

**BİR TERMOFOTOVOLTAİK (TPV) HÜCRE OLARAK
Al – ALÜMİNA – Cu DİYOTUNUN TASARLANMASI VE
KARAKTERİSTİKLERİNİN ORTAYA KONULMASI**

MERT ÇAVUŞ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR TERMOFOTOVOLTAİK (TPV) HÜCRE OLARAK Al – ALÜMİNA – Cu
DİYOTUNUN TASARLANMASI VE KARAKTERİSTİKLERİNİN
ORTAYA KONULMASI**

MERT ÇAVUŞ
0000-0002-7600-2489

Prof. Dr. Necdet COŞKUN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OPTİK VE FOTONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Mert ÇAVUŞ tarafından hazırlanan “Bir Termofotovoltaik (TPV) hücre olarak Al – Alumina – Cu Diyotunun Tasarlanması ve Karakteristiklerinin Ortaya Konulması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necdet COŞKUN
0000-0002-3933-3596

Başkan : Prof. Dr. Necdet COŞKUN İmza
0000-0002-3933-3596
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Kimya Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU İmza
0000-0002-9555-6903
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR İmza
0000-0002-4862-0490
Balıkesir Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
20/09/2021

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/09/2021

Mert ÇAVUŞ

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Necdet COŞKUN

20/09/2021

Mert ÇAVUŞ

20/09/2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR TERMOFOTOVOLTAİK (TPV) HÜCRE OLARAK Al – ALÜMİNA – Cu DİYOTUNUN TASARLANMASI VE KARAKTERİSTİKLERİNİN ORTAYA KONULMASI

Mert ÇAVUŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necdet COŞKUN

Enerjiye duyulan ihtiyaç her gün biraz daha artmaktadır. Artan insan nüfusunun bu ihtiyacını karşılamak için çevreci yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren termofotovoltaik hücrelerdir. Bu hücrelerin genel olarak enerji bant boşlukları kızılötesi bölgededir. Çoğunlukla Silikon, InAs, InGaAs, GaSb ve GaInAsSb kullanılarak üretilirler. Bu yapılardan farklı olarak Metal – Metal Oksit – Metal katmanlarından oluşan Al – Alümina – Cu diyotun TPV olarak kullanılabilirliği gösterildi.

Kızılötesi bölgede yayılan radyasyonun Al – Alümina – Cu diyotu tarafından soğurulması ile tünelleme ve Seebeck mekanizmaları sayesinde Al – Cu kontakları arasında bir gerilim oluştuğu gözlemlendi. 296,8 – 415 K arasında sıcaklık arttıkça daha da enerjisi yüksek olan fotonların bu diyot tarafından soğurulduğu ve bu diyotun gücünün de buna bağlı olarak arttığı ortaya konuldu. Yapılan ölçümler sonucunda 18.75 cm² yüzey alanı bulunan bu diyot çipinin gücü oda sıcaklığında 7.831 mW ve 415 K sıcaklıkta 11.56 mW olarak belirlendi. Geleneksel termofotovoltaiklerden çok daha ucuz ve üretimi çok daha kolay olan bu tip diyotlar sayesinde ortama yayılan kızılötesi bölgedeki radyasyonun yakalanıp elektrik enerjisine çevrilmesi ile enerjinin daha verimli halde kullanılması sağlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: TPV Diyot, Alüminyum, Alümina, Bakır ve Enerji Dönüşümü
2021, viii + 54 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF AN Al – ALUMINA – Cu DIODE AS
A THERMOPHOTOVOLTAIC (TPV) CELL

Mert ÇAVUŞ

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Optics and Photonics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necdet COŞKUN

The need for energy is increasing every day. Environmental methods are being researched to meet this need of the increasing human population. One of these methods is thermophotovoltaic cells that convert heat energy into electrical energy. Generally, the energy band gaps of these cells are in the infrared region. They are mostly manufactured using Silicon, InAs, InGaAs, GaSb and GaInAsSb. Unlike these structures, the usability of Al - Alumina - Cu diode, which consists of Metal - Metal Oxide - Metal layers, as TPV has been demonstrated.

It was observed that the radiation in the infrared region absorbed by the Al – Alumina – Cu diode provides potential difference formation between the Al – Cu contacts thanks to tunneling and Seebeck mechanisms. It was found that the photons, which are more energy as the temperature increased, were absorbed by this diode and the power of this diode increased accordingly in range of 296,8 to 415 *K*. As a result of measurements, the power of this diode chip with a surface area of 18.75 cm² was determined as 7.831 *mW* at room temperature and 11.56 *mW* at 415 *K* temperature. With these types of diodes which are much cheaper and much easier to produce than conventional thermophotovoltaics, the energy will be used more efficiently by capturing the radiation and converting it into electrical energy in the infrared region emitted from the environment.

Key words: TPV Diode, Aluminium, Alumina, Copper and Energy Conversion
2021, viii + 54 pages.

TEŐEKKÖR

Çalıőmamın baőlangıcından bitiőine dek; tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda engin bilgi ve tecrübesi ile her zaman bana destek olan ve bilimsel temeller ışığında her daim yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Necdet COŞKUN'a, Optik ve Fotonik Mühendisliği'nde derslerimize giren hocalarımız, Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na ve emekli Prof. Dr. Atilla AYDINLI'ya verdikleri kaliteli eğitim ve destekleri için teşekkür ederim.

Her türlü maddi ve manevi yardımını esirgemedikleri için sevgili aileme de tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mert ÇAVUŞ
20/09/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Dalganın Yayılması ve Maxwell Eşitlikleri.....	7
2.2. Elektromanyetik Spektrum	8
2.3. Yarıiletken Malzemeler.....	10
2.4. Al – Al ₂ O ₃ – Cu Diyotu'nun Çalışma Biçimi	15
2.5. Geleneksel Termofotovoltaik Yapıların Çalışma Prensibi	21
2.5.1. Isı kaynağı.....	24
2.5.2. Optik Sistem.....	25
2.6. Fotovoltaik Hücre Karakteristikleri	25
2.6.1. Akım- Gerilim (I-V) Karakteristikleri	26
2.6.2. Dolum Faktörü (FF).....	27
2.6.3. Güç Dönüşümü Verimliliği.....	27
2.6.4. Kuantum Verimi ve Spektral Tepki	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1. Diyotun Üretim Aşaması	28
3.2. Ölçüm Sisteminin Blok Şeması	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	34
5. SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR	47
EKLER.....	50
EK 1 296,8 – 415 K Sıcaklık Bandı için Al – Alümina – Cu TPV Diyot Karakteristiklerini Veren Aşağıdaki Fonksiyonlara Oturtulmuş Denklemler ve Denklemlerdeki Katsayı Değerleri.....	51
EK 2 Oda Sıcaklığında Al – Al ₂ O ₃ – Cu Diyotunun Ölçüm Düzenegi.....	52
EK 3 Al – Al ₂ O ₃ – Cu Diyotunun Kontaklarının Birbirinden Ayrılma Durumu ve Alüminyum Tabakasındaki Çeşitli Kalınlıktaki Alümina Yüzeyi.....	53
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
V_{oc}	Açık devre gerilimi
I	Akım
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
k	Boltzmann sabiti
λ	Dalga boyu
x	Değişken
FF	Dolum faktörü
e	Elektron yükü
A	eV/K cinsinden Varshni Parameteresi
I_L	Fotoakım
I_{ph}	Fotoakım
ν	Frekans
V	Gerilim
c	Işık hızı
η	İdeallik faktörü
B	Kelvin cinsinden Varshni Parametresi
K	Kelvin Skalası'ndaki sıcaklık
I_{sc}	Kısa devre akımı
h	Planck sabiti
$^{\circ}C$	Santigrat derece
T	Sıcaklık
ΔT	Sıcaklık farkı
$E_g(0)$	Sıfır Kelvin sıcaklığındaki yasak bant aralık değeri
I_0	Ters doyum akımı
$E_g(T)$	T Kelvin sıcaklığındaki yasak bant aralık değeri
E_g	Yasak bant aralığı
q	Yük

Kısaltmalar	Açıklama
I-V	Akım-Gerilim
PV	Fotovoltaik
TPV	Termofotovoltaik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Bir doğrultucu diyotlu anten sistemini oluşturan elemanlar.....	3
Şekil 1.2.	Aynı kişinin görünebilir bölge (a) ve kızılötesi bölgeden (b) alınan resimleri.....	5
Şekil 2.1.	Elektromanyetik spektrumda dalga boyu, frekans ve enerji arasındaki dönüşüm.....	9
Şekil 2.2.	Yalıtkan, yarıiletken ve metal bant yapıları.....	10
Şekil 2.3.	Katkısız, n- tipi ve p- tipi yarıiletkenlerde iletkenlik veya değerlik bandının arasındaki bölgede yer alan Fermi enerji seviyesinin konumu.....	14
Şekil 2.4.	Bir p-n eklem diyotu (solda) ve bir diyot sembolü (sağda).....	14
Şekil 2.5.	MIM diyotundaki bir elektronun bir taraftan diğer tarafa; metalden metale tünel açarak geçişi.....	15
Şekil 2.6.	Metal ve yalıtkanın birbirlerinden ayrı konumda bulunması (a) metal ve yalıtkanın birbirleri ile temas ettiği konumda bulunması (b)	16
Şekil 2.7.	Al – Alümina – Cu diyotunun enerji bantları ve bariyer yükseklikleri....	17
Şekil 2.8.	MOM diyot yapısında foton destekli tünelleme olayı.....	18
Şekil 2.9.	MOM diyot yapısında Metal-1'e gelen foton sayesinde enerjilenen elektronların bariyeri aşabilme ihtimali vardır.....	18
Şekil 2.10.	MOM diyot yapısında uyarılan elektronların bariyeri aşmak için kuvvetli bir enerjiye sahip olmasıyla tünelleyen elektronların bulunması durumu.....	19
Şekil 2.11.	MOM diyot yapısında termal destekli tünelleme.....	19
Şekil 2.12.	Aynı metalin bir ucunun ısıtılması ve diğer ucunda soğutulması ile oluşan ΔT sıcaklık gradyanı altında yük taşıyıcılarının difüzyon yolu ile hareketi.....	20
Şekil 2.13.	Bir termofotovoltaik sistemde enerji dönüşümünün temel bileşenleri....	22
Şekil 2.14.	Farklı katkılanmış yarıiletkenlerin bant yapısı.....	22
Şekil 2.15.	n- tipi ve p- tipi bölgelerin birleşmesi sonucu oluşan bant.....	23
Şekil 2.16.	Bir p-n eklem diyotun nötr n, nötr p ve tükenim bölgeleri.....	24
Şekil 2.17.	İdeal bir güneş pili hücresinin akım gerilim eğrisi.....	27
Şekil 3.1.	Maskeleme bandı yapıştırılmış alüminyum metali.....	28
Şekil 3.2.	Ayraç yapıştırılan alüminyumun 1 ml'lik çözeltide tepkimeye girmesi....	29
Şekil 3.3.	Al – Alümina – Cu diyot çipinin CST Studio kullanılarak üç boyutlu uzaydaki görüntüsü ve diyotu oluşturan katmanların boyutları.....	30
Şekil 3.4.	TPV diyot çipinin alüminyum (solda) ve bakır (sağda) yüzeylerinden görünümü.....	31
Şekil 3.5.	Kapağı kapalı fırın.....	32
Şekil 3.6.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun karakteristiklerinin ölçüldüğü düzenek.....	33
Şekil 4.1.	313 K'de Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotundan elde edilen I-V verisi.....	34

Şekil 4.2.	323 K’de Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotundan elde edilen I-V verisi.....	36
Şekil 4.3.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun açık devre gerilimi – sıcaklık ilişkisi.....	37
Şekil 4.4.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun güç – sıcaklık ilişkisi.....	38
Şekil 4.5.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun güç yoğunluğu – sıcaklık ilişkisi.....	39
Şekil 4.6.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun maksimum gerilim – sıcaklık ilişkisi.....	40
Şekil 4.7.	Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun açık devre gerilimi – maksimum gerilim ilişkisi.....	41
Şekil 4.8.	Bir MIM diyotundaki denge anındaki enerji bant yapısı (a), pozitif besleme durumundaki bant yapısı (b), negatif besleme durumundaki enerji bant yapısı (c).....	42
Şekil 4.9.	297 K’de Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun akım – gerilim karakteristiği.....	42
Şekil 4.10.	309,8 K sıcaklık değeri için MATLAB’de bir I – V çizim uygulaması....	43
Şekil 4.11.	296,8 – 353 K sıcaklık bandında yapılan ölçümler sonucu aynı grafik üzerinde verilen Akım – Gerilim eğrileri.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Çeşitli kızılötesi detektör tipleri ve bunların bazı parametreleri.....	4
Çizelge 2.1. Elektromanyetik spektrumda elektromanyetik dalgaların bölgelerinin aralık değerleri.....	8
Çizelge 2.2. Periyodik cetvelde yer alan bileşik veya tekil olarak yarıiletken özellik gösteren elementler.....	11
Çizelge 2.3. İkili bileşik yarıiletkenleri.....	11
Çizelge 2.4. Üçlü bileşik yarıiletkenleri	12
Çizelge 2.5. Dörtlü bileşik yarıiletkenleri.....	12
Çizelge 2.6. Bazı yarıiletkenlerin sıcaklığa göre eV cinsinden yasak bant aralıkları.....	13
Çizelge 4.1. Çeşitli sıcaklık değerlerinde temel parametreler ve değerleri.....	35
Çizelge 4.2. Al – Al ₂ O ₃ – Cu diyotunun karakteristikleri.....	36

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının günden güne daha hızlı tüketildiği günümüzde enerjiye duyulan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Enerjiye duyulan ihtiyacın artışı, enerjiyi daha verimli ve enerjinin çevreci bir biçimde kullanılmasını gerektirmektedir. Buna çözüm olarak sunulan yöntemlerden birisi de, ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen termofotovoltaik (TPV) hücrelerdir. Hem ısı ve hem de ışık kaynağı olarak yararlandığımız Güneş'ten fotovoltaik (PV) hücreler yardımıyla da elektrik enerjisi elde edilebilir. Güneş pilleri, elektromanyetik spektrumda görünür bölgede çalışırken termofotovoltaik hücreler ise genellikle yakın kızılötesi bölgede çalışırlar (Coutts 2001).

TPV sistemlerinde, ışımayı dönüştürme şekli temelde PV cihazlar için aynı olmasına rağmen PV cihazlar ile arasında önemli farklılıklar vardır. Fotovoltaik sistemlerde radyasyon kaynağı Dünya'dan 150×10^6 km uzaklıkta bulunan yaklaşık 6000 K sıcaklığında siyah cisim ışıma kaynağı Güneş iken TPV sistemlerinde genellikle 1100 ile 1800 K arasında çalışan ısı kaynakları kullanılır (Mattaralo 2007). PV sistemlerinde diyot ile kaynak arası mesafeler çok uzunken, TPV hücrelerinde ısı ve ışıma kaynağı arasındaki mesafe santimetre mertebesindedir. TPV sistemler uzun süre kararlı olarak çalışmalarını sürdürebilirken, Güneş'in Dünya'ya göre konumu, mevsimsel hatta günlük değişimler, atmosferik soğurulma ve hava durumu gibi etkiler PV hücrenin parametrelerini etkiler. PV hücrelerinde Si ve GaAs gibi yasak bant genişliği 1 eV'tan büyük yarıiletkenler kullanılırken TPV'lerde dar bantlı yarıiletkenler kullanılmaktadır. PV sistemlerde yaygın olarak kullanılan Si hücrelerin yasak bant aralığı 1,1 eV'tur. (Piprek 2003, Mattaralo 2007, Efendi 2017)

Mayıs 1956' da Dr. Henry Kolm bir silisyum güneş pili ile Coleman lambasından gelen ışımadan faydalanarak; güneş pilinden elektrik çıkışı almasıyla ilk TPV etkiyi gözlemlemiş oldu (Chubb 2007). 1960'lı yıllara gelindiğinde, Savunma Sanayii'nde taşınabilir, sessiz ve hafif güç kaynaklarına duyulan ihtiyaçtan dolayı TPV' e duyulan ilgi artmış ve TPV gelişimi hızlanmıştır (Efendi 2017). 1960'ların ve 1970'lerin TPV'leri, silikon ($E_g = 1,12$ eV) ve germanyum ($E_g = 0,66$ eV) TPV hücreleri ile sınırlıydı. 1980'lere gelindiğinde GaSb ($E_g = 0,72$), $In_xGa_{(1-x)}As_x$ gibi verimli yeni hücreler ortaya çıkmıştır

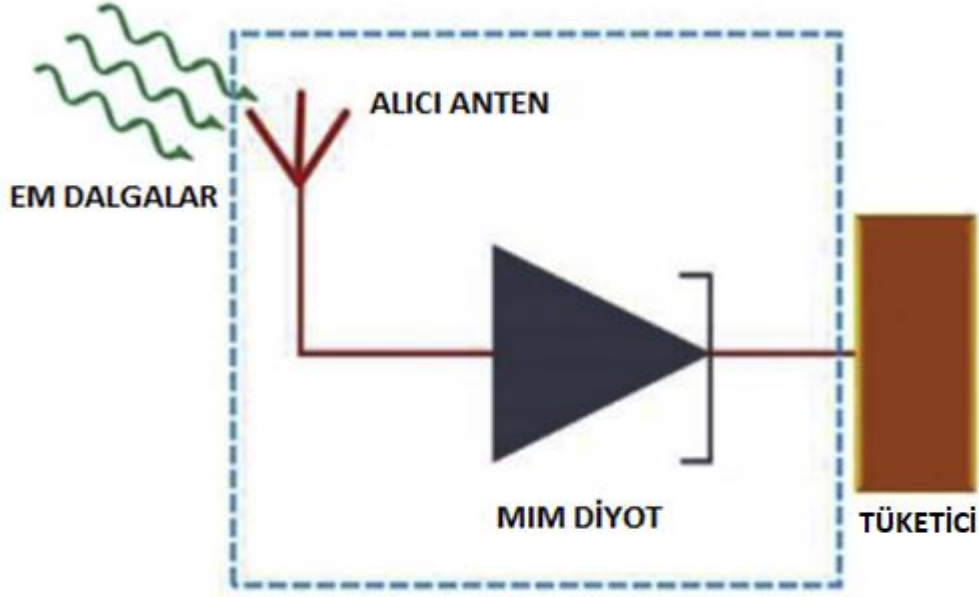
(Chubb 2007). 2000'li yıllardan itibaren de mikro-fabrikasyon yöntemiyle üretilen TPV sistem çalışmaları hızlanarak artmıştır (Efendi 2017).

