



**DAR BANTLI GaInAsSb TERMOFOTOVOLTAİK
YAPILARIN ELEKTRİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Banu KUCUR EFENDİ



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAR BANTLI GaInAsSb TERMOFOTOVOLTAİK YAPILARIN ELEKTRİK
VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Banu KUCUR EFENDİ

Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2017

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Banu KUCUR EFENDİ tarafından hazırlanan “Dar Bantlı GaInAsSb Termofotovoltaik Yapıların Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Başkan: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye: Prof. Dr. Necdet COŞKUN
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Kimya Anabilim Dalı

İmza

Üye: Doç. Dr. S. Kemal AKAY
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye: Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR
Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye: Doç. Dr. Öznur KARAAĞAÇ
Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

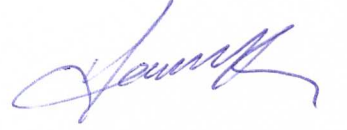
21/08/2017

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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.**

21/08/2017

Banu Kucur Efendi



ÖZET

Doktora Tezi

DAR BANTLI GaInAsSb TERMOFOTOVOLTAİK YAPILARIN ELEKTRİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Banu KUCUR EFENDİ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Termofotovoltaik (TPV) sistemler ısınmış bir kaynaktan yayınlanan infrared radyasyonu absorbe ederek fotovoltaik etki sayesinde elektrik enerjisi üretirler. Yasak bant genişliğinin mümkün olduğunca dar olması TPV sistemlerde kullanılacak olan TPV diyotlar için önemlidir. Dolayısıyla, yapılan çalışmalar III – V grubu bileşik yarıiletkenler ile bunların üç ve dört bileşenli alaşımlarına odaklanmış durumdadır. Dörtlü III – V grubu alaşımları hem yasak bant aralığının hem de örgü sabitinin kontrolünü mümkün kıldığından dolayı TPV diyotlar için önemlidir. Bu çalışmada ele aldığımız, GaSb altlık ile örgü uyumlu dört bileşenli GaInAsSb alaşımlar 0.5 eV kadar dar bir bant aralığı ile büyütülebilirler.

Bu tez çalışmasında, GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV hetero diyotların elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Farklı aktif bölge çaplarına sahip benzer yapıları diyotların farklı sıcaklıklarda akım – gerilim karakteristikleri incelenerek karanlık akım mekanizmaları tespit edilmiştir. Farklı ışık yoğunluklarında fotoakım – gerilim karakteristikleri incelenen yapılardan 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun daha belirgin ışık duyarlılığının olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, eklem temas potansiyeli değerinin tespit edilebilmesi için genel olarak kullanılan I–V ve C-V karakteristiklerine ek olarak ilk kez geliştirmiş olduğumuz optik deney düzeneği ile farklı fotodiyotların temas potansiyelleri ölçülmüş ve sonuçların literatürdeki değerler ile uyum sağladığı görülmüştür. İncelenen yapı için elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun TPV sistemler için kullanışlı ve geliştirilmeye açık olduğu kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yarıiletken, termofotovoltaik, optoelektronik, heteroyapı

2017, x + 92 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF LOW BANDGAP GaInAsSb THERMOPHOTOVOLTAIC STRUCTURES

Banu KUCUR EFENDİ

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOGLU

Thermophotovoltaic (TPV) systems absorb the infrared radiation emitted by a heated source and produce electrical energy by way of the photovoltaic effect. It is important for the TPV diodes in the TPV systems to have bandgaps as narrow as possible. Therefore, investigations focus on III – V compound semiconductors and their ternary and quaternary alloys. Quaternary III – V alloys are important for TPV diodes due to the possibility of controlling both the bandgap and the lattice constant. Quaternary GaInAsSb alloys that investigated in this study can be grown lattice matched to GaSb substrates with bandgaps as low as 0.5 eV.

In this research, the electrical and optical properties of the GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV hetero diodes were investigated. Current – voltage characteristics of the diodes with different active region diameter and same structure were analyzed and dark current mechanisms of the diodes were obtained. It is observed from the photocurrent – voltage characteristics at different light intensities that n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diode with 2 mm active region diameter has more clear light sensitivity than the other structures. Additionally, besides the conventional I – V and C – V methods, the built-in potential value of different photodiodes was measured by an optical setup that we designed for the first time and it is found that the results are in good agreement with the literature. Considering the results of the investigated structures, n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diode is believed to be convenient and suitable for development.

