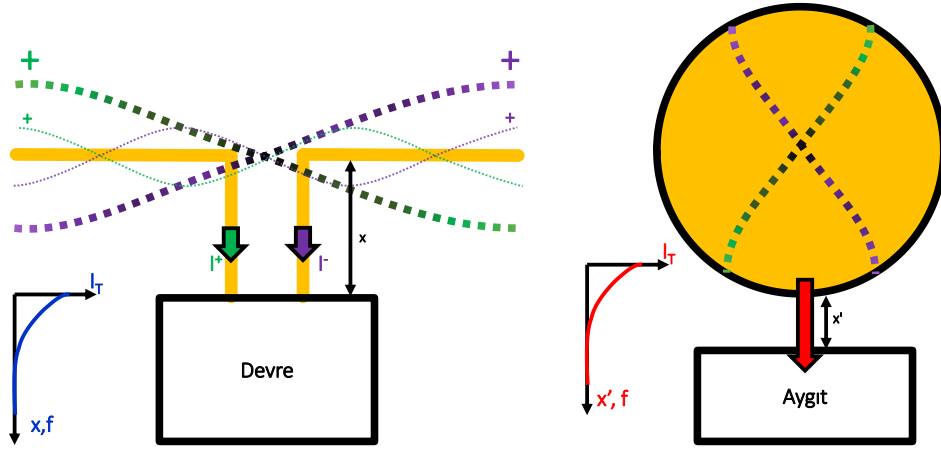
Böyle bir düşünce devre olarak tasarlanırsa diğer hangi devre ögelerine ihtiyaç duyulur? Önceden doğrultma işlemi için diyot yer alması gerektiği ifade edilmişti; bir duran dalga yaratmak için anten önemli bir diğer parçadır. Ulaşan dalganın devre ile eşleşmesi için anten, duran dalgayı yaratır. Duran dalga, antenin iki ucundaki yansımaların (ve sonrasında yankılanma veya rezonans) yaptığı girişimle oluşur. Bu antenin boyutu, görülür bölgeden (400-700nm) gelen bu elektromanyetik dalgaya göre olmak zorundadır; eğer dalgaboyundan çok büyük olursa, dalga sönümlenir, çünkü duran dalga, frekansına bağlı olarak iletken düzlemde daha dar bir alanda hareket ederek dirence maruz kalır. Bu etki cidar kalınlığı kaynaklıdır (Griffiths, 1989) ve iletkenin fiziki kalınlığı değişmiş gibi daha dar bir kesit alandan akım akar; yani direnç artmış gibi düşünülebilir.

Böyle bir antenin üretilmesi gerçekten zordur: Mikron-altı bu yapılar bir dizi olarak kullanılabilir, ancak geniş yüzeylere bu desenlerin aktarımı zordur. İşte plazmonik etki tam da burada devreye girer: Gelen elektromanyetik dalga frekansına bağlı olarak metal yüzeyindeki elektron hareketinden yararlanılabilir.

Plazmonik yapıların üretilmesi de oldukça kolaydır; nanoparçacıklar ve tekrarlı yapılar kolay oluşturulabilirler. Örneğin, ızgara şeklinde bir plazmonik elektrot, LASER ile girişim deseni hazırlanarak maskesiz litografi ile aktarılabilir. Elbette, burada ızgara elektrotun dizilişi nedeniyle, gelen elektromanyetik dalga, kutuplanma (polarizasyon) seçici bir süzgeçle karşılaşır ve ancak dizilişe uygun yönelimli elektromanyetik dalgalardan yararlanır. Farklı girişim desenleriyle tüm kutuplanmalara uygun bir plazmonik elektrot yapılabilir.

Burada bir açıklama plazmonik yapı-anten karşılaştırması için gerekecektir. **Şekil 1.1.** de bir anlamda buna hizmet eder. Anten, belirtildiği gibi, duran dalga oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Farklı anten türleri duran dalga oluşturmaktan ziyade hareket eden dalgayı da kullanmaktadır. Elektromanyetik dalga antenle eşleştiğinde eğer iletim hattında bir yansıma yapmadan ilerlerse, bu hareketli dalga ilgili devre ögesine ulaşır. Bu tür antenlerin üretimi zordur, çünkü iletim hattının da herhangi bir yansıma yaşanmaması için doğru hazırlanması, yani öz direnç eşleşmesi gerekir. Yüksek frekanslarda bunu başarmak güçleşir, çünkü cıdar kalınlığı devreye girer. Ayrıca eşleştirme zorluğu, zaten boyutça zor olan üretimi daha da güçleştirir. Bu nedenlerle, duran dalga antenlerinin kullanımı, çoğu uygulamada daha uygundur. Oluşan duran dalgalar, kullanılmamış, yani yansıma ile birikmiş elektron hareketlerinin girişimiyle oluşur. Metal antenden (yüzeyden) devreye (aygıt) doğru geçecek bir elektron bu kesişimden yansır, yeni ilerleyecek elektron dalgası ile girişim yaparak duran dalga oluşturur ve bu bir enerji sıçması (yankılanma, rezonans) görevi görür. Her yansıma, duran dalga genliğini arttıracak ve bu salınımca, yeni elektronlar ilettime geçecektir.

Plazmonik yapılar bir anten gibi düşünüldüğünde hangi türe uyar? Bir “duran dalga anten” ile ifade etmek uygundur: Plazmon hareketi, elektromanyetik dalganın frekansına bağlı bir yankılı (rezonatif) harekettir. Hızlı veya sıcak elektron derhal toplanmalıdır, aksi halde hızla sönümlenecektir. Hızlı elektronun katedeceği yol (x') – tıpkı iletim hattının uzamasıyla (x) kaybın arttığı bir haberleşme devresinde olduğu gibi – olabildiğince düşürülmelidir. Ayrıca tasarlandığı frekanslardan daha yüksek ve düşük frekanslı dalgalar, etkin şekilde soğrulamaz.



Şekil 1.1. Anten ve plazmonik yapının elektromanyetik dalga ile eşleşmesi – Akım duran dalgalarca iki farklı yöndedir (I^+ ve I^-) ve doğrultucu vasıtasıyla tek yönlü (I^+) hale getirilir. Daha yüksek frekanslı dalgalar, boyutlarına göre daha uzun bir yol içinde hareket ettiklerinden sönümlenirler. Burada böyle yüksek frekanstaki (düşük dalgaboyu) bir örnek dalga -abartılı olarak- 2 kat gösterilmiştir (düşük genlikteki ince çizgiler). Sağda yer alan plazmonik yapıda duran dalga yeniden görülür: Yapının plazmon frekansında olan elektromanyetik dalgalar, yankılanmayı (rezonans) oluşturur. Elektronlar, aygıtça en yakından toplanmalıdır; aksi halde, sönümleme ile kayıp olurlar veya kesişimden geri yansıyarak duran dalga oluşturacaklardır.

Anten kısmının çözümü kolay olsa da, doğrultucu diyotun hazırlanması pek kolay değildir. Görünür bölgede ışınların ulaştığı frekans 350 THz üstündedir. Böyle yüksek frekanslarda doğrultma yapmak oldukça zordur: Eğer anten kısmının plazmonik yapılarla çözüldüğü düşünülürse, elektron dalgaboyunun aşağı çekilmesi (sönümlemenin yavaş olması için) ve elektronun alacağı yol, yani aygıt kalınlığının (taşıyıcı hareketi yüzeye koşut (paralel) ise yatay uzunluk) düşürülmesi gereklidir. Elektron dalgaboyuna müdahale, seçilecek malzemelerle mümkün olabilir: Enerji-dalgasayısı (E-k) eğrisi daha dik olan malzemeler uygundur. Bu seçimin haklılığı hemen gözüktür: Elektron, böyle bir enerji kuşağında daha yüksek hızlara ulaşabilir.

Bu yapılırken, aygıt içerisinde kullanılacak bu enerji kuşağına sahip malzemenin, yine de yüksek hıza izin verebileceği meçhuldür. Kristalinin niteliği, azami ulaşılabilir hızı belirleyicidir. Yüklenmiş kusurlar, yüksek elektrik alanda elektronu yavaşlatır. Bugün elektronik aygıtların ucuzluğu, üretim yöntemleri sayesinde, ama düşük gürültü, yüksek hız gibi beklentilere karşılık yüksek kristal niteliği ile orantılı olarak, maliyet de artmaktadır.

Pahalı malzemelerin (galyum nitrit ve galyum arsenit bileşikleri gibi) ve üretim aşamalarının, böyle bir enerji dönüştürücü yapımında -şu an için- engel oldukları görülür. Elbette MOSFET teknolojisinde galyum nitrit söz sahibi olmaya başlamıştır ve buradaki

maliyet düşüşü yadsınamaz. Galyum arsenit diyotlar da yüksek frekans elektroniğinde artık daha çok kullanılır durumdadır. Ancak yüksek akım, daha geniş yüzey alana ve kalınlığa sahip kristal demektir. Bu da yüksek güç galyum nitrit MOSFET'lerin pahalı olmasına neden olur. Yine doğrultucu diyotun bir enerji dönüşümü uygulamasında kullanılacağı hatırlandığında, yüksek akımlarda çalışılacağından, bu malzemelerin kullanımı, maliyet olarak şu an uygun değildir.

Atlanmış gözükebilir; hızlı bir aygıt için acaba yarıiletken inceltilemez mi? Bilindiği gibi MOSFET'ler bugün hızlı aygıtlar olarak kullanılıyorsa, bu kısa geçit (kanal) uzunluğu nedeniyledir. Mikron mertebesinde daha aşağıda, yüz nanometre altında üretilen geçit uzunluğunda, elektronlar saçılmaya daha az maruz kalarak hız kaybetmeden diğer bağlantı (elektrot) noktasına ulaşır. Kristal niteliğinin belirlediği hızlar aşılabilmektedir artık. Elektronun alacağı yolu kısaltmak için de bu amaçla inceltme yapılabilir.

Bu inceliği kısıtlayıcı ölçütler nelerdir? Bir Schottky yapısı kurgulanarak, kolay bir çıkarımda bulunulabilir: İnceliğin sınırı, -ilk bakışta- kıtlık bölgesinin kalınlığı kadardır. Aksi halde taşıyıcıları hızlandıracak elektrik alan oluşturulamaz; en önemlisi, kıtlık bölgesi içinde kendine yer bulamayan yük taşıyıcılarının bulunabileceği bir bölge oluşamaz.

Akışın verimle sağlanabilmesi için kıtlık bölgesinin yarıiletken içinde kurulmuş olması şarttır. Taşıyıcılar kıtlık bölgesini geçtiklerinde artık doğrultulmuşlardır (aslında kıtlık bölgesindeki azınlık taşıyıcıları bağlantılara doğru sürüklenmiştir); tek yönlü geçiş sağlanmıştır, ters yönden gelecek yükler (yansıma) ise, Schottky engelince kısmen durdurulmuştur. Böyle bir düşsel yapı için metal iş fonksiyonunun, yarıiletkeninkinden daha yüksek alındığını belirtmek gerekir. Arayüz, yani metal-yarıiletken kesişimindeki durumlardan elbette kaçak akım gelecektir, ama bu ana akıma göre düşüktür. Diyotun niteliğini de işte bu ters yöne olan akımın ana akıma oranı belirler.

Bu kadar ince bir yarıiletken katman yeterli olabilir mi? Birim zamanda gelen elektron sayısını kabul edebilecek bir alana ihtiyaç vardır: Bu, gelen elektron kadar boşluğun zıt yöne iletilmesi demektir. Asgari incelik için yarıiletken içerisindeki durum sayısının bilinmesi gerekir: Yük yoğunluğu, yani birim zamanda birim alandan geçecek elektron sayısı kadar boşluk durumu bulunmalıdır. Fermi istatistiği kullanılarak elde

edilen durum yoğunluğunun (artık taşıyıcının bulunabileceği her enerji değer aralığında Fermi-Dirac integrali alınmıştır) malzeme hacmiyle çarpımı toplam boşluğu, yani kabul edilebilecek elektron sayısını verir (McKelvey, 1982).

Azami akım yoğunluğu seviyesine karşılık gelen kalınlık (akımın geçtiği yol uzunluğu), boş durum sayısı, elektronun metaldeki hızı ve yük dolaşım zamanı çarpımlarıyla elde edilebilir. Dolaşım zamanı, yani yükün ilk hareketinden malzeme içindeki tuzağa takılması arasındaki süre, kalın malzemeler için ortalama bir değerdir. Dolaşım zamanının ortalama olarak değişmeye devam etmediği kalınlık veya yükün ulaşabildiği ortalama hızın artık değişmediği uzunluk, serbest dolaşım uzunluğudur ve bu uzunluk malzemenin enerji kuşağı (bant) yapısı ve kusur yoğunluğu ile ilintilidir. Yukarıda yapılan kalınlık hesabı, serbest dolaşım uzunluğundan ince bir malzeme için büyüktür; çünkü bu inceliği kat eden yükler, rassal olarak, bir tuzağa takılmadan veya sayıca daha az takılarak yoluna devam ederler. Ancak, bu çarpım sonucunda elde edilen değer daha güvenli bir incelik sınırı belirlemede uygundur. Bu özen çarpımdaki hızın seçiminden de anlaşılır: Malzeme içinde alabileceği azami hızdan ziyade, daha yüksek olan metaldeki hız alınmıştır. Metaldeki hızıyla hareket eden yük, yavaşlamadan bu incelikteki yarıiletkeni geçebileceğinden, bu hızı almak daha uygun olur. Elbette, elektronların ışık hızına yaklaştığı malzemeler (grafen, süperiletkenler) de vardır; ancak bu çalışmanın içerisinde kullanılmadıklarından, bu hızlar dikkate alınmamıştır.

Yarıiletkenler, bir kristal niteliği sağlanmadan düzensiz yapıda olsalar bile, ince katmanlar olarak hazırlandıklarında hızlı aygıtlar yapmak için kullanılabilir gibi gözükebilir. Ancak, düzensiz yapılardan da kusur kaynaklı ikincil yük taşıyıcıları gelecektir. Kusurları, sadece yabancı veya katkı atomları olarak algılamaktan ziyade, bölgesel elektrostatik çekim merkezleri olarak da düşünmek gerekir. Taşıyıcıyı tutup serbest bırakan bu merkezlerin sayısı, iyi bir kristale göre fazla olacak, bu da aygıtta farklı arızalar olarak nüksedecektir: Bir fotodiyotta karanlık akım; bir diyotta sızıntı akımı ve en önemlisi, herhangi bir aygıt için gecikmeli tepki olarak gözlemlenebilir kristal niteliğindeki bu kusurlar. Ayrıca uçtan uca ulaşan yük sayısında, yani verimce de bir düşme yaşanır. Bu verim, bir akım karşılaştırması yani ileri ve geri yönde akımların oranı ile ilintilidir.

Yukarıda yarıiletken davranışı hakkında çeşitli bilgiler, hızlı bir aygıt tasarımı için verilmiştir. Tüm bu açıklamalar daha iyi bir aygıt ve bu aygıtta en yakın benzetim ortamını

yaratmak için gereklidir. Yükün geçiş hızından aygıtta ait tepki hızı, akım yoğunluğu nedeniyle oluşabilecek ısı etkileri, kristal kusurlarının etkisiyle içerideki tuzak merkezlerinin atıl (potansiyel) engelle etkileri ve bunun da dalga fonksiyonunun Schrödinger denklemi çözümünde alacağı başkalaşımı (elektron dalgaboyunun değişmesi) açıklamak için bu sayılanlar, benzetimler içerisinde yer alırlar.

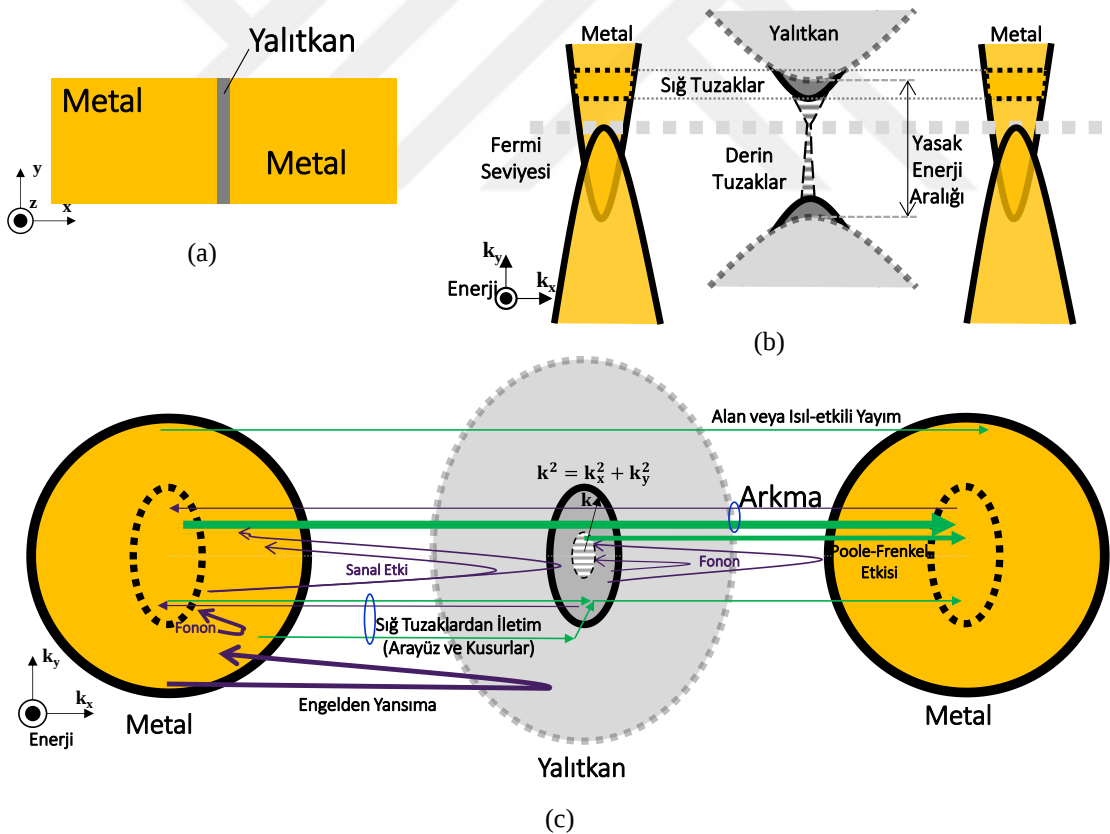
İnceltme için bir sınır belirlenmiştir ve daha altına inmek verimli bir yük taşınımını mümkün kılmaz. Ancak, yük taşınım yolu kısaltılırsa, elde edilecek önemli kazanımlardan biri, daha yüksek hızlara ulaşabilmektir. Açıklanmamıştır, ama çalışmanın konusuna geçme açısından yerinde bir soru ile konuya giriş yapılabilir: Çok daha ince bir yarıiletken katman nasıl davranacaktır? Elbette, iki-boyutlu malzeme gibi davranmaya başlar: Taşıyıcılar yatay düzlemde hareket etmeye mecbur bırakılır. Yarıiletkenin bu durumu, yani iletim (elektrik alan) yönünde kısıtlı durum sayısına sahip olması, onu bu yönde bir engelle dönüştürür. Sahip olduğu durum sayısının iletime katkıda bulunur, ama inceltme devam ettikçe, iletim yönündeki durum sayısı daha da azalacak, iletim düşecektir.

Bu engel belli bir incelikten sonra delinebilir: Arkma (tünelleme) olayı işte burada devreye girer. W. Heisenberg ile özdeşleşmiş olan Heisenberg belirsizliği, böyle bir incelikte (taşıyıcının arandığı alan daraltılmıştır) çok yüksek enerjili (momentum yükselmiştir) taşıyıcıların olacağını söyler (Heisenberg, 1950). Bu incelik birkaç nanometreyi geçmez. Böyle bir noktada elektron hem dalga hem de parçacık özelliği gösterir ki, Y. Cui 2005 yılındaki çalışmasında (Cui, Banin, Björk, & Alivisatos, 2005) bu etkiyi nanometre ölçeğinde deneysel olarak göstermiştir.

Hızlı bir diyot için bu incelikte kullanılabilecek yarıiletkenin belirlenmesi gerekir. Yatay yönlü kayıplı olan iletimi sınırlandırmak gereklidir, çünkü taşıyıcıların bu ince katmandaki yatay hareketleri ve iletim yönündeki sınırlı sayıda bulunabilecekleri durum nedeniyle yapacakları saçılmalar, büyük kayıplar verir. Uygulanabilecek ilk düşünce, yataydaki yarıiletken yüzey alanını daraltmak olabilir: İki iletken arasında çok dar bir noktadan arkmanın olması yatay hareketleri engeller. Ancak, bu da çok dar bir geçiş bölgesinin olması ve doğrudan, yüksek akım yoğunluğu demektir. Taşıyıcının yapacağı geçişler yoğun ve bölgesel olduğundan, yüksek elektrik alanlarda malzemede bozulma (bağların kırılması ile yüklenme), ve ısı (bağlantı noktalarında direnç artışı) sorunlar görülür.

Sayılan nedenlerle, böyle bir engel için yük yoğunluğu kısıt olan, yani yalıtkan bir malzemeyi katman olarak seçmek uygun olur: Arkma artık her noktadan ve iletim yönündedir (en kısa yol tercih edilir). Bir aygıt olarak yalıtkan tabanlı ark diyotun hazırlanması ve incelenmesi, işte bu çalışmanın konularıdır.

Şimdi **Şekil 1.2** içindeki gibi düşünülmüş enerji kuşağı ile bir metal-yalıtkan-metal (MYM) aygıt incelemesini yapmak, yapı özelinde görsel bir fikir verecektir. Her bir malzemede yük taşıyıcılarının bulunabilecekleri durum yoğunlukları bir hacim olarak düşünülebilir. Taşıyıcıların yönleç (vektörel) büyüklük oldukları, yani hız ve bu hızın yönelimine sahip oldukları unutulmamalıdır. Bu hareketler, matematiksel kolaylık sağlaması açısından, ters uzayda, yani uzaysal boyutların (x, y, z) kesirde payda ($1/x$, $1/y$, $1/z$ ve sonrasında k_x , k_y ve k_z) olduğu büyüklüklerle ifade edilen düzlemlerde incelenir. Yük yönleçleri birer çubuk olarak düşünülürse (yalıtkan içindeki k gibi), bu çubukların sığabileceği hacimlere kayıpsız girer; aksi halde kayıp yaşanır.



Şekil 1.2. MYM aygıt için yük taşınım türleri – Enerji kuşağı (b) biraz abartılı verilmiştir: Derin tuzaklar yasak-enerji aralığı boyunca kesikli dağılmıştır ve kötü nitelikte bir yalıtkan varmış izlenimi verir; ancak yazım içinde tuzaklar bölümünde ve malzeme optik incelemelerinde bu açıklanmıştır. Eğer kuşaklar üç boyutta düşünülür ve iletim kuşağının üstünden değerlik kuşağına doğru bakılırsa (c), yalıtkan, k_x yönünde bir basıklık görülür: Bu iletim yönünde durum sayısının azalması yani aygıt (a) ait yalıtkan katmanın inceliği nedeniyledir. Bu gösterim durum yüzeyi gibi düşünülmelidir.

Elektrik alanının her iki yön için de olduğu düşünülerek hazırlanmış bu çizimde, zayıf etkiler daha ince çizgilerle **Şekil 1.2.c** içinde ifade edilmiştir. E-k kuşağına yukarıdan bakılmış gibi alınan bu çizimde, yalıtkanın kesikli çizgi ile verilmiş geniş yüzeyi garipsenmez: Çok az bir kısmı dolmuş yalıtıkandaki bu durum bulutu, yayvan bir E-k kuşağına sahiptir ve bu yayvanlık taşıyıcı hızını yavaşlatır. Bu yalıtkan biraz da elektron zenginidir (Fermi seviyesi, iletim kuşağına yakındır).

Bu görsel anlatım, taşıyıcı momentumunun malzemeler arasındaki dönüşümünü açıklar: Taşıyıcı hızı veya daha açık olarak, enerjisi, eğer geçilen malzeme içerisinde bulunamayacak kadar büyükse, yük enerjisinde kayıp oluşur. Yalıtkan malzeme içerisinde gösterilmiş olan k yönlü (vektör), x ve y yönündeki azami dalgasayısını bir anlamda belirler. Plazmonikte hızlı elektronların toplanamama sorunu da bu nedenledir (Chalabi, Schoen, & Brongersma, 2014). **Şekil 1.2.c** içinde metal-yalıtkan-metal boyunca kesikli bir doğrultuda ilerlemiş iletim buna örnektir. Metalde daha yüksek momentumlu elektron yalıtkan malzeme içerisinde momentumunun bir kısmını kaybederek (saçılma) bulunabileceği bölgeye kadar düşmüş ve oradan diğer metale, bu yeni momentumla geçmiştir. Bir yalıtkan için bu kayıp zaten beklenir; ama yarıiletkenlerde de aynı sorun daha az kayıpla yaşanır: Yarıiletkende yüksek momentumlu elektronların bulunabileceği durum yüzeyi daha geniştir. Metal içerisinde kesikli çizgi ile gösterilmiş bölge, yalıtıkanda alınabilecek dalga yönleçlerini (vektör) ifade eder.

Sanal etki ile ilgili de kısaca bilgi vermekte fayda vardır: Metal, diğer malzemeye yönelen elektronun hareketiyle, kendisinde bunun zıttı bir yük varmış gibi davranır. Bir bakıma ayrılan elektronun yerinde bir boşluk yaratılmış gibi düşünülebilir. Bu boşluk da yükçe elektronun zıttı olacak ve iki taşıyıcı arasında bir çekme kuvveti oluşacaktır. İşte bu çekme kuvvetinin taşıyıcı üzerinde yarattığı atıl (potansiyel) enerji sanal etkidir. Metal iş fonksiyonu ve yarıiletkene ait elektron çekiciliği (affinity) arasındaki farkça beliren Schottky engelini büken etkidir bu.

İletimin kayıpsız sağlanmasında malzemenin enerji kuşağı yapısının ve boyutlarının seçiminin titizlikle yapılması tüm sayılan nedenlerle, elzemdir.

Son bir ekleme de Fowler-Nordheim arkması üzerine yapılmalıdır: Çalışma bu konuyu atlamıştır; çünkü çalışmada, görece ince bir yalıtkan katmanda ve düşük elektrik alanlarda arkma incelenmiştir. Engel, yüksek elektrik alanda yeteri kadar bükülürse

(elektrik alan yönü tersine ağarsa), yüksek enerjilerde engel kısmen incelmış ve arkma gerçekleşmiş olur. Ancak, belirtildiği gibi aygıtlar yeterli incelikte olduğundan, bu çalışmada doğrudan arkma incelenmiştir. Fowler-Nordheim arkması, görece kalın (5 nm üstü) yalıtkanların (vakum da dahildir) kullanıldığı anahtarlama (tek elektron transistörler) ve elektron kaynağı (örneğin taramalı elektron mikrogörüntüleme) uygulamalarında ana taşınım türüdür.