TPV hücreler, fotodiyotların ve p-n eklem güneş pillerinin daha düşük bant aralıklı sürümüdür. TPV hücreler, kendi ısısı sayesinde ışıma yapan bir kaynaktan gelen radyasyonu emerek onu elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fabrikalarda üretim, nükleer santrallerde atom parçalama işlemleri sonucu oluşan atık ısı enerjisini, uygulanan TPV (elektromanyetik spektrum'da özellikle kızılötesi bölgede çalışan) hücrelere bağlı olarak bir kısmının geri kazanılması mümkündür (Efendi 2017). Isıya ve ışığın dalga boyuna duyarlı bu hücrelerin gelişimiyle birlikte sadece üretim hatlarında değil, Savunma Sanayii'nde ve Tıp alanı'nda ilerleme kaydedilecektir.

Bu çalışmada alüminyum (Al), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bakır (Cu) üçlüsünden oluşturulmuş TPV hücrenin diyot karakteristikleri araştırıldı. Al'un bir yüzeyine oluşturulan Al_2O_3 bileşiği ile hücrenin anot kısmı meydana gelmiştir. Cu ise bu hücrede katot görevi görmektedir.

Al – Al_2O_3 – Cu diyotu, Metal – Metal Oksit – Metal bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu yapıların genel olarak isimlendirilmesi MOM veya MIM (Metal – Insulator (Yalıtkan) – Metal) şeklindedir. MIM diyotlarının uygulama alanları genel olarak yüksek frekanslı doğrultucular, kızılötesi algılama; kızılötesi detektörler ve fotovoltaik enerji dönüşümü için anten bağlantılı diyotlardır (Moddel ve ark. 2013).

Enerji kaynaklarından doğaya yayılan enerjinin toplanması çalışmaları temiz bir enerji üretimi için umut vericidir. Geleneksel fotovoltaikler görünür spektrumda (400 – 750 nm) yani kızılötesi (IR) radyasyonu içermeyen bir aralıkta çalışırlar. IR enerjisinin toplanması için Rectenna (doğrultucu diyotlu anten) sistemleri kurulabilmektedir. Bir doğrultucu diyotlu anten sistemini ifade eden görsel şekil 1.1'de verilmiştir (Moddel ve ark. 2013).



Şekil 1.1. Bir doğrultucu diyotlu anten sistemini oluşturan elemanlar (Moddel ve ark. 2013)

Burada MIM diyot, gelen sinyalin kullanılması amacıyla doğru akım (*DC*) çıkışına dönüştüren doğrultucu diyotlu anten sisteminin önemli bileşenlerinden biridir (Bhatt ve ark. 2019).

Hayvanların ve insanların yaşadığı ortamda yani 300 K ve civarında yüksek hızlı algılama yapabilen bu tip cihazlar, uzun dalga- kızılötesinde (*LWIR*) soğutma olmadan oda sıcaklığında 8 ila $14\ \mu\text{m}$ arasındaki bantta geliştirilir (Chagaan ve ark. 2010). Bir doğrultucu diyotlu anten sisteminde gelen fotonlar aynı enerjideki yüzey plazmonlarına dönüştürülür, anten ısınmaz (Moddel ve ark. 2013). Çizelge 1.1’de çeşitli kızılötesi detektörler ve detektör parametreleri verildi. Kızılötesi bölgede çalışan detektörler, nesneden yayılan termal enerjinin yakalanması ile algılama yapan sistemlerdir. Kızılötesi bölgede çalışan antenler çeşitli kızılötesi detektörlere bağlanabilmektedir ve bunlara mikrobolometreler, MIM ve Shottky diyotlar örnek olarak verilebilir (Mohammadi ve ark. 2020).

Çizelge 1.1. Çeşitli kızılötesi detektör tipleri ve bunların bazı parametreleri (Chagaan ve ark 2010)

Detektör Tipi	Alan [mm^2]	Çalışma Sıcaklığı [K]	Tepki Süresi [ms]
HgCdTe	(yaklaşık) 0,25	77	10^{-3}
Piroelektrik	0,78-6,36	300	10^{-4}
Termistör	0,25-25	300	5
Termopil	(yaklaşık) 5	208-343	5
Bolometre (Ge)	(yaklaşık) 5	0,3 – 2,0	0,5
Anten bağlantılı bolometre	0,0001	300	10^{-4}
Anten bağlantılı MOM diyot	0,0001	300	10^{-10}

Çizelge 1.1 incelendiğinde hem oda sıcaklığında çalışabilen hem de yüzey alanı diğer detektörlerden küçük olan anten bağlantılı MOM diyotların en hızlı tepkiyi verdikleri yapılan araştırmalar sonucu ortaya konulmuştur.

Doğrultucu diyotlu anten sistemleri her ne kadar termofotovoltaik sistemler gibi IR bölgesinde çalışıyorlar ise de, TPV sistemlerinden farklı olarak daha yüksek frekans değerlerinde daha yüksek verimle çalışabilmektedirler. Ayrıca, doğrultucu diyotlu anten sistemlerinin üretimi geleneksel TPV sistemlerin üretiminden daha kolaydır. Her ikisi de kızılötesi radyasyonu soğurarak elektrik enerjisi üretirler (Moddel ve ark. 2013).

Kızılötesi frekanslarda çalışan algılama sistemleri ile görünebilir bölgede gözümüz ile görebildiğimiz nesnelerin dışındaki diğer nesnelerin görülmesi sağlanabilir. Bu tespit Savunma Sanayii açısından epey önem taşımaktadır. Ayrıca, bazı hastalıkların tespitinde; vücut sıcaklığının ölçülmesinde bu kızılötesi frekanslarda algılama yapan sistemlerden yararlanır. Şekil 1.2’de aynı resmin, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde ve kızılötesi bölgesinden alınmış halleri gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Aynı kişinin görünür bölge (a) ve kızılötesi bölgeden (b) alınan resimleri (Chagaan ve ark 2010)

İnce film materyali olarak alümina (Al_2O_3) polimorf ve amorf gibi birbirinden farklı fazlarda bulunabilir ve anodizasyon, plazma anodizasyonu, kimyasal buhar birikimi, moleküler ışın epitaksi, doğru akım (DC) magnetron, radyo frekansı (RF) gibi tekniklerle üretilmektedir. Alüminanın çok fazla kullanım alanı bulunmaktadır; örneğin, mikro-elektronik aygıtlarda, izolatörlerde, kapasitörlerde ve optik kaplamalarda kullanılmaktadır (Ross 1996, Houska ve ark. 2012). Literatürde, Al_2O_3 bileşiğinin televizyon teknolojisinde önemli bir yeri olan ışık yayan diyot yapımında da kullanılabilmekte olduğu görüldü. Al_2O_3 , son yıllarda yapılan çalışmalarda, ince bir tabaka halinde, bir organik film tabakalı ışık yayan diyot (OLED) ve kuvantum noktalı ışık yayan diyot (QLED) yapımında kullanıldığı gözlemlendi (Kim ve ark. 2007, Ji ve ark 2018).

Literatür incelendiğinde Al ve Al_2O_3 tabakalarının birlikte bulunduğu diyot araştırmalarının literatürde yer aldığı görüldü: “Al- Al_2O_3 -Ti/Au (Hu ve ark 2014), Al- Al_2O_3 -Au (Hickmott 1999, 2005, 2009), Al/ Al_2O_3 /n-Si (Gullu ve ark. 2019), Al- Al_2O_3 -Ag (Hickmott 2015, 2017, 2019 ve Bhatt ve ark. 2019).” Bu çalışmalarda Hickmott, Hu ve ark. bu diyotların elektron emisyon karakteristiklerini, Gullu ve ark. oluşturdukları bu Schottky diyodun akım-gerilim karakteristiklerini, Bhatt ve ark ise Al- Al_2O_3 -Ag diyotunun ortamdaki yayılmakta olan enerjinin toplama çalışmaları gerçekleştirdiler. Bu çalışmalardan farklı olarak bir MOM diyotu oluşturan çeşitli metal ve metal oksit tabakalarının bulunduğu çalışmalara da literatürde yer aldığı görüldü ve bu türden diyotların nanometrik boyuttaki kızılötesi detektör sistemlerinde doğrultucu diyotlu

antenler ile kullanıldıklarına ilişkin çalışmalar literatürde yer almıştır (Bean ve ark. 2009, Slovic ve ark. 2010) Bu tez çalışması kapsamında Al – Alümina – Cu diyotun TPV olarak tasarlanması ve karakteristiklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

TPV sistemleri halen gelişme sürecinde bulunmaktadır. Bu alanda yapılacak olan çalışmalarla, ısıdaki hafif değişimleri tespit edebilen TPV sistemleri ile birlikte bu teknoloji evlerimize kadar girecek, gelecekte ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaya başlanacaktır.

Tez, Giriş bölümü ilk bölüm olmak üzere beş kısımdan oluşmaktadır. Kuramsal Temeller bölümünde tez başlığı ile uyumlu literatür araştırması sonucu elde edilen bilgiler yer almaktadır. Bu bölümde dalga yayılması ve Maxwell eşitliklerinden, elektromanyetik spektrumdan, yarıiletkenlerden, yarıiletken bazlı olan geleneksel TPV'lerin çalışma biçiminden ve TPV yapıların bileşenlerinden, MOM diyotlarından, diyotunu oluşturan enerji bantlarından ve bu tip diyotlardaki Seebeck mekanizması ve elektron tünelleme akımlarından bahsedildi ve Al – Alümina – Cu diyotunun enerji diagramı verildi. Materyal ve Yöntem kısmında Al – Alümina – Cu diyotunu oluşturma süreci açıklandı. Bulgular ve Tartışma bölümünde elektriksel ve optik ölçümler sonucu elde edilen veriler ve tartışmalar yer almaktadır. Sonuç bölümünde ise deneysel çalışmalar ile ulaşılan sonuçların genel değerlendirilmesi yapıldı ve yorumlara yer verildi.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Dalganın Yayılması ve Maxwell Eşitlikleri

Maxwell denklemleri, bir İskoç fizikçi ve matematikçi olan James Clark Maxwell tarafından son halini alan, uzayın her noktasında ve her anda, elektrik ve manyetik alanlar ile kaynaklar arasındaki ilişkiyi veren; elektromanyetik dalgalarla ilişkili elektrik ve manyetik alanların, yüklerin ve akımların ilişkilerini açıklayan dört denklemlilik bir denklem setidir (Balanis 2012, Sayın I. 2016). Aşağıda Maxwell denklemleri verilmiştir:

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = J \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = \rho \quad (2.4)$$

E vektörü elektrik alanı, H vektörü de manyetik alanı temsil ederken, D vektörü elektrik yer değiştirmesini ve B vektörü de manyetik indüksiyon vektörünü verir. ρ ve J sırasıyla elektrik yük yoğunluğu ve elektrik akım vektörünü verir (Yariv ve ark. 2007).

Elektromanyetik dalga hareket eden ve yayılan enerjinin formudur. Yayılan enerjinin elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri her zaman bir arada vardır, biri olmadan diğeri olmaz.

TPV sisteminde bileşenler arasındaki enerji transferi temel olarak elektromanyetik dalgaların yayılması ile olur. Bir arayüzde, optik özellikleri; yansıtma ve geğirgenliğin denklemlerini elde etmek için Elektromanyetik Dalga Teorisi gereklidir. TPV sistemlerinde kullanılan optik filtrelerde dalga yayılımı değerlendirilmelidir (Chubb 2007).

2.2. Elektromanyetik Spektrum

“Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik radyasyonun enerji, frekans veya dalga boyuna göre dağılımını verir. Elektromanyetik radyasyon ise, ışık hızında hareket eden dalga benzeri özellikler gösteren parçacıklar olan bir foton akışı olarak tanımlanabilir.” (Daniels 2010). Elektromanyetik spektrumda, Radyo dalgaları, Mikrodalga, Kızılötesi, Morötesi, X ışınları ve Gama-ışınları bölgeleri bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de Elektromanyetik spektrumda elektromanyetik dalgaların bölgelerinin aralık değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre de görsel açıklama şekil 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Elektromanyetik spektrumda elektromanyetik dalgaların bölgelerinin aralık değerleri (Genç 2006)

	Dalga boyu (m)	Frekans (Hz)	Enerji (J)
Radyo	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^9$	$< 2 \times 10^{-24}$
Mikrodalga	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Kızılötesi	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Görünür	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Morötesi	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
X-ışınları	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
γ-ışınları	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

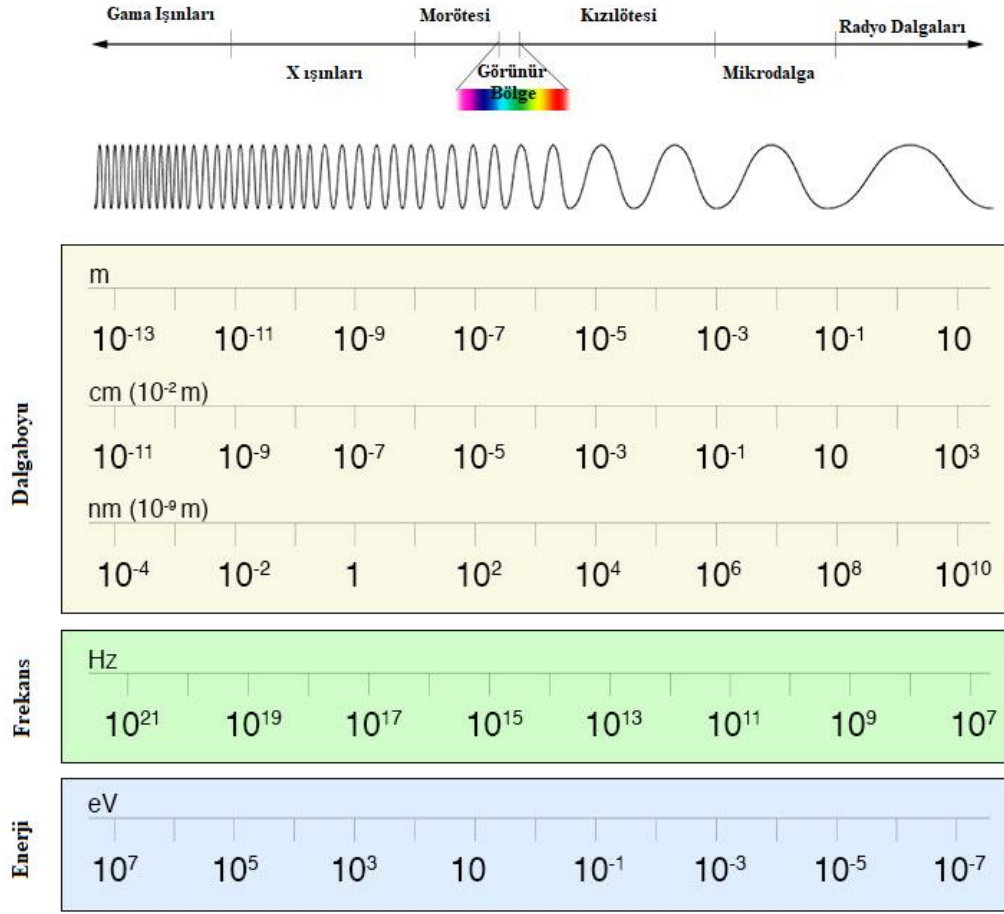
Dalga boyu arttıkça frekans değeri azalmaktadır. Bunun nedeni ışık hızının sabit oluşundan kaynaklanır. Işık hızı, dalga boyu ve frekans ilişkisi aşağıdaki formül ile verilir:

$$c = \lambda \nu \quad (2.5)$$

Burada c ışık hızını ve dalga boyunu λ verirken, ν değeri de elektromanyetik dalganın frekansını vermektedir. Benzer bir ilişki enerji ile dalga boyu arasında da vardır.

$$E = hc / \lambda \quad (2.6)$$

Dalga boyu arttıkça enerji azalmaktadır (Daniels 2010).



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrumda dalga boyu, frekans ve enerji arasındaki dönüşüm (gsfc.nasa)

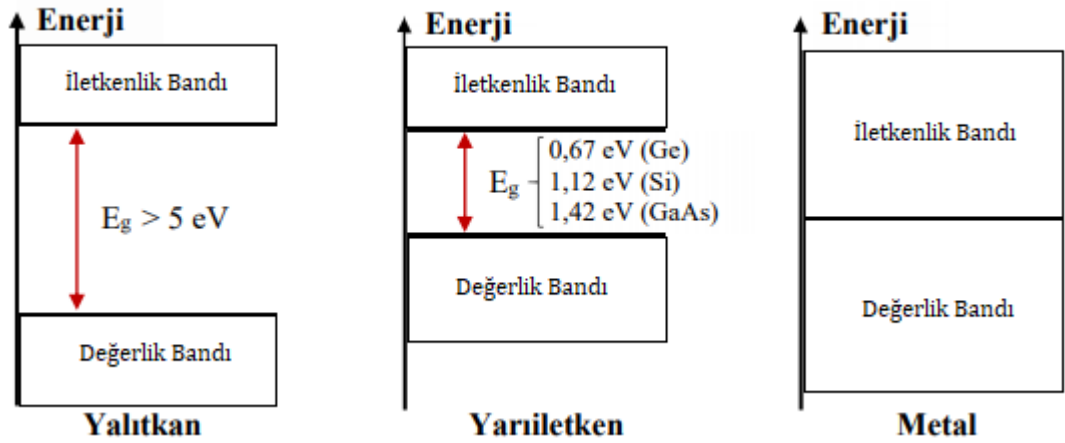
Görünür bölge ile mikrodalga arasında yer alan bölge, kızılötesi bölgedir. Kızılötesi bölge kendi içinde 5 ayrı bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümlerin genel kullanımdaki dalga boyu aralıkları aşağıda verilmiştir:

- Yakın - Kızılötesi (*NIR*): 0.75– 1.4 μm
- Kısa Dalga - Kızılötesi (*SWIR*): 1.4– 3 μm
- Orta-Dalga - Kızılötesi (*MWIR*): : 3– 8 μm
- Uzun-Dalga - Kızılötesi (*LWIR*): 8– 15 μm
- Uzak-Kızılötesi (*FIR*): 15– 1000 μm

SWIR bölge için Yakın-Kızılötesi dalgaları fiber optik haberleşmede SiO_2 (Silica) cam ortamda zayıflamaların azlığı nedeniyle kullanılırken, *SWIR* bölgede 1530–1560 nm spektral aralığı uzun mesafe haberleşmelerinde kullanılır. *MWIR* bölgesinin 3-5 μm aralığı güdümlü füze teknolojisinde, hedefin *IR* ışımasına yönlendirilerek kullanılmasını sağlar. *LWIR* bölgesinde termal bir kaynaktan, görüntü elde edilmesinde kullanılır (Byrnes 2008).