Key words: Semiconductor, thermophotovoltaic, optoelectronics, heterostructure

2017, x + 92 pages.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca, bilgi ve tecrübesi ile her zaman bana destek olan ve yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na teşekkür ederim. Yüksek lisans ve doktora eğitimimde her ihtiyaç duyduğumda yardımını esirgemeyen sevgili ağabeyim Arő. Gör. Dr. M. Cüneyt HACIŐSMAİLOĐLU'na, manevi destekleri ile her zaman yanımda olan, huzurlu ve mutlu bir çalışma ortamı sağlayan Arő. Gör. Dr. Fatma KOÇAK'a, Yrd. Doç. Dr. Handan ENGİN KIRIMLI'ya, Doç. Dr. Mürőide ŐAFAK HACIŐSMAİLOĐLU'na ve sevgili dostum Arő. Gör. Dr. Ürkiye AKAR TARIM'a en içten teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği veren sevgili annem Ferah KUCUR ve sevgili babam Yalçın KUCUR'a, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve desteğini her an hissettiğim sevgili eőim Mehmet EFENDİ'ye sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Banu Kucur Efendi

21/08/2017

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|--------------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER | 4 |
| 2.1. Termofotovoltaik Yapıların Geçmişi | 4 |
| 2.2. Termofotovoltaik Sistemlerin Önemi ve Avantajları..... | 5 |
| 2.3. Fotovoltaik Teknolojisi ile Karşılaştırma..... | 6 |
| 2.4. Yarıiletken Malzemeler..... | 9 |
| 2.4.1. TPV Yapılar için IV. grup yarıiletkenleri | 10 |
| 2.4.2. Bileşik yarıiletkenler | 11 |
| 2.5. p-n Eklemler..... | 16 |
| 2.6. Karanlık Akım Mekanizmaları | 21 |
| 2.7. Heteroeklemler | 23 |
| 2.8. Kuantum Kuyulu Heteroeklemler | 27 |
| 2.9. Termofotovoltaik Yapıların Çalışma Prensibi | 28 |
| 2.9.1. Isı kaynağı | 29 |
| 2.9.2. Yayıcı | 29 |
| 2.9.3. Filtre | 31 |
| 2.9.4. Fotovoltaik Hücre..... | 31 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 36 |
| 3.1. Malzeme Üretim Teknikleri..... | 36 |
| 3.1.1. Likit (Sıvı) faz epitaksi yöntemi | 38 |
| 3.2. Dar Bantlı GaInAsSb Temelli TPV Diyot | 40 |
| 3.3. Elektriksel Ölçüm Deney Düzenegi..... | 42 |
| 3.3.1. Akım – gerilim ölçüm sistemi..... | 43 |
| 3.3.2. Kapasitans – gerilim ölçüm sistemi | 44 |
| 3.4. Optik Ölçüm Deney Düzenegi | 44 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 48 |
| 4.1. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV Diyotların Akım – Gerilim Karakteristikleri | 48 |
| 4.2. 2 mm Aktif Bölge Çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV Diyotun C – V Karakteristiği | 59 |
| 4.3. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV Diyotların Optik Özellikleri | 60 |
| 4.3.1. Fotoakım – gerilim karakteristikleri..... | 60 |
| 4.3.2. GaInAsSb temelli TPV diyotun spektral karakteristiği | 66 |
| 4.4. Optik Yöntem ile Temas Potansiyeli Ölçümleri | 69 |
| 4.4.1. GaInAsSb temelli TPV diyot için optik ölçüm yöntemi..... | 79 |
| 5. SONUÇ | 82 |
| KAYNAKLAR | 85 |
| EKLER | 89 |
| EK 1 İdeallik Faktörünün Hata Hesabı | 90 |