1.1. Malzeme Seçimi

Sunulan çalışmada ulaşılmış olan sonuçlarda, şu noktaların sağlanabildiği sürekli sorgulanmıştır:

- Kolay üretim: Mümkünse az bileşen çeşitliği ve bunların saflıkları dışında kristal niteliğinden bağımsız sonuç elde edilebilmesi; bu bileşenlerin kolay tedarik edilebilirliği ve elbette karmaşık olmayan düzeneklerle üretimin sağlanabilmesi, aygıta uygulama alanı verir.
- Tekrarlanabilirlik: Neredeyse tüm uygulamalı bilimler alanındaki çalışmalarda yüksek verimler, hızlar veya maliyet düşürme imkanı yakalandığı iddiaları hep var. Peki, her denemede yeniden aynı sonuca ulaşıyor mu? Ticarileşememeleri nedeniyle bunların sağlanamadığı açıktır ve maalesef sonuçlar basılı yayımlarda; üretilen aygıtlar ise bir laboratuvar dolabında kalıyor. Uzun süredir çalışmalar yürütülmesine rağmen ark (tünel) diyotları da benzer kaderi paylaşmıştır (Elbette, yarıiletken temelli olan Esaki ve Gunn diyotları hariç). Çalışma içinde sonuca ulaşılan kadar bu tekrarlanabilirlik aranmıştır.
- Ölçeklenebilirlik: Büyük ve sürdürülebilir olmayan bir altyapıyla istenildiği kadar ileri düzey bir sonuç elde edilsin; o çalışma da uygulanabilir olamaz. En azından bunun tersi için örnek gösterilebilecek bir çalışma yazım esnasında bulunamadı. Elbette uzay teknolojileri için bu, bir yere kadar yadsınabilir; ancak sadece üretimi cezbedici olan teknolojilerde maliyet düşüşünü ve geniş kullanım alanını görebiliyoruz.

Yukarıdaki üretim kaygıları nedeniyle, yıllar içerisinde farklı malzemeler ve üretim yöntemleri ile elde edilmiş aygıtları, maalesef, bu yazımın içeriği dışında bırakmıştır. Malzeme seçimindeki seçicilik, bir bakıma yukarıda sayılan her bir beklentiye birden sağlamayı daha mümkün kılar.

Üretim açısından -görece- zorluk çıkarmayacak malzemeler nelerdir? Özoksit (native oxide), çalışmanın başlangıçta temelini oluşturuyordu; üretimi kolaydı ve kalınlığı, görece, denetlenebilirdi. Elbette, yalıtkan bir oksit tabaka istendiği için özoksit oluşturulacak malzemeler kısıtlıdır: Krom, magnezyum, alüminyum hemen akla gelenler iken, belki hafniyum gibi uç bir örnek de ilave edilebilir. Çalışmada tecrübe edildiği üzere, bu oksitler oldukça kararsızdır: Zamanla kalınlaşan oksit tabaka her ölçümde farklı davranan diyotlar olarak kendini göstermiştir. Alüminyum ve oksidi ile bu olumsuz sonuç tecrübe edilmiştir.

Peki, ince bir metal tabaka, oksitleninceye kadar işlem görüp kullanılamaz mıydı? Çalışma içerisinde yaşanarak görülenlerden biri de bir alt bağlantı (elektrot) metali üstüne oksitlenmesi için kaplanan ince metal tabakanın, alt metal ile intermetalik yapı oluşturmasıydı. Bakır üstüne kaplanmış olan 5nm kalınlığındaki alüminyum, bakır ile intermetalik yapı oluşturmuş, oksit tabaka saf alüminyumdaki gibi üstte oluşmamıştır (Tonooka, Shimokawa, & Nishimura, 2002). Alüminyum gibi kolay oksitlenen ve oksidi de bu uygulama için uygun olan bir malzeme, herhangi bir soy metal ile intermetalik alaşım oluşturduğundan, kullanılamaz. Bu ilginç sonuç, farklı bir örnekte, çelik tencerelerde yoktur: Krom ve demir intermetalik yapı oluşturmadığından krom oksit paslanmayı önleyecek şekilde dış çeperlerde nanometre kalınlıkta zar oluşturabilecek kadar serbesttir (Ohmi, Nakagawa, Nakamura, Ohki, & Koyama, 1996).

Oksitten ziyade -nitrit veya -sülfid de oluşturmak düşünülebilir, ancak gelen zorluklar daha da fazladır: Ortamda oksijen varlığının olmaması istenecektir (Elbette alüminyumda oluşturulabilecek oksinitrit uygun olabilir). Alüminyumun elektrokimyasal olarak nitritlenmesi mümkünken, kalınlık hızla onlarca nanometreyi geçebildiğinden denetimli bir büyütme zordur. Sülfid ise uygulanabilecek metallere, pek yalıtkan sayılamayacak yarıiletken bileşikler verir (ZnS , Cu_2S , Al_2S_3 (kararsızdır), Ag_2S).

Pek meşhur iki-boyutlu malzemeler bir yalıtkan tabaka olarak kullanılamaz mı? Elbette akla gelen bor nitrit (hekzagonal veya kübik) uygundur. Ancak iki-boyutlu malzemelerde hala tekrarlanabilir yekpare katmanlar üretilmemektedir. Buhar biriktirme yöntemi ile çoğunlukla adalar halinde hekzagonal bor nitrit oluşmaktadır ve henüz bir bütün katman, tekrarlanabilir olarak, boşluksuz üretilmemiştir.

Tekrar ark diyot yapısına döndüğünde, W. Simmons'un çalışmasında (Simmons, 1971) belirttiği gibi, gerçekten kristal yapı ne kadar önemli olacaktır? Diyottan beklenen, iyi bir doğrultucu gibi tek yönlü geçirgenliktir ve bu nedenle, tek yönde yüksek arkma olasılığı sağlanabilmelidir. Yani kristal yapının bir tarafta çok iyi olması, ilk bakışta yeterli gözükmemektedir. Elbette, karşı taraftaki düzensiz (amorfe) yapı, burada var olan tuzaklardan, foton veya ısı etkilerinden hangisi olursa olsun, tekrar yük taşıyıcı oluşturup ters yönde bir arkma ihtimalini barındırır. Çalışma içerisinde kullanılabilecek malzemeleri kısıtlayan bir engel de budur: Düzenli kristal yapı her iki bağlantı ve yalıtkan tabaka için de sağlanabilmeli ve bunu sağlarken uygulanacak ısı işlemleri (tekrar kristalleştirme) yalıtkan malzemeye zarar vermemelidir.

Silisyum, artık her özelliği bilinen, üretimi kolaylaşmış bir element olarak farklı elektronik aygıtların üretiminde tek başına yer almaktadır. Hatta üzerindeki kimyasal süreçlerin kolaylığı sebebiyle, pek esnememesine rağmen, Mikro-Elektro-Mekanik Sistemlerin (MEMS) hem sabit (statik) hem hareketli (dinamik) parçaların üretiminde yer almaya devam ediyor. Üstelik kararlı özoksidi yani SiO_2 , üzerine de çok şey biliniyor: Kalınlığı denetimle oluşturmak oldukça kolaydır (Kobayashi Asuha, Maida, Takahashi, & Iwasa, 2003). Nanometre mertebesinde bir kalınlık için böyle denetimli bir yalıtkan tabaka oluşturabilmek, işlem-yoğun üretim süreçlerinden (atom-molekül katman biriktirme) bir çırpıda kurtulma imkanı vermiştir. Bu nedenle silisyumun, böyle bir diyot için kullanılması oldukça mantıklıdır.

Elbette bir yarıiletken, tasarlanan böyle bir ark diyot için pek çok sorunu beraberinde getirecektir: Kristal kusurları nedeniyle tuzak merkezleri, foton soğurma nedeniyle oluşacak fononlar ve yine bu nedenle ortaya çıkacak yük taşıyıcılarının tersine arkma olasılığını arttırabileceği, ilk bakışta görülür. Aşırı katkılama ile yük taşıyıcısını arttırarak, artık bir yarıiletkendен ziyade silisyuma, iletkenliği düşük ve yasak-enerji aralığı olsa da, bir metal gibi kullanılabilmek fırsatı verir. Tabii, bu katkılamaların oluşturacağı yeni tuzaklar, yeni durumlardır. Bu durumlar, yani var olan kusurların yük olarak elektrostatik etkileri; ayrıca bir yayım merkezleri olmaları nedeni ile tersine arkma olasılığı yeniden artacaktır. Ek olarak, ısı etkileriyle bile azınlık taşıyıcılar, bir elektrik alan uygulanmadan, arkma yapabilecektir.

Katkılama nedeniyle oluşan bu sorunun aynısı yankılı (rezonant) Esaki diyotlarda da görülür: Arkma akımının arttırılması için katkılama oranı arttırıldıkça ters arkma akımı

da artar. Öyle ki, bu diyotların nitelikleri, ileri ve zıt arkma akım yoğunluklarının oranıyla belirlenir.

Tüm bu etkiler silisyum incelidikçe azalacaktır: Kusur yoğunluğu yüksek olsa bile iletim yönündeki taşıyıcı daha az kusur tarafından saçılacaktır. Tabii ki giriş kısmında uzun uzadıya fikir yürütülen bu kalınlığın alabileceği asgari değer, tekrar hatırlanmalıdır.

1.2. Tuzaklar Üzerine

Tuzak, bir taşıyıcıyı hapsedme olarak düşünülebilir. İletim işleyişini tam anlamıyla daha kapsayacak şekilde ele alındığında, taşıyıcıyı yolundan eden malzemeye öz ve malzemeler arasındaki etmenler de tuzak olarak sayılabilir. Taşıyıcının yol boyunca karşılaştığı etkilerin tümü elektrostatik olarak ifade edilebilir: Tuzaklar, taşıyıcı hareketinin zamandan bağımsız olarak saçılma yapmasına neden olan malzeme içindeki durumlardır. Durum kelimesi bu tuzağın istatistiki varlığı olarak katıhal fiziğindeki anlamıyla düşünülmelidir. Burada, taşıyıcı-taşıyıcı etkileşimi tuzak konusuna dahil edilmemiştir.

Tuzakları iki farklı açıdan incelemek gerekir: Malzemenin kendi enerji kuşağı yapısı nedeniyle ortaya çıkan durumlar ve üretim esnasında oluşan kusurların yarattığı durumlar olarak düşünmek uygun olur. Elbette malzemeler arasındaki arayüzleri de ilave etmek gerekir: Malzemelerin kendi enerji kuşaklarının, bitişindeki diğer malzemeninkiyle etkileşimi yine o malzemeye has düşünülebilir.

W. Simmons önemli bir çalışma (Simmons, 1971) sunarak ark diyotların aslında neden bu kadar zaman içinde öne çıkamadığını önceden özetlemiştir: İyi bir kristal niteliğinin sağlanması, metal için bile zordur. Aslında tekrar kristalleştirmek için ısı bir işlem uygulamak yeterli gelebilir, ancak böyle bir işlemin, metal-yalıtkan arayüzde oluşturacağı yeni bileşenler işin içerisine girer. Metalin yalıtkanaya ait oksijeni alması ile yeni bir bileşiğin oluşması (örneğin Alüminyumun silika ile kesiştiği yerde alümina gelişmesi), yalıtkanada oksijen boşluğunun (silika oksijenini alüminaya kaydırmıştır) yaratılması nedeniyle gerilime bağlı etkin (aktif) bir yük merkezi (SiO_x) oluşturma ve metal-yalıtkan bileşiklerin oluşması (örneğin bakır üstüne kaplanan alümina, biraz kötü iletkenlikte ince bir bakır-alümina oluşturur (Tonooka, Shimokawa, & Nishimura, 2002)) üç önemli sonuçtur. Sayılan hareketlilikler zamandan bağımsız olarak ele alındığında, her

üçü de olumsuz bir tersine etki yaratır: Tuzak merkezleri, artık elektrik alan ve sıcaklığa bağlı gürültü kaynakları ve taşıyıcı saçıcı işlevi görürler.

Peki, bu tuzaklar elektron hareketine tam anlamıyla nasıl bir etki yapar? Malzeme içerisindeki kusurlar birer atıl enerji olarak düşünülür. Kusur, taşıyıcıya, yükü itibarıyla farklı etkide bulunur: Aynı yüktelese, bir engel, zıt yüktelese ise kuyu gibi düşünülür. Hacimsel tuzaklar zamandan bağımsız bir hesap yapıldığında taşıyıcı birleşme ve yaratma noktalarıdır.

Malzemelerin kendi içindeki hacimsel tuzaklara dönülecektir tekrar; ama iki benzemez malzeme arasındaki etkileşime burada giriş yapmak, bazı ön bilgileri vermek açısından yerinde olacaktır. Bir kristalde elektron dalgası için çözüm aranırken, tekrarlı yapılar kullanılarak Bloch dalgalarına ulaşılır (McKelvey, 1982). Ancak çözümlemede malzemenin yüzeyine gelindiğinde, bu elektron dalgası ifadesi doğru kabul edilebilir mi? Artık ifade, bu uçta süresizdir; onu oluşturan ifadedeki terimler de geçersiz olur. Hava veya vakum yeni bir engelmüş gibi kabul edilir, ama yüzeydeki atomların dış yüzeye bakan kısımları serbest ve yeni bir davranış gösterecektir: Enerji kuşakları bu noktadan sonra farklı bir bükülme yapar. Örneğin yüzeydeki silisyum atomlarının artık bir melez (sp^3) yörüngesi boştur. Metallerde ise serbest elektronlar, Coulomb etkileşimine daha az maruz kaldıklarından (artık daha az atom onlara müdahale edecektir), yüzeyde daha rahat hareket ederler. Bu bir bakıma Gauss yasasına yüklerin yüzeyde bulunmasıdır.

Bu yarıiletken (yalıtkan) bir metalle bitiştiğinde, yeni bir atıl (potansiyel) engel oluşur. J. Bardeen (Bardeen J. , 1947) ve V. Heine (Heine, 1965) arayüzleri incelerken buna ulaşmışlardır. Metal enerji kuşakları yarıiletkene sarkmış, yarıiletken iletim ve değerlik kuşakları yakınlarında durumlar bulunmuştur. Yani taşıyıcı artık yarıiletkenin yasak-enerji bölgesinde – iletme katılamasa da – bu durumlar içerisinde bulunabilir. Her bir yüzey atomunun arayüze bakan kısımlarında enerji kuşakları toplamı bu sığ bölgeyi oluşturur. Pek çok çalışmada metal kaynaklı sığ durumlar (Metal-Induced Gap States – MIGS) olarak ifade bulan bu etki, epeydir üzerinde çalışılan bir konudur. Bu durumları veya bunların oluşturdukları arayüz tuzaklarını engellemek için, yalıtkan bir tabakanın ara katman olarak bulunması gerektiği her çalışmada (Bhattacharyya, et al., 2020; Islam, Shine, & Saraswat, 2014; Kobayashi Asuha, Maida, Takahashi, & Iwasa, 2003; Wager & Robertson, 2011) ortaya konmuştur.

Mönch'ün çalışmasına (Monch, 1990) atıfla gerçekleştirilmiş olan bir diğer çalışma (Kerelsky, et al., 2017), ondan daha açıklayıcı olarak, bu arayüzdeki durum sayısının ifadesini elde etmiştir (A. Kerelsky'ye ait çalışmanın ek bölümünde yer almaktadır). Bu yöntemlerin her birinde atıl engel (potansiyel) için, çözümü kolaylaştırmak açısından, kosinüs terimi içeren bir benzetim yapılmış ve durum yoğunluğu bulunmuştur.

Bir başka yaklaşım (Card & Rhoderick, 1971) da H. Card tarafından gösterilmiştir. Yüzey yük dağılımını inceleyerek, yüzey gerilimi ve durum yoğunluğu ifadelerini elde etmiştir. Bu yaklaşımdan hemen bir yıl sonra S. Kar, bu tezdeki ölçümlerin yapılmasını kolaylaştıran çıkarımlarda (Kar & Dahlke, 1972) bulunmuştur. Bu iki çalışmadaki doğrultular aynı olsa da, arayüzün farklı frekanslardaki davranışının bir eşdeğer devre yardımıyla irdelenmesi her şeyi daha da kolaylaştırmıştır.

Tüm bu yaklaşımlar belirli kabulleri yaparak deneysel verilerden önce bu arayüzlerin varlıklarını göstermişlerdir. Ancak, Poisson denklemi sonucunca, arayüzdeki durumların (yüklerin) yaratacağı engel 2. dereceden bir polinomdur. Bu yaklaşıklık yerine daha gerçeğe yakın bir çözüm aranırsa, matematik zorlaşır: Polinom bir engele göre Schrödinger denklemini çözmek oldukça zordur. Tabii ki Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB) yaklaşımını kullanmak bir fikir verebilir. Ancak bu yaklaşım, engelin boyut uzayında hızla değiştiği durumlarda kullanılamaz. Bu nedenle, sonraki bölümde üzerinde çokça durulan benzetim yardımıyla bu konu incelenecektir.

Arayüz durum yoğunluğunun hassasiyetle bilinmesi, düşürmek için yapılabilecek müdahalelerin belirlenmesi açısından önemlidir. İletime katılabilecek taşıyıcıları tutan ve iletimdekileri de saçan arayüz durumları (tuttukları taşıyıcılar arayüzü kutuplu hale getirmiş (Perfetti, Quaresima, Coluzza, & Fortunato, 1986) ve bu nedenle elektrostatik etkiyenler olmuşlardır), tezin, kısa da olsa üstünde durduğu inceleme merhalelerindenidir. Yüzey şekli (darboğaz) ve uygun olabilecek malzemelerin (yüksek yasak-enerji aralığına sahip yarıiletkenler) sıralanması, arayüz durum sayısının aşağı çekilmesine imkan verir.

Yarıiletken malzemeye ait yasak-enerji aralığının yüzey durumu yoğunluğuna etkisi var mıdır? Pek çok çalışma, yüzey durumunun sayısını azaltmak için atıl engel yüksekliğini yukarı çekmeyi denemiştir. Gerçekten de bu, dalga fonksiyonuna ait sönümlenen üs ifadesinden ($e^{-\kappa x}$) görülür: Eğer elektron enerjisi ile engel arasında 1eV fark varsa ($\kappa^2 \propto (E_{\text{Engel}} - E)$), dalga fonksiyonu genliğinin $1/e$ 'ye düştüğü uzunluk (x) yaklaşık 0.1nm olur (elektron kütlesinin iki malzemedede de aynı olduğu düşünülmüştür; e :

Euler sayısı). Benzetim bölümünde, **Şekil 2.4** içinde görüleceği gibi, arayüze takılan taşıyıcıların sayısı, bu atıl engelin varlığıyla düşer.

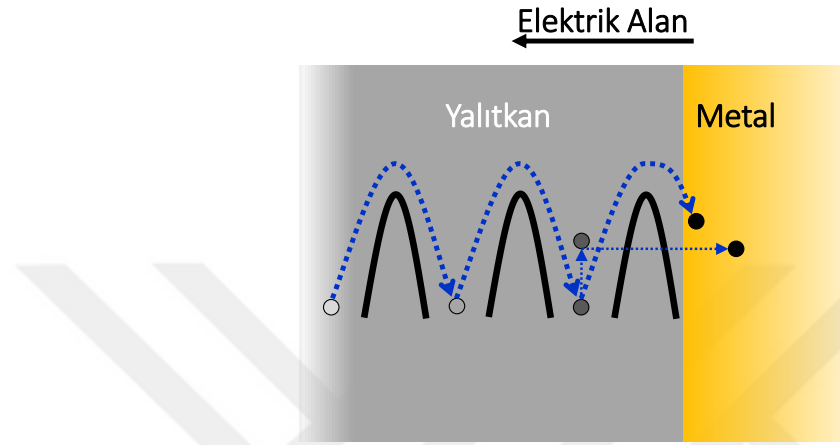
Tuzak merkezleri taşıyıcı oluşturan kaynaklar olarak ele alınırsa, elbette hareketlilik (elektrik alan, ısı veya fotonik değişim) yaratıldığında bu merkezlerden bir akış olur. Yani anlık veya zamandan bağımsız gerilim uygulandığında, burada oluşan taşıyıcı, yüküne bağlı olarak elektrik alan yönünde hareket eder. İşte bu hareketliliği yaratan bir elektrik alan değişimine yapı içerisindeki tuzak merkezlerinin gösterdiği tepki, tuzak yoğunluğu ile ilgili bilgi verebilir.

Tuzağın taşıyıcıları oluşturma hızları burada önem arz eder. Eğer bu tuzaklar bir enerji kuşağında, benzetim bölümünde görüleceği gibi hayali olarak yerleştirilirse, farklı geçişler gözlemlenebilir. Elektrik alan değişiminde hız yani frekans, burada geçişlerin saptanmasında belirleyici olacaktır. Tuzağın taşıyıcı oluşturma hızı, gerilim değişiminin yavaş olduğu frekanslara karşılık verebilir. Ancak frekans arttıkça bu hız yakalanamaz: Taşıyıcı oluşturma hızı, gerilim değişimlerine artık tepki veremez.

Arayüz etkilerinden tekrar hacimsel tuzaklara dönerek bir başka etkiye daha değinmek gerekir. Bu konu Poole-Frenkel tuzağıdır (etkisi) (Frenkel, 1938): İletkenlik artışı gibi bir davranış sunan bu tuzak, elektrik alan bağımlıdır. Yani bir yalıtkan dahi, dielektrik kırılmaya maruz kalmadan, elektrik iletimi sağlayabilir. Yukarıda hacimsel durumların kusur kaynaklı olduğu belirtilmişti. Ne var ki, bu tuzak türü malzemenin enerji kuşağı nedeniyle ve bu tuzakların yalnız yapısal kusurlardan kaynaklandığı düşünülemez. **Şekil 1.3** içinde yalıtkan ile metal arasındaki yüksek elektrik alan kaynaklı elektron geçişi verilmiştir.

Tıpkı Krönig-Penney benzetimindeki gibi, yarıiletken (yalıtkan) atomlar (ya da moleküller) birer engel gibi düşünülür ve her biri arasında elektronun bulunabileceği Coulomb tuzakları, yani kuyular vardır. Eğer elektron bulunduğu kuyudan, uygulanan elektrik alan yardımı ile çıkarak bu engelleri aşarsa, iletme katılır. Bu bir alan etkisidir ve **Şekil 1.2** içindeki yük taşınım türleri arasında gösterilmiştir. **Şekil 1.2.b** içinde yer alan derin tuzakların abartılı gösterimi mazur görülebilir: Yasak-enerji aralığının üstüne doğru olan derin tuzak bölgesi bu etkice kullanılabilir. Yalıtkanda, bu çizimde olduğu gibi bir oksijen hareketi varsa, derin tuzakların evirisi (simetri) de Fermi seviyesine göre farklı olur (şekilde bu nedenle derin tuzaklar için iletim kuşağına yaklaştıkça daha şişkin olan

bir gösterim vardır). Fermi seviyesine doğru olan daha düşük enerjideki tuzaklar ise buraya dahil edilmez ve optik ölçümler kısmında açıklanmıştır. Elektrik alan daha da büyürse, elektronların kazandığı hareket enerjisi malzeme içerisinde bağlarda paylaşılan elektronların da serbestleşmesine ve bağların kopması ile bölgesel yüklemeye (iyonizasyon) neden olacaktır. İşte dielektrik kırılma bu elektrik alan seviyesinde başlar.



Şekil 1.3. Poole-Frenkel etkisi – Yüksek elektrik alanda taşıyıcılar, yalıtkan atomlarınca oluşmuş atıl engelleri aşarak ilettime katılırlar. Kuyuya benzeyen Coulomb tuzaklarında (engeller arasında kalan boşluklar) birikmiş elektronlar arayüzde arkma ile de ilettime katkıda bulunurlar. Bu iletimin yavaş ve kayıplı olacağı barizdir. Derin tuzaklar olarak da ifade edilebilirler.

H. Poole'den sonra J. Frenkel tarafından elektron enerji bağımlılığının üstel etkisi düzenlenmiştir (Bu nedenle buradan sonra Poole-Frenkel veya PF olarak anılacaktır). PF etkisi yarıiletken aygıtlarda genelde pek incelenmeyen konulardandır. Bir nedeni, bu etkinin yüksek elektrik alanlarda (~ 1 kV/cm) görülmesi ve çalışmalarda aygıtların bu yüksek alanlarda incelenmemesi olabilir. Oldukça ince bir katmanın yer aldığı bu çalışmada, akım-gerilim ölçümlerinde bu etki görülecektir.

Tüm bu tuzaklara ek, fonon etkili saçılımlar da vardır. Bu etkiler, kristal içerisindeki atomların salınımları ya da hareket eden atıl engeller gibi düşünülebilir. Tuzakların zamandan bağımsız olarak düşünüleceği unutulmadan, bu hareketli engellerin farklı frekanslarda (mod) duran dalgalar oluşturacağı belirtilmelidir.

1.3. Ark Akımı

Fermi altın kuralı (E. Fermi'nin makalesinde bu ifadeyi 2. altın kural olarak yazması nedeniyle, bu isimle anılmaktadır; ilişkiyi 1926 yılındaki çalışmasında (Dirac, 1926) ilk sunan P. Dirac'tır.) durumlar arası geçiş ile olan akıyı açıklar. Bir başlangıç

(ilk) durumundan son duruma geçişi ve bu geçişler arasındaki eşleşirliği (D) sunan denklem 1.1'deki gibi bir ilişkidir bu (h, Planck sabitidir).

$$A_{k1} = \frac{4\pi^2}{h} \times D_{ilk \rightarrow son}^2 \times \rho_{son} \times \rho_{ilk} \quad 1.1$$

Durum yoğunluğu, ρ ile gösterilmiştir. Aslında, bu denklemin esas ifadesinde ilk duruma ait durum yoğunluğu (ρ_{ilk}) ifadesi yer almaz, çünkü elektronun ilk durumda zaten bulunduğu kabul edilir. Eşleşirlik ($D_{ilk \rightarrow son}$), bir integralden oluşur. Bu integral, durumlar arasındaki geçişin olasılığını bulmakta kullanılabilir. J. Bardeen çalışmasında (Bardeen J. , 1961) arkma olayını da bu geçiş olasılığını açıklamakta kullanmıştır: Bir atıl engelin (yalıtkan) solunda ve sağında yer alan durumlar arasındaki geçiş, bir dizin (matris) yardımı ile ifade edilmiştir. Bu dizinde, o enerjideki (E) bir dalga fonksiyonunun (ψ) geçiş olasılığı denklem 1.2 ile ifade edilmiştir.

$$D_{ilk \rightarrow son} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{son}^* E \psi_{ilk} dE \quad 1.2$$

Bu denklem arkma olasılığı ile eş düşünülebilir. Eğer dalga fonksiyonunun arkma olasılığı bir engel için çözülürse, arkma olasılığı (O_{Ark}), yani engeli geçen dalga ile gelen dalganın genliklerinin oranı, denklem 1.3 ile ifade edilen (burada çıkarımı yapılmamıştır) görünümü alır (McKelvey, 1982).

$$O_{Ark} = D_{ilk \rightarrow son} = \frac{Eh^2}{Eh^2 + 2\pi^2 m d_{Ark} E_{Engel}} \quad 1.3$$

Elektron kütesinin (m) malzemeler arasında değişmediği bir denklemdir bu. Engelin enerjisi (E_{Engel}) ve engel kalınlığındaki (d_{Ark}) artış, beklendiği gibi, arkma olasılığını düşürecektir. W. Harrison sonrasında (Harrison, 1961) bu olasılığı bir akım yoğunluğu ifadesine dönüştürmüştür. Burada akı, yani geçiş oranı denklem 1.4 ile ifade edilmiş ve her iki taraf için durum yoğunlukları (ρ) her iki tarafta (yalıtkanın sağındaki ve solundaki metaller) bulundukları enerjiye bağlı olan Fermi dağılımıyla ($f(E)$), yani o durumda bulunabilme olasılığıyla çarpılmıştır. Önceki ifadelerde yer alan ilk durum, yalıtkanın solunda bulunan metaldeki uygun durum olarak; son durum ise, arkma gerçekleştiğinde sağdaki metaldeki uygun durumun bulunması olarak yeni denklem içinde yer alırlar.

$$A_k = \frac{4\pi^2}{h} \times O_{Ark}^2 \times \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{sol} \times f(E - E_{sol}) \times \rho_{sağ} \times (1 - f(E - E_{sağ})) dE \quad 1.4$$

Buradan ark için bir direnç (R) benzetimi, denklem 1.5 ile elde edilebilir. Üstteki integralde durum yoğunluklarının düşük enerjiler için sabit olduğu düşünülürse, integral dışına alınabilir; ayrıca enerji farkı ($E_{sağ} - E_{sol}$) da sabit bir gerilim farkı (V) ile elektron yükü (q) çarpımı olarak ifade edilirse, bir direnç ifadesi elde edilebilir. Akı, yani bir yüzeyden geçiş oranı elektron yükü ile çarpılırsa, akım (I) elde edilir.

$$R = \frac{V}{I} \times \frac{1}{\frac{qV}{e k_B T} - 1} = \frac{h}{4\pi^2 q^2 O_{Ark}^2 \rho_{sağ}(E_{sağ}) \rho_{sol}(E_{sol})} \quad 1.5$$

İntegral içinde yer alana Fermi fonksiyonu çarpımı sonucunda çıkan üstel ifade, iki yöndeki sonsuzda ele alındığında denklem 1.5'e sadeleşir. Akım-gerilim içeren ilk ifadedeki ikinci çarpanın paydasında yer alan üstel fonksiyon, denklem 1.4 içindeki Fermi fonksiyonları çarpımlarınca çıkmıştır.