2.3. Yarıiletken Malzemeler

Yarıiletken malzemeler elektrik iletkenlerine göre iletken ve yalıtkanların arasında yer almaktadır. Isı, ışık, elektrik alan gibi etkilerle normalde yalıtkan bulunan yarıiletkenler iletken hale geçebilmektedirler. Ayrıca, katkılama ile yapılacak değişim ile de yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri ciddi ölçüde değişir. Yalıtkan malzemelerin elektriksel iletkenlikleri 10^{-18} – 10^{-8} S/cm arasında yer alırken, bu değer iletkenlerde çok daha yüksektir ve iletkenlerin elektriksel iletkenliği 10^4 – 10^6 S/cm civarındadır (Efendi 2017). Şekil 2.2’de verildiği üzere metallerde iletim bandı ve değerlik bandı iç içe denilebilirken, yalıtkanlarda değerlik bandı ve iletim bandı arasındaki yasak bant aralığı 5 eV’den büyüktür (Boylestad ve ark 1998).



Şekil 2.2. Yalıtkan, yarıiletken ve metal bant yapıları (Boylestad ve ark 1998).

Çizelge 2.2’de çok çeşitli yarıiletken maddelerin yapılarında karşımıza çıkan elementlerin periyodik tablodaki yerleri verilmiştir. Yarıiletken malzemenin özellikleri onu oluşturan

atomların kimyasal ve fiziksel özellikleri ile ilişkilidir, periyodik cetvelde gruptan gruba değişim gösterir. Bir saf yarıiletken olan germanyum (^{32}Ge), transistörler ve diyotların çoğunda kullanılmıştır. Şimdilerde ise, doğrultucularda, transistörler de ve entegre devrelerin çoğunda silisyum (^{14}Si) kullanılır. Eğer yüksek hızlarda çalışma performansına ihtiyaç varsa, bu problemin çözümünde de bileşik yarıiletkenler kullanılır. GaN, GaP ve GaAs gibi ikili bileşik yapıları ışık yayıcı diyotlarda yaygın olarak kullanılırken, yarıiletken lazerlerin yapımında, GaAs, AlGaAs gibi diğer üçlü ve dördü bileşikler kullanılır (Streetman ve ark 2006). Çizelge 2.3, 2.4, 2.5’de önemli bileşik yarıiletkenler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı saf veya çok bileşenli yarıiletken malzemelerde yer alan elementler (Mutlu 2010)

Periyot	II. Sütun	III. Sütun	IV. Sütun	V. Sütun	VI. Sütun
2		B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg		Pb		

Çizelge 2.3. İkili bileşik yarıiletkenleri (Mutlu 2010)

İkili	Bileşik Sembölü	İsim
III-V	AlAs	Alüminyum arsenit
	GaN	Galyum nitür
	GaP	Galyum fosfit
IV-VI	SiC	Silisyum karbit
II-VI	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
IV-IV	SiC	Silisyum karbit
IV-VI	PbS	Kurşun sülfür
IV-VI	PbTe	Kurşun tellür

Çizelge 2.4. Üçlü bileşik yarıiletkenleri (Mutlu 2010)

Yarıiletkenler	
Bileşik Sembolü (Üçlü)	İsim
$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
$GaAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat

Çizelge 2.5. Dörtlü bileşik yarıiletkenleri (Mutlu 2010)

Yarıiletkenler	
Bileşik Sembolü (Dörtlü)	İsim
$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Galyum indiyum arsenik fosfat
$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

Yasak bant aralığı yarıiletkenin özelliklerini tanımlamakta en önemli özelliklerden biridir. Yasak bandın üstündeki enerji bölgesi iletkenlik bandı iken yasak bandın altında kalan enerji bölgesi değerlik bandıdır (Kaya 2011).

Yasak bant aralığı sıcaklıkla değişen bir parametredir. Yarıiletkenlerde sıcaklığa bağlı olarak yasak bant aralığının hesaplanması aşağıda verilmiştir (Varshni 1967):

$$E_g(T) = E_0 - AT^2 / (T + B) \quad (2.7)$$

Varshni, yarıiletken yapıların yasak bant aralıklarının sıcaklıkla değişimini veren bu denkleme oturtulabileceğini görmüş ve denklem 2.7'yi geliştirmiştir. Si, GaAs, InP gibi yarıiletkenlerin yasak bant aralığının (E_g) eV cinsinden hesaplanması için formülde geçen A ve B değerleri sabittir. Formüldeki E_0 ise 0 K'deki yasak bant boşluğudur (Varshni 1967).

Silisyum için bu formül:

$$E_g(T) = 1,17 - (4,73 \times 10^{-4}) T^2 / (T+636) \quad (2.8)$$

şeklindedir (Efendi 2017). Çizelge 2.6’da bazı yarıiletkenlerin yasak bant aralığı değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Bazı yarıiletkenlerin sıcaklığa göre eV cinsinden yasak bant aralıkları (Mutlu 2010)

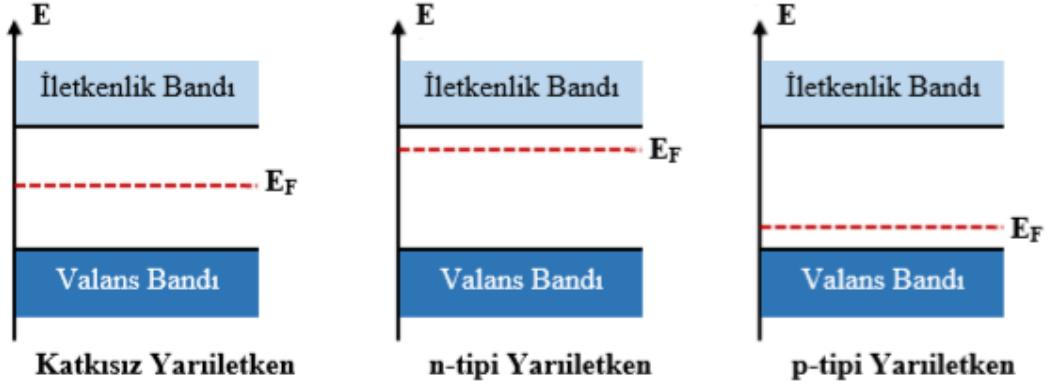
Kristal	Yasak Enerji Aralığı	
	0 K	300 K
Ge	0,74	0,66
Si	1,17	1,11
GaAs	1,52	1,43
GaP	2,32	2,25
AlSb	1,65	1,6
InP	1,42	1,27
GaSb	0,81	0,68

Sıcaklık arttıkça yasak bant aralığı düşmektedir. Böylece elektronların değerlik bandından iletim bandına geçişi kolaylaşır. Değerlik bandındaki bir elektron iletim bandına geçtiğinde yerine bir deşik bırakır (oluşur).

Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirmek amacıyla, yarıiletkeni oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı ve uygun atomların yerleştirilmesi işlemi katkılama olarak adlandırılır. Yarıiletken malzemelerin uygun katkı atomları ile katkılanması ile n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler meydana gelmektedir. Katkılı yarıiletkenler, çoğunluk yük taşıyıcıların türüne göre p-tipi ve n-tipi olarak sınıflandırılır. p-tipi yarıiletken malzemelerde azınlık yük taşıyıcıları elektronlar, n-tipi yarıiletken malzemelerde ise deşiklerdir (Sertel 2016).

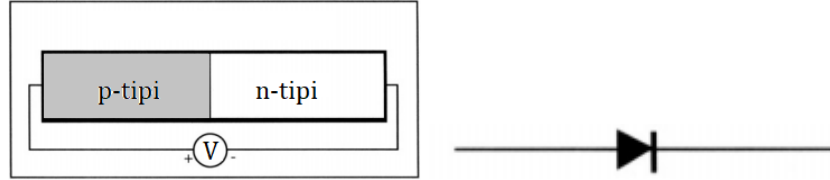
Grup V atomları, örneğin Fosfor (P) kristali oluşturan 4 değerlik elektrona sahip Silikon (Si) atomları ile kovalent bağ yaparak fazlalık 1 elektronu kristale verir. Böylece n-tipi katkılanmış bir yarıiletken elde edilir. Grup III atomları örneğin Bor (B) kristali oluşturan 4 değerlik elektrona sahip Si atomları ile kovalent bağ yaparak kristalden 1 elektron alır ve p-tipi katkılanmış bir yarıiletken elde edilmiş olur.

T sıcaklığındaki bir elektronun enerjisi E olan bir kuvantum durumunu Fermi-Dirac olasılık fonksiyonuna göre işgal eder. Fermi seviyesi yarıiletkenin saf veya katkılı olma durumuna göre belirlenir. Saf yarıiletkenlerde Fermi seviyesi değerlik ve iletkenlik bandının tam ortasında bulunurken katkılı yarıiletkenlerde katkı atomunun değerine bağlı olarak iletkenlik veya değerlik bandına yaklaşır.



Şekil 2.3. Katkısız, n- tipi ve p- tipi yarıiletkenlerde iletkenlik ve değerlik bandının arasındaki bölgede yer alan Fermi enerji seviyesinin konumu (Sertel 2016)

p-tipi ve n-tipi iki eklem bir araya gelerek bir yarıiletken devre elemanı olan diyotu oluşturur.

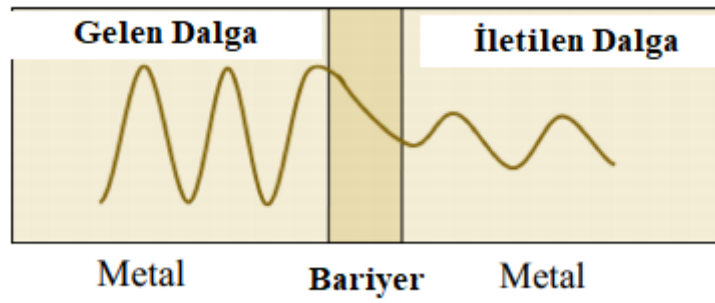


Şekil 2.4. Bir p-n eklem diyotu (solda) ve bir diyot sembolü (sağda)

Diyotu oluşturan n-tipi ve p-tipi malzemeler aynı ise homoeklem, farklı ise heteroeklem olarak adlandırılırlar. Diyotun dirençten farkı, lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip olmasıdır. Bazı diyotlar ışık yayabilirken (LED), bazıları da lazer ışığı yayabilirler (LD) hatta iki p-n eklemının bir araya gelmesiyle de transistör oluşturulabilir (J.P. Colinge ve ark. 2002).

2.4. Al – Al₂O₃ – Cu Diyotu'nun Çalışma Biçimi

Yapısal olarak, Metal – Yalıtkan – Metal (MIM) veya Metal – Metal Oksit – Metal (MOM) diyot, iki benzer veya benzer olmayan metal elektrot arasında sıkışmış çok ince bir yalıtkan tabakasıdır. “Bu diyotlardaki baskın iletim mekanizması, elektrotlar arasındaki bir elektron dalga fonksiyonunun iletiminin yalıtkan bariyerin yasak enerji boşluğuna nüfuz ederek gerçekleştiği kuantum mekanik tünellemedir.” (Shriwastava ve ark. 2019). Şekil 2.5'te bu tünelleme resmedilmiştir.

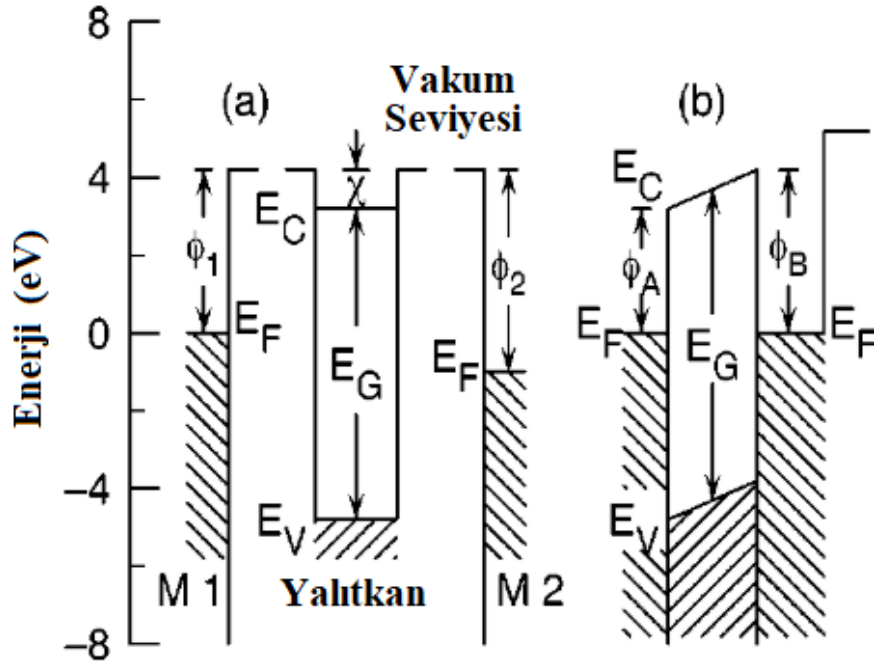


Şekil 2.5. MIM diyotundaki bir elektronun bir taraftan diğer tarafa; metalden metale tünel olarak geçişi (Shriwastava ve ark. 2019)

Elektronun tünel olarak geçme olasılığı, artan bariyer kalınlığı ile exponensiyel olarak bozunmaktadır. Ayrıca, bu olasılık metal ile yalıtkan arasında oluşan bariyerin yüksekliğine de bağlıdır. Bariyer yüksekliği ne derece düşükse, elektronun tünel olarak geçme olasılığı da o derece yüksektir (Shriwastava ve ark. 2019).

Elektronun tünel olarak bir taraftan diğer tarafa geçişi femto-saniye seviyesinde gerçekleşir. Bu yük transferinin çok kısa sürede olması, MIM diyotunun optik frekanslarda çalışabilmesine olanak sağlar (Moddel ve ark. 2013).

İletimdeki bir MIM diyotunu analiz etmek için enerji bant diagramı şekil 2.6'da çizilmiştir (Hickmott 2005).



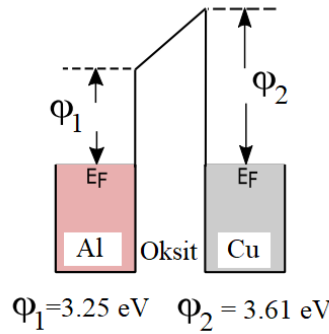
Şekil 2.6. Metal ve yalıtkanın birbirlerinden ayrı konumda bulunması (a) metal ve yalıtkanın birbirleri ile temas ettiği konumda bulunması (b) (Hickmott 2005)

Burada, metalin Fermi seviyesi E_F ve iş fonksiyonu ϕ ile gösterilmiştir. İş fonksiyonu, Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmayı ifade eder ve ϕ_1 ve ϕ_2 Metal-1 ve Metal-2 için metallerin cinsine göre değişen özel bir parametredir. Bir yalıtkanın parametreleri ise iletim bandı, değerlik bandı ve iletim ve değerlik bandındaki enerji farkı bant boşluğu enerjisi olarak verilir yani $E_G = E_C - E_V$ olarak ifade edilmektedir. Elektron ilgisi ise χ harfiyle gösterilir ve elektronun iletim bandından vakum seviyesine çıkarılmasındaki enerji farkı olarak verilir. Bariyer yüksekliği ise $\phi_A = \phi_1 - \chi$ olarak tanımlanabilir (Hickmott 2005).

Amorf-Alümina için bant boşluğu (E_G) değeri Filatova ve ark. (2015) yaptığı çalışmada $7,0 \pm 0,1$ eV olarak bulundu ve Al – Al₂O₃ – Cu diyotu için bu diyotun çalışma prensibini açıklamak amacıyla amorf-Alümina'nın bant boşluğu değeri 7,0 eV olarak seçildi.

William ve ark. (1951) $4,61 \pm 0,04$ eV olarak Bakır'ın iş fonksiyonunu ve $4,25 \pm 0,05$ eV olarak da Alüminyum'un iş fonksiyonunu buldular. Literatürdeki diğer çalışmalarda bu materyaller için bulunan iş fonksiyonları birbirlerine yakınlık göstermektedir. Bundan

dolayısı Bakır'ın iş fonksiyonu 4,25, Alüminyum'un iş fonksiyonu 4,61 seçildi. Hickmott'un (2009) çalışmasında Alümina için χ elektron ilgisi değeri 1 eV olarak belirlendi. Metalin Fermi seviyesi 0 eV olarak seçildi. Alüminyumun iş fonksiyonu $\phi_{Al} = 4,25$ eV ve Bakır'ın iş fonksiyonu 4,61 iken elektron ilgisi değerleri farkları alındığında, $\phi_A = \phi_1 - \chi$ denklemine göre alüminyum taraftaki bariyer yüksekliği 3,25 eV ve bakır taraftaki bariyerin yüksekliği ise 3,61 eV olarak bulunur.

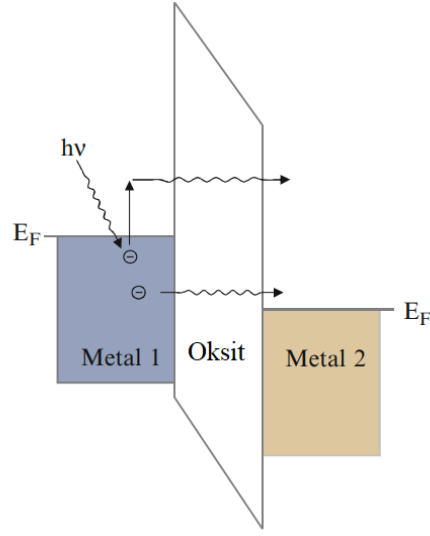


Şekil 2.7. Al – Alümina – Cu diyotunun enerji bantları ve bariyer yükseklikleri

Bulunan bu bariyer yüksekliği sıcaklık ile değişmektedir; sıcaklık yükseldikçe, bariyer yüksekliği artmaktadır (Moddel ve ark. 2013). MOM diyot uygulamalarındaki Al – Al₂O₃ bariyer yüksekliği anodik ve termal Alümina için 1,4 – 2,2 eV olarak belirlendiği farklı çalışmalara literatürde yer verildiği gözlemlenmiştir (Hickmott 2005).