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|--------------|--------------------------------------|
| V_{oc} | Açık devre gerilimi |
| I | Akım |
| A | Aktif bölge alanı |
| E_a | Aktivasyon enerjisi |
| N_a | Alıcı katkı konsantrasyonu |
| χ | Alınganlık |
| ϵ_s | Bağıl dielektrik sabiti |
| I_{btb} | Banttın banda tünelleme akımı |
| k_B | Boltzmann sabiti |
| L_h | Boşluk difüzyon mesafesi |
| D_h | Boşluk difüzyon sabiti |
| μ_h | Boşluk mobilitesi |
| λ | Dalgaboyu |
| N_V | Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu |
| E_V | Değerlik bant kenarı enerjisi |
| ΔE_V | Değerlik bandı süreksizliği |
| ϵ | Dielektrik sabiti |
| I_{dif} | Difüzyon akımı |
| n_i | Doğal taşıyıcı konsantrasyonu |
| I_F | Doğru yön akımı |
| FF | Doldurma faktörü |
| I_0 | Doyma akımı |
| R | Duyarlılık |
| C | Eklem kapasitansı |
| E_m | Elektrik alan |
| L_e | Elektron difüzyon mesafesi |
| D_e | Elektron difüzyon sabiti |
| m_0 | Elektron kütlesi |
| μ_e | Elektron mobilitesi |
| e | Elektron yükü |
| m_h | Etkin boşluk kütlesi |
| m_e | Etkin elektron kütlesi |
| τ_e | Etkin taşıyıcı ömrü |
| E_F | Fermi seviyesi |
| I_{ph} | Fotoakım |

| | |
|--------------|--|
| V | Gerilim |
| n | İdeallik sabiti |
| N_c | İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu |
| E_c | İletkenlik bant kenarı enerjisi |
| ΔE_c | İletkenlik bandı süreksizliği |
| x | İndiyum katkı oranı |
| I_{tat} | Kapanlar yardımıyla oluşan tünelleme akımı |
| I_d | Karanlık akım |
| I_{sc} | Kısa devre akımı |
| V_{bi} | Kontak potansiyeli |
| η | Kuantum verimi |
| I_{max} | Maksimum akım |
| V_{max} | Maksimum gerilim |
| \hbar | Planck sabiti |
| T | Sıcaklık |
| σ | Sıcaklık katsayısı |
| I_R | Ters yön akımı |
| W | Tükenim bölgesi genişliği |
| I_{g-r} | Üretim – yeniden birleşme akımı |
| N_d | Verici katkı konsantrasyonu |
| E_g | Yasak bant aralığı |
| Q | Yük |