Direnç, durum yoğunlukları ve arkma olasılığı ile ifade edilir. Yalıtkan kalınlığı arttıkça, direncin de artacağı ($R \propto d_{Ark}^2$) artık daha belirgin görülmektedir. Ayrıca engel büyüklüğü, yani yalıtkan yasak-enerji aralığı artarsa, direnç de bu büyümenin karesi ile artar.

Ark akımının (I) düşük sıcaklıklarda (Boltzmann katsayısı (k_B) ve sıcaklık (T) çarpımıyla bir enerji olarak $k_B T$) doğrusal bir seyir izleyeceği çok açık olarak görülür. Böyle bir doğrusallık, diyotta pek istenmez: Bir anahtar görevi görmesi için belirli bir gerilim değerinden sonra akımın akması tercih edilir. Buradaki doğrusallığın bozulması için iki yalıtkan katmanlı ark diyotlar inceleme konusu olmuştur (Grover & Model, 2011). Evirinin (simetri) bozulması, ters yönde arkmayı da azaltacaktır. Ancak üretim zorluğu nedeniyle kimi zaman, uygulamaya bağlı olarak, ters arkma akımı nedeniyle düşecek verimlilik hoş görülebilir. Bu çalışmada da çift yalıtkan katman üretiminin zorluğu nedeniyle, inceleme dışında kalmıştır.

1.4.Bazı Ark Diyot Çalışmaları

Hızlı bir çevrim için çeşitli ark diyot üretim denemeleri vardır. Tekrar hatırlatmakta fayda vardır: Amaç yüksek akım taşımaya imkan verebilecek bir aygıtın üretimidir; tek elektron diyotlar veya hız-serbest (high electron mobility) elektron transistörler gibi düşük akım yoğunluklu aygıtlar, uygulama düşüncesine uygun değildir.

Ark diyotlarının üretimini kolaylaştırmanın yolu özoksit kullanımıdır. Bu nedenle uygulamaya yaklaşabilen pek çok çalışma ya ısı (Alshehri, et al., 2019) ya da tepkiyen (reaktif) ozon uygulamasını kullanmıştır (Choi, et al., 2011). Önceden de belirtildiği gibi, bu oksitlerin zamanla metal içine doğru kalınlaşmaları nedeniyle kararlı sayılmazlar. Tek katman bor nitrit de denenmiştir (Cui, et al., 2020): Faydası, dielektrik kırılma eşiğinin yüksek olması ve yüzeyin kendini yeniden düzenleyebilme yeteneğidir.

Bor nitrit için yukarıda belirtilen fayda yine de düşündürücüdür. Farklı kaplama türleri ile ara yalıtkan katman oluşturan çalışmalar da, inceleme dışında bırakılmıştır. Bunun nedeni, tasarım kaygılarında açıklandığı gibi, tekrarlanabilir ve ölçeklenebilir üretimden uzak olmalarıdır.

Verim, iki yakadaki metal bağlantılarda yaşanacak elektron saçılması nedeniyle düşer. Bu, plazmonik yapılar açıklanırken de belirtilmişti. Metallerin yüzeyinde yaratılacak pürüzlük elektron yayımı ve kabulünü kolaylaştırabilmektedir (Tagliabue, et al., 2018). Yüzeydeki çarpıklık, yapay bir şekilde iş fonksiyonunun düşürülmesine imkan verir.

Bu çalışmada gerçekleştirilmeye çalışılan benzer bir uygulama (Li & Valentine, 2017), yukarıda belirtilen engele takılmıştır. Saçılma verimi düşürmüştür, ama daha da kötüsü, verimsiz bir plazmonik desen hazırlanmıştır: Sadece tek bir kutuplanmayı (polarizasyon) kabul eden bu plazmonik yapı verimi düşürmüştür. Ayrıca belli yönelimdeki sıcak elektronların kabulünü sağlayan bağlantı, verimi oldukça aşağı çeker. Bunun yaşanmadığı bir diğer çalışma (Knight, et al., 2013), plazmonik yapıdaki yayımın tüm yönlerini kapsayıcı şekilde yarıiletken içine gömülü bir tasarım denemiştir.

Bir THz kaynak olarak bu yapıdaki aygıtların kullanımı da denenmiştir (Belkadi, Weerakkody, & Moddel, 2021). İki yalıtkan arasında bir kuyu yaratılarak, arkan elektron dalgasından duran dalga oluşturulmuştur. Tezin son bölümde, bu çalışmaya benzer, fakat çok daha basit bir üretim düşüncesine sahip aygıt önerisi sunulmuştur.

Kaynaklara bu örnek verilirken, farklı bir çalışmada (Liu, Chua, Gao, Hu, & Guo, 2021), bu tezde kullanılan aygıt yapısına yakın bir aygıtın, elektro-ışık yayıcı (electroluminescent) uygulamasında kullanımından da bahsetmek gerekir. Görece kalın oksit tabaka, yarıiletken-oksit arasında yük birikimi ve anlık foton yayıcı bir arayüzün oluşumuna imkan vermiştir. Aslında burada iyi bir evirtim (inversion) katmanı vardır. Bu

arayüzden yarıiletkeneye doğru sanki pozitif-nötr-negatif (pin junction) aygıtlardaki gibi bir davranış görülür.

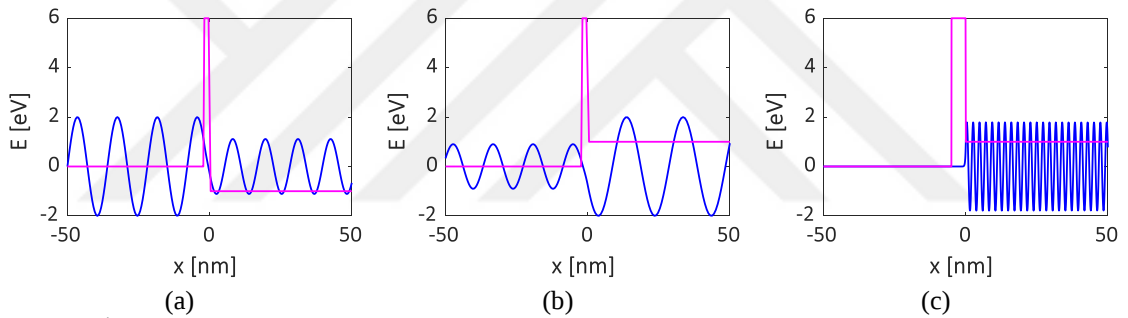
1.5.Tezin Bölümlerine Kısa bir Bakış

Hızlı bir giriş ile aygıt ve onu oluşturan malzemeler ilgili sorunlar bir bakıma belirtilmiş oldu. Ancak daha açık olarak sorunları yazmak ve geri kalan bölümlerde bunların nasıl işleneceğini belirtmek faydalı olur.

- Aygıtın İşleyişi: Arkma olayını kısıtlayan etkiler engel uzunluğu, geçilecek malzemede müsait durumun olması ve kalınlıktır. Bir benzetim yaratılması, sayılan etkilerin incelenmesinde somut bir veri sunar. Böyle bir aygıt ölçülmek istenirse hangi devre öğeleri kullanılarak bir eşdeğer devre hazırlanabilir; ayrıca böyle bir devredeki iletim ne kadar verimli olur? Bu nedenle tez 2. bölümde, benzetim ve eşdeğer devre oluşturmaya eğilecektir.
- Denetimli kalınlıkta üretim: Aygıtların üretimindeki en kolay kısımdır ve çok kısa olarak 3. bölüm girişinde yer alacaktır. Kalınlığın iyi bir denetimle sağlandığını optik ölçümler yine bu bölüm içerisinde sunmuştur.
- Arayüz Durumları (Tuzakları): Tüm aygıtları ilgilendiren bir konu olması nedeniyle ölçümü için bir çaba harcanmıştır. Özdirenç çözümlemesi, bu tuzaklarla 3. bölümde ilgilenmiştir.
- Yalıtkan Malzemeye ait Kusurlar: Yüksek elektrik alan etkisi nedeniyle gelişen yeni ve zararlı iletim yolları 3. bölümdeki akım-gerilim ölçümleriyle tespit edilecektir. Sonrasında, Raman-kayması tayfı ve çalışmaya özgün geliştirilmiş katmanölçer, üretimde ortaya çıkan ara yapıları ele almışlardır.
- Uygulama: Bir GHz enerji toplama uygulaması, belki de önümüzdeki yılların önemli bir uğraş kolu olan nesnelerin ağı teknolojisine bir örnek olması amacıyla 4. bölümde verilmiştir.

2. BENZETİM (SİMULASYON)

Bloch ve takibinde Krönig-Penney benzetimleri elektron hareketinin Schrödinger denklemi ile çözülmesinde kolaylıklar getirmiştir (McKelvey, 1982). Elektronun içinde bulunduğu malzeme atom veya moleküllerince tekrarlı olarak düşünülür ve her bir atom veya molekül, yükü bakımından elektrona göre bir atıl (potansiyel) fark olarak gösterilir. Böyle bir düzende, türev içeren bir denklemin çözümünü bulmak, görece kolaydır; çünkü sınır koşulları o bölge içindeki elektronun dış etmenlerden bağımsız davranışını verir. Elektron dalgaboyuna göre hesabın yapılacağı bölgenin ebatları büyük düşünüldüğünde (birkaç atom) çözümler oldukça basitleşir; çünkü atomların her biri birim uzaklıkça tekrarlanır atıl engeller olarak düşünüldüğünden, elde edilen denklemlerdeki bilinmeyen katsayılar bulunabilir. Bir basit örnek olarak hazırlanan benzetim kullanılarak bir metal-yalıtkan-metal evirili (simetrik) aygıt için elektron dalgası çözümü **Şekil 2.1** içindeki gibidir.



Şekil 2.1. İleri ve geri yönde arkma – İki aynı metalin yer aldığı bu örnekte, ileri (a) ve geri (b) yöndeki arkma için eviri (simetri) olacağı açıktır. 2 nm kalınlığındaki yalıtkan (atıl engelin $x=0$ 'da tepe yapmış olarak gösterilmiştir) arkmaya izin verirken kalınlık 5 nm'ye ulaştığında (c), en sağdaki örnekte görüldüğü gibi, görece daha yüksek enerjilerde bile arkma olmaz.

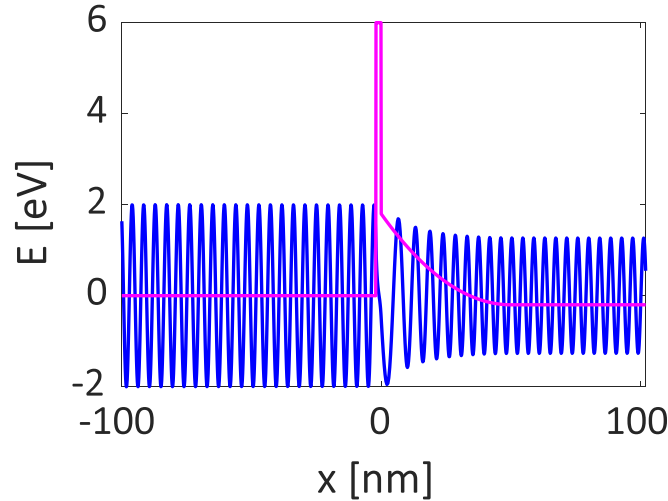
Benzetim içerisinde yer alan elektron dalgasının, dikey enerji mihveri ile ilgisi yoktur. Farklı genliklerde gösterilmiş bu dalganın, aygıta ait enerji kuşağındaki hareketi gösterilmiştir (tabii, zamandan bağımsız bir çözüm olduğu hatırlanmalıdır). Elektron dalgasının enerji mihveri ile ilgisinin olmadığı, buradaki gibi elektron enerjisinin bir "paket" gösteriminde (atım) kullanılmaması nedeniyle kendini zaten açık eder.

Bu kolay örneğin giderek zorlaştığı zamanlar vardır: Eğer iki uçtaki metal arasında bir atıl (potansiyel) fark varsa, engelde bükülmeler oluşur. Diğer uçtaki metal yerine bir yarıiletken gelirse (tezin ilgilendiği aygıttır), zorluk daha da büyür; çünkü yarıiletken içindeki yük dağılımı ve bunun oluşturacağı atıl veya Schottky engel, yalıtkanın oluşturduğu engele bitişik ve artık doğrusal olmayan bir uzantı verir. Artık yarıiletkenin iletim kuşağı iletim yönünün karesiyle (Poisson denklemince) sönümlenecek şekilde

bükülmüştür. Daha önce tuzak bölümünde anlatıldığı gibi, böyle bir engel için kolay bir çözüm yoktur. Schrödinger denklemindeki atıl engelin şekilce değişmesi, elektron dalgasına ait çözümü zorlaştırmıştır. Elbette sonlu öge (eleman) veya farklar çözümlemesi (analizi) bir yoldur. Ancak bunun yerine, bu türev içeren denklem sayısal (nümerik) yöntemlerle çözülebilir. Runge-Kutta yöntemi, adi türevli denklemlerin çözümünde kolaylık verir. Euler yöntemine göre daha yüksek dereceden polinomların kullanımı ile daha yüksek hassasiyette çözüm verir (Ascher & Petzold, 1998). Elbette buradaki çözümün bir adi türevli denklem için bulunacağı düşünüldüğünden, Schrödinger denklemi zamandan bağımsız olarak ele alınmalıdır.

Peki zamana bağlı bir çözüm nasıl elde edilir? Schrödinger denklemi kısmi (zaman ve boyut) türev içeren bir denklemdir; sonlu fark yöntemi kullanılarak türev farklardan oluşan bir denklem haline getirilir. Bu bir adi türevli denkleme dönüşmüştür artık ve buradan Runge-Kutta yöntemi tekrar kullanılarak çözüm elde edilir.

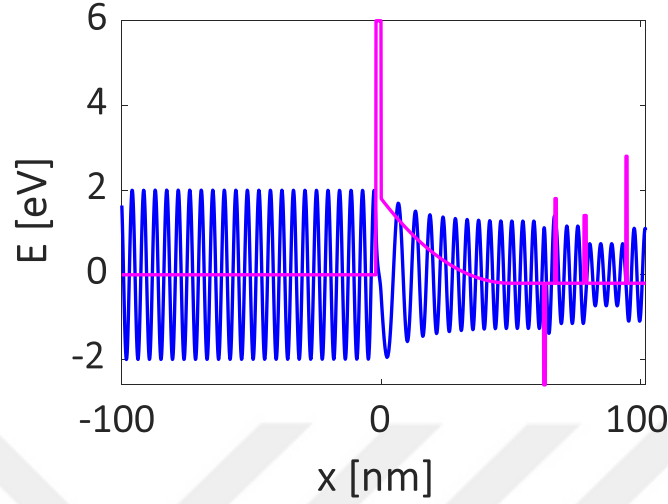
Artık aygıtta daha çok benzeyen bir deneme gerekecektir. Yalıtıktan sonra bir yarıiletkenin geldiği yapı hazırlanırken, Schottky engeli varlığı dahil edilmelidir. Bu yapı arayüz durumlarının tayini için de kullanılacaktır. **Şekil 2.2** içinde verilen aygıtta ait benzetim, arayüz durumları ve tuzakların da incelenebileceği bir temeli oluşturur.



Şekil 2.2. Aygıtta ait örnek bir benzetim – Schottky engeli hemen oksit tabakadan sonra kendini gösterirken, katkılık bölgesi, katkılamanın yüksek olması nedeniyle, incedir.

Şimdi de yarıiletken içinde kusurların bulunduğu bir benzetim hazırlanabilir. Rassal olarak yarıiletken içerisine engel ve kuyular yerleştirilmiştir. Benzetim kullanılarak tuzak

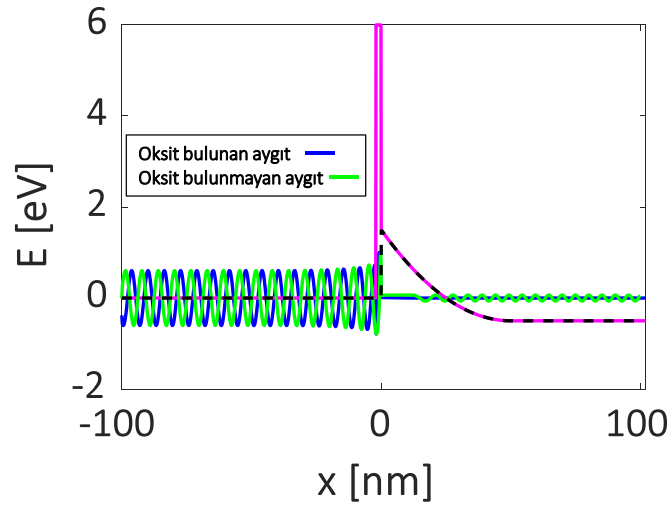
merkezleri birer atıl engel gibi düşünülerek, **Şekil 2.3** içindeki gibi taşıyıcı hareketi gözlemlenmiştir.



Şekil 2.3. Yarıiletkendeki kusurların iletme etkisi – Sağa doğru hareket eden elektron dalgasındaki sönümlenme, dört örnek saçılma merkeziyle (kısa ve sivri) gösterilmiştir. Eksi enerjili olarak gösterilmiş tek tuzak, elektron için bir elektrostatik çekim merkezi gibi düşünülebilir. Elektron dalgası genliği ile akım; uzaysal frekansla da enerji ilişkilendirilirse, tuzakların olumsuz etkisi gösterilmiş olur.

Böyle bir aygıt için arayüzlerin önemi de incelenebilir. **Şekil 2.4** içinde yer alan örnek, arayüz durumlarının etkisinin yalıtkan yardımıyla nasıl azaldığını göstermektedir. Arayüz durumunun varlığı düşük enerjili taşıyıcıların düşük elektrik alanında harekete geçme durumundan anlaşılabilir. Yani durum sayısı az ise, burada daha az taşıyıcı bir elektrik alanla iletme katılır. Bir Schottky diyotu, yani yalıtkanın (şekildeki yüksek ve dar atıl engel) yer almadığı bir aygıtta ise, bu arayüzde yer alan durumların sayısı fazladır: Elektronların geçişi sönümlense de devam eder. Arayüzde takılmış olan taşıyıcılar, elektrik alan farkıyla iletme geçmişlerdir.

Arayüz varlığının bir fotodiyot için karanlık akım; bir diyot için ise sızıntı akımı gibi olumsuz etkiler doğuracağı önceden belirtilmişti. Bu nedenle bir yalıtkan varlığı önem arz eder. Bugün düşük gürültülü aygıtlarda, özellikle taşıyıcı tutabilecek ve yaratabilecek açık yüzeylerin kapatılması amacıyla soyutlama (pasifleştirme) bu nedenle yapılmaktadır. Ancak bu yapılırken, kimi zaman, önemli bir nokta atlanmaktadır: Oluşturulacak yalıtkan arayüz, bir yük tutucu olmamalıdır. Yani yarıiletkenin, kaplanacak yalıtkan ile yapabileceği bağ düşünülmeden bilinçsizce soyutlama yapılması, soyutlama yapılmamış bir aygıttan daha da yüksek gürültü seviyeleri oluşturur.



Şekil 2.4. Arayüz etkisinin düşürülmesi – Eğer bir yalıtkan katman bulunmuyorsa (oksit bulunmayan aygıt), bir Schottky diyot örneği için arayüz etkileri burada görülür: Schottky engelinden düşük enerjili elektronlar hareketlerine -sönümlense- de devam eder. Bu arayüz varlığına işaret eder: Bir gerilim farkında, buradaki elektronlar tekrar harekete geçecektir. Ancak bu örnekte, arada bir yalıtkan yer aldığında, bu gerilim farkı kaynaklı bir elektron hareketi görülmemektedir. Apaçık, durum sayısı azalmıştır.

Böyle bir benzetimde akım-gerilim ilişkisi nasıl bulunabilir? Ark akımının ifadesinin açıklandığı bölüm bir fikir vermektedir. Engelden geçen elektronların enerjileri kullanılabilir, ama en önemlisi, gerilime bağlı bunun nasıl değiştiğidir. Schrödinger denkleminin çözümünde gerilme bağlı oluşacak atıl engeldeki eğrilmeler dikkate alınmalıdır. Bu nedenle gerilimin değişeceği adım aralığı seçilerek, oluşan yeni engele bağlı çözümler hesaplanır.

Bu benzetimler neticesinde elde edilen sonuçlar, yegane bir elektron için çözüm verir (özdeğer ve özfonksiyon) ve bu elektronlar malzeme içerisinde serbesttir. Böyle bir serbestide, çıkarılmış olan denklemlerden, elektron hızı ve etkin kütlesi gibi önemli değerler elde edilebilir. Örneğin, elektron enerjisinin (E) k -uzayındaki (dalgasayısı) türevi, hızı verir. Yine enerji kuşağında (E - k) dalgasayısına göre ikinci bir türev alındığında, etkin kütle ortaya çıkar (McKelvey, 1982). Ancak, bu kolaylıklar bazı soruları da doğurmuştur: Boyut uzayında başlayan Schrödinger denkleminin çözüm işlemi, nasıl enerjiyi dalga sayısına bağlı bir fonksiyon olarak çıkarmıştır? Elbette, kullanılan tekrarlılık yani kristal düzeni, sonucu boyut değişkeninden bağımsız hale getirmiştir; ancak birkaç katmanlı bir yapı için her bir malzemede etkin kütle ve hız nasıl bulunur?

Boyut uzayından k -uzayına geçen bu çözüm, aslında Fourier dönüşümüdür: Boyut uzayından, artık, sıklık (frekans) uzayına geçilmiştir. Tıpkı zamana bağlı değişen bir

işaretin (sinyal), hangi frekanslarda hangi genlikte bileşeni olduğunun çizdirilmesi gibidir bu. Fourier dönüşümü alınan bir işaret, frekans uzayında tam katlı frekanslardaki (harmonikler) sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamıdır.

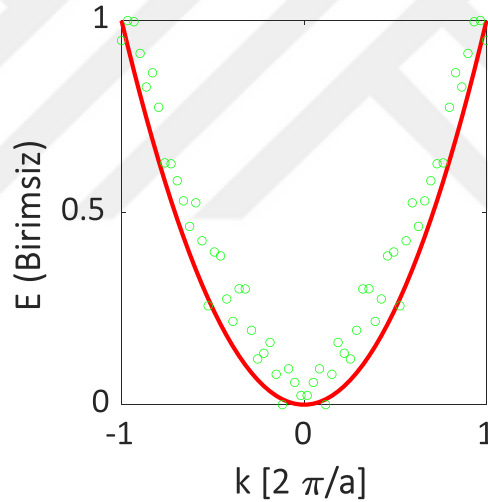
Böyle bir Fourier dönüşümü için, elbette analitik yöntemlerden çok sayısal (nümerik) adımlar kullanılır, çünkü bu sayede çok daha hızlı sonuç elde edilir. Bu dönüşümler bilgisayar ortamında hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform – FFT) yöntemiyle bulunur. Çok açık olarak, bunun gibi sayısal yöntemlerin her birinde olduğu gibi, dönüşüm esnasında işlem yapılacak değerler dizini (matris) içinde ve herhangi bir öge (eleman) için, öne ve arkaya doğru aritmetik işlemler gerektirir. Daha açıklayıcı olması için bir işlemcinin türevi sayısal olarak hesaplaması örnek verilebilir: Bir dizin içindeki değer, öncekinden çıkarılarak nasıl artmış, bulunur. Ama bu, ilk dizin ögesi için yapılamaz, çünkü onun öncesinde bir öge bulunmamaktadır. Aynı şey son öge için de geçerlidir, kuşkusuz. İlk akla gelen, bu ögelerin haricinde hesaplama yapılmasıdır. Malzeme içerisinde bir işlem yapılacaksa sorun olmaz, ama çok katmanlı yapılar için ilk ve son ögelere ait hesapların ihmal edilmesi düşünülemez. İşte sınır koşulları bu noktalarda kurtarıcıdır.

Fourier dönüşümünde önemli olan bir diğer nokta da dönüşümün en iyi sonucu ancak evrilir (simetrik) işaretler için vermesidir. Fourier dönüşümü, bir işaretin, tam-katlı frekanslardan oluşan (harmonik) trigonometrik fonksiyon toplamı olarak ifade edilmesi olarak açıklanır. Evirili olma durumu, Fourier dönüşümünün doğasında vardır: Trigonometrik fonksiyonların evrilir olması, toplamlarının da bu eviriyi sağlaması gerektiği anlamına gelir. En güzel çözüm ise, işareti evrilir hale getirmek için işaretin ifade edildiği mihverde (eksende) kendi başlangıç noktasını kerteriz alarak ayna görüntüsünü elde etmek (eksende ters yöne çevirmiş gibi) ve bu yansımayı işaretin başlangıç noktası öncesine eklemektir. İki katı uzunluğa ulaşmış bu işaret, artık ortadan (kerteriz alınan ilk başlangıç noktasından) katlandığında tam örtüşen bir evrilir işarete dönüşmüştür.