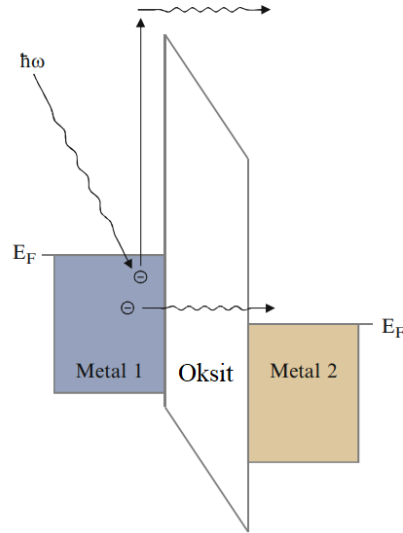
Bir MOM yapısındaki bariyerin metal yüzeye gelen fotonlar sayesinde elektronun metalden metale geçişini şekil 2.8, 2.9, 2.10 ve 2.11'de görselleştirerek açıklanmıştır (Chagaan ve ark. 2010).

Bariyere yakın Metal-1'deki elektronlar metale gelen hv enerjili fotonlar sayesinde enerji kazanabilir ve Metal-2'ye tünelleme olasılığını arttırabilir (Chagaan ve ark. 2010).

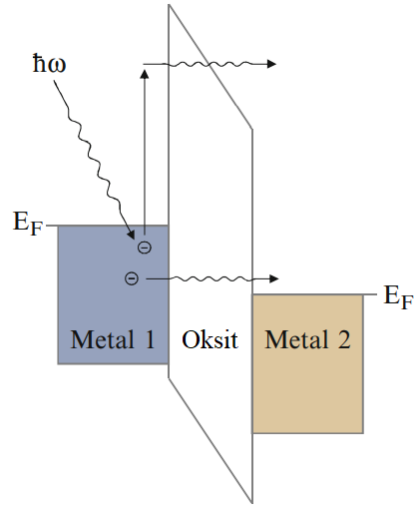


Şekil 2.8. MOM diyot yapısında foton destekli tünelleme olayı (Chagaan ve ark. 2010)

Metal-1'deki elektronlar, Metal-2'ye ulaşmak için bariyeri aşarak Metal-1'e gelen fotonlardan yeterli enerjiyi kazanabilir (Chagaan ve ark. 2010).



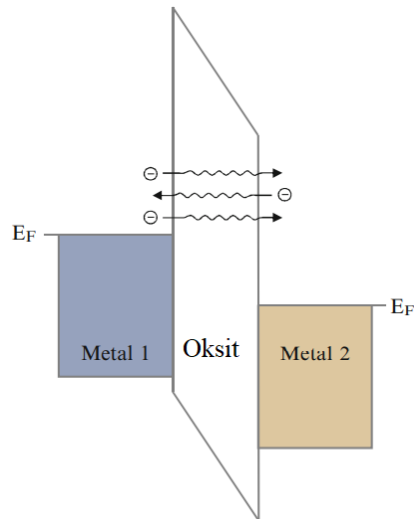
Şekil 2.9. MOM diyot yapısında Metal-1'e gelen foton sayesinde enerjilenen elektronların bariyeri aşabilme ihtimali vardır (Chagaan ve ark.2010).



Şekil 2.10. MOM diyot yapısında uyarılan elektronların bariyeri aşmak için kuvvetli bir enerjiye sahip olmasıyla tünellenen elektronların bulunması durumu (Chagaan ve ark. 2010)

Gelen foton tarafından enerjilenen Metal-1'deki elektronlar bariyerin üst seviyelerine yaklaşabilir ve bu seviyelerde Metal-2'ye tünelleyebilir (Chagaan ve ark. 2010).

MOM diyot yapısı ısıtıldığında enerjisinde artış meydana gelen Metal-1'deki elektronların Metal-2'ye tünelleme olasılığı artar (Chagaan ve ark. 2010).

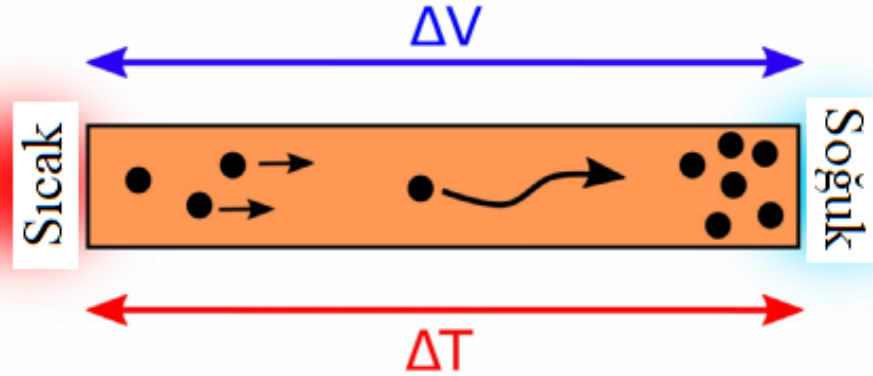


Şekil 2.11. MOM diyot yapısında termal destekli tünelleme (Chagaan ve ark. 2010)

Yapılan çalışmaların göstergesi, MIM diyotunun çıkış gerilimine olan bir katkısının da Seebeck etkisi tarafından geldiğini söylemektedir (Moddel ve ark. 2010). Seebeck etkisine göre, elektriksel olarak iletken bir maddeye uygulanan bir sıcaklık gradyanı (ΔT) bir elektrik potansiyeli (ΔV) üretir, bu etki Seebeck etkisi olarak bilinir (Mulla ve ark. 2021) Bu etki aşağıdaki formülle ifade edilir (Shanawani ve ark. 2017):

$$\Delta V = -S_{AB} \Delta T \quad (2.9)$$

Burada sıcaklık farkını ifade eden ΔT , gerilim farkı ΔV ile doğru orantılıdır. Sıcaklık farkı ne kadar büyükse, elde edilen gerilim o derece yüksek olacaktır. A ve B iletkenleri arası oluşan potansiyel farkı ΔV ile, ΔT ifadesi incelenen sistemdeki sıcaklık farkını ve S_{A-B} ifadesi Seebeck katsayısını verir (Shanawani ve ark 2017).



Şekil 2.12. Aynı metalin bir ucunun ısıtılması ve diğer ucunda soğutulması ile oluşan ΔT sıcaklık farkı altında yük taşıyıcılarının difüzyon yolu ile hareketi (Mulla ve ark. 2021)

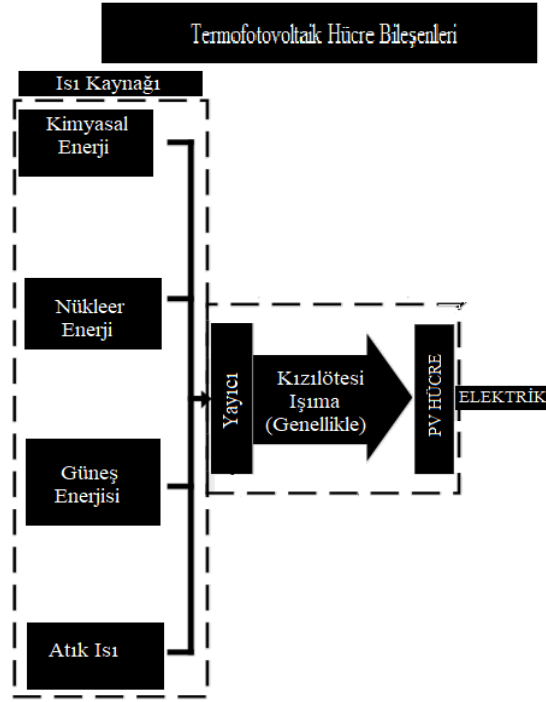
Açık devre gerilimine katkıda bulunan Seebeck etkisinden genelde, iki metal yüzey arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan bir etki olarak bahsedilmesine rağmen, aynı metal içinde dahi bu etki gözlemlenebilmektedir ve hatta aynı metal farklı geometrik şekillerden oluşursa bile, bu etki gözlemlenebilmektedir. Bu etkinin gözlemlenebilmesi için metal yüzeyler arasında sıcaklık farkının olması gerekmektedir (Shanawani ve ark. 2017, Mulla ve ark. 2021).

Bir Metal – Metal Oksit – Metal diyotundaki elektron geçiş yöntemleri, Seebeck etkisi ve elektron tünellemesi olarak söylenebilmektedir. Bir MOM diyotundaki akıma olan katkının ne kadarının fotonların metal tarafından soğurulup bir elektronun tünel açarak Metal-2'ye gitmesi ile sıcaklık farkından kaynaklanan Seebeck etkisinin katkısının ne derece olduğunu anlamak için detaylı bir çalışma yapılması gerekmektedir.

2.5. Geleneksel Termofotovoltaik Yapıların alışma Prensibi

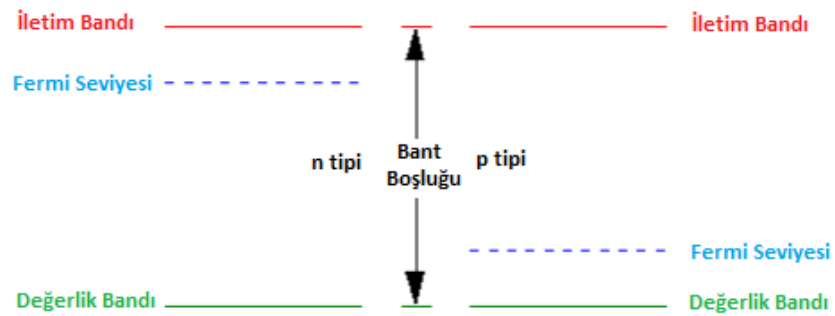
TPV enerji dönüşümünde kullanılan ısı kaynağı, termofotovoltaik sistemin bir parçası olan yayıcıyı ısıtır (yayıcının ulaştığı sıcaklık genellikle 1300-2000 K arasındadır.) Yayıcı temel olarak kızılötesi dalga boylarında ışımaya yapar. Bu ışımaya PV hücre tarafından kullanılır ve elektrik enerjisi elde edilir (Bauer 2011). Bir TPV sistem temel olarak üç bileşenden oluşur:

- Isı kaynağı: yayıcıyı uygun sıcaklığa ulaşmasını sağlayan çok çeşitli kaynaklardır
- Optik sistem: Filtre ve yayıcıdan oluşur. Yayıcı, PV hücrede kullanılmak üzere istenilen dalga boyunda foton üretir. Daha dar bantlı fotonların geçişini önlemek için filtre kullanılır (Efendi 2017).
- TPV hücre: Uygun dalga boyundaki fotonları emerek elektrik enerjisine eviren hücredir. Bir Fotovoltaik hücrede elektrik enerjisi üretimi p-n ekleme düşen fotonların sayesinde elektron-boşluk çiftlerinin dış devreden akmasıyla olur.



Şekil 2.13. Bir termofotovoltaik sistemde enerji dönüşümünün temel bileşenleri (Bauer 2011'dan değiştirilerek alınmıştır.)

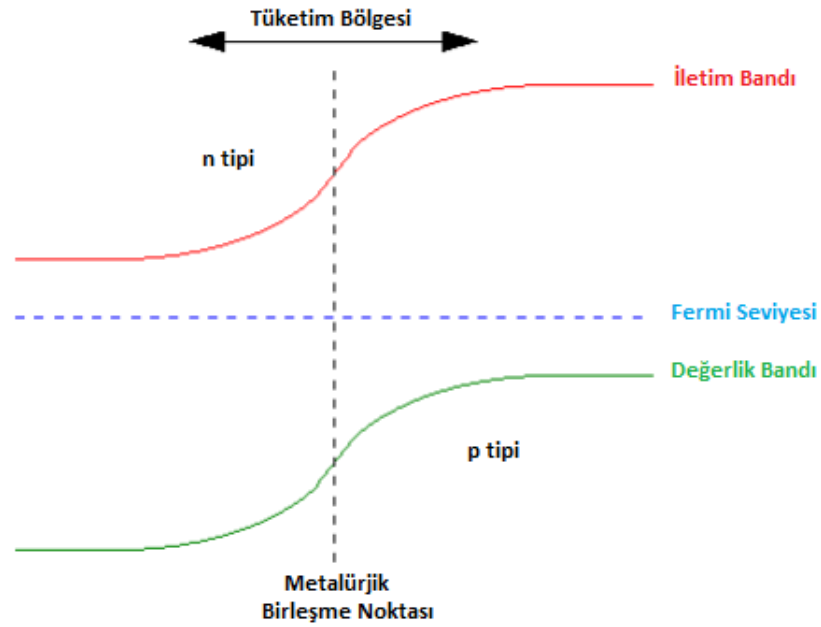
Şekil 2.14'de n ve p katkılanmış yarıiletkenlerin enerji bant bileşenleri verilmiştir. Değerlik bandındaki bir elektronun farklı etkilerle iletim bandına geçiş yapıp iletimde rol oynayabilmesi için en az yasak bant aralığı E_g 'nin kadar bir enerjiyi atoma vermek zorundadır.



Şekil 2.14. Farklı katkılanmış yarıiletkenlerin bant yapısı (Akpek 2005)

Bir yarıiletkenin alt enerji seviyesinde olan değerlik enerji bandı ile elektronların hareket ettiği üst enerji bandı olan iletim bandı ile arasındaki fark enerji aralığını verir (Akpek 2005).

Şekil 2.14’de gösterildiği üzere, Fermi seviyeleri n tipi ve p tipi yarıiletken için farklı seviyelerdedir. n ve p tipi yarıiletkenler bir araya getirildiğinde Fermi seviyeleri eşitlenecek ve şekil 2.15’deki gibi olacaktır.

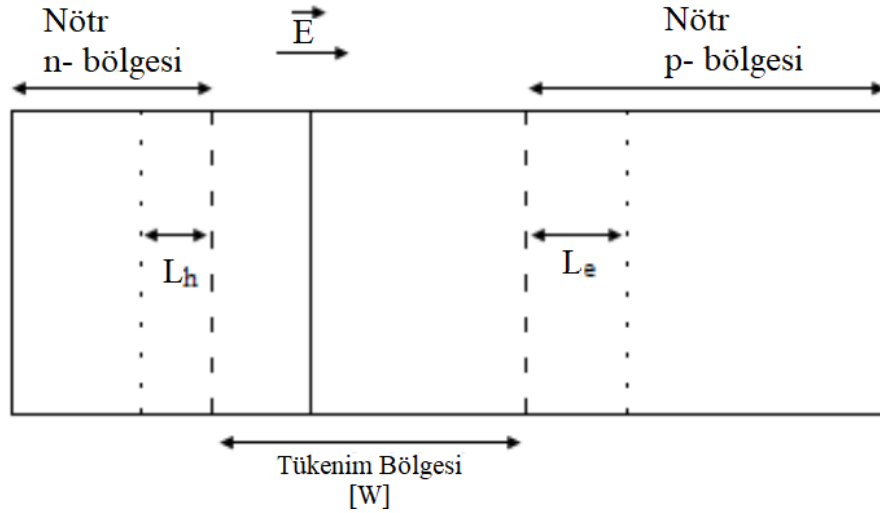


Şekil 2.15. n- tipi ve p- tipi bölgelerin birleşmesi sonucu oluşan bant yapısı (Akpek 2005)

Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığından daha büyük bir enerjiye sahip bir foton güneş hücresinden geçtiğinde, eğer bu foton bu hücre tarafından emilirse, bu emilim banttan banda elektronik geçiş şeklindedir, bu nedenle bir elektron – delik çifti üretilir (Akpek 2005).

Şekil 2.15’de bahsedilen bir p-n eklem diyotun nötr n, nötr p ve tüketim bölgeleri eklemdeki elektron akışının belirlenmesinde önemli rol oynayan bölümlerdir. Serbest yük taşıyıcıları tüketim bölgesinde bulunmazlar ancak bu bölgede sabit iyonların varlığından kaynaklanan bir elektrik alan mevcuttur. Bu diyottaki difüzyon bölgeleri L_h ve L_e olarak

verilebilir ve difüzyon veya tükenim bölgesinde üretilen elektron – delik çifti tükenim bölgesindeki elektrik alan nedeniyle birbirinden ayrılırlar. Üretilen bu çift, üretildiği bölgeye göre sürüklenmektedirler; örneğin p- tipi bölgede üretilmiş elektronlar n- tarafına geçiş yapacaklardır. Üretilen taşıyıcıların akım akışına katkı sağlayabilmesi için rekombinasyona uğramadan yani elektron – delik çiftlerinin tekrar birleşmeden tükenim bölgesinden karşı bölgeye geçerek çoğunluk yük taşıyıcısı haline gelebilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak p- tipi bölgede biriken delikler ve n- tipi bölgede biriken elektronlar, açık devre voltajı (V_{oc}) olarak adlandırılan bir gerilimin oluşmasını sağlarlar. Eğer bu diyotun uçlarına bir tüketici bağlanırsa, n- tipi bölgedeki fazlalık elektronlar p- tipi bölgeye ulaşabilirler, bu şekilde üretilen akıma foto-akım I_{ph} denmektedir (Efendi 2017).



Şekil 2.16. Bir p-n eklem diyotun nötr n, nötr p ve tükenim bölgeleri (Efendi 2017)

2.5.1. Isı kaynağı

Isı kaynağı, TPV sistemlerinde foton elde etmek için yayıcıyı ısıtan çeşitli kaynaklardır. Fosil yakıtlardan, nükleer sistemlere, endüstriyel uygulamalardan, Güneş'i kullanan sistemlere kadar birçok ısı kaynağı vardır. Stefan - Boltzmann yasasına göre, ışımının güç yoğunluğu sıcaklığın 4. kuvvetiyle orantılı olduğu için uygun sıcaklıkta bulunmak gerekmektedir (Aybek 2015).

Genellikle yüksek sıcaklıklardaki ışımalardan elde edilen fotonlar vasıtasıyla termofotovoltaik sistemler çalışırken Al – Alümina – Cu üçlüsünden meydana gelmiş bir termofotovoltaik bir sistemde düşük sıcaklıkların dahi etkisiyle bu pilden enerji elde edilmektedir. Al – Alümina – Cu TPV diyot çipi santimetreler mertebesinde yakınında bulunan herhangi bir ısı kaynağından (fırın vb.), gelen ışımaların etkisiyle elektrik üretimini gerçekleştirmektedir.