Kısaltmalar Açıklama

| | |
|-------|---|
| I-V | Akım-Gerilim |
| VPE | Buhar Faz Epitaksi |
| C-V | Kapasitans-Gerilim |
| MOCVD | Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme |
| MBE | Moleküler Demet Epitaksi |
| LPE | Sıvı Faz Epitaksi |
| SEM | Taramalı elektron mikroskobu |
| TPV | Termofotovoltaik |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.1. | III-V bileşikleri ve onların üçlü ve dördü alaşımları için örgü sabitine bağlı yasak bant genişlikleri..... | 12 |
| Şekil 2.2. | $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ katı çözeltilisinin kompozisyonuna bağlı bant aralığı.... | 14 |
| Şekil 2.3. | (a) eklem oluşmadan önce p-tipi ve n-tipi bölgeler (b) bant diyagramları (c) tükenim bölgesinde elektrik alan (d) termal dengede p-n eklem enerji bant diyagramı..... | 17 |
| Şekil 2.4. | İdeal p-n eklem I-V karakteristiği (a) Lineer (b) Yarılogaritmik..... | 19 |
| Şekil 2.5. | Heteroeklem tipleri: (a) I. tip iç içe bant düzenli, (b) II. tip basamak bant düzenli (c) II. tip ayrılmış bant düzenli | 24 |
| Şekil 2.6. | p – n heteroeklemin şematik gösterimi: (a) eklem oluşumundan önce (b) eklem oluşuktan sonra enerji bant diyagramları (termal denge halinde)..... | 25 |
| Şekil 2.7. | Kuantum kuyusunun şematik gösterimi..... | 27 |
| Şekil 2.8. | TPV dönüşüm şeması..... | 28 |
| Şekil 2.9. | Diyot bölgelerinin şematik gösterimi..... | 32 |
| Şekil 2.10. | Güneş pilinin karanlık ve aydınlatılmış durumda I-V karakteristiği..... | 33 |
| Şekil 2.11. | Güneş pilinin çalışma noktası | 34 |
| Şekil 3.1. | LPE ve MBE ile üretilmiş GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapısı için (a) Spektral duyarlılık (b) Karanlık akım değerlerinin karşılaştırması ... | 37 |
| Şekil 3.2. | LPE düzeneği | 38 |
| Şekil 3.3. | GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun şematik gösterimi | 40 |
| Şekil 3.4. | GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapısının kesit SEM görüntüsü | 41 |
| Şekil 3.5. | n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun enerji bant diyagramının şematik gösterimi | 41 |
| Şekil 3.6. | Standart diyot kalıbına yerleştirilmiş olan numune..... | 42 |
| Şekil 3.7. | Elektriksel ölçümler için kurulan sistemin şeması..... | 43 |
| Şekil 3.8. | Optik ölçümler için kurulan sistemin şeması | 45 |
| Şekil 3.9. | Monokromatör çalışma prensibi..... | 46 |
| Şekil 3.10. | Optik deney düzeneği..... | 47 |
| Şekil 4.1. | 1 mm aktif bölge çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri | 48 |
| Şekil 4.2. | 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n diyotun sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri..... | 50 |
| Şekil 4.3. | 1 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri | 51 |
| Şekil 4.4. | n-n-p anizotip yapının sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri | 51 |
| Şekil 4.5. | 1 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyot ile p-p-n TPV diyotun karanlık akım karşılaştırması | 53 |
| Şekil 4.6. | 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri | 54 |
| Şekil 4.7. | 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri | 54 |
| Şekil 4.8. | 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun I – V karakteristiklerinin I eksenine extrapole edilmesi ile elde edilen doyma akımının sıcaklığa | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | bağlı değişimi | 56 |
| Şekil 4.9. | 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için -0,5 V'ta ters yöndeki akımın sıcaklığa göre değişimi..... | 57 |
| Şekil 4.10. | 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n TPV diyot ile 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p heteroyapıların karanlık akım karşılaştırması..... | 58 |
| Şekil 4.11. | 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun C – V karakteristiği (T = 300 K)..... | 59 |
| Şekil 4.12. | 1 mm aktif bölge çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği (T = 300 K) | 61 |
| Şekil 4.13. | 1 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği (T = 300 K) | 62 |
| Şekil 4.14. | 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği (T = 300 K) | 63 |
| Şekil 4.15. | Sabit ışık yoğunluğunda 1 mm ve 2 mm çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotların I – V karşılaştırması..... | 63 |
| Şekil 4.16. | 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun ışık yoğunluğuna bağlı (a) açık devre gerilimi (b) kısa devre akımı | 64 |
| Şekil 4.17. | Fotoakımın spektral dağılımı (T = 300 K) | 66 |
| Şekil 4.18. | GaInAsSb temelli TPV diyotun farklı sıcaklıklardaki spektral dağılımı | 67 |
| Şekil 4.19. | (a) Dengede (b) İletim yönünde beslenmiş (c) Ters yönde beslenmiş p – n eklem | 69 |
| Şekil 4.20. | Yapı potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneği şeması | 70 |
| Şekil 4.21. | Temas potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneği | 71 |
| Şekil 4.22. | Vishay BPV10 silikon fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri | 73 |
| Şekil 4.23. | Laser Components InGaAs fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri | 75 |
| Şekil 4.24. | Laser Components Germanyum fotodiyotun (a) I – V (b) Ters yön optik ölçüm (c) İletim yönü optik ölçüm grafikleri..... | 77 |
| Şekil 4.25. | GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri..... | 79 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 2.1. GaSb ile örgü uyumlu $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ kompozisyonlarının bazı temel özellikleri..... | 15 |
| Çizelge 3.1. $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ve $Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$ epitaksiyel tabakalarının parametreleri..... | 40 |



1. Giriş

Isı enerjisinin elektrik enerjisine verimli, pratik ve düşük maliyetli dönüştürülebilmesi neredeyse son elli yıldır araştırmacıların dikkatini çeken bir konu haline gelmiştir. Termofotovoltaik (TPV) yapılar ısıyı direkt olarak elektrik enerjisine çeviren p-n eklem temelli yarıiletken cihazlardır. Daha iyi bir ifadeyle, TPV aygıtlar ısınmış bir kaynaktan yayınlanan özellikle infrared radyasyonu absorbe ederek fotovoltaik etki sayesinde elektrik enerjisi üreten yapılardır. Bu sebeple, bir kaynaktan yayınlanan infrared radyasyonu, herhangi hareketli bir parça yahut sıvı gereksinimi olmaksızın, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen; sessiz, kompakt, güvenli ve yüksek verimli TPV sistemler cazip bir fikir olarak gündemdeki yerini korumaktadır (Mauk 2006, Boriskina ve ark. 2016).