Belirtilen dönüşüm doğrudan alınırsa uzaysal bilgi kaybolur. Zaman içinde değişen bir işaretin (sinyalin) frekans dağılımına bakmak için kullandığımız dönüşümde yaşanır bu: İşaret içinde düşük frekanslı bileşenler vardır, ama bu bileşen ne zaman başlamıştır ve bitmiştir? İntegral hesabı da böyledir: Bir fonksiyonun tanımlı olduğu düzlemlerle arasında kalan alana (üç boyutlu ise hacme), hangi aralıkta ne kadar etki vardır? Bu gibi

doğrusal işlemler (operatörler) aşamalı olarak uygulandıklarında, bölgesel bilgi kaybolmaz. Dönüşüm de, işte bu nedenle doğrudan alınmaz; bilakis, kayan aralıklarla hesaplanır. Yani malzeme küçük kesitlere ayrılıp, o küçük kesit özelinde dönüşüm yapılır ve kesitlerin birleştirilmesiyle bir bütüne ulaşılır.

Benzetim çözümünü sağlayan dalga fonksiyonun şiddeti (genliğinin karesi) ile bu fonksiyona ait dalgasayısı kullanılarak, metal içindeki enerji kuşağı eğrisi **Şekil 2.5** içindeki gibi elde edilmiştir. Bu enerji kuşağı bir arkmanın olduğu metal için örnek olarak oluşturulmuştur. Noktalar elektron dalga fonksiyonu genliğini göstermektedir ve bu noktalara ikinci dereceden bir polinom oturtulmuştur. Burada bir Poynting yönleci (vektörü) düşüncesi kullanılmıştır, yani elektron dalgasına ait genliğin karesi enerji ile ilişkilendirilmiştir. Bu polinoma ait 2. türevin sonucu, hiç şaşırtıcı olmayarak, elektron kütlesine eşit bir sonuç vermiştir.



Şekil 2.5. FFT sonucu elde edilen E-k eğrisi – Elektronun alabileceği değerler kullanılarak 2. dereceden bir polinom elde edilmiştir. Buradan hız ve etkin kütle gibi önemli değerler elde edilebilir. Birimsizleştirilmiş (normalize) bu enerji eğrisi, bir örnek olması açısından verilmiştir. Yatay k-mihverinde görülen “a” değeri atom örgü sabitidir.

Poisson denklemi üzerinden aygıttaki potansiyel dağılıma boyut uzayında bakıldığında, yük dağılımı bilgisi gereklidir. Gauss yasası gereği metal bağlantı üzerindeki tüm yükler yüzeyde toplanmıştır (Griffiths, 1989). Yalıtkan malzeme içinde var olan yükler de buna uyacak şekilde kutuplanır (elektron ve boşluklar zıt yöne doğru yerleşir). Yarıiletken arayüzü için de bu geçerlidir. Yükün dağılabilme yeteneği olan dielektrik sabitinin metale göre ufak olması, yarıiletken içindeki yük dağılımını daha geniş bir alana yayar. İşte bu yük dağılımının her bir malzemenin kendi dielektrik

sabitiyle bölünmesi ve bu değerin iki kez boyut uzayında integralinin alınması engeli (atıl enerjiyi) verir.

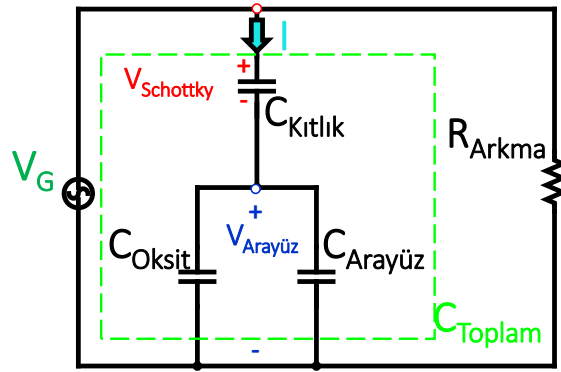
Elektron hareketi, elektron-elektron ve elektron-tuzak etkileşimleri hariç tutularak incelendiğinde, sanki daha az yoğun ortamda hareket eden bir parçacık kadar rahat hareket ettiği, yani kolay ivme kazandığı görülür. Bu hareketin doğrultusu iki farklı yönde incelendiğinde sonuçlar farklıdır: Kütlece hafifleme yarıiletkenine doğru görülürken, yarıiletkeniden yalıtkana doğru olan akışta ağırlaşan bir elektron vardır. Oransal olarak elektron enerjisinin yöne bağlı bakılması, bir diyot davranışını açıklar.

2.1.Eşdeğer Devre Çözümlemesi

Eşdeğer devrenin hazırlanması sırasında eğer fiziki yapı düşünülürse, oksit, arayüz ve kıtlık bölgelerine ait sığaların bir dizi halinde yerleştirilmesi gerekir. Ne var ki, bu yaklaşım, öz direnç çözümlemesinde görüleceği gibi, yanlış olur: Frekansla uyarılan (aktifleşen) bir taşıyıcı soğurma gözlemlenmektedir. Yüksek frekanslara çıkıldıkça, yukarıda sayılan farklı bölgelerdeki taşıyıcı hareketinin davranışı değişir; çünkü bu frekansları takip edecek hızı sağlayamazlar. Bir bakıma bunlar yüksek sığalı bölgelerdir: Sınırlı bir akım için çabuk dolma-boşalma imkanları yoktur. Düşük sığalı bölgeler bu nedenle hızlı takibi sağlayabilirler: Yarıiletken içerisindeki görece kalın kıtlık bölgesi böyledir.

Arayüz ve kıtlık bölgesi sığalarının ardışıl olacağı ilk bakışta hissedilir. Arayüzdeki yük durumu, bir gerilim farkı (potansiyel) yaratacaktır. Tıpkı Schottky engeli gibi, bölgedeki durumların aracılığıyla bir gerilim oksit üzerinde görülür. Elbette, oksidin üzerinde yer alan bağlantı ile yarıiletkenin altındaki bağlantı arasındaki fark, Schottky ve arayüz gerilimleri toplamıdır.

Arkmanın engellenmesi (olasılığın zayıflaması) bir direnç aracılığıyla betimlenir. **Şekil 2.6** içindeki eşdeğer devre, aygıtın davranışına uygundur. S. Kar'ın çalışmasına (Kar & Dahlke, 1972) ait bu eşdeğer devre düşüncesi, hem katkılama miktarı hem de arayüz gerilimini verir.



Şekil 2.6. Eşdeğer devre – Arkma akımını kısıtlayan direnç sığalara koşut olarak yerleştirilmiştir. Kıtık bölgesine ait sığa diğer tüm sığalardan, kalın olması nedeniyle, daha küçüktür. Bir gerilim (V_G) uygulanmadığında, aygıt üstünde Schottky engeli ve arayüzü ait gerilimlerin toplamı gözükür. Arayüz gerilimi oksidin hemen üstünden okunur. Uygulanan gerilim büyüdükçe, artık bu gerilim değeri ölçülemez. Kıtık sığasının hemen üstüne, silisyum için ardaşıl bir direnç de eklenebilir, ancak yüksek katkılı bu yarıiletken de direnç de oldukça düşük olacağından, ihmal edilmiştir.

Eğer arayüzü ait sığa da bulunursa, arayüz durum yoğunluğu da elde edilecektir. Sığanın elektron yüküne oranı yük yoğunluğunu, yani durum yoğunluğunu verir. Bu eşdeğer devre, akım doğrultusunda ve akıma göre çözülürse, denklem 2.1 elde edilir.

$$\frac{\partial V_{\text{Arayüz}}}{\partial V_G} = \frac{C_{\text{Toplam}}}{C_{\text{Arayüz}} + C_{\text{Oksit}}} = \frac{C_{\text{Kıtlık}}}{C_{\text{Oksit}} + C_{\text{Arayüz}} + C_{\text{Kıtlık}}} \quad 2.1$$

Oksit ve kıtlık bölgesine ait sığalar bilinirse, arayüz sığası bulunabilir. Dahası, arayüz sığasının gerilime (V_G) bağlı değişiminden, yüzey gerilimi ($V_{\text{Arayüz}}$) çıkar. S. Kar aynı çalışmada (Kar & Dahlke, 1972) yarıiletken e ait katkı yoğunluğunun da çıkarılabileceğini göstermiştir.

Bir ölçüm sonunda arayüz sığası elde edildikten sonra, tüm giriş gerilimleri aralığında integral alındığında, yüzey gerilimi elde edilebilir. Yüzey geriliminin arayüz sığası ile çarpımı yük yoğunluğunu verecektir.

Ölçümlerde yer alan öz direnç çözümlemesi, bu eşdeğer devrenin doğruluğu hakkında fikir verecektir. Eşdeğer devre içinde sıralı bileşenler çok farklı sonuçlar, hatta yankılanma (rezonans) bile oluşturabilir (bir sarkaçtaki enerjinin devingen-atıl enerji arasında değişmesi gibi). Hatta yüksek frekanslı devrelerde öz direnç eşleşmesinin sağlanmasında burada elde edilen sonuçlar faydalı olacaktır. Bu eşleşme doğru yapılmadığında, devre içerisinde geçen dalga, çok açık olarak, geri yansıma ve sönme gibi etkilere maruz kalacağından kayıplar oluşacaktır.

3. AYGIT ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ

Aygıtın üretimi oldukça basit olsa da ölçüm kısmı çeşitli zorluklar barındırır: Kalınlık iyi bir doğrulukla nasıl ölçülebilir; oksit katman hangi oksijen oranından oluşur; böyle bir aygıtın elektrik alana olan dayanımı nedir? Tüm bu soruların yanında, üretilen aygıtın hızı gerçekten THz bölge için ne kadar uygun olur; incelenmesi şart olan bir diğer konudur.

3.1. Üretim

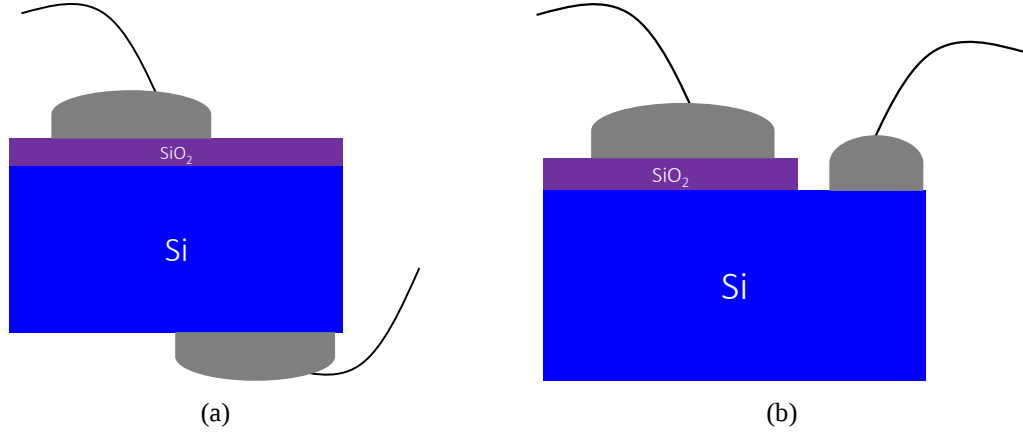
Çalışmada belirtilen üretim kaygıları, silisyum kullanımının daha uygun olacağına işaret eder. Yüksek katkılı bir silisyum, bir elektrot gibi kullanılabilir.

Yaklaşık olarak cm^3 başına 10^{19} arsenik katkısı bulunan 4 inç silisyum alttaş, $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ boyutlarda kesilmiş ve her bir hazırlanacak aygıt için, önce bu örneklerdeki oksit tabaka temizlenmiştir. Bu temizlik, hacimce %5 hidroflorik asitli su çözeltisi içine örneğin bir dakika daldırılmasıyla yapılmıştır.

Oluşturulacak oksit tabaka için nitrik asitli su çözeltisi hazırlanmış, birkaç deneme sonunda sıcaklık 120°C olarak belirlenmiştir. İstenen kalınlığa göre örneğin çözeltide kalma süresi ayarlanmıştır ve 1.2 nm/dakika büyüme hızı bulunmuştur. Bu oksitleme işlemi, örnek kenarından çözeltiye dik gelecek şekilde daldırılmasıyla yapılmıştır. Böylece oksitlenmesi istenmeyen kısmın korunması için bir koruyucu katman gerekmemiştir. Böyle bir işlem nedeniyle oluşabilecek kirlilikten de, bu sayede, kaçınılmıştır. Ancak yapışkansız ince bir polimid yaprak, asit buharının nüfuzunu kesmesi amacıyla örneğin üstüne bir tutucu yardımıyla sıkıştırılmıştır.

Bu işlem sonunda yükselen oksit tabaka bir yalı yar gibidir: Bir cephe oluşmuştur ve bu cephe çeşitli girintilerden teşekküldür. Yüzey incelemeleri sırasında girişimölçer, bu girintileri göstermiştir.

Üst ve alt bağlantılar için gümüş pasta ve indiyum kullanılmıştır. Kullanılan bu bağlantılar Schottky ile açıklanmaktan uzaktır: Yarıiletken içerisindeki kıtlık bölgesi oldukça dar olduğundan (katkılamanın yüksek olması nedeniyle), oluşan Schottky engeli arkmaya oldukça müsaittir. Direnç gibi (Ohm-vari) davranan bu bağlantılar, ne yazık ki, kayıplı bir iletim ve aynı zamanda tepki gecikmelerine neden olacaktır. **Şekil 3.1** içinde üretilen yapılar görülebilir.



Şekil 3.1. Üretilen aygıtlar – Bu basit aygıtların bağlantı tercihleri farklı şekildedir: Akım-Gerilim, arayüz durumları ve dielektrik kırılma incelemeleri için yarıiletken derinliği kullanılırken (a), yüzey yapısının tayini ve uygulama için hızlı bir aygıt gereksiniminde yatay aygıt (b) üretimi tercih edilmiştir. Bağlantılarda kayıplı gümüş-pasta kullanılmıştır.

3.2. Ölçümün Önemi Üzerine

Heisenberg belirsizliği ve onun çok daha öncesinde Cauchy-Schwarz eşitsizliği sonuçları itibarıyla bir noktaya işaret eder: Düzen içerisinde her zaman büyük oranda bilinmeyen en az bir büyüklük vardır. Bazen bu bilinmezlik büyüklükler arasında bölüşülebilir. Bu giriş şu nedenle yapılmıştır: Eğer çalışma içerisinde ölçümlenemeyecek noktalar varsa, çalışmanın sonucu uygulamadan da o kadar uzaklaşır. Ölçülebilen aygıtlar, doğal bir seçimden geçermiş gibi, gerçek hayat uygulamalarına katılırlar.

Uygulamaya katılabilen aygıtlar, aslında kolay ölçümlenebilenlerdir de. Çünkü çok sayıda üretilen bir aygıtın, maliyet-zaman kaygısı yaşanmadan, başlangıçtan, üretim hattından çıktığı ana kadar incelenmiş olması gerekir. İnceleme süresi üretim hattından çıkan bir ürün için uzadıkça, maliyet artar. İşte bu saikle, elektronik ve optik ölçümler üzerine bu bölüm hazırlanmıştır.

Bir aygıt ölçülebildiğince başarılıdır: Bu nedenle, üretilen aygıt tüm önemli yönleriyle incelenmiştir.

3.3. Özdirenç Çözümleme (Empedans Analizi)

Kavramlar üzerinde durmak burada işe yaracaktır, çünkü okuyucu özdirenci, malzemenin kendine has yapısından gelen doğru akıma gösterdiği engelleme miktarı olarak bilir. Direnç, akışı zayıflatan bir doğrusal etki olarak kabul edilir. Ancak, kökleşmiş anlamda kullanılan direnç göstermek, bir yandan da bir işin olmasını geciktirmektir. Bu anlamıyla da ele alındığında, bir malzemenin veya aygıtın, uygulanan gerilime iki türlü “direnç” göstereceği düşünülebilir.

Malzeme veya aygıt üstüne uygulanan işaretten (sinyal), uygulanan gerilimin genliği ve frekansına bağlı bir tepki (reaktans) gelir. İşte bu, malzemeye veya aygıtı has öz dirençtir: Yapı içindeki tüm etkiler devreye girer ve uygulanan gerilime göre doğrusal olmayan bir çıkış görülür artık. Zayıf ve yüksek akım devrelerde kullanılan basit bir direnç (hatta bir iletim yolu bile), zayıf akım-yüksek frekanslarda (haberleşme devreleri) veya her frekansta yüksek akımda (enerji iletim hatları), sanki içlerinde sığaç ve bobin varmış gibi davranabilir. Bu nedenle, baskı devre tahtaları (kart) yüzeylerine lehimlenen dirençler tercih edilir ve dirençlerin bobin gibi davranan bağlantı tellerinden kurtulmuş olunur. Bu tellerin gösterdiği sığa-bobin davranışı bir salıncı (osilatör) gibi davranarak anten etkisi oluşturur; bu da, devre içerisinde elektronik gürültü olarak kendini gösterir.

Çalışmanın içeriğine döndüğünde bu çözümlemenin ne gibi bir faydası olacağı bir açıklama bekler: Aygıtı oluşturan malzemeler ve birbirlerinin arayüz koşulları çok ciddi etkiler getirmektedir. Burada yalıtkanın her iki tarafında da farklı etkiler kendini gösterir. Yarıiletken kısmına bakıldığında yarıiletken kusurları, özoksit-yarıiletken geçişi ve yüzey pürüzlülüğü frekansa bağlı sonuçlar verir. Sayılan bu üç etki temelde yük tuzakları olarak adlandırılabilir: Tüm kusurlar doğrudan düzensizlik olarak düşünülür ki, işte bu düzensizlikler elektrik alan dağılımını etkilemektedir. Elektrik alan dağılımındaki bölgesel farklılıklar yük geçişlerini etkiler. Coulomb etkisi açısından elektrostatik olarak ele alınırsa, bu düzensizlikler daha pozitif veya daha negatif yük cazibe merkezleridir ve bunlar tuzaklar olarak ifade edilir.

Elektron geçişleri sırasında bu tuzaklar, oluşan taşıyıcı yükleri hareket hatlarından saptırırlar ve toplam akımı azaltırlar. Foton veya elektriksel bir etki ile oluşan elektron-boşluk çifti, bu tuzaklarda yeniden bir araya gelir ve aygıt verimliliği bu şekilde de düşmüş olur. Ayrıca önceden de belirtildiği gibi, bu tuzaklar anlık yük oluşturma merkezleridir ve tepki gecikmesi ile kaçak ve karanlık akımların oluşumuna sebebiyet verirler.

Tuzakların varlığı aygıtın çalışmasına bu denli etkide bulunuyorsa, ne oranda var olduğu da incelenmeye muhtaçtır. Hacimsel tuzaklardan ziyade arayüz tuzaklarının incelenmesine ağırlık verilmiştir.

X-ışın kırınımı kullanılarak kristal niteliği incelenebilir, ancak bu doyurucu bir sonuç vermez. Çoğu çalışmada ihmal edilen ve incelenmeyen arayüzlerin varlığı bu

yöntemle dolaylı olarak elde edilir; arayüzdeki bozukluk, üste kaplanan katmanın doğru büyümesine engel olur. Peki bunun nedeni nedir? Yüzeydeki kristal yönelimi mi, malzemenin yeterli saflıkta olmaması mı ya da bir yüzey temizliği yapıldığında yüzeyde kalan hidroksil bileşikler mi? Bunların her biri ortadan kaldırılabilir; ancak katmanın geliştirildiği hazneden çıkanlar önceden incelenmediyse, rastgele sonuçlar elde edilir. Örneğin bir malzeme üzerinde geliştirilen bir başka malzeme, işlemler sırasında arayüzde farklı bileşiklerin oluşmasına neden olabilir. Mikroelektronikte çok fazla karşılaşılan oksijensiz bir ortamda silika üstüne kaplanan alüminyum işleminde, bu iki malzemenin arayüzünde alümina oluşabilmektedir (Wilson, 2005). Hele ki ısı bir işlem uygulanmışsa, silikada yer alan oksijen, alüminyumla daha rahat bileşik oluşturabilmektedir. Bu nedenle, çok katmanlı aygıt çalışmaları yapan araştırmalar, X ışınımı kırınımından ziyade X-ışın-uyarımli fotoelektron tayfölçeri (X-ray photoelectron spectroscopy – XPS) kullanırlar. Bu ölçüm yönteminin azami ulaşacağı bir kalınlık değeri vardır; ancak bütünleşik kapalı üretim düzeneklerinde, her yeni katmana geçilmeden bir ölçüm alınarak arayüzler incelenebilir. Ya da katmanlar yeterince inceyse (100 nm altında), yine her arayüze bakılabilir.

Ancak, eğer katman geliştirme işlemlerinde kullanılan malzemeler ve üretim tarifleri uzun süredir çalışılmışsa ve üretim ortamının özellikleri biliniyorsa, arayüzde oluşabilecek bileşikler hakkında bilgi sahibi olduğundan, tuzak bileşiminden ziyade tuzak yoğunluğunun bulunması yeterli olacaktır. Bu çalışmada özoksit uzun süredir kullanılan bir yöntemle oluşturulmuştur. Elbette kullanılan kimyasal ara maddelerin saflık durumu da bu özoksit oluşturulurken farklı bileşikler ve kirlilik oluşturabilir; ancak bu göz ardı edilerek silikanın oluştuğu kabul edilerek, elektronik davranışa etki eden tuzakların varlıkları bir yöntemle bulunmak durumundandır.

Yukarıda uzun uzadıya yer alan hususlar çok önemli bir noktayı işaret etmek amacıyla açıklanmıştır: Üretim kaygıları içerisinde yer alan tekrar edilebilirliğin sağlanabilmesi için XPS ve buna eşlik edebilecek başka ayrıntılı inceleme yöntemleri, uygulamaya geçebilecek bu tezdeki gibi aygıtlar için kullanılamaz. Çünkü, her bir aygıtın incelemesi için ayrıntılı yöntemler kullanmak zaman alıcı olduğu kadar zararlı da olabilir. XPS içinde yüksek enerjili ışınların malzemeye verebileceği zararlar, aygıtların yapısını bozarak verimliliklerine zarar verebilir. Bu nedenle, yıkıcı olmayan farklı yöntemlerin kullanılması daha uygun olur. Özdirenç çözümleme yöntemi, tam da böyle bir özelliğe

sahiptir: Bir aygıtın içindeki yük hareketliliğini tam hatlarıyla vermiş olur. Bu nedenle öz direnç-frekans ilişkisini belirleyen tuzaklar üzerine bir açıklama, çözümlemenin yorumlanmasında kolaylık getirecektir. D. Lang'a ait (Lang, 1974) ve bugün çokça kullanılan derin durum (tuzak) geçiş çözümlemesi (spektroskopi), sıcaklık ve elektrik alan değişimleri ile taşıyıcıları harekete geçirmesi nedeniyle ayrıntılı bir tuzak inceleme yöntemidir. Ancak bu çalışmada daha çok sıg durumlardan gelen taşıyıcılar inceleneceğinden, bu verimli inceleme yöntemi ölçümler arasında kullanılmamıştır.

C. Berglund çalışmasında (Berglund, 1966) yükler toplamı üzerinden bir sıga toplamına gitmiştir. Arayüzde bulunan durumların yük olarak toplamı hesaplanıp, buradan bir yüzey gerilimi elde edilmiştir. Buradaki yük toplamı durumlar tarafından belirlenir. Durum doluyken etkisiz, boşken de elektron bulunmadığı için artı değerli yükler gibi düşünülebilir. Bu yük toplamı da bir yüzey gerilimi yaratır. Bu yüzey geriliminin yarıiletken tarafında yüzey boyunca yaratacağı (uyaracağı) zıt yükler de hesap edilmelidir. Böyle bir kutuplu yük dağılımı, doldurulmuş bir sıga gibidir.

Poole-Frenkel etkisi, görece küçük olsa da, sıga ölçümlerinden ziyade akım-gerilim ölçümlerinde kendini daha belirgin gösterir.

Bu uzun açıklamaları geçmek ve çözümleme sırasında kullanılan basit ama kullanışlı devrenin özelliklerine bakmak daha sağlıklı sonuçlar almak açısından önem arz eder. Çalışmada kullanılan işaret güçlendirici (**operational amplifier – OpAmp**) bazı kıstaslar temel alınarak seçilmiştir:

- Gürültü Yoğunluğu [$nV \times \sqrt{Hz}$]: Çalışma frekansı etkisiyle gelecek gürültülerdir. Tıpkı bu çalışmadaki kusur kaynaklı yavaş taşıyıcıların yarattığı gürültü gibi, OpAmp içerisinde de bu kusurlar gürültü oluşturur. Azınlık taşıyıcıları daha az kusurlu yapılarda, daha uzun serbest yol uzunluğuna sahiplerdir. Saçılma nedeniyle oluşacak gecikme nedeni gürültü yine kusur seviyesine bağlıdır. Bu geçilmelerin yarattığı gürültü, OpAmp çıkışındaki işarete belirir (toplanmış olarak) ve eğer işaretin seviyesi gürültü seviyesi ile kıyas edilir büyüklükteyse, sağlıklı bir ölçüm alınamaz.

- Sapma Gerilimi: Tümlleşik (entegre) OpAmp'ı oluşturan transistörler (JFET), üretim kusurlarından dolayı eş değildir. Bu nedenle transistörlerin açılma gerilimleri birbirinden farklılık gösterir. Bu, işaret karşılaştırma amacıyla kullanılan

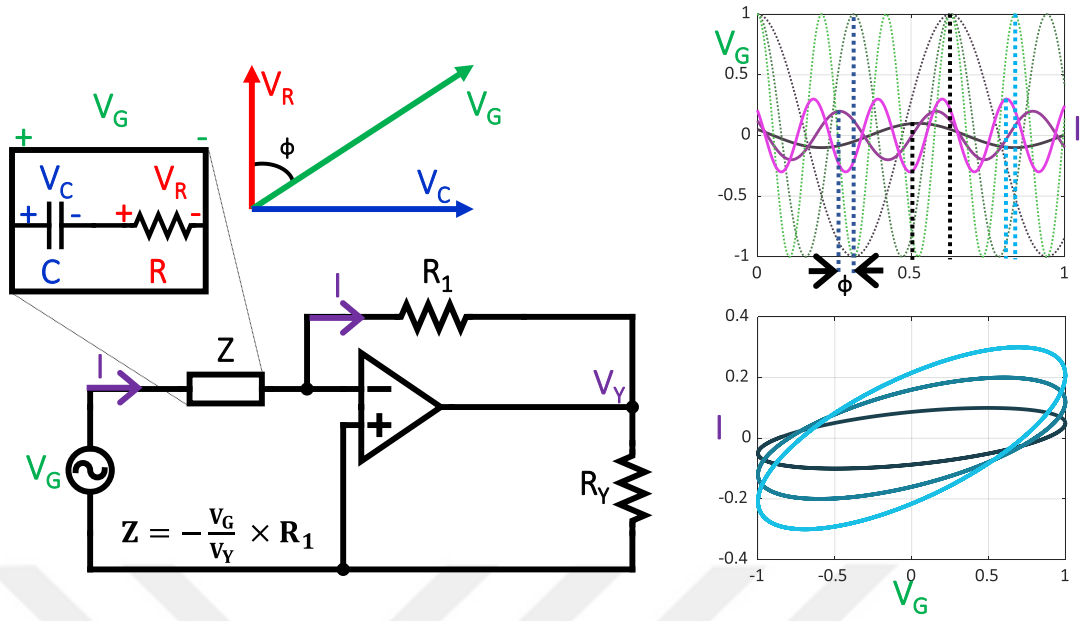
OpAmp uygulamalarında sorundur. Ölçüm devresinde eksi değere geçilen zamanın (sıfır gerilimi kestiği an) hassasiyetle belirlenmesinde toprağa göre bir karşılaştırma yapıldığından, bu sapma önem arz eder. Sapma büyükse, sıfır değeri sapma gerilimi kadar geçildikten sonra OpAmp işareti vererek gecikmiş olur.