2.5.2. Optik Sistem

Optik sistemin görevi, termal radyasyonu seçmek ve TPV hücrelere iletmektir. Optik sistem, filtre ve yayıcıdan oluşur. Yayıcı foton yayarken, Filtre istenilen dalga boylarının geçişine izin verirken diğerlerini filtreler.

Yayıcılar, optik özelliklerine göre, elektriksel özelliklerine göre, termal özelliklerine göre, fiziksel yapılarına göre sınıflandırılabilir. Geniş bantlı seramik yayıcılara örnek olarak: Silikon Nitrit (Si_3N_4), Silikon karbit (SiC), Silikon (IV) Oksit (SiO_2), Altın (Au), Magnezyum Oksit (MgO), Titanyum (IV) Oksit, Silikon (Si), Alüminyum Oksit (Al_2O_3), Platin (Pt), Grafit (C), Tantal (Ta), Tungsten (W) verilebilir (Bauer 2011).

Yayıcı sistemlere genel olarak seçici- yayıcı da denmektedir. Seçici- yayıcı sistemlerde fotovoltaik hücrenin kullanabileceği fotonların geçişi göz önünde bulundurularak, bu fotonların fotovoltaik sistemle dalga boyu açısından eşleşmesi gerekmektedir. Fotovoltaik hücrede amaç olabildiğince fazla fotonu enerjiye dönüştürmektir (Önal 2017).

Filtreler de kristal malzemeler ve amorf materyaller olarak sınıflandırılabilir. Alüminyum Nitrit (AlN), Bor Nitrit (BN), Magnezyum Oksit (MgO), Elmas (C), Bor Fosfit (BP), Galyum Fosfit (GaP) kristal malzemelere örnek verilebilir.

2.6. Fotovoltaik Hücre Karakteristikleri

Bir hücre, p-n eklemlili diyot olduğundan dolayı Fotovoltaik hücrenin karakteristiklerini belirleyen özellikler diyot denklemlerine bağlıdır. Bu diyotun fotonlarla etkileşiminden

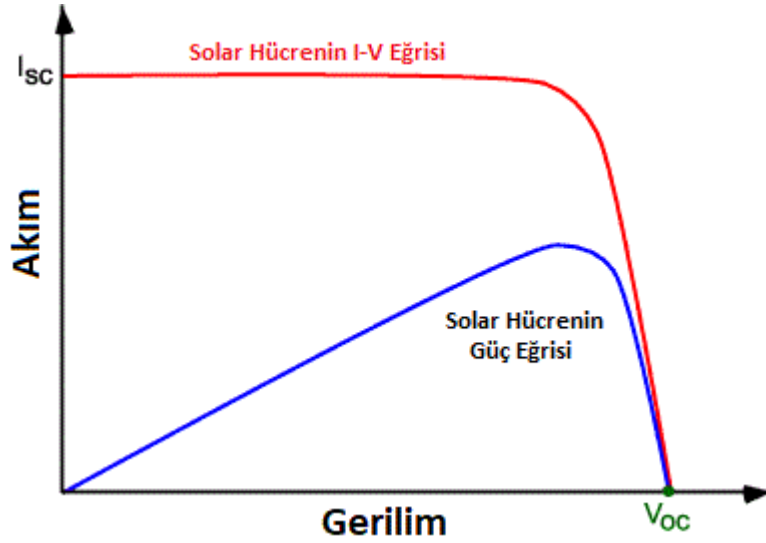
dolayı akım, gerilim ve güç özellikleri aşağıdaki alt başlıklar altında incelenmiştir.

2.6.1. Akım- Gerilim (I-V) Karakteristikleri

Bir fotovoltaik hücrede akım-gerilim karakteristikleri aydınlatılmış ve karanlık ortamlardaki durumlarda hücrenin nasıl tepki gösterdiği ile ilişkilidir. Aşağıdaki denklemde diyotun akım denklemi verilmiştir:

$$I = I_A - I_0 \left(e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Burada η ideallik faktörünü, k Boltzmann sabitini, T kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı, q temel yükü, I_A üretilen ışık akımını, I_0 ise karanlık doygunluk akımıdır.



Şekil 2.17. İdeal bir güneş pili hücrenin akım gerilim eğrisi (pveducation.org web sitesinden alınmıştır, 2020)

İdeal bir güneş pili hücrenin akım gerilim eğrisi şekil 2.17' de gösterildiği gibidir. Akım en yüksek değerine gerilimin sıfır olduğunda ulaşır, bu değer I_{sc} yani kısa devre akımıdır. Akımın minimum yani sıfır olduğu değerde gerilim yani V_{oc} en yüksek değerini alır. V_{oc} burada açık devre gerilimidir. Açık devre gerilimini ifade eden denklem aşağıdaki gibidir:

$$V_{oc} = \left(\frac{\eta kT}{q} \right) (\ln(I_A / I_0 + 1)) \quad (2.11)$$

2.6.2. Dolum Faktörü (FF)

Maximum akım ve maximum gerilim değerlerinin çarpımlarının açık devre gerilimi ve kısa devre akımının çarpımına oranını Dolum Faktörünü (FF) verir. Akım ve gerilim çarpımı gücü ifade eder yani hesaplanan güneş pilinin güç değerlerinin birbirlerine oranıdır da denilebilir. Aşağıdaki denklemde dolum faktörü verilmiştir:

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.12)$$

2.6.3. Güç Dönüşümü Verimliliği

Fotonlardan gelen enerjinin ne kadarı kullanılabilir elektriğe dönüştürülebiliyor olduğunun bir göstergesi olmaktadır. Güneş hücresinin verimi hesaplanırken, maksimum güçteki hücrenin, yük altındaki gücüne ($P_{in} = P_{incident}$) oranını veren ilişki ile hesaplanır.

$$Verim = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2.13)$$

Aynı zamanda, $V_{oc} I_{sc}$ ve FF değerlerinin çarpımı P_{max} değerini vermektedir. Böylece verimin maksimum değeri için P_{max} 'in P_{in} 'e oranı verimi verir.

2.6.4. Kuantum Verimi ve Spektral Tepki

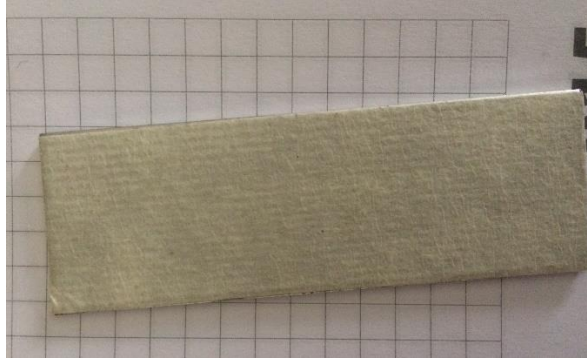
Bir PV hücresinin performansını tanımlamak için kullanılan önemli diğer iki nicelik ise Kuantum Verimi ve Spektral Tepki'dir. Bu nicelikler dalga boyuna bağımlı olup, Fotovoltaik güç çıkışını ve verim hesaplarında kullanılırlar.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Diyotun Üretim Aşaması

Al – Al₂O₃ – Cu TPV diyotunun Alüminyum katmanı yüzeyinde alümina oluşumu kimyasal olarak gerçekleştirildi. Bu diyotta katot görevi gören Bakır (Cu) katmanı ile Alüminyum (Al) anot tabakası birleştirilerek TPV hücre Bursa Uludağ Üniversitesi'nin Kimya Bölümünde üretildi.

Boyutları, en boy ve kalınlık olmak üzere, 2,5 x 7,5 x 0,146 cm olan Alüminyum levha zımparalama işlemi için Dramel makinesinden geçirildi. Ardından, yüzeyin temizlenmesi açısından sabunlu su ile yıkandı. Daha detaylı bir temizlik için etil alkol ile temizlendi. Etil alkole maruz bırakılan alüminyum levha kuruduktan sonra yüzeyinde iz bırakmamak için kenarlarından bir kısıkaç yardımıyla tutularak dinlenmeye alındı. Bu aşamadan sonra alüminyum levhanın herhangi bir yüzeyine tek tarafı yapışkan olan ayraç yapıştırılır. (Ayraç olarak 2,5 x 7,5 x 0,0125 cm maskeleme bandı kullanıldı.) Bir yüzeyine ayraç olarak maskeleme bandı yapıştırılmış hali şekil 3.1'de gösterilmiştir.

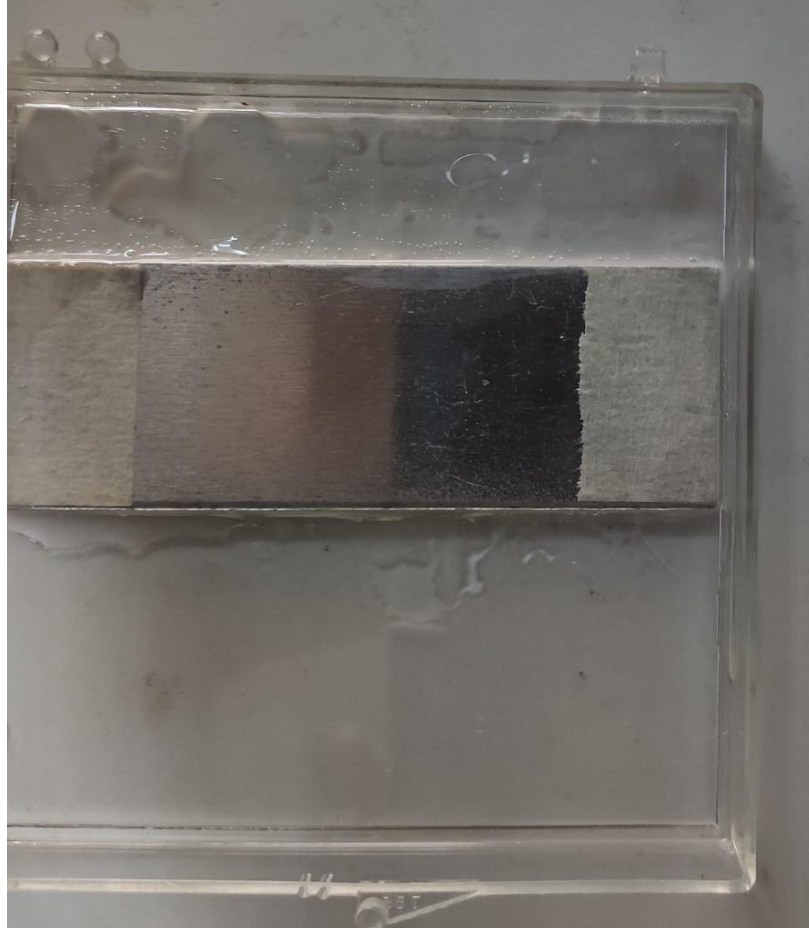


Şekil 3.1. Maskeleme bandı yapıştırılmış alüminyum metali

Alümina oluşumunu sağlamak için oda sıcaklığında katı halde bulunan potasyum hidroksit (KOH) ve saf su (H₂O_(saf)) aynı kapta bir araya getirilerek kütlece %50 derişimde çözelti hazırlandı.

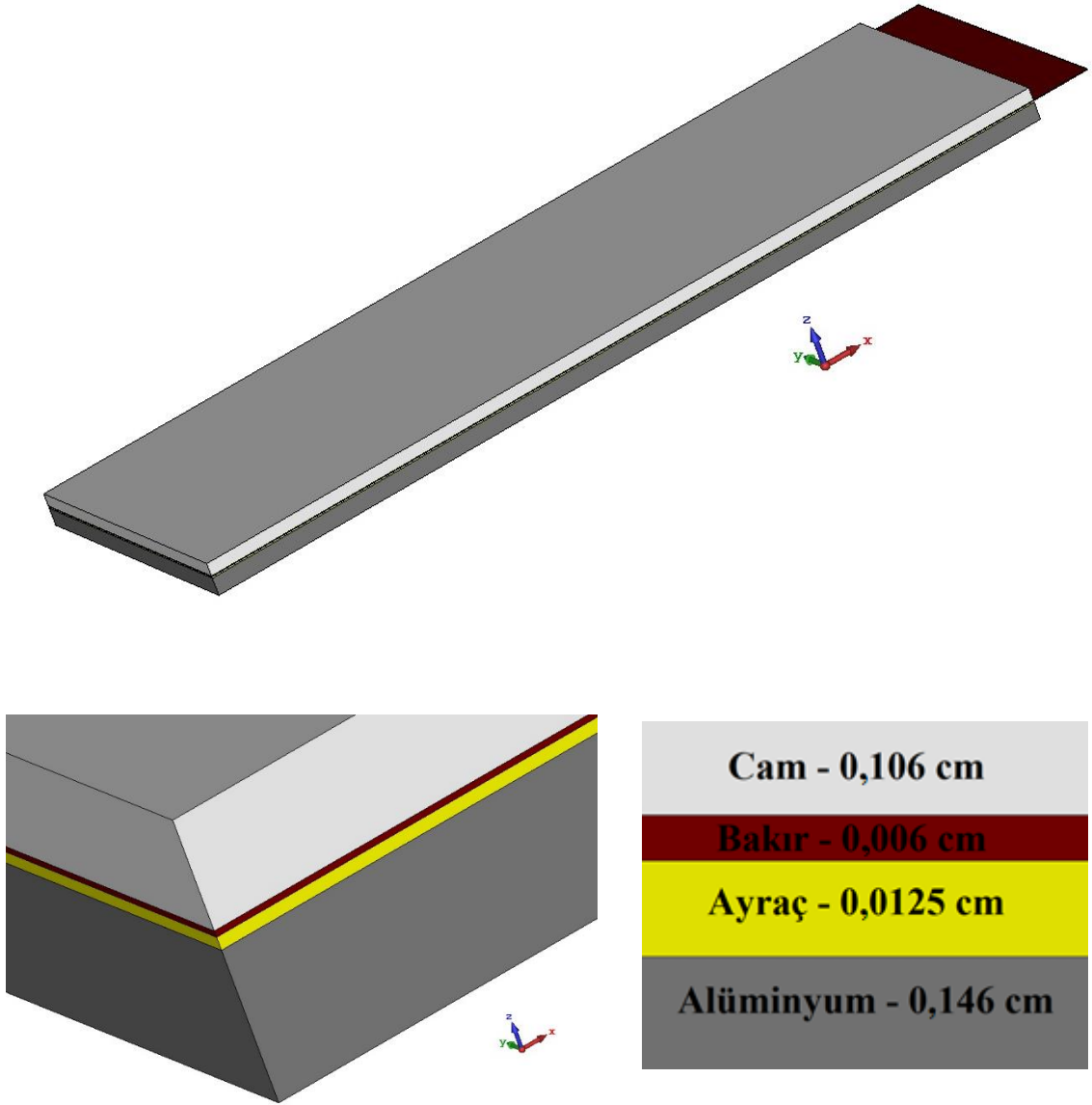
Mikropipet yardımıyla çözeltden 1 ml alındı reaksiyon kabına aktarıldı. Alüminyum levhanın ayraç kaplı yüzeyi çözelti havuzuna bırakıldı. 15 dakika boyunca çözeltiye

maruz kalan alüminyum tepkimeye girerek alümina oluşturduğu gözlemlendi. (Tüm bu işlemler oda sıcaklığında yapıldı.) Reaksiyon kabından çıkarılan Al – Al₂O₃ katmanları, yaklaşık 2 dak. boyunca kurutma makinesi ile kurutuldu.



Şekil 3.2. Ayraç yapıştırılan alüminyum'un 1 ml'lik çözeltide tepkimeye girmesi

Boyutları 2,5 x 7,5 x 0,106 cm olan cam lamel üzerine bir tarafı yapışkan olan boyutları 2,5 x 8 x 0,006 cm olan bakır (Cu) folyodan kesilerek yapıştırılır. (Bakır'dan daha rahat kontak alabilmek için Al levhadan 0,5 cm daha uzun kesildi.)



Şekil 3.3. Al – Alümina – Cu diyot çipinin CST Studio kullanılarak üç boyutlu uzaydaki görüntüsü ve diyotu oluşturan katmanların boyutları

Alüminyum ve ayraç katmanlarının arasında nanometrik boyutta oluşan alümina katmanının boyutu diğer boyutların yanında ihmal edilecek kadar azdır ve alümina, alüminyum üzerinde farklı bölgelerde farklı kalınlıklarda oluştuğundan dolayı çizim programında verilmedi.

Alüminyum yüzeyinde oluşan alümina kısmına bakır lamel temas ettirilir ve mengene yardımıyla oluşan diyot sıkıştırılır. TPV diyot iç sıcaklığı sabit 50 °C'ye ayarlı bir fırın içerisine konulur ve 24 saat boyunca beklenir. Hazırlanan diyotun resmi şekil 3.4'te

verildi. Ardından diyot ölçüm için hazırlandı.