Aslında TPV hücreler p-n eklem güneş pilleri ve fotodiyotların daha düşük yasak bant aralıklı versiyonlarıdır. Radyasyon çevrimi açısından fotovoltaik yapılar ile benzer bir prensiple çalışıyor olmalarına rağmen aralarında bazı önemli farklılıklar da mevcuttur. Örneğin fotovoltaik sistemlerde radyasyon kaynağı yalnızca, dünyadan 150×10^6 kilometre kadar uzak ve yaklaşık 6000 K sıcaklığa sahip olan güneş iken; TPV yapılar çok daha düşük sıcaklıktaki ve sadece santimetre mertebesinde bir uzaklıkta bulunan çeşitli kaynaklardan gelen radyasyondan faydalanabilirler (Bauer ve ark. 2004). Geleneksel güneş pilleri ağırlıklı olarak görünür bölgeyi kullanırken, TPV'ler yakın infrared bölgede çalışacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu da, verimli bir dönüşüm için daha düşük yasak bant aralıklı yarıiletken kullanımını gerektirir. Dolayısıyla TPV alanındaki gelişmelerin III-V grubu bileşik yarıiletkenler ile doğrudan alakalı olacağı açıkça görülmektedir (Coutts 2001).

TPV hücrelerin (diyotların) büyük bir kısmı dar bant aralıklı (0.25-0.70 eV) III-V grubu bileşik yarıiletkenler ile bunların üç ve dört bileşenli alaşımları ile yapılmaktadır. Her ne kadar ticari yarıiletken teknolojisi bu materyallerin üzerine kurulmuş olmasa da; detektör, ışık yayan diyot (LED) ve lazerleri içeren orta-infrared optoelektronik teknolojisi için yerleşmiş kullanım alanları mevcuttur. Halen, özellikle düşük maliyetin ön planda olduğu alanlarda silisyum (Si), germanyum (Ge) ve çeşitli II-VI grubu bileşikler ve bunların alaşımlarından oluşan TPV hücre çalışmaları da devam etmektedir. Ancak, araştırma

faaliyetleri verimlerinin yüksek olması ve teknolojisinin de gelişmiş olması sebebiyle dar bant aralıklı III-V grubu bileşikler (galyum antimonit (GaSb), indiyum arsenid (InAs)) ve bunların, indiyum galyum arsenit (InGaAs), indiyum fosfor arsenik (InPAs), galyum indiyum arsenik antimonit (GaInAsSb), indiyum arsenik antimon fosfit (InAsSbP) gibi üç veya dört bileşenli III-V grubu alaşımlarına odaklanmıştır. Üç ve dört bileşenli alaşım temelli TPV yapılarında bu alaşımlar GaSb, InP, GaAs ve InAs altlıkların üzerine epitaksiyel tabakalar halinde oluşturulurlar. p – n hetero eklemine içinde olduğu bu epitaksiyel alaşım katmanının bant genişliği TPV hücrenin spektral duyarlılığının uzun dalgaboyu sınırını ve açık devre gerilim değerlerini belirler (Mauk 2006).

Dört bileşenli GaInAsSb alaşımlar GaSb altlık ile örgü uyumu sağlayacak şekilde 0.5 eV kadar dar bant aralığı ile oluşturulabilirler (Dashiell ve ark. 2006). Bu yapıların oluşturulabilmesi için her ne kadar daha yeni teknikler mevcut olsa da sıvı faz epitaksi (LPE) hala kolaylığı ve düşük maliyetinden dolayı çok tercih edilen bir metot olarak yerini korumaktadır (Piskorski ve ark. 2004). Ayrıca, LPE yöntemi ile GaSb altlık üzerinde elde edilmiş olan GaInAsSb yapıların karanlık akım değerlerinin daha gelişmiş bir yöntem olan Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi ile elde edilmiş olan aynı yapılardaki karanlık akım değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında da LPE yönteminin üretim için daha avantajlı bir yöntem olduğu açıktır (Kunitsyna ve ark. 2000, Kunitsyna 2012).