- Kuşak Genişliği (Hz): Kusurların devreye girdiği bir diğer konudur. Yavaş taşıyıcıların (kusurların) az olduğu OpAmp'larda bu etki de az olur. Azınlık taşıyıcıları, uygulanan frekansı, kusur az ise takip edebilir.

- 3. Harmonikler: Anlık değişimler, sığa gibi görev yapan kusurlarda anlık yük dolma ve boşalmalarına neden olur. Bu olay, yüksek frekanslı yük hareketlerine ve bu hareket kaynaklı harmonik işaretlere sebep olur. Bir bakıma sönümlenen bir salınıcı (osilatör) gibi bir davranış gösterir.

Bu şartları ($\sim 1 \text{ nV} \times \sqrt{\text{Hz}}$, 1 mV, 200 MHz) en iyi Texas Instruments'e ait LMH6626 OpAmp sağlamıştır. Çalışmada 100 MHz'ye kadar güvenilir sonuçlar vermiştir.

Şekil 3.2 içindeki devre çizimi oldukça basittir ve bu çalışmada kullanılan bir özdirenç çözümleyici devresini özetler (elbette öncesinde bir soyutlama (tampon) katmanı ve sonrasında bir güçlendirme katmanı ve sayısal dönüştürücü vardır): İşaret üreticinin frekansına ve genliğine bağlı olarak çalışmadaki diyotun gösterdiği özdirenç (sıralı bir sığaç ve direnç ile ifade edilmiştir) kolayca hesaplanabilir.



Şekil 3.2. Öz direnç ölçüm devresi – Bu basit devre, yönleç (vektör) çözümlemesi yardımıyla Z, yani ölçülen aygıtın öz direncini, frekansa bağlı belirlemekte kolaylık sağlar. Akım (I) ya da V_Y/R_1 , V_G ile karşılaştırılırsa, sağ üstteki çizimde görülen gecikme miktarı, yani faz (ϕ), V_R ve V_C 'nin elde edilmesinde kullanılır. Sağ altta görülen meşhur Lissajous eğrisidir ve buradaki gibi üç farklı giriş frekansı için çizildiğinde, akım-gerilim etkileşimini kolayca (faz büyüdükçe basıklaşma) algulamak açısından sezgi geliştiricidir.

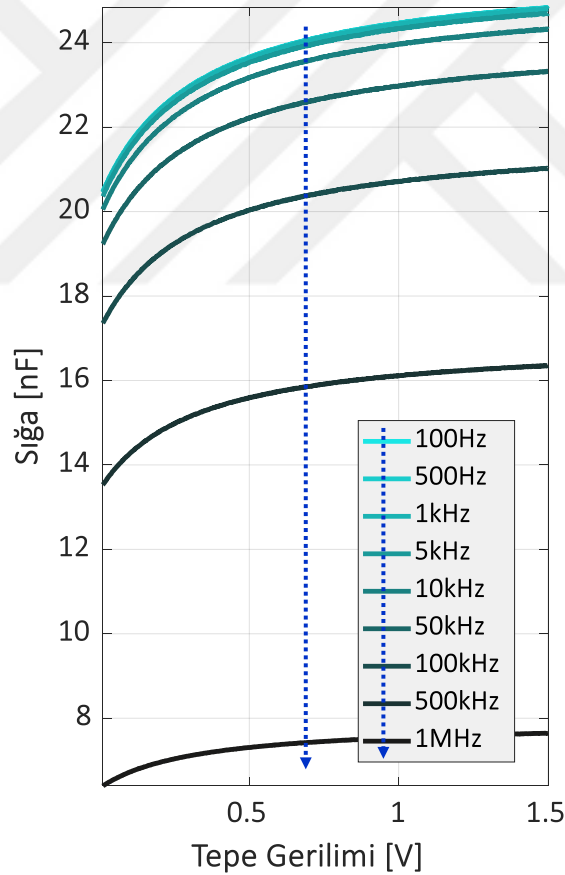
Burada gösterilmiş olan aygıtı ait öz direnç (Z) ile **Şekil 2.6** içinde gösterilen eşdeğer devre nasıl örtüşür? **Şekil 3.2** içinde Z ile ifade edilen ögenin, salt sığadan oluşan kısmı bulunur. Buradaki doğrusal direnç (R), aslında yarıiletkenin direncidir.

Uygulanan gerilim ve frekans üzerine de kısaca bilgi vermek gerekir: Eksi değerler bu çalışma içerisinde kullanılmamıştır. Bunun nedeni, sonradan yapılacak çözümlemeyi kolaylaştırmak içindir. Ayrıca arkma akımının daha düşük olacağı ileri besleme (metal artı, yarıiletken tarafı eksi) ile daha doğru sonuç elde edilir. Uygulanan kutbun seçimindeki bir diğer fayda ise evirtim (inversion) katmanı kaynaklı bir sığa oluşumunun engellenmesidir. En yüksek uygulanan tepe gerilim değeri ise, dielektrik kırılmanın yaşanmaması için sınırlandırılmıştır (1.5 V). Bir diğer gözden kaçmaması gereken konu ise, oksit katmana ait dielektrik sabitin değişmediği düşük frekansların kullanımı da kolaylık getirmiştir. Farklı frekanslarda alınan sonuçlar da, bilinmeyen sayısının fazla olduğu sığa denklemlerinin çözümüne imkan verebilmiştir.

Şimdi, bu ölçüm devresi kullanılarak aygıt ölçümü yapılabilir. **Şekil 3.3** içinde farklı frekanslarda gerilime bağlı eşdeğer sığa ölçümü gösterilmiştir. Düşük frekanslarda arayüz ve oksit kusurları kaynaklı taşıyıcılar, uygulanan işareti takip edebilmektedir.

Yüksek frekanslarda artık bu durum gözükmez: Taşınımdaki yük sayısı kısmen azalmıştır. Bu da bir sığa kaybı demektir.

M. Depas'ın incelediği (Depas, Van Meirhaeghe, Laflère, & Cardon, 1994) frekansa bağlı sığa düşümü daha düşük katkılı yarıiletkenlerde daha az belirgindir. Böyle olması zaten beklenir: Yüksek katkılı bir yarıiletken kitlelik bölgesine ait sığa düşüktür. Bu da, daha hızlı dolan ve boşalan bir sığadır. Katkı arttıkça bu durum ortadan kalkar: Eşdeğer devredeki diğer sığalar ile kitlelik bölgesine ait sığa yakın değerlerdedir ve toplam sığa değerine etkisi fazla olur. Katkı arttığından, taşıyıcı hareketleri de baskılanmıştır; çünkü taşıyıcılar artık daha çok saçılmaya maruz kalırlar. Ortalama hızların düşmesi, frekansa bağlı sığa değişimini daha belirgin yapar.



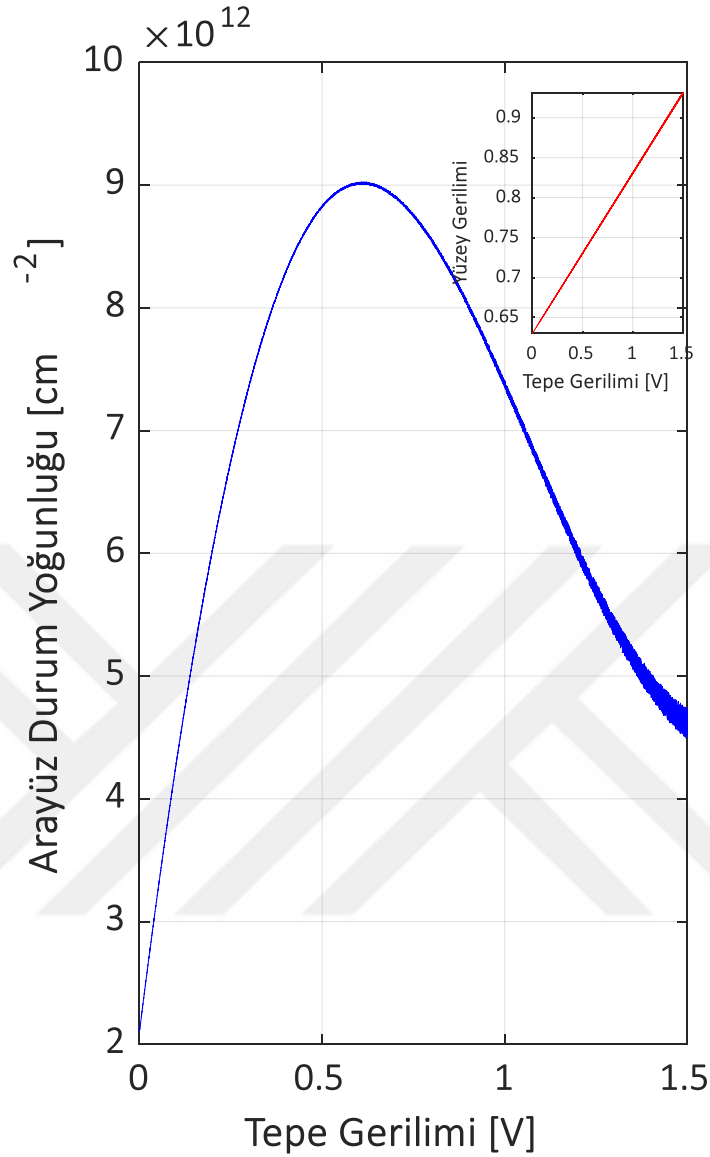
Şekil 3.3. Frekans ve gerilime bağlı eşdeğer sığa – Yüksek frekanslara çıkıldıkça, sığada bir düşüş vardır; ancak düşük frekanslarda bu düşüş gözükmez: Taşıyıcı hareketi bu frekansları takip edebilecek hızları yakalar. Eğrilerin hangi sırayla hangi frekansta elde edildikleri ok doğrultusunda gösterilmiştir.

Eşdeğer devre çözümlemesi sırasında ifade edilmiş olan denklem 2.1, burada elde edilen sonuçlarda kullanılabilir. Eğer kitlelik bölgesi ve okside ait sığa bilinirse, arayüz

sığası da kolaylıkla bulunur. Uygulanan işaretin tepe geriliminin düşük olduğu değerler ve düşük frekanstaki ölçümler kullanılabilir. **Şekil 3.4.** içinde böyle bir ölçüm yer almaktadır. Arayüz durum yoğunluğu önce artmaktadır: Düşük enerjili taşıyıcılar hızla bu durumları doldururlar; yüzey gerilimini aşabilecek enerjideki elektronlar artık ilettime katılırlar. Arayüz durumlarına daha yüksek elektrik alanda daha az elektron (artık enerjice yükselmişlerdir) takılır ve bu da sanki daha az arayüz durumu varmış gibi sirayet eder. S. Kar'ın çalışmasına (Kar & Dahlke, 1972) göre ($\sim 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) bu çalışmada daha yüksek durum yoğunluğu ($\sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) olmasının sebebi yüksek katkılamadır: Yarıiletken içerisinde daha fazla taşıyıcıyı kabul edebilecek durum vardır.

Eşdeğer devre hatırlanarak sığaların yerleşimi, sonuçların açıklanabilmesine yardımcı olabilir: Kıtık bölgesine ait sığa düşük ve bu sığanın diğer iki sığaya ardışık olması nedeniyle, bu sığadaki değişim, toplam (eşdeğer) sığaya daha çok etki edecektir. Gerilim yükseldikçe, bu sığa ve eşdeğer sığa da yükselir (kıtık bölgesi daralır). Gerilim arttıkça bir düzlük görülür: Buradaki yavaşlatıcı (hatta düşürücü) etki, okside ait sığadan dolayı değildir; çünkü frekans ve gerilimle değişmeyecektir. Öyleyse, arayüzdeki elektronların daha yüksek enerji ile çekildiği ve oluşturdukları sığayı da düşürdükleri anlaşılır. Arayüzde yer alan durum sayısında, yüksek gerilim değerleri için görülen (efektif) düşüş vardır.

Yüksek gerilimlere doğru görülen gürültü PF etkisiyle açıklanabilir: Yüksek gerilimlerde ilettime katılan taşıyıcılar sığada dalgalanmalar yaratmıştır. Ölçüm düzeneği basit bir sığaç için denendiğinde, düşük sığalarda bile bu etki görülmemiştir.



Şekil 3.4. Arayüz durum yoğunluğu – Arayüze ait sığanın çıkarılması ile integral sonucu yüzey geriliminin elde edilmesi, durum yoğunluğunun da çıkarılmasına imkan vermiştir. Tepe gerilimi yükseldikçe, elde edilen değerlerde gürültü görülür. Burada PF etkisinin devreye girdiği düşünülmektedir.

3.4. Tepki Süresi

Elektronik aygıtların tamamı direnç-sığa çarpımı ile bulunur. Bu bir yaklaşım gereği böyledir: Eğer aygıt için bir benzetim yapılırsa, direnç ve sığaç (kapasitör) ile bir devre eşdeğeri oluşturulur. Böyle bir eşdeğer devrenin tepkisel niceliği (transfer fonksiyonu) sığaç ve direnç değerlerini içerir. Çok açık olarak, bir sığacın dolma ve boşalma süreleri, onun boyutu ve onu dolduracak akım genliğine yani dirence bağlıdır. Eğer zamandan bağımsız, frekansa bağlı bir hesaplama yapılırsa, bu terimlerin yanına frekans da dahil olur. Bu türlü bir çözümleme Laplace çözümlemesi olarak adlandırılır ve

devrenin başlangıç koşullarının ilave edilmesiyle tepki niteliği, frekansa bağlı olarak bulunur. Bir sığaç için bulunacak öz direnç değeri, işte bu işlemler sırasında, frekansa bağlı olarak öz direnç çözümlemesiyle bulunur. Yani sığaç, artık frekansla değişen bir doğrusal direnç gibidir. Yüksek frekanslara gidildikçe öz direnci düşer.

Bu açıklamalardan anlaşılan, bir aygıtta ait tepki hızının da frekanstan bağımsız düşünülmemeyeceğidir. Bu, yarıiletkenlerin davranışlarına bakıldığında da sezilir: Açılma kapanma sürelerinin birbirinden farklı olmaları, basit bir direnç-sığa çarpımının, aygıt hızını hesaplamada kullanılamayacağını açıkça gösterir. Aygıt kapanırken gözlenecek gecikme, arayüz ve malzeme içerisindeki tuzaklardan gelen taşıyıcıların ulaşması nedeniyledir. Uygulanan gerilim kaldırıldığı anda, bu tuzaklardan gelen ikincil taşıyıcılar, ana taşıyıcılardan sonra ulaşacaktır (Bu gecikme, hızla gelen ana taşıyıcılar ve yeni ivmelenen ikincil tuzak kaynaklı taşıyıcılar arasındaki farktan gelmektedir). Ayrıca yük-yük etkileşimi ve tuzaklarda ana yük taşıyıcılarının saçılması nedeni yavaşlamalar da vardır. Aynı nedenler açılma süresindeki gecikmenin de kaynaklarıdır.

Hızlı aygıtlarda görülen bir diğer etki de elektron dalga yönlecinin (vektör) malzemeler arasındaki uyumsuzluğu nedeniyle yaşanan yavaşlamadır. Bu, plazmonikte sıcak elektronların verimli toplanamaması olarak kendini gösterir (Tang, et al., 2020): Schottky engeli, gelen dalganın bir kısmını duvara çarpmış gibi geri yansıtır ve geçebilen kısım da artık farklı bir dalga yönleciyle malzeme içerisine ilerler. Bu dalga sayısına denk gelen enerji, gelen elektronunkinden daha düşük olacaktır. Malzemelerin seçiminde, momentum eşleşmesi doğru yapılmalıdır. Aşırı katkılı silisyuma uyumlu olarak alüminyumun bir bağlantı malzemesi olarak tercih edilmesinin sebebi de bu yüzdendir: Fermi dalgasayısı (momentumu) $k_F \propto \sqrt[3]{\text{iletimdeki elektron yoğunluğu}}$ her iki element için neredeyse aynıdır. Bu sayede geçişlerde momentum kaybı oluşmaz. Bir Schottky engeli yine de vardır, ama oldukça incelmıştır. Giriş bölümünde **Şekil 1.2.c** için verilen açıklamada bu bilgi (kesikli sığ tuzak iletimi) verilmişti; ancak burada bağlantıların yaratabileceği direnç ve bundan kaynaklı gecikmelere neden olan etki sunulmuş oldu.

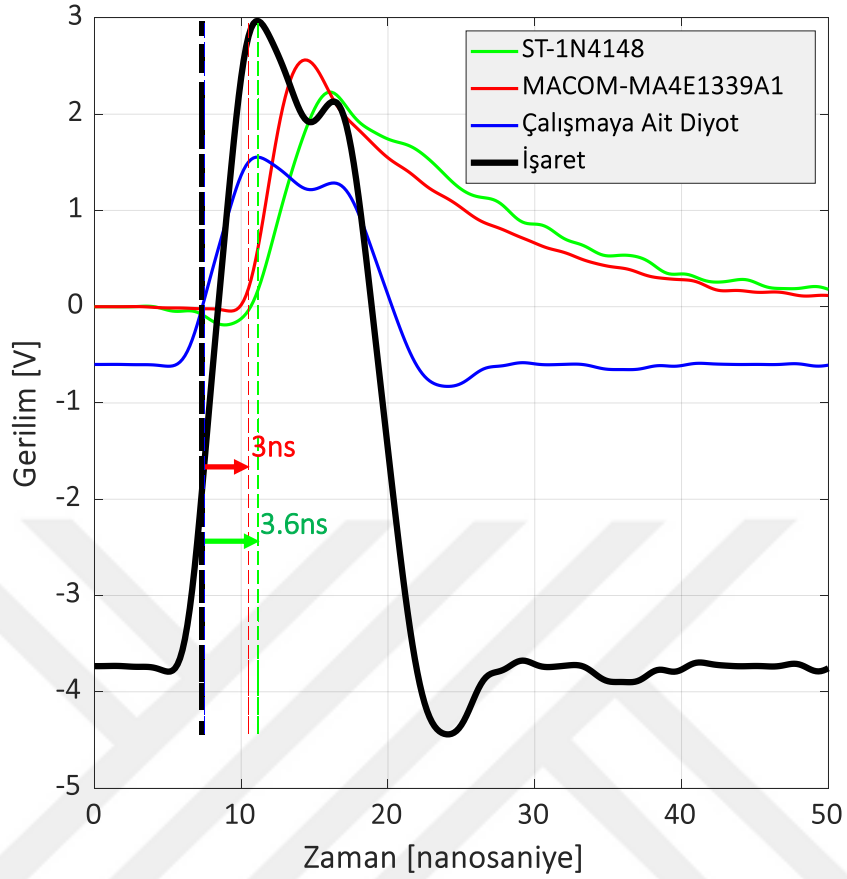
Sayılan tüm bu nedenler, daha iyi bir ölçüm tekniğine ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Düşük hızlarda çalışan aygıtlar için direnç-sığa çarpımı bir yaklaşıklık verebilir, ancak bu çalışmanın incelediği aygıtlarda olduğu gibi, yüksek hızlı aygıtlar için daha ayrıntılı bir çözümleme gerekir. Bir diğer husus ise ölçüm düzeneği niteliğinin

ayrıntılı inceleme imkanı verebilmesidir: Dar-kuşak genişliğine sahip, yani düşük zaman hassasiyetli işaret çözümleyiciler (osiloskop) zaman uzayında hassas bir sonuç veremez. Elbette kuşak (bant) genişliği ile bit derinliği ödünleşmesi de -bir diğer sorun olarak- vardır: Kuşak genişliği arttıkça düşecek olan gerilim çözünürlüğü, iyi bir ölçüm alınamamasına neden olur.

Geliştirilen yöntem görüntü işlemede yaygın kullanılan evrişime (konvolüsyon) dayanır. Kısaca evrişim, bir değişken düzlemi üzerindeki tanımlı iki fonksiyondan birinin sabit tutulup, diğerinin bu düzlem üzerinde kaydırılarak sabit olanla çarpılması olarak ifade edilebilir. Buradaki uygulamada hareket eden fonksiyon, bir aygıtı veya düzene hastır ve buna tepki niteliği (transfer fonksiyonu) denir.

Amaç aygıtın tepkisini, yakaladığı işareti kullanarak, olması gereken bir çıkış işareti ile mukayese ederek çıkarmaktır. Aygıtın açılma ve kapanma süresindeki gecikmeler, giriş işaretinin, bozulmuş olarak çıkışta elde edilmesi olarak kendini gösterir. Yani dar bir darbe, daha genişlemiş olarak çıkışta gözlenir ve elbette, eğer girişteki işaretin evrilir (simetrik) olduğu biliniyorsa, çıkışta elde edilen işarettaki biçim değişikliği, açılma kapanma sürelerindeki farklılığa işaret eder. Bu durumda ülküsel (ideal) bir diyotun çıkışı yani tek yönlü geçişin kayıpsız olduğu bir işaret ile ölçülen aygıtın çıkışı karşılaştırılır. İster ters evrişim (dekonvolüsyon), istenirse Fourier dönüşümü ile frekans uzayında bölme ile elde edilebilir.

Çalışmada kullanılan aygıtın yüksek tepki hızında çok az olsa da PF etkisi görülmektedir. Açılma ve kapanma anlarında yakalanan bu etki, bu yöntem sayesinde fark edilir olmuştur. **Şekil 3.5** içinde karşılaştırma olması amacıyla, 1N4148 ve MA4E1339A1 diyotlarının tepkisi de ölçülmüştür. Kötü bir kare dalga olan işaret ile çalışmada hazırlanan diyot arasında neredeyse fark yoktur. Bu işaretin kötü olması bir anlamda takip hızını da göstermektedir. Ancak diğer diyotlara göre bir sorun vardır: Geri beslemede, maalesef bir geçiş görülmektedir.



Şekil 3.5. Diyotların tepki hızları – Dikey çizgiler her bir eğrinin tepe noktasının %10'una denk gelmektedir. Hemen en solda yer alan iki dikey çizgi neredeyse örtüşmüştür ve hazırlanan aygıtın diğer aygıtlara göre daha hızlı açıldığını gösterir. Kapanma süreleri ardışık (seri) yüke (direnç) bağlı olduğu halde, burada karşılaştırılmamıştır; ancak her bir diyota eşit direnç bağlandığı hatırlatılarak, kapanma sürelerindeki büyük farka dikkat edilmelidir.

3.5. Dielektrik Kırılma

Tezdeki gibi ark diyotları inceleyen çoğu çalışma, dielektrik kırılma (dielectric breakdown) olayını incelememiştir. Yalıtkanın yüksek elektrik alan nedeniyle yozlaşması yani artık elektrik iletir bir malzemeye dönüşmesi, böyle ince bir katman için düşünülmelidir.

Bu olay, doğada olduğu gibi, rastlantısaldır: Anlık yükün, aynı şekilde oluşmuş yüklerce dizili bir yol üzerinden akması gerekir. Yıldırım olayında su molekülleri ve gaz plazmasının oluşturduğu tam bir doğru olmayan çatalı kılcallar, yalıtkan tabaka içinde de oluşur. Bu kılcallar, elbette, daha kolay yüklenen (iyonize olan) bölgelerden geçer. Yani malzeme içerisindeki bozukluklar, katmanın incelmesi (elektrik alanın da arttığı) noktalarda işte böyle bir güzergahı oluşturur.

Eğer iyi bir kristal niteliğinden bahsediliyorsa ve yüzey pürüzlüğü düşükse, rassal geçişler de azalır. Buna binaen şu çıkarım da yapılabilir: Eğer ufak bir alan üzerinde işlem yapılıyorsa, yalıtkan yozlaşması da pek görülmeyecektir. Alan genişledikçe, kusur sayısı ve girinti-çıkıntı görünürlüğünün (oksit kalınlığının bölgesel farklılığı) artması nedeniyle bağlantı noktalarının (alt ve üst elektrotların) birbirine yakın olduğu nokta sayısı da artar.

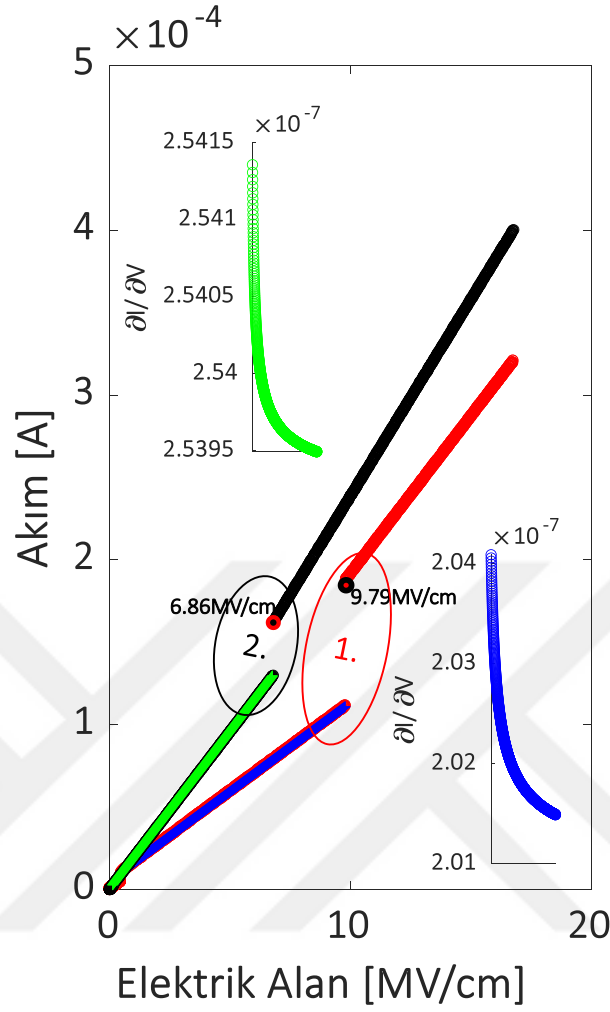
Malzemeye ait dielektrik kırılma değerinin daha ince katmanlar içinde kullanılıp kullanılmayacağı ise şüphelidir. Bazı çalışmalarda daha ince katmanlar için bu değerler daha kalın katmanlara göre farklılık göstermiştir.

Üretilmiş silika (SiO_x), katman kesitince hangi bileşiklerden teşekküldür? Örneğin, birkaç nanometre kalınlığında bir katman üretildiğinde, bu katmanın bir bölümü silisyumca daha zengin bir ara-katmandan oluşmuşsa, artık burada doğru bir dielektrik kırılma ölçülemez: Oksijen hareketi katmanlar arasında devam ettiğinden, bazı noktalar akım iletimine daha meyillidir.