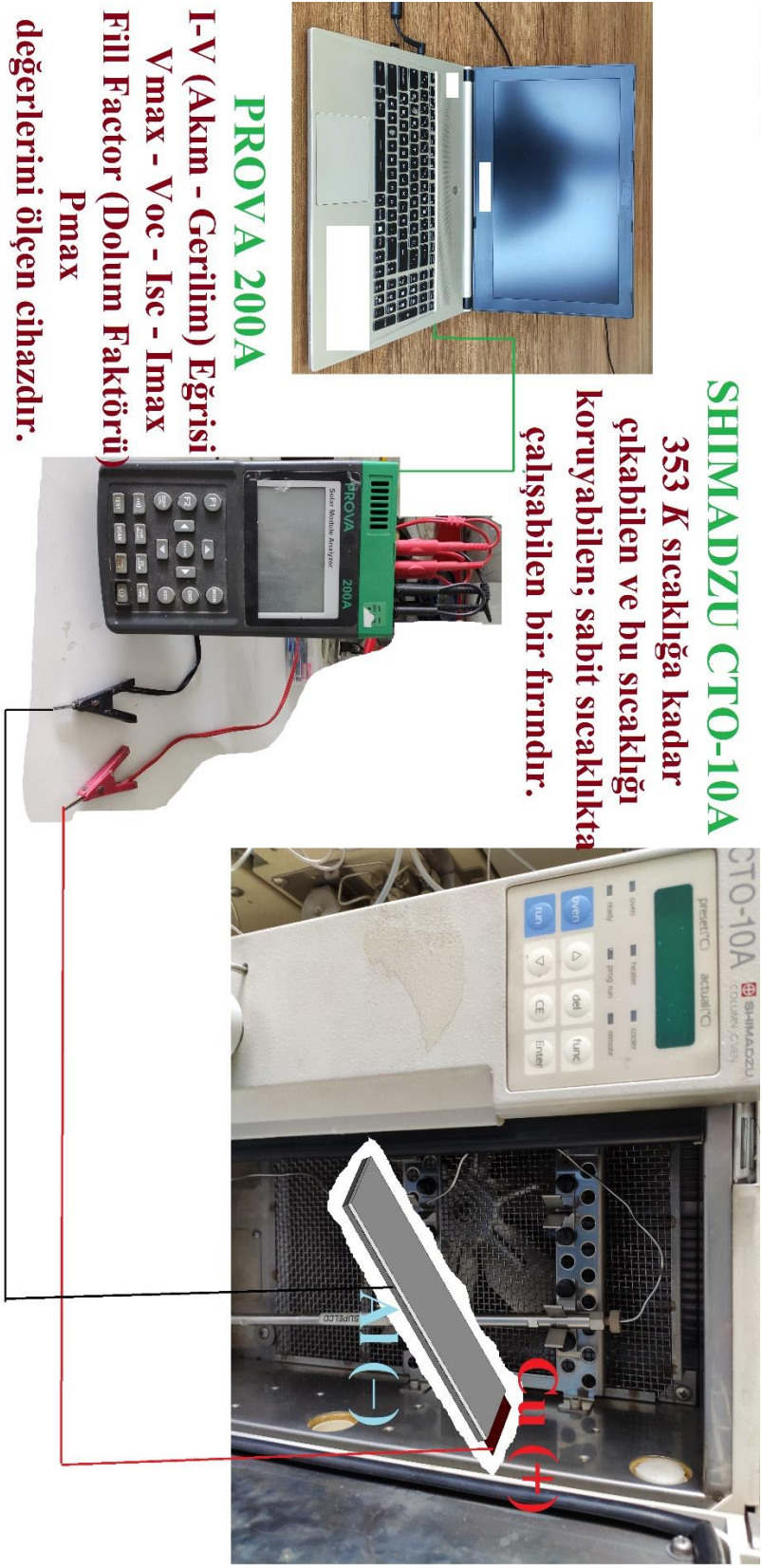
Şekil 3.4. TPV diyot çipinin alüminyum (solda) ve bakır (sağda) yüzeylerinden görünümü

3.2. Ölçüm Sisteminin Blok Şeması

Tez çalışmasında kullanılan sistemin sabit sıcaklıkta karakteristiklerinin ölçüldüğü sistem şekil 3.6’da verilmiştir. Fırının kapağının kapalı hali şekil 3.5’de ayrıca verilmiştir. Şekil 3.6’nın sağ kısmında gösterilen kapağı açık fırının dışarıdaki sıcaklık değişimlerine maruz kalmaması için kapağı kapatılmıştır. Ölçülen değerler PROVA-200A cihazının bilgisayar ile eş zamanlı bağlantısı sayesinde veriler bilgisayar ekranına düşmüştür.



Şekil 3.5. Kapağı kapalı fırın



SHIMADZU CTO-10A

353 K sıcaklığa kadar çıkabilen ve bu sıcaklığı koruyabilen; sabit sıcaklıkta çalışabilen bir fırındır.

PROVA 200A

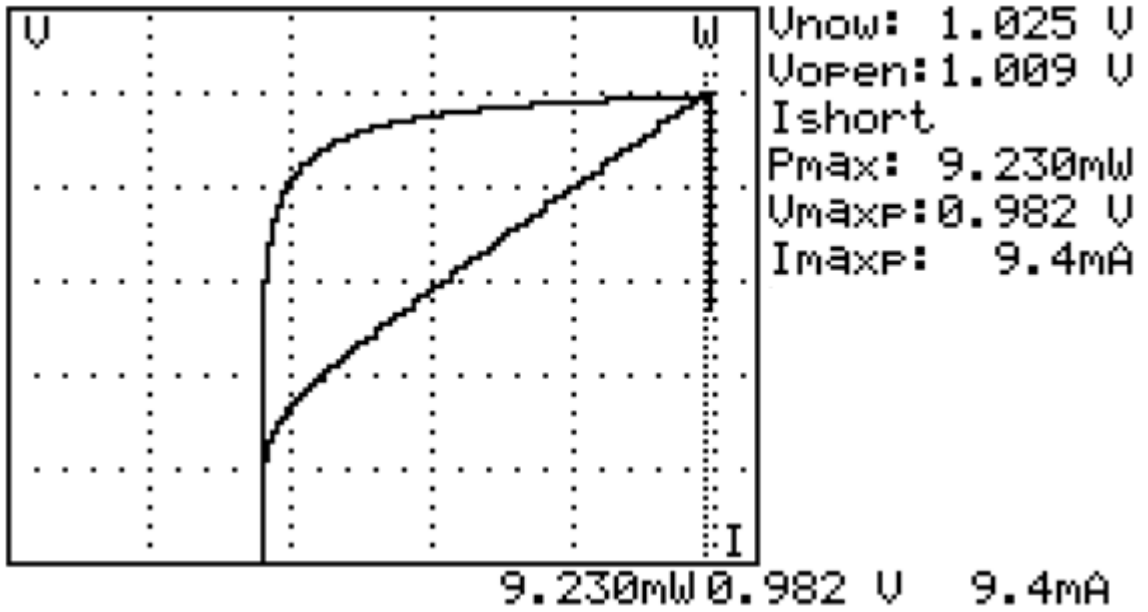
I-V (Akım - Gerilim) Eğrisi
V_{max} - Voc - Isc - Imax
Fill Factor (Dolum Faktörü)
P_{max}
değerlerini ölçen cihazdır.

Şekil 3.6. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun karakteristiklerinin ölçüldüğü düzenek

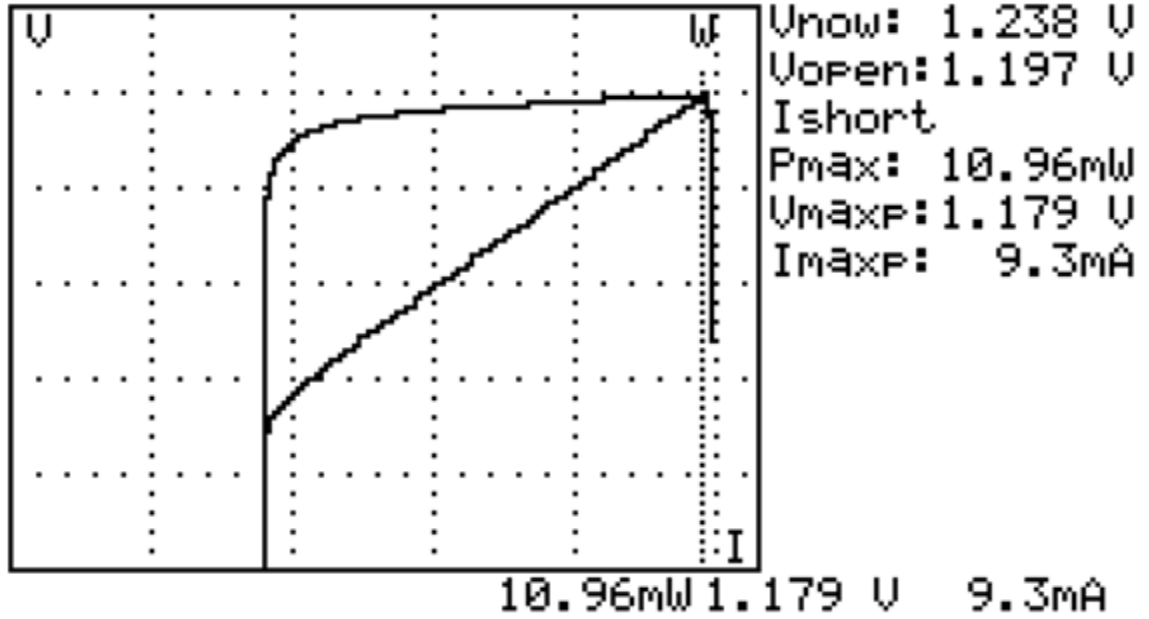
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde Al – Al₂O₃ – Cu TPV diyotunun elektriksel ve optik karakteristikleri araştırıldı.

Al – Al₂O₃ – Cu TPV Diyot Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'nin Kimya Bölümünde üretiminden 24 saat sonrasında deneysel ölçümlerine başlandı. 313 K sıcaklık değerinde Solar Module Analyzer Prova 200A cihazından elde edilen veriler şekil 4.1'de ve 323 K sıcaklık değerinde edilen veriler şekil 4.2'de verildi.



Şekil 4.1. 313 K'de Al – Al₂O₃ – Cu diyotundan elde edilen I-V verisi



Şekil 4.2. 323 K'de Al – Al₂O₃ – Cu diyotundan elde edilen I-V verisi

Art arda yapılan bu iki deney sonucunda Solar Module Analyzer Prova 200A cihazı bu ölçümlerde kısa devre akımını ölçüm sonucunu vermedi. Fakat bu cihazla yapılan farklı deneyler sonucunda Al – Al₂O₃ – Cu TPV Diyotlarında maksimum akım değeri ile kısa devre akımı arasındaki farkın sürekli olarak 0,2 mA olduğu gözlemlendi. 313 – 323 K sıcaklıkları arasında yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen veriler aşağıdaki gibidir:

Çizelge 4.1. Çeşitli sıcaklık değerlerinde temel parametreler ve değerleri

Sıcaklık [K]	Voc [V]	Pmax [mW]	Imax [mA]	Vmax [V]
313 K	1,009	9,23	9,4	0,982
323 K	1,197	10,96	9,3	1,179

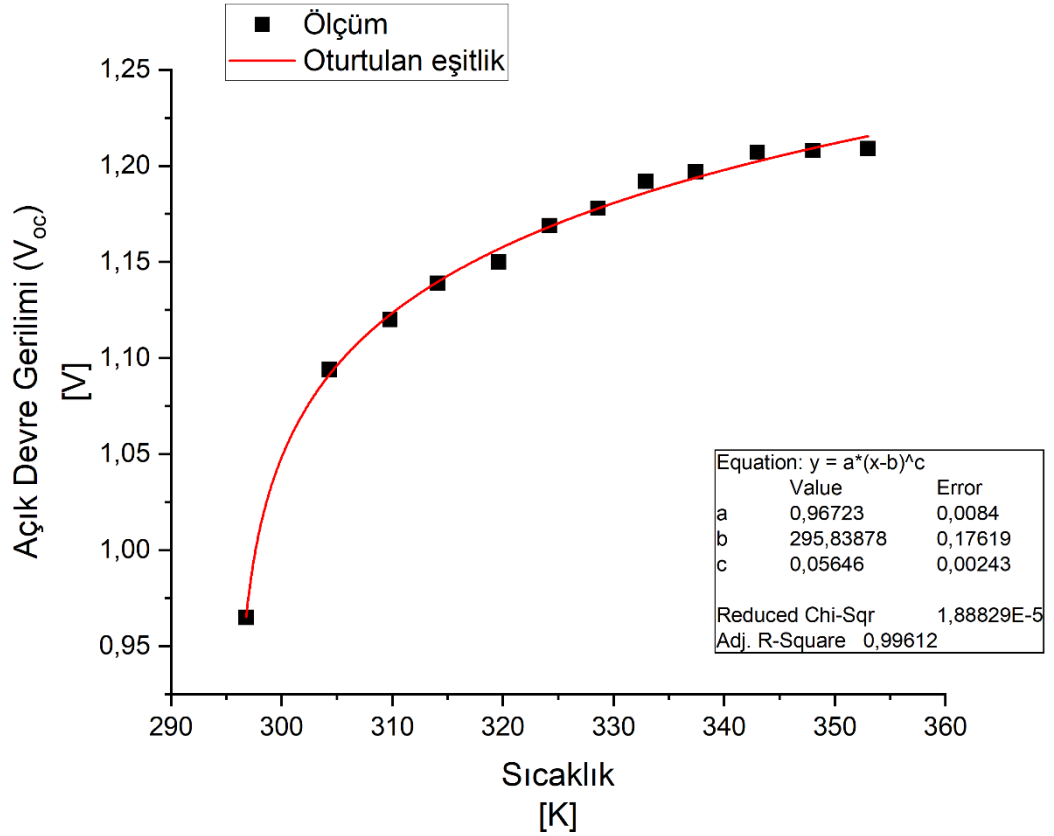
Rastgele sıcaklık değerleri seçilerek art arda yapılan bir diğer deneyin sonucunda elde edilen veriler çizelge 4.2'de verildi. Bu veriler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe maksimum akım değeri sabit iken, sıcaklık arttıkça açık devre geriliminin yükseldiği gözlemlendi. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun gücü, sıcaklığa bağlı olarak; akım değişmediği halde gerilimin yükselmesi sayesinde diyotun ürettiği güç miktarında artışı gözlemlendi.

Kızılötesi bölgede çalışan Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun oda sıcaklığında Al – Al₂O₃ ve Cu kontaktları mekanik olarak değdirildiğinde devreden akım akmaya başlar ve bir gerilim üretir. Oda sıcaklığında ve oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklara çıkıldıkça artan açık devre gerilimini veren çizelge incelendiğinde, bu tip yapılarda Metal-1 ve Metal-2 arasındaki elektron geçişleri tünelleme akımı vasıtasıyla gerçekleştiği ve tünelleme mekanizmalarının baskın olabileceği söylenebilir çünkü ortam sıcaklığı sabit iken Seebeck'e göre sıcaklıkta bir değişim olmadığı için gerilim ortaya çıkmamaktadır ancak, Al – Al₂O₃ – Cu diyotu bir ortama bırakıldığında ortam sıcaklığına ulaşana kadar yapılacak herhangi bir ölçümde Seebeck etkisinin akıma katkısından bahsedilebilir.

Çizelge 4.2. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun karakteristikleri

Sıcaklık [K]	Açık Devre Gerilimi [V]	Güç [mW]	Maksimum Gerilim [V]	Maksimum Akım [mA]
296,8	0,9650	7,8310	0,8250	9,5000
304,3	1,0940	8,4930	0,8940	9,5000
309,8	1,1200	8,5590	0,9010	9,5000
314,1	1,1390	8,5970	0,9050	9,5000
319,6	1,150	8,6640	0,9120	9,5000
324,2	1,169	8,816	0,9280	9,5000
328,6	1,178	8,996	0,9470	9,5000
332,9	1,192	9,548	0,9840	9,5000
337,4	1,197	9,669	1,0210	9,5000
343,0	1,207	9,984	1,0510	9,5000
348,0	1,208	10,21	1,0750	9,5000
353,0	1,209	10,44	1,0990	9,5000
415,0	1,242	11,56	1,2100	9,5000

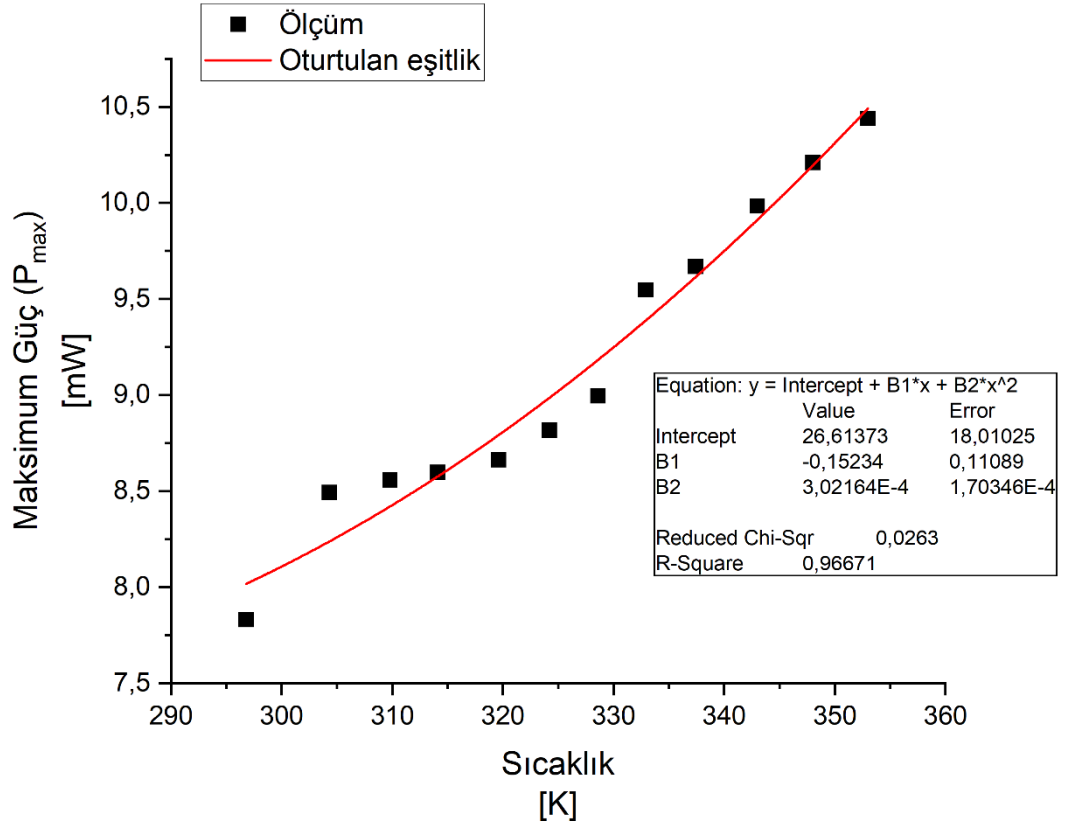
Açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı nasıl değiştiğini gösteren grafik şekil 4.3'de verildi. 296,8 – 353 K aralığında üstel bir fonksiyon olan $f(x) = a(x-b)^c$; $f(x)$ fonksiyonu ile sıcaklık – gerilim değerleri Origin 2021b kullanılarak, $f(x)$ denkleminde oturtuldu ($R^2 = 0,99612$). Bu denklemde a, b ve c birer sabittir. Bu değerler sırasıyla: $a = 0,96723$, $b = 295,83878$, $c = 0,05646$ olarak belirlendi.



Şekil 4.3. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun açık devre gerilimi – sıcaklık ilişkisi

Açık devre gerilimi sıcaklık ilişkisi incelendiğinde başlarda dik olan doğrunun eğiminin yatay bir hal almaya başladığı görülmektedir yani yükselen sıcaklıkla beraber açık devre gerilimindeki değişim miktarı giderek azalmaktadır.