Son yıllarda ısı enerjisinden elektrik enerjisine çevrim alanında ilgi çeken bir diğer konu da kuantum kuyulu hücrelerdir (QWC). QW'ler genişlik veya kompozisyonunun değiştirilmesi ile bant genişliğinin ayarlanmasında esneklik sağlar. Böylece diyot ile gelen ışığın spektrumu arasında daha gelişmiş bir spektral uyum yakalanmasına olanak tanır. Halihazırda kullanılan ve benzer bant aralıklarına sahip olan bulk yapılara göre daha düşük karanlık akım geçirir. Ayrıca, kuantum kuyulu yapılarda bant genişliğinin kullanılmakta olan yapıların genişliğinden daha dar olması sağlanabilir. Bu sayede hücre, ısı kaynağının daha uzun dalgaboylu fotonlarından da enerji dönüşümü gerçekleştirebilir. Üretimlerinin az bir ek masraf ile mevcut geleneksel üretim süreçlerine benzer şekilde yapılabilecek olması bu yapılar için önemli bir avantajdır. Dolayısıyla, TPV uygulamalarında QWC kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar umut vaat etmektedir (Connolly ve Rohr 2003, Rohr ve ark. 2004). Tez çalışması kapsamında yapılan

araştırmaların TPV sistemler için kullanılacak kuantum kuyulu yapı çalışmalarına da ışık tutması umut edilmektedir.

Pek çok olumlu özelliğine rağmen TPV teknolojisini endüstride tercih edilebilir kılmak için sistem gelişiminin artarak devam etmesi gerekmektedir. Özellikle üç ve dört bileşenli yarıiletken temelli yapılarla ilgili yapılan çalışmalar her geçen gün TPV sistem özelliklerinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, TPV dönüşüm sistemlerinde kullanılmak üzere, IOFFE (Physical-Technical Institute, St.Petersburg, RUSSIA) araştırma enstitüsünde LPE yöntemi ile üretilmiş, dar bantlı GaInAsSb temelli yapılarının elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir.

Tez, Giriş bölümü dahil beş kısımdan oluşmaktadır. Kuramsal Temeller bölümünde yapılan çalışma ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. TPV yapıların öneminden, avantajlarından, çalışma prensibinden, yarıiletkenlerden ve kullanılan GaInAsSb temelli yapının özelliklerinden bahsedilmiştir. Materyal ve Yöntem kısmında yapının üretim yöntemi, kullanılan deneysel sistemler ve ölçümlerin nasıl yapıldığı, Bulgular ve Tartışma bölümünde elektriksel ve optik ölçümler sonucu elde edilen veriler yer almaktadır. Sonuç bölümünde ise deneysel çalışmalar ile ulaşılan sonuçların genel değerlendirmesi ve yorumlar verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Termofotovoltaik Yapıların Geçmişi

İnfrared ışımayı fotovoltatik etki sayesinde elektriğe çeviren ilk TPV sistemin 1956 yılında Dr. Henry H. Kolm (MIT Lincoln Laboratuvarı) tarafından silisyum güneş pilinin bir Coleman lambasının yakınına yerleştirilmesi ile hayata geçirildiği bilinmektedir. Ancak, pek çok kaynağa göre TPV araştırmalarının esas gelişimi 1960'lı yılların başında, o dönem Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) çalışmalarını sürdürmekte olan Dr. Pierre Aigrain ile başlamıştır. Başlarda bu kavram için kullanılan ilk ifade termal-foto-voltatik iken daha sonraları termofotovoltaik halini almıştır (Nelson 2003, Chubb 2007).

1960'lı yılların başında TPV teknolojisine ilgi duyulmaya başlanması ve materyal çalışmalarının gelişmesinde savunma sanayisi önemli bir rol oynamıştır. Bunun en önemli sebebi savunmada taşınabilir ve sessiz güç kaynaklarına duyulan gereksinimdi. Bunun için de en iyi aday elbette TPV sistemlerdi. Aynı dönemde endüstride de bu yeni teknolojiye olan ilgi yoğun bir artış gösterdi.