Görüldüğü gibi açık bir cevabı olmayan bu durumun incelenmesi oldukça elzemdir. Aksi halde, aygıt tepkisinin ne kadarı arkmaya bağlıdır, bu bilinemez. Bir başka nokta, geri döndürülemeyen bu olayın ölçüm tekrarlarınca yayılarak aygıt tepkisini tamamen değiştirmesidir. Yalıtkan katman, bu olay süresince oksijen kaybederek daha iletken olur.

Şekil 3.6 içerisinde sol üst ve sağ altta bulunan eğriler, renkleriyle aynı olan doğruların elektrik alana bağlı türevleri olarak çizdirilmiştir. Bu renkli kısımların her biri, bir akım-gerilim ölçümüne ait -ama birden zıplamış- ana doğrular üstündelerdir. Türevler, PF etkisinin ne kadar güçlü olduğunu göstermek için bir ölçüt gibi kullanılabilir. Akım-elektrik alan çiziminde kırılma öncesinde olduğu tahmin edilen bu etkinin görünürlüğü, türev alındıktan sonra daha belirginleşmiştir. J. Frenkel'in çalışmasındaki (Frenkel, 1938) iletkenlik (σ) ifadesinin gerilime (V) göre türevi (denklem 3.1), bu etkinin baskınlığını gösterir.

$$\frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{I}{V} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial V} \propto \frac{e^{\sqrt{V}}}{\sqrt{V}} \quad 3.1$$

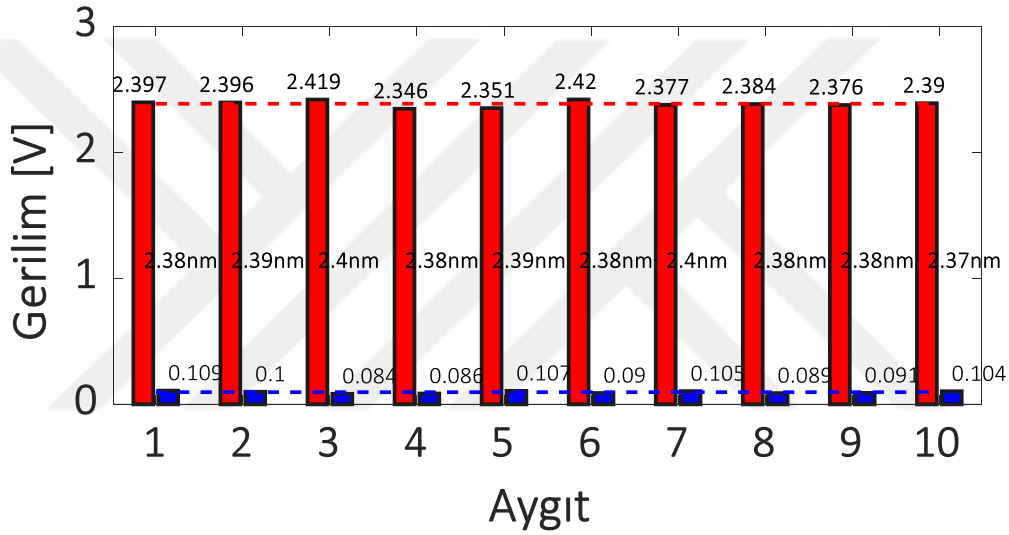


Şekil 3.6. Dielektrik kırılmanın yaşandığı bir cihazda akım-elektrik alan ilişkisi – Akımdaki sıçrama ilk ölçümde (1.) yüksek bir gerilimdeyken aynı aygıt ikinci kez ölçüldüğünde (2.), artık kırılma daha önce başlamıştır. PE etkisi (sağ-alt ve sol-üst köşelerde) her iki ölçümde bakıldığında çok az değişmiştir. Daha düşük gerilimlerde iletimin başlaması aygıttaki bozunma nedeniyledir.

Şekil 3.6 içinde bir aygıtta ait akım gerilim değeri ikinci kez ölçüldüğünde farklı bir tepkiyle karşılaşılmıştır. Burada dikkat edilecek iki değişim vardır: Dielektrik kırılma ve PF etkisi kaymıştır. Bu beklenir; çünkü yalıtkan özelliğini yitirmeye başlayan oksit artık dielektrik kırılmaya daha düşük gerilimlerde başlamıştır. Yalıtkanlıktan kısmen çıkmış bu bölgelerin PF etkisine bir katkısı olmaz, çünkü kendileri iletme katılacak ikincil taşıyıcıları üreten merkezler olmuşlardır. Ölçüm üçüncü kez tekrarlandığında, ölçülen örneklerin büyük çoğunluğunda kayma gözükmemiştir: Aygıtlar bozunmuşlar ve artık dirençten farksız hale gelmişlerdir.

Yaklaşık aynı kalınlığa sahip on aygıt incelemesi Şekil 3.7 içinde verilmiştir. Dielektrik kırılmaya uğradıkları gerilim değerleri oldukça yakındır. Ayrıca PF etkisinin

görülmeye başladığı gerilim değerleri de yakındır. Bu incelikteki bir malzemede bu kadar hassas olarak bu değerin ne olabileceğini kestirmek zordur: Gürültü oranı yüksek bir bölgede (düşük gerilim ve akım) yapılmış olan bu ölçümlerde yine de yakın gerilim değerleri elde edilmiştir. Bu gerilim değerleri, akım türevinin kısmen doğrusallıktan çıkmaya başladığı noktaları verir. Dielektrik kırılma, elektrik alan olarak yaklaşık 10 MV/cm elde edilmiştir ve yapılan diğer çalışmalarla aynıdır. PF etkisi ise yaklaşık 400 kV/cm görülmeye başlanmıştır. Bu değer az da olsa düşüktür, ancak burada etkin yalıtkan katman kalınlığının da farklı olduğuna dikkat çekilmelidir. Etkin kalınlığın ne anlama geldiği, optik malzeme muayenesinde Raman-kayması tayf ölçümünde görülecektir.



Şekil 3.7. Dielektrik kırılma ve PF gerilimleri – Ortada yazan değerler, her bir aygıtın oksit kalınlığını belirtir ve katmanölçer düzeneği ile elde edilmişlerdir. İlgili gerilimler için ortalama değerler, kesikli çizgilerin hizasında 2.38 ve 0.097 V kadardır.

Dielektrik kırılma konusunda önemle durmak gerekir: Buradaki davranış Ohm-vari veya katı-yük sınırlı akım (space-charge-limited current) ile açıklanabilir mi? Farklı çalışmalarda ölçümlerde iletim mekanizmalarının incelendiği farklı oksit malzemeler için genellikle malzeme yapısına dikkat edilmemiştir. Yani oksijen oranının malzeme derinine göre değiştiği buradaki gibi oksitlerde, artık hangi iletim mekanizmasının kullanılacağı düşündürücü olur. Elbette, sıcaklığa bağlı alınacak ölçümler tuzak yoğunluğunu vererek açıklamayı kolaylaştırabilir. Ayrıca kullanılan oksit yüzey üstünde farklı metallerle bağlantıların alınması PF etkisinin, Ohm-vari iletimden ayrışmasına imkan sağlar (Chiu, 2014). Bu değişimle bir Fermi momentumu sorunu yaşanacaktır (uyumsuz metallerde Ohm-vari bağlantıdan bahsedilemez); bu da iletim mekanizmalarının, kullanılan oksit tabakada hangi şekilde olduğunu açık eder.

Burada düşük gerilimlerde mevcut katı-yük sınırlı akımına uyacak akım davranışlarının (rejim) görülebildiği doğrudan söylenemez. Görece düşük gerilimlerde PF etkisi vardır ve kuyular arası arkma (hopping) ile daha da güçlüdür. Belki de bu incelikte bir yalıtkan için ölçüm hassasiyetinin daha geliştirilmesi gerekecektir. Ancak şu unutulmamalıdır: **Şekil 3.6** içinde görülen akım “zıplaması”, Ohm-vari iletim mekanizmalarıyla izah edilemez. Bunun nedeni, katı-yük iletiminin geri döndürülebilir olmasıdır; yani aynı ölçüm ikinci kez alındığında önceki sonuçlar elde edilmelidir. Halbuki, burada tekrar edilemeyen bir sonuç vardır (1. ve 2. ölçümler arasındaki fark): Bu doğrudan malzemede bozulmaya, yani dielektrik kırılmaya işaret eder. Düşük gerilim uygulamalarında bu kesin bir yargıda bulunmak yanlış olabilir, ama elde edilen sonuçlara göre, görece yüksek gerilimlerde (> 1 V) katı-yük iletiminden bahsedilemez. Zaten PF etkisinin bu incelikteki bir oksidin yapısında yaratacağı zarar, ilgili çalışmada (Harrell & Frey, 1993) görülmüştür.

Burada farklı bir gözlemlenen durum ise aygıt temizliğinin etkisidir. Kuru hava veya azotla temizlenen aygıtların hemen hepsi çok düşük gerilimlerde dielektrik kırılmaya uğramıştır. Bu şaşırtıcı değildir: Kirlilik, yüzeydeki oksit tabaka altında hapsolmuştur. Aynı zamanda oksidin bölgesel olarak büyümemesine de neden olmuş olabilir. Ozon temizliğinden geçen örneklerde bu durum, büyük oranda gözlemlenmemiştir ve yukarıdaki sonuçlar plazma (ozon) temizliğinden geçen aygıtlardandır.

3.6. Raman-Kayması Ölçümü

Geliştirilen bir özoksit için XPS ölçümlerinden yararlanılsın: G. Aygün tarafından hazırlanmış olan çalışma (Aygün, Atanassova, Alacakir, Ozyuzer, & Turan, 2004) örnek olarak ele alındığında, bu çalışmada denenen LASER yardımıyla üretilmiş (oksitlenmiş) silikanın yapısı nelerden oluşmuştur? Yazar, iki farklı bileşenden söz etmektedir: Bunlar Si_2O ve SiO_2 bileşikleridir ve üretilen katmanı oluşturan bu bileşiklerin kalınlıkları nedir diye hesaplanmak istenirse, katı (inelastik) serbest yol her iki malzeme için bilinmelidir. F. Bechstedt çalışmasında (Bechstedt & Hübner, 1981), bu yol uzunluklarını silikada farklı oksijen oranları için bulmuştur. Beer-Lambert kuralı uygulanarak, ele alınan çalışmadaki XPS verisi kullanırsa, Si_2O kalınlığı 0.98nm olarak bulunur. Bu örnek makalede oluşturulmuş 8 nm kalınlıktaki oksit için böyle bir kalınlık pek önemli değildir; ancak eğer oran olarak değil de yaklaşık 1 nm kalınlığındaki bu bozuk katman sabit olarak

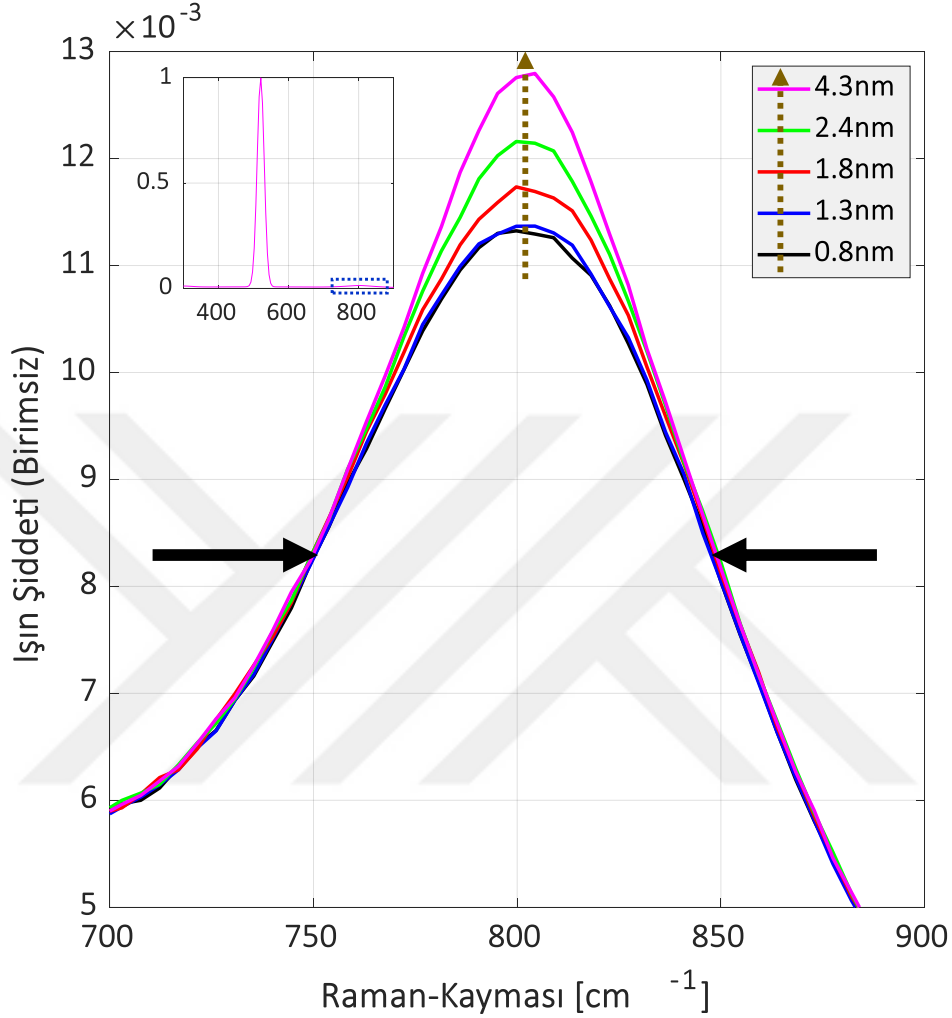
her üretimde geliyorsa, çok daha ince üretilen tabakalarda ($5\text{ nm}<$), bu bozukluk büyük önem taşır. Yani 2 nm kalınlıkta bir oksit büyütüldüyse ve yine 1 nm Si_2O katman kalınlığı varsa, bu yalıtkan katman için arkma olasılığı yüksek olacaktır. Bunun nedeni de, daha önceden bahsedildiği gibi, oksijence fakir olan Si_2O katmandaki oksijen hareketli yük taşınımıdır ve bu taşınım iletkenliğe katkı sağlar. **Şekil 1.2.b** içindeki derin tuzakların içerisinde, özellikle Fermi seviyesine yakın kısımlarda, bu iletim de yer alır. Si_2O , PF etkisinin görülmeye başladığı seviyelere (elektrik alana) göre daha düşük enerjideki tuzakları oluşturur.

Büyütülmüş oksitte bahsi geçen iki bileşenin keskin bir geçişle bulunması (bunlar dışında farklı oksijen oranında bileşenin bulunmaması) ne kadar mantıklıdır? Si_2O bileşenine göre Si_2O_3 bulunmayışı bu incelikte tespit edilemeyebilir. Aslında bunun bir nedeni de katı serbest yolun bu iki malzeme için birbirine yakın olmasıdır (Bechstedt & Hübner, 1981). Bu bakımdan hem bu tezde hem de belirtilen çalışmada (Aygün, Atanassova, Alacakır, Ozyuzer, & Turan, 2004) yer alan Si_2O_3 yerine Si_2O varlığı bir kabuldür (makalede bu konu oldukça yüzeysel bir şekilde, “bulunmuyor” denilerek geçilmiştir). Gittikçe zenginleşen oksijenli bir bileşik olan silisyum monoksit (SiO) ise yüzeyinde derhal ince bir kuvars (SiO_2) oluşturur (Cheng, 1977). Yani oksijen fakiri bir bölgenin üzerine büyümüş silisyum monoksit inceyse, artık tamamen kuvarstan söz edilir.

XPS ölçümü alınamadığında, Raman-kaymasının incelenmesi bu açıdan değerlidir: Yalıtkan tabakada ne gibi bir bileşim var, ortaya çıkar.

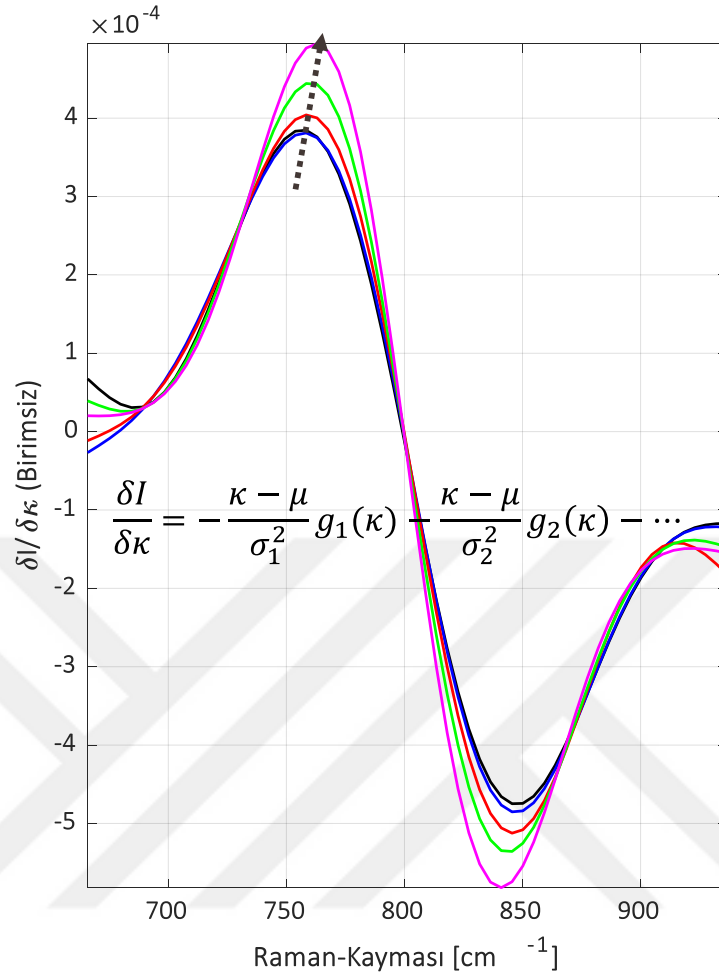
Şekil 3.8 içinde verilmiş beş farklı örneğin Raman-kayması tayfı oldukça açıklayıcıdır. Düzenekte 450 nm dalgaboyunda ve 10 mW gücünde LASER ile uyarım yapılmıştır. Odaklama ise Olympus RMS100X-O mercek dizisi (objektif) ile sağlanmıştır. Tayf-ölçer hassasiyeti 0.2 nm olarak belirlenmiştir. Oluşturulan oksit tabakaların kalınlıkları 0.8 , 1.3 , 1.8 , 2.4 ve 4.3 nm olarak belirlenmiş (sonraki kısımda tanıtılan katmanölçer ile) ve bu örneklerin Raman-kaymalarındaki farklılaşma, oksit kalınlaştıkça görülmüştür. Bu beklenir; çünkü daha kalın bir malzemeden daha fazla Raman-kayması tepe şiddeti gelir. Ne var ki, kuvarstaki sivrileşme düşündürücüdür: Kalınlık arttıkça sivrileşme belirginleşir. Artık bir geçiş bölgesinin (SiO_x 'ten SiO_2 'ye) varlığı açıktır. Bir diğer gözlem ise, bu geliştirici bölgenin kalınlıktan bağımsız olarak yer almasıdır: Her kalınlık için tepe genişliği değişmemiş, sabit bir SiO_x varlığı

anlaşılmıştır. Şiddetteki artış, SiO_x üstünde büyümüş olan SiO₂ kaynaklıdır. Bu ayrımın görülebildiği tepe, tayfin ayrıntılı olarak incelendiği kısımda, 800 cm⁻¹ civarındadır.



Şekil 3.8. Raman-kayması tayfi – Silisyum tarafından aşırı baskın gelen ışık şiddeti (sol üstte görülen çizim), okside ait tepelerin algılanmasını güçleştirmiştir. 800 cm⁻¹ civarında görülen tepeler oldukça açıklayıcıdır: Tepe genişliği, kalınlık arttıkça değişmemiş, şiddeti ise artmıştır.

Yukarıdaki “tepe üstünde tepe” düşüncesini matematiksel olarak doğrulamak da bu öneriyi güçlendirir. Eğer tepe bir Gauss dağılımı gibi düşünülürse ve düzenli ve düzensiz SiO_x yapıları farklı genişlikte ve yine Gauss dağılımına sahip kabul edilirse, bu tepe toplamalarının (ışın şiddetinin) Raman kayması mihverine göre türevi ilginç bir sonuç verir: Tek bir tepenin türevine göre birden fazla tepeye sahip olan dağılım, yatay mihverde kaymıştır. Daha açık olarak, eğer elde edilen tayfa tek bir Gauss tepesinden oluşan bir değer oturtma (fitting) uygulanırsa, oturtulan tepe ile elde edilmiş olan tayfin türevlerinin tepe noktaları birbirine göre kaymıştır. Bunun bir örneği **Şekil 3.9** içinde görülebilir.



Şekil 3.9. “Tepe-üstünde-tepe” – Önceki Raman kayması tayfı verileri kullanılarak alınan türev önemli bir veri sağlamıştır: Daha düşük genlikli olan tayf, tek bir tepemmiş gibi düşünülürse, iki tepeden oluşan tayfın türevi görece bir kayma gösterir. Tabii, tepe içinde tepe durumunun incelenmesi bir başka uygulamada tek bir tayf verisi için incelenecekse, bir öneri olarak, bu tayfa uygulanacak tek bir Gauss tepesine oturtma (fitting) sonrası bu oturtulan tepe ile tayfın kendisinin türevi alınarak bu kayma görülebilir.

XPS verilerinden çıkarılmış olan 1 nm kalınlıktaki bu geçiş bölgesi düşüncesi, burada da benzer olarak elde edilmiştir. Öyleyse, bir aygıt üretilirken (en azından bu çalışmada kullanılan yöntemle), bu kalınlığın, yani 1 nm üstünde bir oksit katman büyütülmelidir. Bu oksijence fakir oksit içerisinde oksijen kaynaklı yük iletimi, bu kısmı biraz daha iletken yapabilir. Bu iletkenlik düşük olsa bile, PF etkisi daha çok taşıyıcı üreten merkezler yaratmıştır: Bu etki de bu nedenle, önceki bölümde tecrübe edildiği gibi, daha düşük elektrik alanlarda gözlemlenir. Zaten oksijence fakir olan bu bölgede (Si_2O , Si_2O_3 ve SiO bileşiklerinden oluşan katman) yük tutma ve saçma etkilerinin varlığı belirtilmiştir (Kohl, 1983).

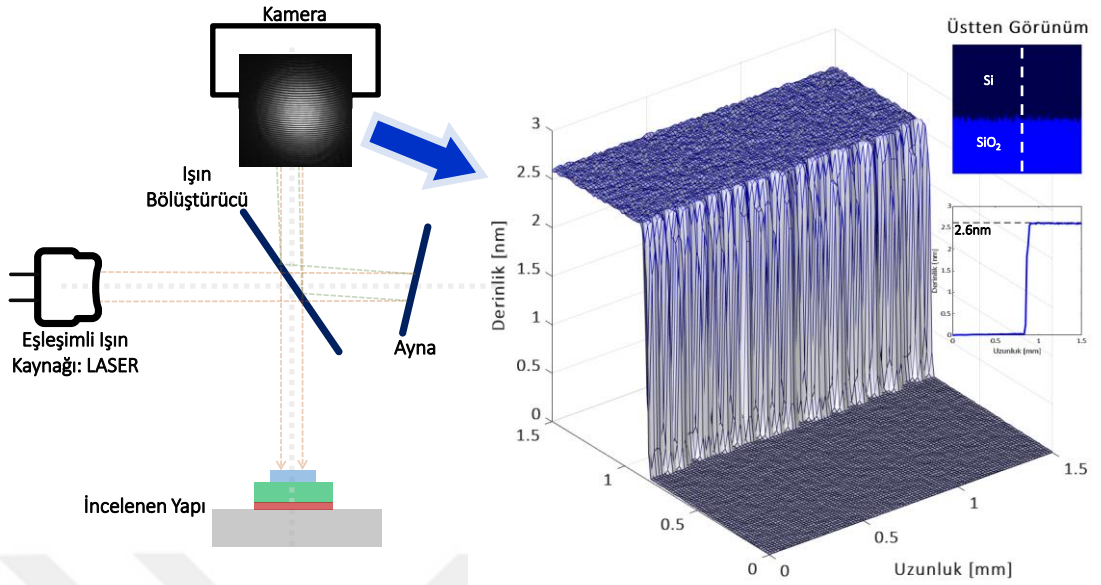
3.7. Girişimölçer

LASER ile yüzey pürüzlüğünün ölçümü için pek çok sayıda girişimölçer uygulaması vardır. Mercek yüzey geometrilerinin tayini, yine merceklere odaklama bozukluklarının ölçülmesi bu konudaki çalışmalardır.

Girişimölçerler, ışıma türüne bağlı olarak iki farklı kaynak kullanır: Eşleşimli ve eşleşimsiz foton kaynakları. Eşleşimsiz, yani kaynaktan yayımlanan fotonların birbirlerinden farklı özellikte olma durumunda, bu kaynağın kendisiyle girişimin bile güç olmasına neden olur. Bu zorluktan aslında faydalanılabilir; eğer bu kaynak kullanılarak girişim sağlanırsa, kaynağın eşleşimsizlik değerleri üzerinden hesap yapılabilir. Yani eğer iki foton (kuanta) girişim yapabiliyorsa, bu iki fotonun aynı özellikte, yani aynı yönelim ve fazda olduğu anlamına gelir. Birkaç Watt'lık kaynaktan 10^{30} civarında foton çıktığı düşünüldüğünde, böyle bir olasılık mümkündür. Aslında, ışın kaynaklarının eşleşim uzunluğu (coherence length), yani bir anlamda eş fotonlar yaratabilme yeteneği de vardır ve kimi uygulamalar için bu değer önem arz eder.

Eşleşimsiz kaynaklarla çalışmak gerçekten zordur: Işınlardan ıraksamadan (etendue), bir doğrultuda hizalanması oldukça meşakkatlidir. Bir diğer husus ise dalga boyuna bağlı kırınım farklılığı nedeniyle gelebilecek etkilerdir. Özellikle geçirgen örnekler (mercek, çeşitli optik camlar) incelenirken, bu etkiler sonuca zarar verir. Bu nedenlerle, her zaman daha iyi sonuç veren LASER girişimölçerler yani eşleşim uzunluğu yüksek kaynakların kullanıldığı düzenekler kullanılır optik araç-gereçlerin ölçümlerinde. Beyaz ışık girişimölçeri (white light interferometer) ayrıntılar yakalama konusunda başarılı olsa da, incelenen yapının hareketli taranması ve bu nedenle çok fazla tekrarlarla ölçüm alınması, onu titreşim gibi gürültülere korunaksız bırakır.