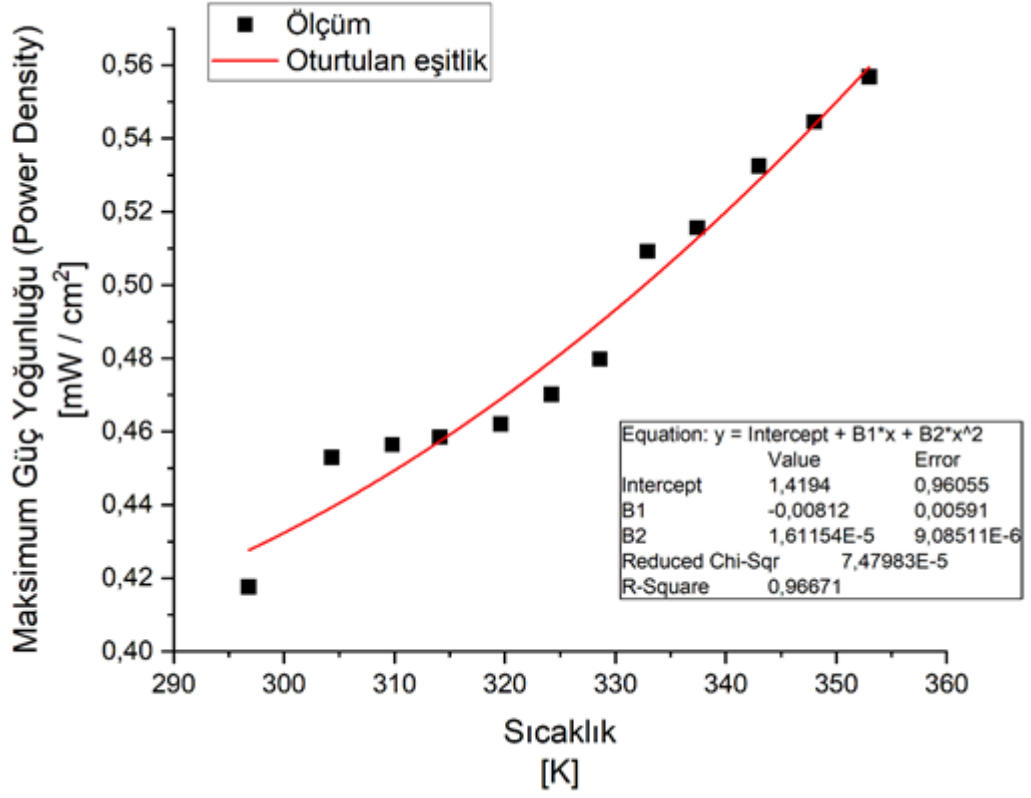
Elde edilen en yüksek güç (P_{max}) değerinin sıcaklığa bağlı nasıl değiştiğini gösteren grafik şekil 4.4’de verildi. 296,8 – 353 K aralığında polinom bir fonksiyon olan $f(x)$ fonksiyonu, $f(x) = ax^2 + bx + c$ olacak şekilde, sıcaklık – maksimum güç değerleri Origin 2021b kullanılarak, $f(x)$ denklemine oturtuldu ($R^2 = 0,96671$). Bu denklemden a, b ve c değerleri birer sabittir. Bu değerler sırasıyla, $a = 3,02164 \times 10^{-4}$, $b = -0,15234$, $c = 26,61373$ olarak belirlendi.



Şekil 4.4. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun güç – sıcaklık ilişkisi

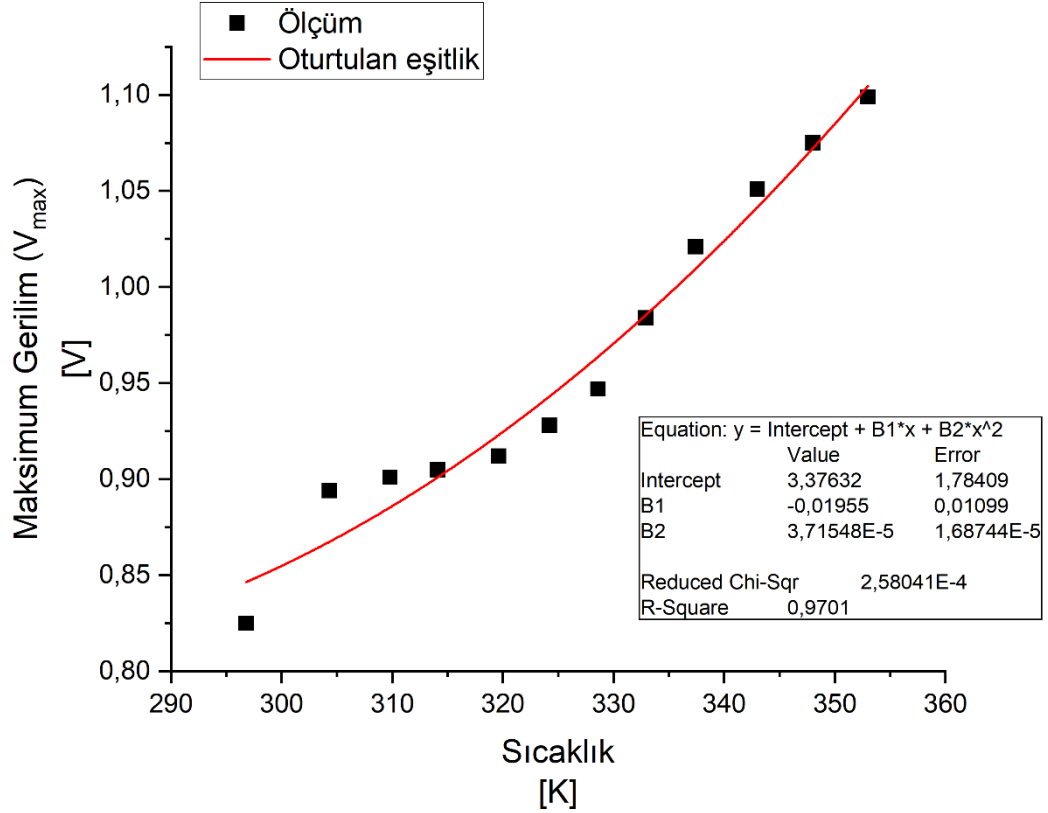
Sıcaklık arttıkça değişim göstermeyen maksimum akım (I_{\max}) değerinin maksimum gerilim (V_{\max}) değeri ile çarpımı sonucunda, sıcaklığın artışı ile güç değerlerinde yükselme gözlemlendi.

Üretilen Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun 7,5 x 2,5 dikdörtgen boyutları ile çipin alan değeri kolayca hesaplanabilir ve bu değer 18,75 cm²'dir. güç – sıcaklık eğrisi bu değere bölüldüğünde santimetrekare başına güç değeri ifadesi elde edilir. Santimetrekare başına ulaşılan sıcaklık başına güç değerleri mW/cm^2 cinsinden şekil 4.5'te verildi. Bu değerler bir polinom olan $f(x)$ fonksiyona; $f(x) = ax^2 + bx + c$ oturtuldu ($R^2=0,96671$). Burada a , b , c değerleri sırasıyla $a = 1,61154 \times 10^{-5}$, $b = -0,00812$, $c = 1,4194$ olarak belirlendi.



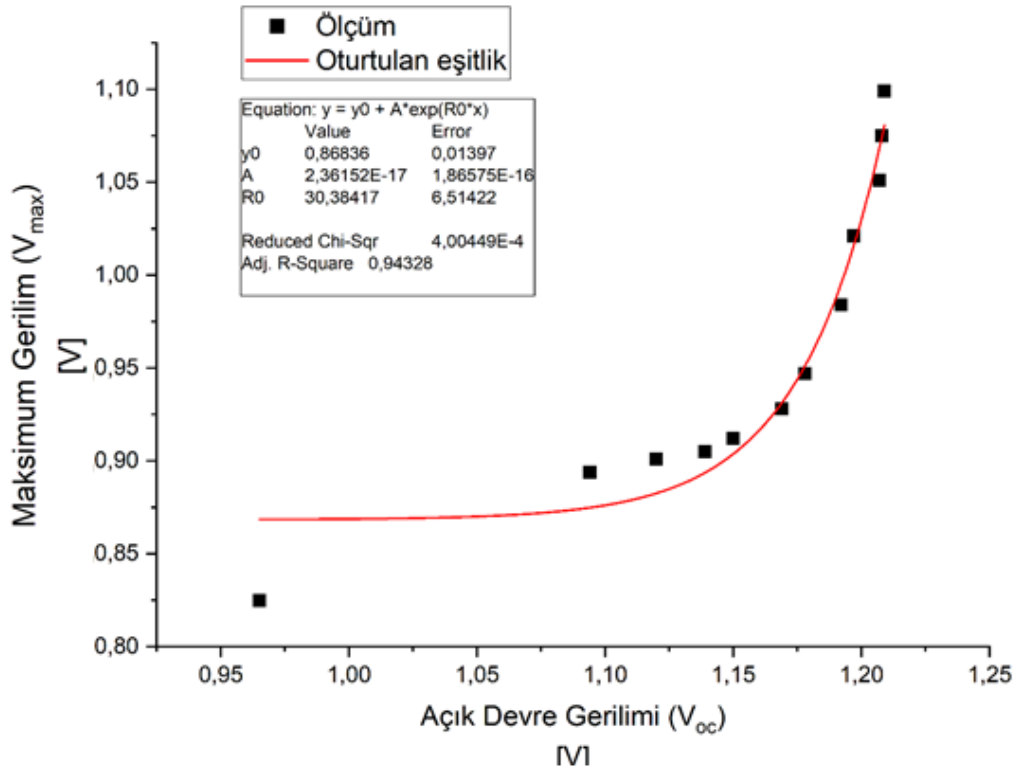
Şekil 4.5. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun güç yoğunluğu – sıcaklık ilişkisi

Daha önce bahsedilen akım ve gerilimin aynı anda; tek noktada en yüksek değerini aldığı gerilim (V_{\max}) değerlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini gösteren eğri polinom bir fonksiyon olan $f(x) = ax^2 + bx + c$ fonksiyonuna oturtuldu ($R^2=0,9701$). Bu fonksiyonda yer alan katsayılar a, b ve c değerleri sırasıyla $a = 3,71548 \cdot 10^{-5}$, $b = -0,01955$, $c = 3,37632$ olarak belirlendi. V_{\max} – Sıcaklık ilişkisini veren görsel şekil 4.6’da sunuldu.



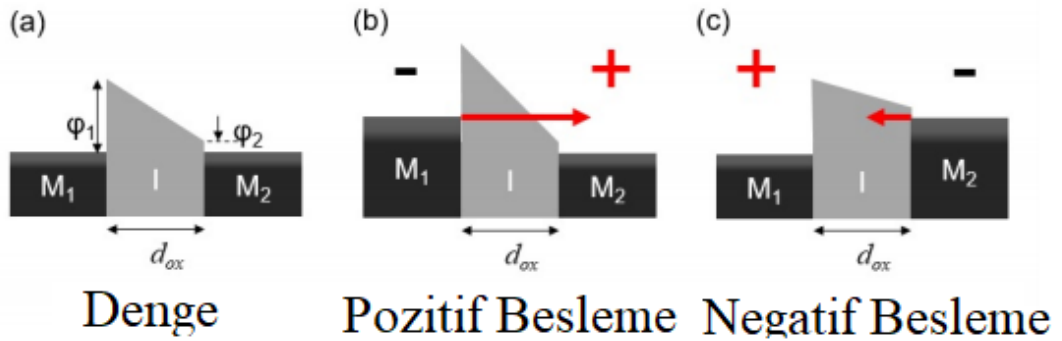
Şekil 4.6. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun maksimum gerilim – sıcaklık ilişkisi

Açık devre geriliminin (V_{oc}), V_{max} değerlerine bağlı olarak değişimini veren eğri ve V_{oc} 'nin V_{max} 'e bağlı ölçülen değerleri şekil 4.7'de verildi. Açık devre geriliminin (V_{oc}) V_{max} değerine bağlı değişimini veren fonksiyon bir üstel fonksiyondur. Bu $f(x)$ fonksiyonu $f(x) = a.exp(bx)+c$ olarak verilebilir ($R^2=0,94328$). a , b ve c değerleri sırasıyla, $a = 2,36152 \times 10^{-17}$, $b = 30,83417$, $c = 0,86836$ olarak belirlendi.

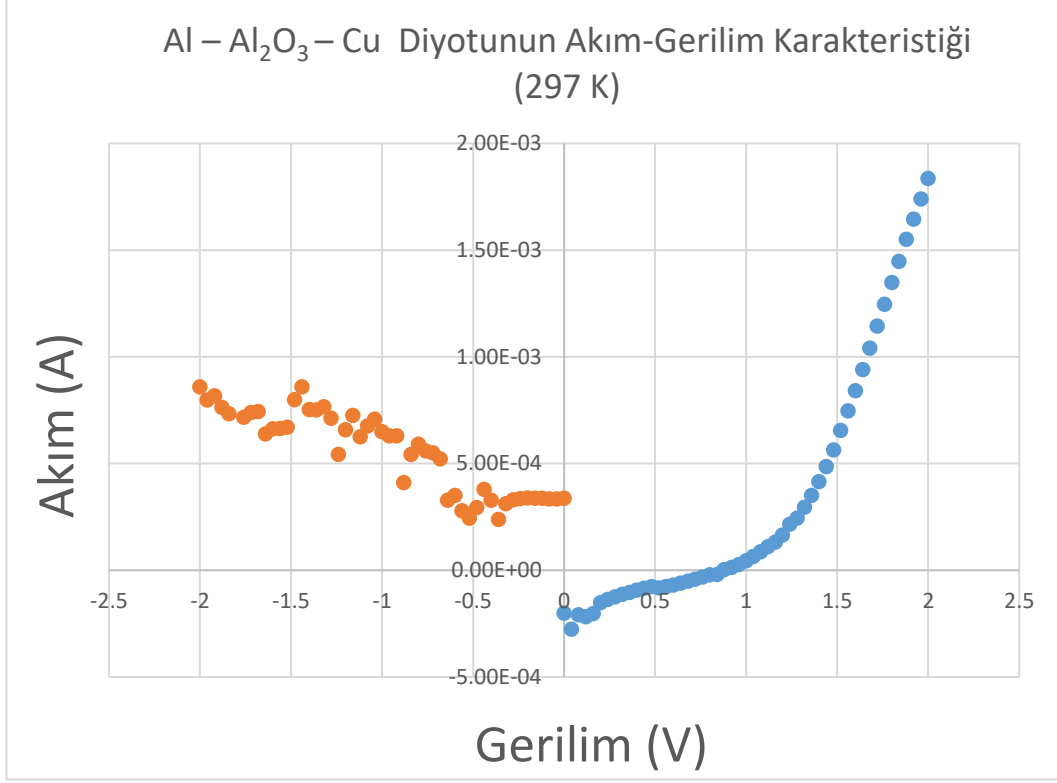


Şekil 4.7. Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun açık devre gerilimi – maksimum gerilim ilişkisi

Şekil 4.8’de bir MIM diyotunun denge anında, pozitif besleme ve negatif besleme uygulandığı zamanki tünelleme mekanizmaları verildi. Şekil 4.9’da ise Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun 297 K’de akım-gerilim karakteristikleri sunuldu.



Şekil 4.8. Bir MIM diyotundaki denge anındaki enerji bant yapısı (a), pozitif besleme durumundaki bant yapısı (b), negatif besleme durumundaki enerji bant yapısı (c) (Pelz 2018)



Şekil 4.9. 297 K’de Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun Akım-Gerilim Karakteristiği

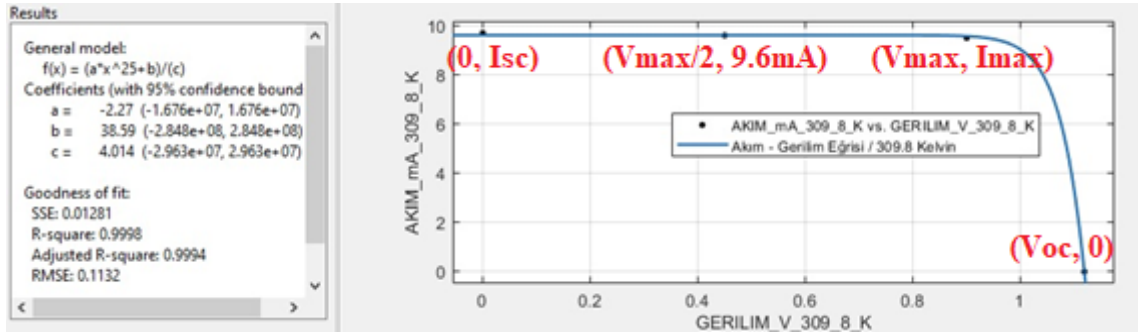
İleri besleme durumunda yalıtkan bantta bir bükülme meydana geldiği söylenebilir ve bu bükülme tünel mesafesini azaltır, elektron tüneller. Geri besleme durumunda ise efektif tünel mesafesi arttığı için daha düşük bir tünelleme akımı elde edilir (Pelz 2018).

Al – Alümina – Cu TPV diyotunun Akım – Gerilim Eğrisi ölçülürken, cihaz hangi akım değerinde ne kadar gerilim vardır, bunu hesaplamaktadır. Çözünürlüğü mA seviyesinin 1/10’u olduğu için, sadece birkaç nokta için Akım – Gerilim karakteristiği vermektedir.

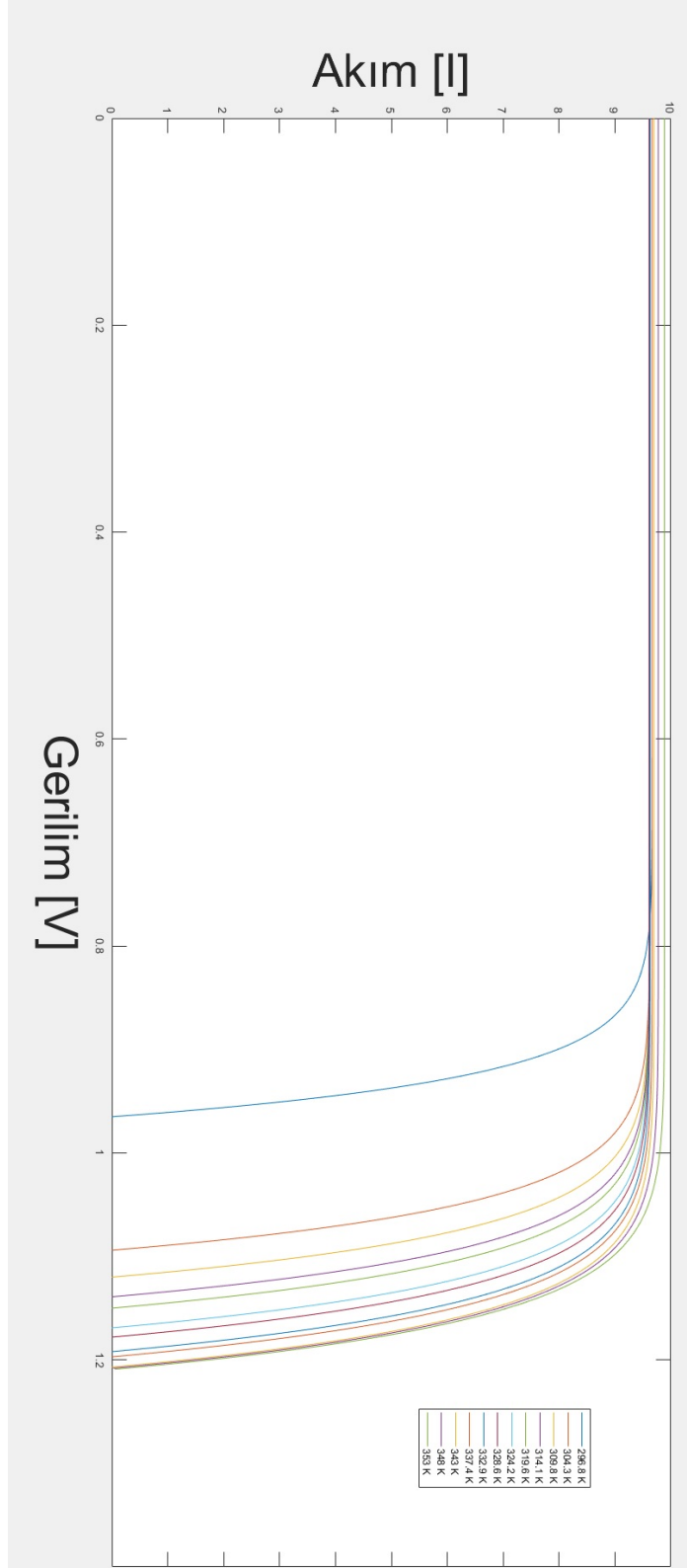
Solar Module Analyzer Prova 200A üzerinden alınan veriler ile akım – gerilim eğrisi çizme metodu aşağıda anlatıldığı şekilde uygulandı. Akım değerinin en yüksek olduğu kısa devre akımı I_{sc} , grafiğin başlangıç noktası olarak seçildi. Akım bu değerden 0,1 mA azaldığında gerilim değerinde bir artış meydana geldiği, bu gerilim değerinin, yaklaşık olarak akımın ve gerilimin aynı anda en yüksek değerini aldığı maksimum gerilim değerinin yarısına ($V_{max}/2$) yakınsadığı, yaklaşık bu değere eşit olduğu gözlemlendi. Akım ve Gerilim değişkenlerinin aynı anda en yüksek değerini aldığı nokta olan V_{max} ,

I_{max} noktası $V_{max}/2$ değerinin ardından seçildi. Bu değerden sonraki değer ise gerilim değeri olarak en yüksek değerini alacak olan açık devre gerilim değeri ile seçilen son nokta olarak ifade edildi. Bu noktaların birleştirilmesi ile elde edilen eğriler 296,8 – 353 K sıcaklığı için şekil 4.9’da sunuldu.

Al – Alümina – Cu diyotları için, Solar Module Analyzer Prova 200A ve MATLAB kullanılarak elde edilen I-V değerleri $f(x) = (ax^{25}+b) / (c)$ fonksiyonuna oturtulabileceği görüldü ($R^2 = 0,9998$).



Şekil 4.10. 309,8 K sıcaklık değeri için MATLAB’de bir I-V çizim uygulaması



Şekil 4.11. 296,8 – 353 K sıcaklık bandında yapılan ölçümler sonucu aynı grafik üzerinde verilen akım – gerilim eğrileri

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında Al – Al₂O₃ – Cu diyotu Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'nin Kimya Bölümünde üretildi, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Bu tip (Metal – Metal Oksit – Metal) yapılarda Metal Oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak elektron tünellemesi gerçekleşebildiği ve bununla birlikte Seebeck etkisinin de temel akım mekanizmaları olduğunu yani tünelleme ve Seebeck etkisinin akıma katkılarından bahsedilmiştir.

Al – Al₂O₃ – Cu diyotu Al ve Cu metalleri birbirinden farklı olduğu için bir asimetrik Metal – Metal Oksit – Metal diyotudur. Bu metallerin asimetrik olmasını sağlayan Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasında bulunan iş fonksiyonlarının farklı oluşudur. Bu sistemin enerji bant diagramları metaller ve metal oksit tabakası için çizildi ve bariyer yükseklikleri hesaplandı ve elektronların çeşitli şekillerde bariyeri aşma olasılıklarının bulunduğunu ve bu olasılıkları artabileceği; örneğin, sistemin ısıtılması ile tünelleme olasılığının artırılabilir gibi olayların üzerinde durulmuştur.

Al – Al₂O₃ ve Cu tabakaları fiziksel olarak birbirlerinden ayrılabilir ve bu tabakalar tekrar olarak birleştirildiğinde oda sıcaklığında bulunan sistemde 18.75 cm² alana sahip bir diyot çipinin tekrar güç üretebildiği deneysel olarak gözlenmiştir. Bu da oda sıcaklığında bulunan Al – Al₂O₃ – Cu diyotunun ortamdaki gelen kızılötesi ışınımı elektrik enerjisine dönüştürebildiği, oda sıcaklığında bulunan bu diyot çipinin ortamda bulunan ısıyı elektrik enerjisine dönüştürürken ısınmadığını, dışarıdan bir etkiyle ortam sıcaklığı artırıldığında yani bu diyot çipi ortam ile birlikte ısıtıldığında elde edilen maksimum güç miktarında da bir ayrıca artış olduğu gözlemlendi.

Diyotun I-V karakteristikleri alınırken, farklı sıcaklıklarda elde edilen açık devre gerilim değerlerinin doğrusal değil üstel bir fonksiyon olarak değiştiği her sıcaklık artışında açık devre gerilimindeki değişim miktarının da azaldığı deneysel olarak gözlemlendi.

Çözünürlüğü mA seviyesinin 1/10'u olan Solar Module Analyzer Prova 200A cihazı ile ölçülen maksimum akım değerlerinin sıcaklığın değişmesine rağmen 296,8 – 415 K sıcaklık bandında değişmediği gözlemlendi.

Oda sıcaklığında 7.831 mW ve sıcaklık 415 K 'e ulaştığında 11.56 mW güç üreten bu diyot çipinin üretimi diğer termofotovoltaiklerin üretim aşamalarından kolay oluşu ve kullanılan malzemelerin doğada kolay bulunması ve ucuz olmasından dolayı birçok avantajı vardır.

Oksit tabakasının kalınlığı tünelleme mesafesini belirlediğinden, bu mesafe ile oynayarak daha farklı frekanslarda çalışan diyotların yapılması da mümkündür.

Sadece ülkemizde değil, tüm dünyada kızılötesi frekanslarda enerji toplayan sistemlerden elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleştirilerek, bu tip yapılardan yararlanmaya ihtiyacımız vardır. Boşa giden bir kızılötesi radyasyon enerjisinin, diğer bir enerji türüne dönüşümünü mümkün kılan bu sistemler, ilerleyen teknoloji ile gelecekte daha çok kendilerine yer bulacaklardır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2020.** <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage> (Erişim tarihi 23.08.2020).
- Anonim, 2021.** Elektromanyetik spektrum resmi, <https://image.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum2.html> (Erişim tarihi 08.01.2021).
- Ayberk, U. 2015.** Determining Methods of Utilizations of Waste Heat in Industrial Applications and Marking a Thermophotovoltaic Application, *M.Sc. Thesis*, Istanbul, Turkey
- Balanis, C.A. 2012.** Advanced Engineering Electromagnetics. WILEY, USA, 1018 pp
- Bauer, T. 2011.** Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design. Springer, Germany, 202 pp
- Bean, J.A., Tiwari, B., Szakmány, G., Bernstein, G.H., Fay P., Porod, W. 2009.** Antenna length and polarization response of antenna-coupled MOM diode infrared detectors. *Infrared Physics & Technology*, 53(3):182-185
- Bhatt, K., Kumar S., Tripathi C.C. 2018.** Highly sensitive Al/Al₂O₃/Ag MIM diode for energy harvesting applications. *International Journal of Electronics and Communications*, 111(2019): 152925
- Boylestad, R., Nashelsky, L. 1998.** Electronic Devices and Circuit Theory (seventh edition). Prentice Hall, USA: pp:901
- Byrnes, J. 2008.** Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. Prometheus Inc., Newport, USA, pp:287
- Chagaan, B., Wolfgang P., T. Roska. 2010.** Cellular Nanoscale Sensory Wave Computing. Springer, USA, pp:249,
- Chubb, D.L. 2007.** Fundamentals of Thermophotovoltaic Energy Conversion. Elsevier, The Netherlands, 515 pp
- Colinge, J.P., Colinge C.A. 2002.** Physics of Semiconductor Devices. Kluwer Academic Publishers, USA, pp: 436
- Coutts, T.J. 2001.** An Overview of Thermophotovoltaic Generation of Electricity. Solar Energy Materials & Solar Cells. *Elsevier*, 66: 443-452
- Daniels, A. 2010.** Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs (second edition). SPIE Press, USA, pp:174
- Efendi, K.B. 2017.** Dar Bantlı GaInAsSb Termofotovoltaik Yapıların Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Filatova, E.O., Konashuk A.S. 2015.** Interpretation of the Changing the Band Gap of Al₂O₃ Depending on Its Crystalline Form: Connection with Different Local Symmetries. *The Journal of Physical Chemistry*, 119(35): 20755–20761
- Genç, B. 2006.** Elektromanyetik Spektrumun X-Işını ve Görünür Bölgesinde, Ortamlardan Yayılan Fotonları Kaydetmek için Spektrometre ve Görüntüleme Sistemlerinin Tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Fizik Anabilim Dalı, Kocaeli, Türkiye
- Gullu, H.H., Yildiz, D.E. 2019.** Analysis of forward and reverse biased current–voltage characteristics of Al/Al₂O₃/n-Si Schottky diode with atomic layer deposited Al₂O₃ thin film interlayer. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 30(21):19383–19393.
- Hickmott, T.W. 1999.** Polarization measurements in anodized Al-Al₂O₃-Au diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 75(19): 2999–3001

- Hickmott, T.W. 2005.** Temperature-dependent Fowler-Nordheim Tunneling and a Compensation Effect in Anodized Al-Al₂O₃-Au diodes. *J. Appl. Phys.*, 10(2005): 97
- Hickmott, T.W. 2009.** Voltage-controlled negative resistance and electroluminescent
- Hickmott, T.W. 2015.** Spectra of surface plasmon polariton enhanced electroluminescence from electroformed Al-Al₂O₃-Ag diodes. *J. Appl. Phys.*, 117(9):1-10
- Hickmott, T.W. 2017.** Millimeter distance effects of surface plasmon polaritons in electroformed Al-Al₂O₃-Ag diodes. *J. Appl. Phys.*, 121(8):1-7
- Hickmott, T.W. 2019.** Electron emission and ultraviolet electroluminescence from valence-band states and defect conduction bands of electroformed Al-Al₂O₃ -Ag diodes. *J. Appl. Phys.*, 125(2):1-11.
- Houska, J., Blazek J., Rezek J., Proksova S. 2012.** Overview of optical properties of Al₂O₃ films prepared by various techniques. *Thin Solid Films*, 520: 5405-5408
- Hu, Y., Zhang X., Xue, T., Liu, C. 2014.** Characteristics of electron emission of Al-Al₂O₃-Ti/Au diode with a new double-layer insulator. *J. Vac. Sci. Technol. B, Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.*, 32(6): 062204
- Jayaswal, G., Belkadi A., Meredov A., Pelz B., Moddel G., Shamim A. 2018.** Optical rectification through an Al₂O₃ based MIM passive rectenna at 28.3 THz. *Materialstoday Energy*, 7(2018): 1-9
- Ji, W., Shen, H., Zhang, H., Kanga, Z., Zhang, H. 2018.** Over 800% Efficiency Enhancement of All-Inorganic Quantum-Dot Light Emitting Diodes with an Ultrathin Alumina Passivating layer. *Nanocsale*, 10: 11103–11109
- Kaya, U. 2011.** GaSb/InAs Süperörgülerinde Optik Destekli Elektron-Deşik Yaratılması ve MATLAB’da Benzeşimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Türkiye
- Kim, K.P., Lee, K.S., Kim, T.W., Woo, D.H., Kim, J.H., Seo, J.H. Kim, Y.K. 2007.** Enhancement of the Light Extraction Efficiency in Organic Light Emitting Diodes Utilizing a Porous Alumina Film. *ScienceDirect* ,516: 3633- 3636
- Mattarolo, G. 2007.** Development and Modelling of a Thermophotovoltaic System. *Ph.D. Thesis*, Kassel University, Germany
- Moddel, G., Grover S. 2012** Engineering the Current–Voltage Characteristics of Metal–Insulator–Metal Diodes Using Double–Insulator Tunnel Barriers. *Solid-State Electronics*, 67: 94-99
- Moddel, G., Grover S. 2013.** Rectenna Solar Cells. Springer, USA, pp:399
- Mohammadi, E., Ghafari M., Behdad N. 2020.** Wide Dynamic Range, Angle Sensing, Long-Wave Infrared Detector Using Nano-Antenna Arrays. *Scientific Reports*, 10(2488):1-11
- Mulla, R., Glover K., Dunnill, W.C. 2021.** An Easily Constructed and Inexpensive Tool to Evaluate the Seebeck Coefficient. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70(2001): 1001707
- Mutlu, T. 2010.** Au/p-GaAs_{1-x}Px/n-GaAs Yapılı P-N Eklem Diyotun Tavlanma Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir
- Piprek, J. 2003.** Semiconductor Optoelectronic Devices. Elsevier, USA, pp:279
- Ross, C.A. 1996.** Properties of Radio Frequency–Sputtered Alumina Films on Flat and Grooved Substrates. *JVSTA*, 14(4): 2511- 2516
- Sayın, I.** Kesirli Fourier Dönüşümünün Maxwell Denklemlerine Uygulanması. *Doktora Tezi*, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi, Ankara

- Sertel, T. 2016.** Seyreltik Azotlu p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Fizik Anabilim Dalı Ankara, Türkiye
- Shanawani, M., Masotti, D., Costanzo A. 2017.** THz Rectennas and Their Design Rules. *Electronics*, 6(4):1-33
- Shriwastava, S., Tripathi C. 2019.** Metal–Insulator–Metal Diodes: A Potential High Frequency Rectifier for Rectenna Application. *Journal of Electronic Materials*, 48(2019):2635-2652
- Slovick, B.A., Bean, J.A., Krenz, P.M., Boreman, G.D. 2010.** Directional control of infrared antenna-coupled tunnel diodes. *Optics Express*, 18(20):20960-20967
- spectra of Al-Al₂O₃ -Au diodes. *J. Appl. Phys*, 106(10):1-9
- Streetman, B.G., Banarjee S.K. 2006.** Solid State Electronic Devices. Pearson, Austin, USA, 581 pp
- Varshni, Y.P. 1967.** Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors. *Physica*, 34: 149-154
- William, E., Mitchell J., Mitchell J. W. 1951.** The work functions of copper, silver and aluminium. *H.H.Wills Physical lab.*, 210(1100):70-84
- Yariv, A., Yeh P. 2007.** Photonics – Optical Electronics in Modern Communications. Oxford University Press, USA, 836 pp

EKLER

EK 1 296,8 – 415 K Sıcaklık Bandı için Al – Alümina – Cu TPV Diyot Karakteristiklerini Veren Aşağıdaki Fonksiyonlara Oturtulmuş Denklemler ve Denklemlerdeki Katsayı Değerleri

EK 2 Oda Sıcaklığında Al – Al₂O₃ – Cu Diyotunun Ölçüm Düzenegi

EK 3 Al – Al₂O₃ – Cu Diyotunun Kontaklarının Birbirinden Ayrılma Durumu ve Alüminyum Tabakasındaki Çeşitli Kalınlıktaki Alümina Yüzeyi

EK 1 296,8 – 415 K Sıcaklık Bandı için Al – Alümina – Cu TPV Diyot Karakteristiklerini Veren Aşağıdaki Fonksiyonlara Oturtulmuş Denklemler ve Denklemlerdeki Katsayı Değerleri

Al - Alümina - Cu TPV Diyot Karakteristiklerini Veren Denklemler				
Açık Devre Gerilimi V_{oc} [V] - Sıcaklık [K]	Güç [mW] - Sıcaklık [K]	Güç Yoğunluğu [mW/cm²] - Sıcaklık [K]	Maksimum Gerilim V_{max} [V] - Sıcaklık [K]	Açık Devre Gerilimi V_{oc} [V] - Maksimum Gerilim V_{max} [V]
$a(x-b)^c$	ax^2+bx+c	ax^2+bx+c	$ax^2 + bx + c$	$a.exp(bx)+c$
$a = 0,96723$	$a = 3,02164 \times 10^{-4}$	$a = 1,61154 \times 10^{-5}$	$a=3,71548 \times 10^{-5}$	$a=2,36152 \times 10^{-17}$
$b = 295,83878$	$b = -0,15234$	$b = -0,00812$	$b = -0,01955$	$b = 30,83417$
$c = 0,05646$	$c = 26,61373$	$c = 1,4194$	$c = 3,37632$	$c = 0,86836$

EK 2 Oda Sıcaklığında Al – Al₂O₃ – Cu Diyotunun Ölçüm Düzenegi



EK 3 Al – Al₂O₃ – Cu Diyotunun Kontaktlarının Birbirinden Ayrılma Durumu ve Alüminyum Tabakasındaki Çeşitli Kalınlıktaki Alümina Yüzeyi



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mert ÇAVUŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa - 18.11.1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Anadolu Erkek Lisesi - 2009
Lisans : İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü - 2014

Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Erikli Su - 2016

İletişim (e-posta) : mertcavus90@yaani.com

Yayımları :