Bu çalışmada kullanılan girişimölçer tek hamlede tüm yüzeyin haritasını çıkarır. Her girişimölçerde olduğu gibi burada kaynak iki kola ayrılarak, ayrı optik yollardan geçip kamera üzerinde girişim deseni oluşturur. Bir kol doğrudan incelenecek yapının üzerine gider ve elbette incelenen yüzeye bağlı olarak, her noktadan farklı bir gecikmeyle geri yansır. Diğer kol ise kerteriz alınacaktır; bu iki koldan gelen ışınların yaptığı girişimden, incelenen yüzeyin pürüzlüğü, faz, yani gecikme bilgisi olarak elde edilir. **Şekil 3.10** içinde bir örnek için katman kalınlığı bu düzenekle elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Girişimölçer ve yüzey yükseltisi – Kamerada oluşmuş girişim deseni işlenerek derinlik bilgisi çıkarılmıştır. Kerteriz kolunda aynanın yaptığı hafif açığa dikkat verilmelidir: Tek seferde faz cephesinin çıkarılmasında büyük fayda sağlar. Girişim desenindeki çizgilerdeki bükülme odak kaynaklı olup, düzeltilmiştir. Üretilmiş oksit tabaka bir yalı yarı andıracak şekildedir; girintilerin varlığı üstten görünüm ile daha açık anlaşılır. Burada kullanılan örnek boyutları 1 cm×1 cm kadardır.

Buradaki sonuçlardan yüzeyin ayrıntılı yapısı görülmektedir. Ancak çok önemli bir nokta atlanmıştır: Oksit katman gerçekten bu kalınlıkta mıdır? Optik yol denen kavram burada ortaya çıkar; ışık, içerisinde ilerlediği malzemenin özelliğine göre fazladan yol gitmiş gibidir.

Gittiği yolun toplamı, malzeme kalınlığının, o malzemeye ait kırınım sabitiyle çarpımı kadardır (Hecht, 2017). Yani bu yöntemde eğer malzemenin bu optik sabiti bilinmiyorsa, kalınlık ölçümü hesaplanamaz. Aslında elipsometrelerin de özellikle ince katman çalışmalarında yetersiz kalması bu nedenledir: Eğer malzeme ile ilgili bir kabul yapılmazsa, kalınlık bilgisi hatalı elde edilir. Bu kabulün yapılmasının zorluğu bir önceki sonuçta kendini göstermişti: Raman-kaymasına ait tayf, tam anlamıyla hangi kırınım sabitinin seçimini güçleştirmiştir. Oksidin kuvars olarak kabulü mümkün değildir ve bu sabitteki hatalı sapma oranı kadar hatalı kalınlık bilgisi elde edilecektir. Hele ki yeni çalışılan malzemelerde böyle kabuller yapmak, daha büyük hata oranlarına neden olabilir.

Bir diğer sorun ise çok katmanlı aygıtların incelenmesi sırasında yaşanır. Hata, hem diğer katmanların da yanlış hesaplanmasına yol açar, hem de iç yansımaların devreye girmesi bu hata oranını yükseltir.

Şekil 3.10 içinde verilen derinlik bilgisi, optik yolun malzemeye ait kırınım sabitine bölünmesiyle elde edilmiştir: Görülecektir; elde edilen bu derinlik hatalıdır. Kalınlığı kırınım sabitinden bağımsız olarak elde eden bir ölçüm düzeneği hemen alttaki bölümde verilmiştir.

Burada sevindirici olan bir sonuç, oksit kalınlığının eş şekilde dağılımıdır. Yüzey göreceli olarak pürüzlüdür ancak ölçümdeki hatalar (optik gürültü) nedeniyle hesaplanmamıştır. Bu gürültü, pürüzlülüğün oldukça düşük olması, yani derinlik çözünürlüğünün belirsizlik yaratması nedeniyledir.

3.8. Katmanölçer

Yukarıda uzun uzadıya girişim ve eşleşim uzunluğundan bahsedildi. Bu boşuna değildir, çünkü gerçekten faydalı bir şekilde eşleşimsiz kaynak kullanımı ile kırınım sabiti ve kalınlık bilgileri, çok katmanlı yapılar için elde edilebilir. Yukarıda hatırlatılmadı, ama unutulmamalıdır ki, tüm bu optik ölçümlerde ışık geçirgenliği yüksek olan katmanların incelenmesi mümkündür ancak.

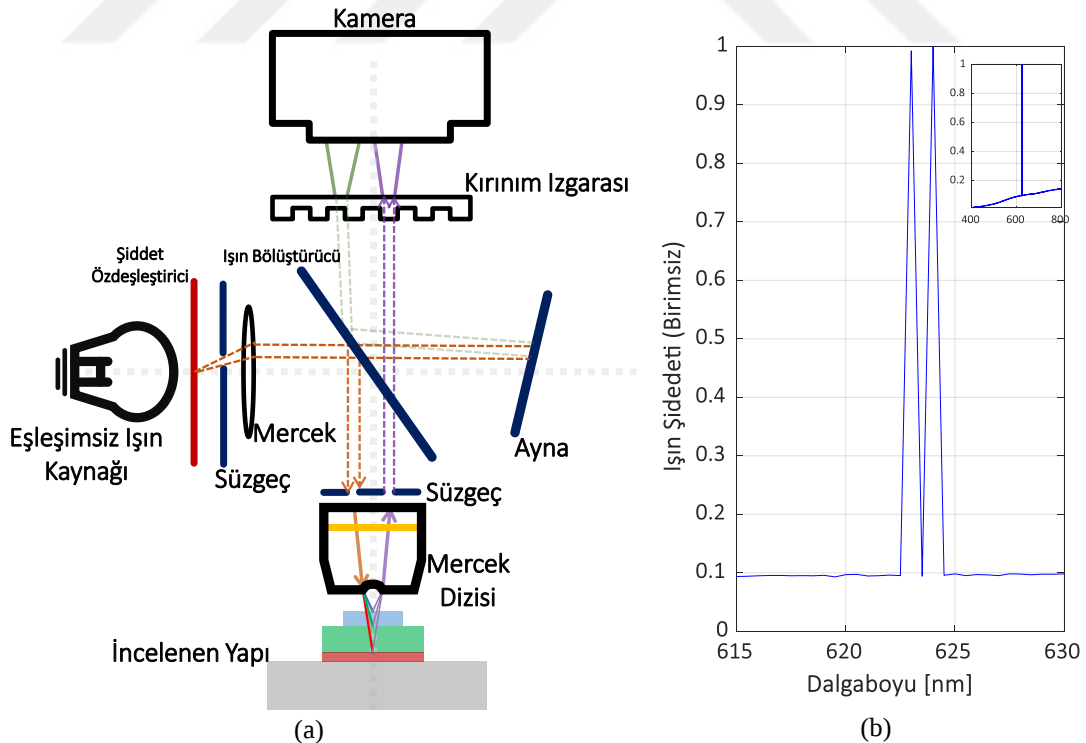
Kırınım sabitinin dalga boyu ile değiştiği bir malzemeyle yapılmış bir merceğin odak uzunluğu da dalga boyuna göre değişir (aslında her malzemede kırınım sabiti dalga boyuna göre değişir). Bu istenmeyen bir etkidir merceklerde, çünkü kendini, özellikle görüntü kenarlarında, renk kaymaları olarak belirgin gösterir. Merceğin renk kusurunu (renk sapması) iyileştirmek için, bu kaymanın dalga boyu artışının tersine olduğu malzemeler ile veya farklı yüzey geometrilerine (küresel olmayan, parabolik) sahip mercekler eklenir. Bu nedenle iyi görüntüleme aygıtlarında tek merceklerden ziyade üçlü ve üstü bileşenden oluşan mercek kümeleri kullanılmaktadır. Mikrogörüntüleme (mikroskopi) bir dizi halinde mercekler sıralanarak bu etki olabildiğince düşürülür.

Geniştayf eşleşimsiz kaynaklar ve dalga boyuna bağlı mercek renk kusuru, bu çalışmaya özgün olarak, hem kırınım sabiti hem de katman kalınlığı bilgisini verecek bir düzenekte kullanılmıştır. Renk kusuru olan merceğin odağı, her derinliğe bir dalga boyunun düşmesine imkan verir. Arayüzden gelen yansımanın olduğu nokta, o dalga boyuna denk düşen odağın bulunduğu noktadır. Bu düşünce yeni değildir; optik eşleşimli katmanölçer (optical coherence tomography) ve eşodak mikrogörüntüleme (confocal microscopy) bu etkiyi kullanır. Ancak burada amaç, bu yöntemlerdeki hareketli

düzenekleri kullanmadan, odağın denk geldiği arayüzün üstü ve altındaki malzemelere ait kırınım sabitlerini tek seferde bulmaktır. Açıklanmıştır; tek ölçümde bulmak titreşim gibi sonuçları oldukça etkileyen bir gürültüden kurtulmak için gereklidir.

Eğer üstteki katmana olan uzaklık bilinirse, Fresnel yansıma eşitliğinden ilk katman için kırınım sabiti bulunabilir. Ancak bu zorlayıcı olacaktır, çünkü tam olarak odaklanmamış ışınlar, yani daha büyük veya daha küçük dalgalıboylarındaki yansımalar kırınım ızgarasından geçtikten sonra, kamerada farklı açılarda birden fazla tayf dağılımı yaratırlar. Tabii odakta olmayan bu ışınlar mercek çıkışında ıraksayacak, bu da odak uzunluğu dalgalıboyu ilişkisini çıkarmak için kullanılacak tayf çözümlemesine hata olarak eklenecektir.

Saçılmış olan, bu tam olarak odaklanmamış ışınların süzülmesi yerinde olur. Bunu yapabilmenin en iyi yolu, ıraksayan yani açılı çıkan ışınların engellenmesidir. Mercek dizisi öncesinde yer alan süzgeç, tam da bu görevi yapmaktadır. Sadece belirli açılardan gelen ışınlar açıklıktan geçerek işlenir. Şekil 3.11 içinde gösterilmiş olan düzenek, sonucu iyi bir hassasiyetle vermektedir.



Şekil 3.11. Katmanölçer – Bir girişimölçeri andırırsa da herhangi bir girişim bu düzende (a) gerçekleşmez. Aynanın yapacağı açı eşleşimsiz kaynaktan gelen ışın kaynağını, incelenen yapıdan gelecek bilgiden ayırmak için uygun şekilde verilmelidir. Kaynağı oluşturan dalgalıboyu büyük olan ışınlar, mercekçe daha derine odaklanmıştır. Sonuçlar ise ışın kaynağına oranlıktan sonra bulunur. Hazırlanan bir aygıt için katman kalınlığı, tayftaki tepe yapan noktalar (b) alınarak bulunur.

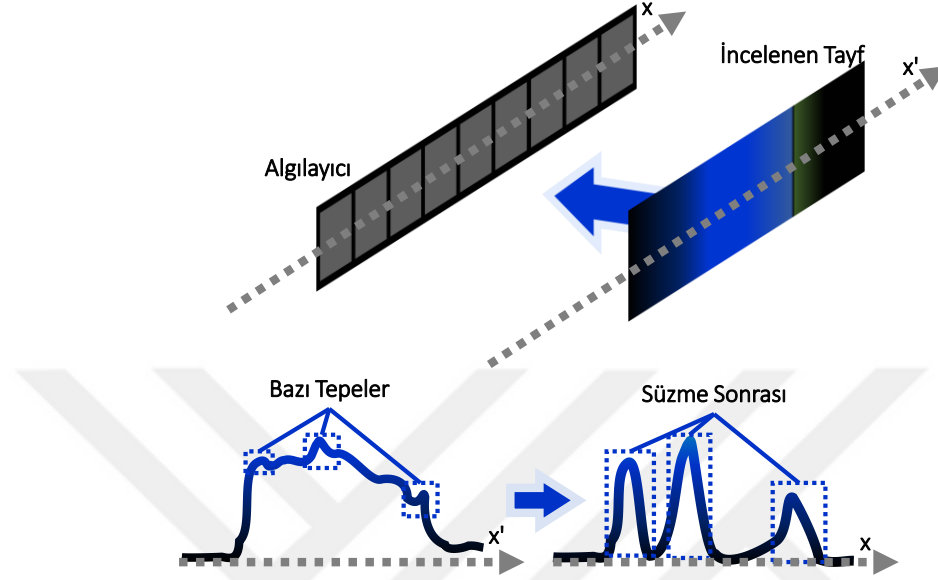
Önemli bir diğer nokta da ışın kaynağının tayfsal dağılımıdır. Bu dağılımın sürekli denetim altında olması gerekir, çünkü ışın kaynağının ısınması ve elektrik beslemesindeki anlık oynamalar nedeniyle tayf dağılımında değişimler yaşanabilir. Hatalı ölçüm yaşanmaması açısından, ışın kaynağının bir kısmı, ışın doğrultusuna göre hafif bir açı yapmış ayna yardımı ile kameraya yönlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ışın kaynağı dağılımıyla denkleştirilir (normalizasyon).

Mercek üreticisinin sunduğu tayfa bağlı odak kayması (renk kusuru) eğrilerinin yerine bu ölçüm de doğrudan alınabilir. Merceğe ait bu tayfsal kayma, ölçülen örneğin yerine bir ayna konulmasıyla elde edilebilir. Ek bölümde bir ölçüm düzeneği (**Şekil 0.1**) sunulmuştur. Hemen ayna önüne de dar açıklıklı bir süzgeç yerleştirilerek yansıma sonrası ıraksayacak ışınların ölçüme zarar vermesi de engellenir.

Fresnel yansıma eşitliğinin kullanımında önce, kaynaktan ne kadarlık bir ışık şiddetinin incelenen yüzeye ulaştığını bilmek isabetlidir. Eğer ışıma her yöne eşit miktarda olsaydı, yüzeye ulaşan ışık şiddeti oranı bulunabilirdi (mercek dizisi önündeki süzgeç açıklığının ışın kaynağı önündeki süzgeç açıklığına oranı). İşte bu nedenle, hemen ışık kaynağı sonrasına bir şiddet özdeşleştirici (difüzör) yerleştirilmiştir. Artık ışık kaynağı bir Lambert kaynak gibidir: Her yöne eş şiddette yayım sağlanmıştır. Odak uzunlukları çözümlemesi öncesinde, özdeşleştiricinin ardındaki süzgeç açıklığı ile mercekle dizisi önünde yer alan süzgeçteki açıklığın oranı bilinmelidir. Mercek dizisi öncesinde yer alan süzgecin bir açıklığı, sadece gelen ışının belli bir bölümünü iletirken, diğeri incelenen yüzeyden yansıyanları geçirir. Burada (önceden de belirtildiği gibi) ıraksamış ışınlar da engellenmiş olur.

Bu ölçüm düzeneği için farklı bir uygulama daha düşünülebilir. Dalgaboyu-değiştirilebilir LASER, eşleşimsiz ışın kaynağı yerine kullanılırsa, her bir arayüze karşılık gelen derinlikten, arayüzdeki iki malzemedeki saçılmalar gelir. İşte bu saçılmalar Raman-kayması olarak arayüzü oluşturan iki malzeme ile ilgili bilgi vermiş olur. Bu işlem her arayüz, yani derinlik için dalgaboyu değiştirilerek devam eder. Uyarıcı LASER saçılması kısmen süzgeç yardımıyla engellendiği için uyarıcı LASER şiddetinin, Raman-kaymasından gelen ışınları baskılaması da engellenir. Ayrıca elde edilen tayftaki gürültü olarak düşünülen LASER nedenli her açıdan (Lambert veya Gauss-vari bir yüzeyden yansıma-saçılma düşünülmüştür) gelen yüksek şiddetli saçılmalar, düşük uzay frekanslı olarak düşünülüp süzülebilir. Yani tayfölçerdeki algılayıcının (**Şekil 3.12** içinde verildiği

gibi bir doğrusal dizin olarak düşünülmüştür) her bir pikseli üzerine düşen ve Raman-kaymasından gelen ışınlara (tepecikler) eklenen bu saçılmalar (yayvan tepe), pikselden piksele ufak bir değişim (uzay frekansı) gösterecektir.



Şekil 3.12. Bir ölçüm düzeneği önerisi – Tayftaki malzemeye özgün tepeler pek seçilebilir olmasa da, bunlar uyarıcı LASER'den gelen yüksek şiddetli yansımalar ile toplanmış olarak algılayıcıya ulaşır. Yüksek şiddete sahip ve sol altta verilmiş yayvan tepe, düşük frekanslı olarak düşünülüp süzülürse, sivri tepeler belirginleşir. Her ne kadar tayf çizimi dalgaboyuna göre olsa da, burada bir uzaysal frekans ile ışın frekansı arasında karmaşa olmaması için bir boyut (x) mihverinde (eksen) düşünülmüştür. Pikseller arasındaki farklılık da bu boyuttaki değişimler yani uzaysal frekanstır ($1/x$). Elektronik veya yazılımsal süzgeç bu boyut frekansı uzayında işlem yapar.

4. UYGULAMA

Bir enerji uygulaması böyle bir çalışma için uygun olacaktır. Aslında hızlı bir diyet olarak kullanılabilirliği önceki aygıt çözümleri kısmında gösterilmişti. Ancak daha elle tutulur bir uygulama düşüncesinin yer aldığı bu bölümde, son zamanlarda epeyce farklı çalışmanın yapıldığı radyodalga enerji toplaması (hasat) seçilmiştir. Kısaca bu uygulama, çevremizdeki haberleşme amacıyla kullanılan elektromanyetik dalgaların, bir anten vasıtasıyla toplanması ve bu haberleşme işaretlerinin bir doğrultucudan geçirilerek doğru akım elde edilmesidir.

Eğer bir elektromanyetik yayıcı Lambert-vari bir yayım yapıyorsa, yani kaynaktan bir uzaklık kadar yarıçapı seçilmiş bir yarım kürenin yüzey alanına dik gelen (normal) her noktaya aynı şiddette enerji akışı varsa, çok büyük bir kayıp yaşanacağı rahatlıkla görülür. Şekildeki gibi bir yer durağından (baz istasyonu) yapılan yayım, onlarca metre ötedeki bir telefona ulaşırken, çok büyük oranda bir enerji kayıp olur. Her ne kadar yeni haberleşme düzeneklerinde devimsel (dinamik) yönlendirici antenler yer alacaksa da, şu an kullanılan yayım duraklarındaki kayıplar farklı amaçlar için kullanılabilir.

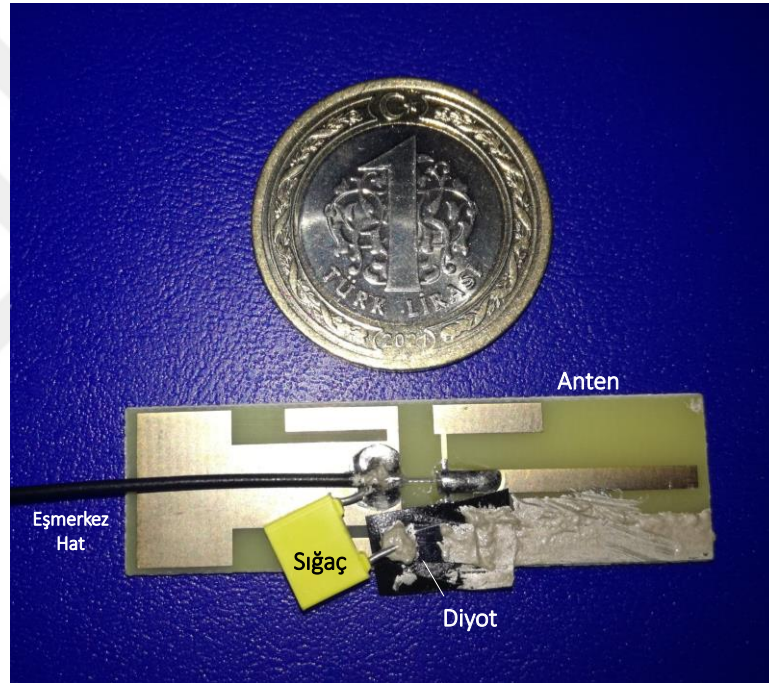
Elektrik şebekesinden uzakta düşük güçte çalışan aygıtlar için böyle bir enerji kaynağı oldukça elverişlidir. Örneğin bir tarlada toprak neminin ölçülmesi için kullanılan bir algılayıcı, böyle bir enerji kaynağını kullanabilir. Aslında böyle bir algılayıcı veriyi okuma ve iletme işlevlerini gerçekleştirmek için gereken gücü bir pilden alabilirdi. Ancak erişimin zor olduğu böyle bir uygulamada, düzenli olarak değiştirilmesi veya yüklenmesi gereken piller, maliyet ve zaman açısından oldukça külfetlidir. Kendi başına işlevlerini sürdürebilen bağımsız algılayıcılar daha etkindir ve veri toplama noktalarının sıklığı da arttırılabilir.

Nesnelerin ağı (internet of things – IoT) olarak adlandırılan böyle bir uygulama için işte bu kayıp elektromanyetik dalgalar kullanılabilir. Bahsedilen tarla uygulaması her ne kadar tek yönlü veri paylaşımı yapsa da veri toplama noktaları, uygulamaya bağlı olarak, kendi aralarında da bilgi paylaşımı yapabilir.

Çalışmada, elektromanyetik kaynak olarak evsel internet MoDem ve bir yüksek frekans işaret üretici kullanılmıştır. Bu işaretlerin genlik ve frekanslarının incelenmesi için bir işaret çözümleyici (ağ analizörü) devre kullanılmıştır.

Üstte açıklanmıştır; ancak tekrar etmek gerekebilir: Bu uygulama, neredeyse bulunduğumuz her konumda bulunan haberleşme için kullanılan MHz-GHz kuşağındaki elektromanyetik dalgaları yakalamak ve enerjiye çevirmek için yer almıştır. Yani güneş veya kozmik yayımları yakalamak iddiasında değildir. Elbette buralardan -az da olsa- ulaşan dalgalar da geri çevrilmez; bunlar da bu devreyle toplanabilir.

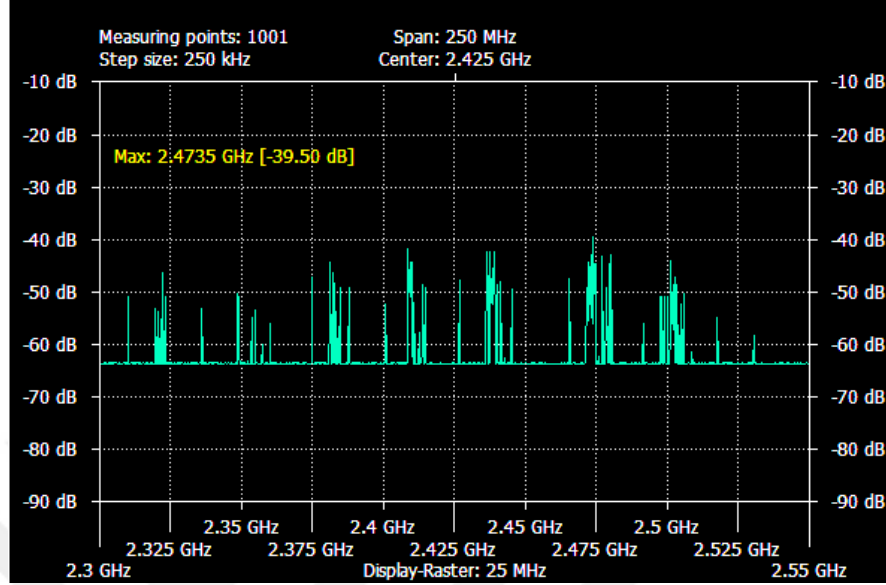
Kullanılan enerji toplama (hasat) devresi **Şekil 4.1** içinde verildiği gibi oldukça basittir: Yarı-dalga doğrultucu düzeni, yani tek bir diyot kullanılmış, bu çıkış ise bir sığaç üzerinde biriktirilmiştir. Aslında, bu bir tepe (maksimum) değer okuma devresidir. Ancak burada sığaç, yüklenen enerjiyi saklar ve yüke iletir.



Şekil 4.1. Örnek uygulama – Bu kötü gümüş-boya ile oluşturulmuş devre, elbette çok fazla kayıp verir. Eşmerkez hat (koaksiyel kablo) üstünden antenin topladığı güç ölçülürken, sığaç üzerinden de doğrultulmuş güç ölçümü yapılır. Yalıtım ve sabitleme amacıyla antenin üstüne yalıtıcı yapışkanla tutturulmuş olan diyot, ona ardışıl bağlı bir sığaçla (2.2 nF) antenin iki yakasını bağlar. Sığaç seçimi, devre sonunda beslenecek aygıt direncine göre seçilmelidir (Düşük akımlar için küçük sığaç).

Verim incelemesi yapıldığında oldukça başarılı bir sonuç elde edildiği görülür. Anten kaybının olmadığı düşünülerek, MoDem'den 5 m açık uzaklıkta **Şekil 4.2** içinde gösterilen işaret çözümleyici (sinyal analizörü) üzerinde okunan değer %78'i devrede yakalanmıştır. Bu gerçekten de iyi bir değerdir, çünkü burada kullanılmış olan hasat devresi oldukça kayıplıdır: Özdirenç eşlemesi yapılmamış (devre içinde yansımalar sonucu kayıplara neden olur), devre yolları uygun üretilmemiştir (yüksek dirençli bağlantıların gümüş pasta ile alınması daha büyük yansımalar oluşturur). Bir diğer kayıp

ise tersine arkma akımı nedeniyledir. Bunun olacağı, bölüm 1.3’de akım-gerilim ilişkisinden çıkarılmıştı.



Şekil 4.2. Antenin yakaladığı bağıl güç – 10 W yayım gücünden 1 mW yakalanmıştır. Bunun da 380 μW (0.6 V ve 0.63 mA) kadarı doğrultulabilmiştir.

Okuyucu, bu verimin ikiyle çarpılmış sonuç olduğuna dikkat etmelidir: Bu devrede tek diyot kullanıldığından sadece tek yönlü (pozitif) gelen akım doğrultulmuştur. Her ne kadar uygulama içinde kullanılan bu diyot, iyi bir verimle enerji yakalanmış olsa da, düşük frekansta bir Schottky diyot ulaşabilir. Ancak, bu aygıttaki arkma, düşük genlikli işaretlerin de yakalanmasına imkan verdiğiinden önemli bir kazanımdır. Ayrıca GHz bölgede sorun olmasa da Schottky diyotta yer alan yarıiletken çoğunluk taşıyıcı hareketlerinin yavaşlığı, THz bölgeye gidildikçe kullanımlarını kısıtlar.

5. SONUÇLAR VE GELECEĞE BAKIŞ

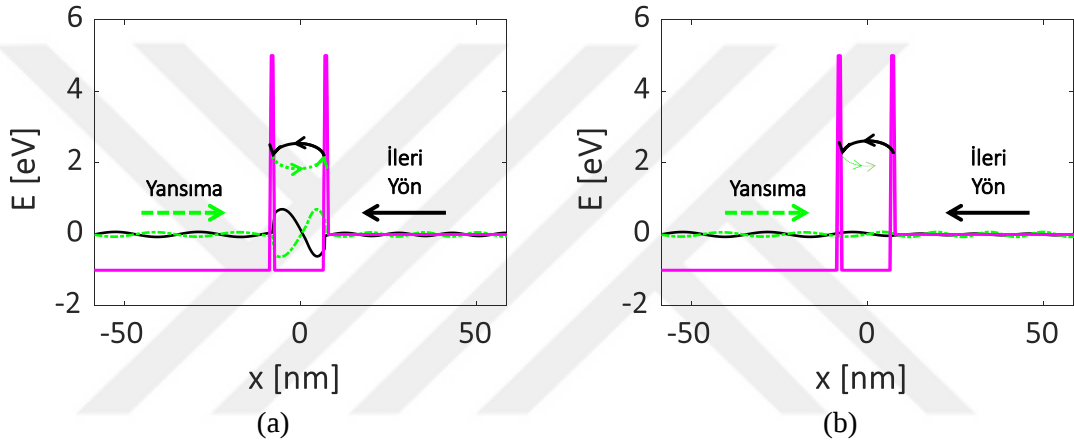
Bir enerji çevrimi düşüncesi olarak yüksek frekans aygıt kullanımı, maalesef, gelişim göstermemiştir. Üretim yöntemlerinin çıkardığı zorluk vardır; ancak en büyük sorun, aygıt tasarımında pek çok noktanın atlanmış olmasıdır. Hızlı elektronların momentum kaybına uğraması, arayüzdeki tuzakların taşıyıcıları tutması, dielektrik kırılış ve etkin bir optik eşleşim (foton-malzeme etkileşimi) olmaması bu aygıtların uygulamaya dökülememesi nedenlerindendir.

Örnek uygulama işte bu nedenle hazırlanmıştır: Momentum kaybı (hızlı elektronlardan duran dalga oluşturma) ve optik etkileşim anten vasıtasıyla çözülürken, arayüz durum sayısı araya gelen yalıtkan malzeme ile, dielektrik kırılma ise görece ufak alan ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$) bir diyot hazırlanmasıyla önlenmiştir. Arayüzün yarıiletken yüzeyi boyunca düzgün dağılımı, yüzeyi pürüzlü bir metal-yalıtkan-metal diyota göre, daha az arayüz durum sayısını vermiştir. Kaplama ile metal yüzeyinde oluşturulacak yalıtkan tabaka, metal yüzeyini bozarak arayüzün yayılabileceği yüzey alanını arttıracaktır; J. Simmons da çalışmasında (Simmons, 1971) bu duruma dolaylı olarak işaret etmiştir.

Elbette daha düşük bir diyot alanı, daha düşük akım geçişi demektir. Burada üretim sorunu yadsınamaz, çünkü pürüzsüz yekpare bir yalıtkan tabaka oluşturabilmek zordur. Ancak silisyum için nitrit bileşik oluşturmak gibi bir yol daha vardır. M. Moslehi'nin hazırladığı çalışmada (Moslehi, Fu, Sigmon, & Saraswat, 1985) plazma nitritleme ile elde edilen, yaklaşık 2 V/nm dielektrik kırılma değerli bir yalıtkan tabaka, 2 inç gibi geniş bir yüzey için sağlanmıştır. Bu da silisyum nitridin geniş bir alanda yalıtkan bir katman olarak kullanılabileceğini gösterir. Bu maliyet-etkin yöntem bugün elektronik endüstrisinde yüzey soyutlamada (pasifleştirme) kullanılmaktadır (Wilson, 2005). Eğer böyle bir aygıt, görece düşük gerilimlerde çalıştırılacaksa (2.5 nm yalıtkan kalınlığında 5 V), bilahare, uygulamaya dönüşebilecek bir çözüm elde edilmiş olur.

Plazmonik yapıların da bir elektromanyetik dalga eşleyici olarak uygun tasarımı uygulama alanlarını genişletir. Özellikle yüksek frekanslarda -görünür bölge de dahil- enerji çevrimi uygulamalarına yönelik yapılacak tasarımlarda aranan kolay üretilebilirliktir. Girişim litografisi, bu açıdan en uygun desenleyicidir. Kutup (polarizasyon) seçici olmayan ve geniş bir tayfi kapsayacak şekilde elektrot olarak da kullanılabilecek yapılar rahatlıkla hazırlanabilir.

Çalışmanın bir diğer kazanımı benzetim olmuştur. Sadece bir algılayıcı tasarımından ziyade kaynak oluşturmak amacıyla da bir aygıt tasarlanabilir. Ark diyotlarda üzerinde çalışılan bir diğer konu da THz kaynaklardır. Eğer uygun bir yankılama bölgesi yaratılabilirse, bu bölgeden yayım yapılabilir. Atıl engeller bir yansıtıcı olarak da görev gördüklerinden, iki atıl engel arasında oluşturulacak bir bölge, elbette, bir yankılama odası işlevini gösterebilir. **Şekil 5.1** içinde verilmiş yapıda ortada silisyum yer alırken, atıl engeller oksit tarafından oluşturulabilir. Bu bölgenin kısa tutulması, taşıyıcı hareketlerinin kayıplarını düşürür. Tabii ki, yayımın olacağı yankılanma frekansı da bundan etkilenecektir.

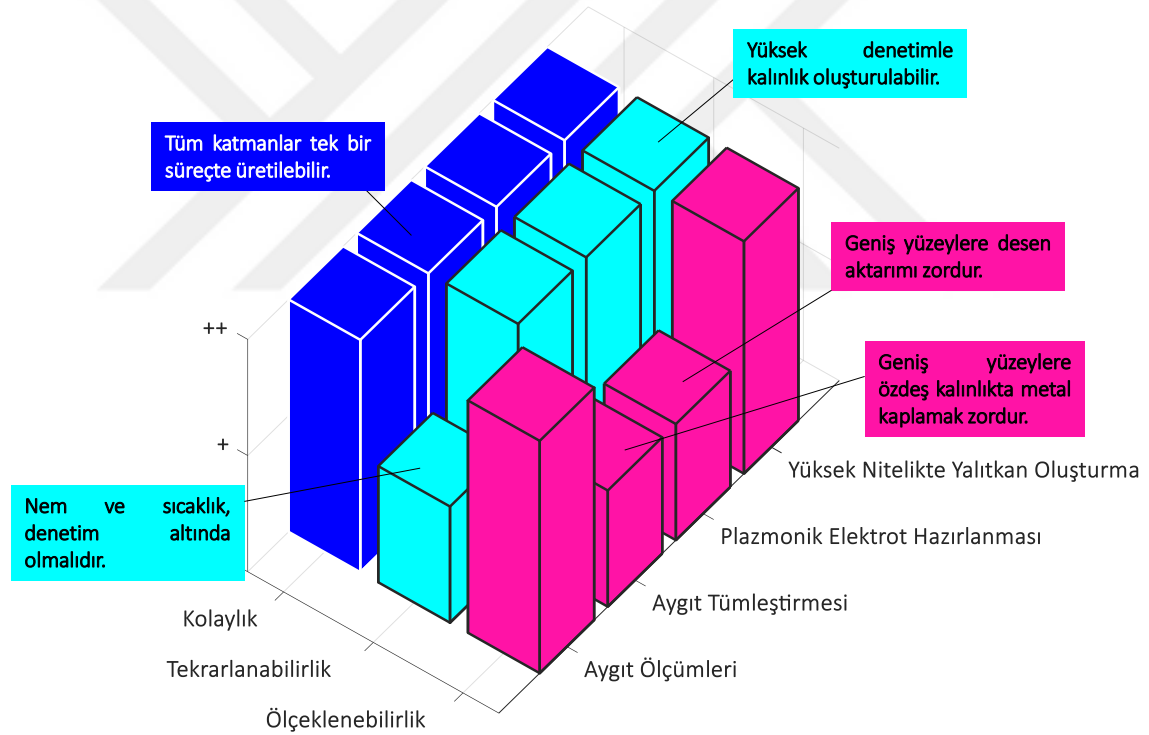


Şekil 5.1. Bir THz kaynak yapısı – Yansıma, atıl engeller arasında bir yankılama oluşturmuştur. Okuyucu, en soldaki uçtan gelen yansımanın nedenini sorabilir: Burası için bir sınır koşulu belirlendiğinden, buradan da bir yansıma benzetim sonucuna dahil olmuştur. Ancak duran dalga oluşumunun tamamen kuyu genişliği ve elektron dalgaboyuna (enerjisine) bağlı olduğu (yani sınır koşullarının etkisi olmadığı), sağdaki (b) sonuçta görülebilir. Solda (a) bir yankılanma oluşabilmiştir.

THz bölgede bir uygulama hazırlanamaması, çalışmanın eksiklerindendir. Elbette böyle bir aygıt için, belirtilen plazmonik yapılar kolaylıkla hazırlanabilirdi. Ancak, aygıtın daha iyi bir niteliğe ulaşması için, kayıp etkenlerinin tespiti ve tayini, sonraki uygulamalara bir önhazırlık oluşturmuştur. Binaenaleyh, plazmonik bir üst elektrot, yüksek dielektrik kırılma dayanımına sahip bir yalıtkan tabaka ve aşırı katkılanmış ince bir yarıiletken alt tabakadan teşekkül bir aygıt yapısı, sonraki çalışmaların omurgasıdır.

Tüm bu noktalar, üretim kaygıları indinde, **Şekil 5.2** içinde özetlenmiştir. Ölçeklenebilirlik konusunda sorunlar vardır: Geniş bir alanda girişim litografisi ve yine geniş yüzeylere özdeş kaplamaların yapılması, iki zorluktur (tek artı ile bu görece hafif zorluklar ifade edilmiştir). Aygıt ölçümleri karmaşık olmayan ve çoklu üretim hatlarına ayak uydurabilecek düzeneklerce yapılır. En önemlisi de bu ölçüm yöntemlerinin ölçünlemeye (kalibrasyon) pek ihtiyaç duymamasıdır. Ortam nem ve sıcaklığı sonuçlara

zarar verebilir, ama bunlar da çağdaş üretim hatlarında kolay denetim altına alınabilen değişkenlerdir. Üretim süreci ve kaygıları arasındaki ilişki bir özet olarak aşağıdaki çizelgede yer almıştır. Bu çizelgede yer alan çift artı, yapılabilirliği gösterirken, tek artı işareti, yaşanabilecek zorlukla beraber başarımın sağlanabileceğini verir. Böyle bir gösterim hazırlanırken, daha karmaşık yapılar kerteriz alınmıştır. İki uygun örnek, açıklayıcı olacaktır: Bir perovskit güneş hücresi için ölçüm tekrarlanabilirliği, bu çalışmanın göre daha güçtür (nem ve sıcaklıktan daha fazla etkilenir); girişim litografisi ile her kutba (polarizasyon) uygun bir elektrot hazırlamak, dönel kaplama ile daha geniş yüzeylere plazmonik nanoparçacıklarla örülü bir ağ hazırlamaktan daha zordur. Bu örneklerin denk geldiği “Aygıt Ölçümleri Tekrarlanabilirliği” ve “Plazmonik Elektrot Hazırlanmasının Ölçeklenebilirliği” işte bu nedenle, tek artı almıştır.



Şekil 5.2. Aygıtın üretilebilirliği – Aygıt, tüm üretim kaygıları göz önüne alındığında, yüksek başarımla üretilebilir gözükmemektedir. Ölçeklenebilirlik konusunda iyileştirmeler gerekecektir.

KAYNAKÇA

- Alshehri, A. H., Mistry, K., Nguyen, V. H., Ibrahim, K. H., Muñoz-Rojas, D., Yavuz, M., & Musselman, K. P. (2019, February). Metal-Insulator-Metal Diodes: Quantum-Tunneling Metal-Insulator-Metal Diodes Made by Rapid Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition (Adv. Funct. Mater. 7/2019). *Advanced Functional Materials*, 29, 1970042. doi:10.1002/adfm.201970042
- Ascher, U. M., & Petzold, L. R. (1998). *Computer methods for ordinary differential equations and differential-algebraic equations*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Aygun, G., Atanassova, E., Alacakir, A., Ozyuzer, L., & Turan, R. (2004, June). Oxidation of Si surface by a pulsed Nd : YAG laser. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 1569–1575. doi:10.1088/0022-3727/37/11/011
- Bardeen, J. (1947, May). Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact. *Physical Review*, 71, 717–727. doi:10.1103/PhysRev.71.717
- Bardeen, J. (1961, January). Tunnelling from a Many-Particle Point of View. *Physical Review Letters*, 6, 57–59. doi:10.1103/PhysRevLett.6.57
- Bechstedt, F., & Hübner, K. (1981, October). Mean free path of photoelectrons in silicon and silicon oxides. *Physica Status Solidi (a)*, 67, 517–526. doi:10.1002/pssa.2210670221
- Belkadi, A., Weerakkody, A., & Model, G. (2021, December). Demonstration of resonant tunneling effects in metal-double-insulator-metal (MI2M) diodes. *Nature Communications*, 12, 2925. doi:10.1038/s41467-021-23182-0
- Berglund, C. N. (1966, October). Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-13, 701–705. doi:10.1109/T-ED.1966.15827
- Bhattacharyya, A., Ranga, P., Saleh, M., Roy, S., Scarpulla, M. A., Lynn, K. G., & Krishnamoorthy, S. (2020). Schottky Barrier Height Engineering In β -Ga₂O₃ Using SiO₂ Interlayer Dielectric. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 8, 286–294. doi:10.1109/JEDS.2020.2974260

- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971, October). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589–1601. doi:10.1088/0022-3727/4/10/319
- Chalabi, H., Schoen, D., & Brongersma, M. L. (2014, March). Hot-Electron Photodetection with a Plasmonic Nanostripe Antenna. *Nano Letters*, 14, 1374–1380. doi:10.1021/nl4044373
- Cheng, Y. C. (1977, January). Electronic states at the silicon-silicon dioxide interface. *Progress in Surface Science*, 8, 181–218. doi:10.1016/0079-6816(77)90003-X
- Chiu, F.-C. (2014). A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1–18. doi:10.1155/2014/578168
- Choi, K., Yesilkoy, F., Ryu, G., Cho, S. H., Goldsman, N., Dagenais, M., & Peckerar, M. (2011, October). A Focused Asymmetric Metal–Insulator–Metal Tunneling Diode: Fabrication, DC Characteristics and RF Rectification Analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58, 3519–3528. doi:10.1109/ted.2011.2162414
- Cui, Y., Banin, U., Björk, M. T., & Alivisatos, A. P. (2005, July). Electrical Transport through a Single Nanoscale Semiconductor Branch Point. *Nano Letters*, 5, 1519–1523. doi:10.1021/nl051064g
- Cui, Z., He, Y., Tian, H., Khanaki, A., Xu, L., Shi, W., & Liu, J. (2020, March). Study of Direct Tunneling and Dielectric Breakdown in Molecular Beam Epitaxial Hexagonal Boron Nitride Monolayers Using Metal–Insulator–Metal Devices. *ACS Applied Electronic Materials*, 2, 747–755. doi:10.1021/acsaelm.9b00816
- Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Laflère, W. H., & Cardon, F. (1994, March). Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation. *Solid-State Electronics*, 37, 433–441. doi:10.1016/0038-1101(94)90009-4
- Dirac, P. (1926, October). On the theory of quantum mechanics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 112, 661–677. doi:10.1098/rspa.1926.0133

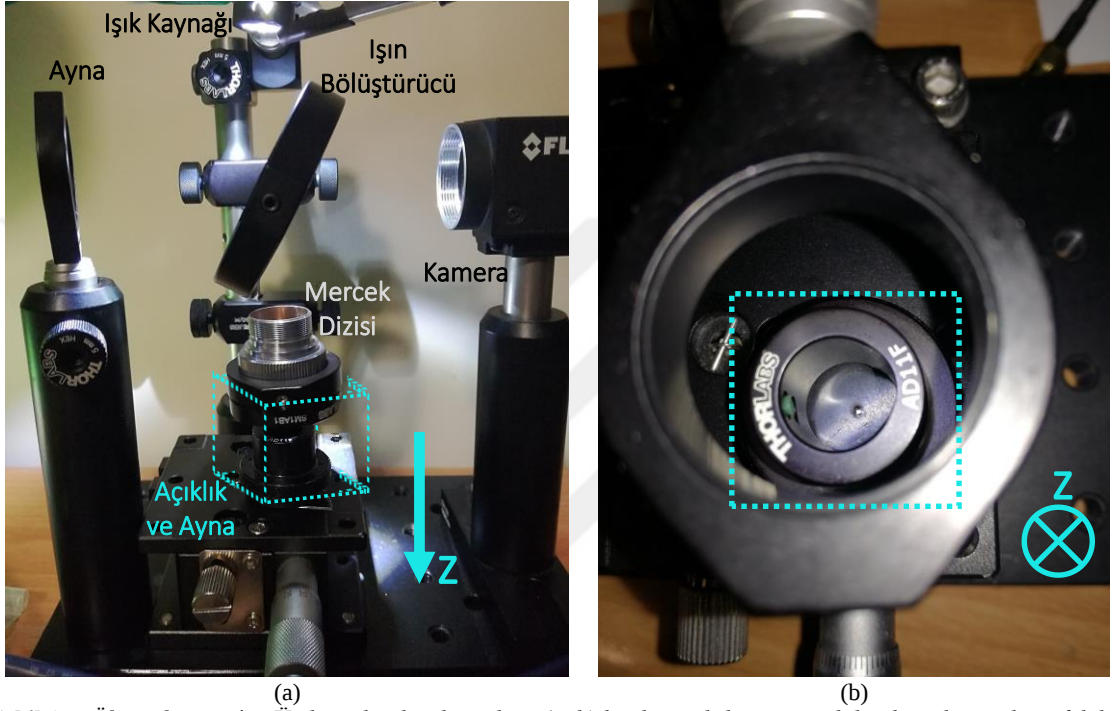
- Frenkel, J. (1938, October). On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors. *Physical Review*, 54, 647–648. doi:10.1103/PhysRev.54.647
- Griffiths, D. J. (1989). *Introduction to electrodynamics* (2nd ed b.). Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Grover, S., & Moddel, G. (2011, July). Applicability of Metal/Insulator/Metal (MIM) Diodes to Solar Rectennas. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1, 78–83. doi:10.1109/JPHOTOV.2011.2160489
- Harrell, W. R., & Frey, J. (1993, August). A unified explanation for gate current in n-MOS devices based on hot electrons and the Poole-Frenkel effect. *Microelectronic Engineering*, 22, 281–284. doi:10.1016/0167-9317(93)90174-4
- Harrison, W. A. (1961, July). Tunneling from an Independent-Particle Point of View. *Physical Review*, 123, 85–89. doi:10.1103/PhysRev.123.85
- Hecht, E. (2017). *Optics* (5 ed ed.). Boston: Pearson Education, Inc.
- Heine, V. (1965, June). Theory of Surface States. *Physical Review*, 138, A1689–A1696. doi:10.1103/PhysRev.138.A1689
- Heisenberg, W. (1950). *The physical principles of the quantum theory*. New York: Dover Publications.
- Islam, R., Shine, G., & Saraswat, K. C. (2014, November). Schottky barrier height reduction for holes by Fermi level depinning using metal/nickel oxide/silicon contacts. *Applied Physics Letters*, 105, 182103. doi:10.1063/1.4901193
- Kar, S., & Dahlke, W. E. (1972, February). Interface states in MOS structures with 20–40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si. *Solid-State Electronics*, 15, 221–237. doi:10.1016/0038-1101(72)90056-1
- Kerelsky, A., Nipane, A., Edelberg, D., Wang, D., Zhou, X., Motmaendadgar, A., . . . Pasupathy, A. (2017). Absence of a Band Gap at the Interface of a Metal and Highly Doped Monolayer MoS₂. *Nano Lett.*, 17, 10, 5962–5968.
- Knight, M. W., Wang, Y., Urban, A. S., Sobhani, A., Zheng, B. Y., Nordlander, P., & Halas, N. J. (2013, March). Embedding Plasmonic Nanostructure Diodes

- Enhances Hot Electron Emission. *Nano Letters*, 13, 1687–1692. doi:10.1021/nl400196z
- Kobayashi Asuha, H., Maida, O., Takahashi, M., & Iwasa, H. (2003, December). Nitric acid oxidation of Si to form ultrathin silicon dioxide layers with a low leakage current density. *Journal of Applied Physics*, 94, 7328–7335. doi:10.1063/1.1621720
- Kohl, C. D. (1983). Electrical properties of semiconductor surfaces. *Appl. Phys. A* 30, 127-145.
- Lang, D. V. (1974, July). Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 45, 3023–3032. doi:10.1063/1.1663719
- Li, W., & Valentine, J. G. (2017, January). Harvesting the loss: surface plasmon-based hot electron photodetection. *Nanophotonics*, 6, 177–191. doi:10.1515/nanoph-2015-0154
- Liu, Y., Chua, S.-J., Gao, S., Hu, W., & Guo, Y. (2021, September). Electroluminescence in plasmonic actuator based on Au/SiO₂/n-Si tunnel junction. *Nanophotonics*, 10, 3487–3496. doi:10.1515/nanoph-2021-0287
- McKelvey, J. P. (1982). *Solid state and semiconductor physics*. Malabar, Fla: Krieger Pub. Co.
- Monch, W. (1990, March). On the physics of metal-semiconductor interfaces. *Reports on Progress in Physics*, 53, 221–278. doi:10.1088/0034-4885/53/3/001
- Moslehi, M. M., Fu, C. Y., Sigmon, T. W., & Saraswat, K. C. (1985, September). Low-temperature direct nitridation of silicon in nitrogen plasma generated by microwave discharge. *Journal of Applied Physics*, 58, 2416–2419. doi:10.1063/1.335915
- Ohmi, T., Nakagawa, Y., Nakamura, M., Ohki, A., & Koyama, T. (1996, July). Formation of chromium oxide on 316L austenitic stainless steel. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 14, 2505–2510. doi:10.1116/1.580010

- Perfetti, P., Quaresima, C., Coluzza, C., & Fortunato, C. (1986). Dipole-Induced Changes of the Band Discontinuities at the SiO₂-Si Interface. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 57, 4.
- Simmons, J. G. (1971, May). Conduction in thin dielectric films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 613–657. doi:10.1088/0022-3727/4/5/202
- Tagliabue, G., Jermyn, A. S., Sundararaman, R., Welch, A. J., DuChene, J. S., Pala, R., . . . Atwater, H. A. (2018, August). Quantifying the role of surface plasmon excitation and hot carrier transport in plasmonic devices. *Nature Communications*, 9. doi:10.1038/s41467-018-05968-x
- Tang, H., Chen, C.-J., Huang, Z., Bright, J., Meng, G., Liu, R.-S., & Wu, N. (2020, June). Plasmonic hot electrons for sensing, photodetection, and solar energy applications: A perspective. *The Journal of Chemical Physics*, 152, 220901. doi:10.1063/5.0005334
- Tonooka, K., Shimokawa, K., & Nishimura, O. (2002, May). Properties of copper–aluminum oxide films prepared by solution methods. *Thin Solid Films*, 411, 129–133. doi:10.1016/S0040-6090(02)00201-8
- Wager, J. F., & Robertson, J. (2011). Metal-induced gap states modeling of metal-Ge contacts with and without a silicon nitride ultrathin interfacial layer. *Journal of Applied Physics*, 109, 094501. doi:10.1063/1.3581159
- Wilson, J. S. (Ed.). (2005). *Sensor technology handbook*. Amsterdam ; Boston: Elsevier.

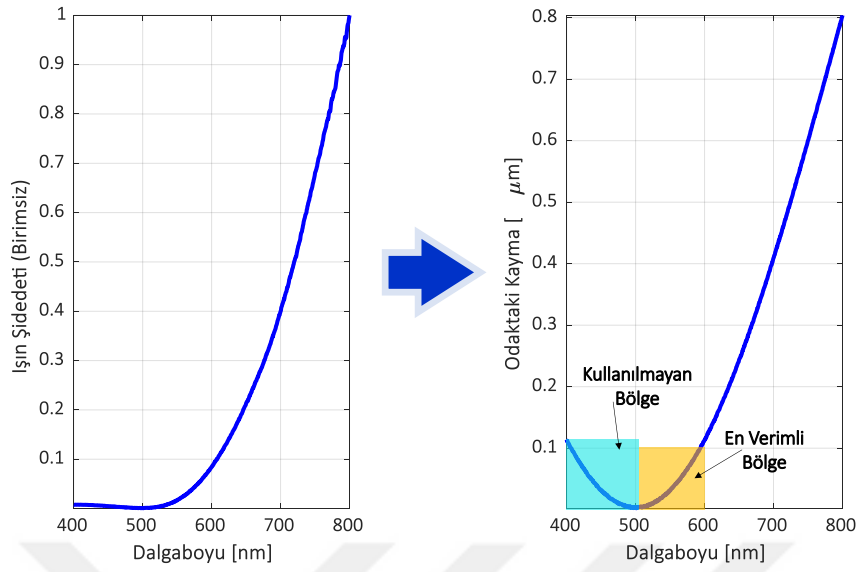
EK 1: MERCEK ÖLÇÜNLEMESİ

Çalışmada kullanılmış olan katmanölçerin ölçünlenmesi (kalibrasyon), düzenekte ufak bir değişiklik ile sağlanmıştır. Bu düzenekte amaç, merceğin renksel kusurlarının tayinidir. Eğer merceğin dalgaboyuna bağlı odak kaymaları bulunursa, çalışmada elde edilen tayftan katman kalınlığı çıkarılabilir. **Şekil 0.1**'de yer alan düzene ile mercek renk kusuru bulunmuştur.



Şekil 0.1. Ölçün düzeneği – Üç boyutlu olarak seçilmiş (a, b) kesik çizgili kısım önemlidir: burada en altta ufak bir açıklık (süzgeç) vardır ve bu açıklığın hemen altına ölçünleme için yerleştirilmiş aynadan gelen yansıma toplanarak, mercek renk kusuru elde edilir. Açıklığın (b) dar olmasının nedeni, dalgaboyuna bağlı odak farklılıkları nedeniyle ıraksayacak ışınların engellenmesidir. Açıklığın rahat görülebilmesi için (b) mercek dizisi kaldırılarak, üstten (ok yönünde) resim alınmıştır. Kamera önünde (görselde yer almasa da) bir kırınım ızgarası vardır.

Kamerada elde edilen tayf ışın kaynağınıninkinden farklılaşmıştır: tam odağa denk gelen dalgaboyunda toplanan ışın şiddeti en yüksek olurken, diğer dalgaboylarında düşüş olacaktır. **Şekil 0.2**'deki gibi, 100-kat büyütmeli bir mercek dizisi (Olympus RMS100X-O) için odakta toplanan tayf ile ışın kaynağına ait tayf (**Şekil 0.1.a**'daki ayna, ışın kaynağı tayfının aynı anda toplanabilmesi için açılı olarak yer almıştır) oranlanırsa, merceğe ait odak kayması bulunur.



Şekil 0.2. Merceğe ait odak kayması– Solda görülen kamera tarafından okunan ve açıklıktan yansıyan tayfa aittir. Bu tayf, ışın kaynağı tayfına oranlanırsa, renk kusuru çıkarılır. Renk kusuru az olan bir mercek, her zaman daha iyi sonuç verir: nanometre-altı ayrıntılar daha kusurlu bir merckte yakalanamaz. Odak kayması-dalgaboyu değişiminin en yavaş olduğu bölgede ayrıntılar, daha iyi yakalanır. Ölçüm sonuçlarında odak uzaklığı ve mercek kusuru arasında karışıklık yaşanmaması için, azalamayan veya artmayan (monotonik) bölgelerin kullanılması uygun olur.

ÖZGEÇMİŞ

Berker Hüsam, lisans derecesini 2009 yılında İstanbul Kültür Üniversitesi ve yüksek lisans derecesini 2011 yılında Bremen Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği bölümlerinden almıştır.