Önceleri kullanılan güneş pili teknolojisi silisyum temelli güneş pillerine dayanmaktaydı. Dolayısıyla, TPV fikri ortaya çıktığında da yapılan ilk çalışmalar silisyum dönüştürücülere odaklandı. Ancak, Si ($E_g = 1.12 \text{ eV}$) temelli TPV sistemler çok yüksek sıcaklık gerektirdiğinden dolayı kullanışlı değildi. Silisyum, 2000 K ve üzerindeki sıcaklık değerlerine sahip yayıcılar için kullanılabilir olmasına rağmen, bu olağanüstü koşullar için yayıcı malzemelerinin dayanıklılığı tam olarak bilinmemekteydi. Tüm nadir toprak oksitleri ısıya dayanıklı ve çok yüksek erime sıcaklıklarına sahip olmalarına rağmen çok yüksek sıcaklıklara uzun sürelerde maruz kaldıklarında sağlam kalıp kalmayacakları belirsizdi. Bu sorunlar ancak yayıcı sıcaklıklarının düşürülmesi ile giderilebilirdi, fakat o zaman da Si kullanılabilirliğini kaybederdi. Çünkü makul yayıcı sıcaklıkları için ($T \leq 2000 \text{ K}$), $E_g \leq 1.0 \text{ eV}$ değerlerinin kullanılıyor olması gerekmektedir. Böylece araştırmacılar özellikle germanyum gibi daha dar bant aralıklı yarıiletkenlere yöneldiler. Ne var ki, Ge ($E_g = 0.66 \text{ eV}$) kullanıldığı takdirde de makul bir yasak bant genişliğine sahip olmasına rağmen yalnızca çok düşük bir performans elde

edilebiliyordu. Bunda, benzer bant aralığı değerlerine sahip III-V grubu bileşik yarıiletkenler ile karşılaştırıldığında Ge elektronlarının etkin kütle değerinin yüksek olması önemli bir rol oynamaktaydı (Couatts 1999).

1970'lerin ortalarına gelindiğinde TPV alanındaki çalışmalar büyük ölçüde sekteye uğradı ve hatta neredeyse durma noktasına geldi. Bunun en önemli sebepleri ise savunma sanayisinin güç kaynağı için termoelektrik teknolojisini tercih etmesi (Guazzoni ve Matthews 2004) ve endüstride yaşanan enerji kriziydi. 1980'lerin başında da durum genel olarak aynıydı. TPV araştırmaları yeterli seviyede değildi. Bunda, halihazırda TPV uygulamaları için kullanılan dönüştürücülerin çok kaliteli olmaması ve yüksek verim beklentisinin bulunmaması etkendi. Bu durum III-V grubu dar bantlı malzemelerin kullanılabilir hale gelmesi ile değişti. GaSb ($E_g = 0.72$ eV) ve InGaAs ($0.36 \leq E_g \leq 1.42$ eV) (Chubb 2007) gibi malzemelerin kullanıldığı yapıların devreye girmesi, radyasyon spektrumunun daha geniş bir bölümünden faydalanılabilmesini ve Si yapıların gerektirdiğinden daha düşük yayıcı sıcaklıklarının kullanılabilmesini sağladı.

1990'lara gelindiğinde TPV sistemlerin geliştirilmesi için çalışan enstitüler ve düzenlenen uluslararası konferanslar ile bu teknolojiye olan ilgi artarak devam etti. 2000'li yıllardan itibaren de çok küçültülmüş TPV sistem çalışmaları hız kazandı. Mikro-fabrikasyon teknolojisi ile üretilen mikro boyutlu elemanların geliştirilmesini amaçlayan mikro elektromekanik sistemler (MEMS) gelişime açık bir araştırma alanı olarak görülmektedir. Ayrıca, teknolojideki gelişmelerle birlikte düşük enerji yoğunluklu bataryalara alternatif olacak enerji dönüşüm teknolojisi ihtiyacı da doğmuştur. Bu noktada da TPV üreteçler buna iyi bir aday olarak görülmektedir (Bauer 2011). Her şeye rağmen, TPV teknolojisi istenen performansa henüz ulaşamadığından endüstriyel pazarda kendine yaygın bir yer edinebilmiş değildir. Fakat kaliteyi artırmaya yönelik çalışmaların yoğun bir şekilde devam etmesi sayesinde kısa bir süre içinde beklentileri karşılayacağı düşünülmektedir.

2.2. Termofotovoltaik Sistemlerin Önemi ve Avantajları

Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde elektrik enerjisi direkt olarak PV hücreye gelen fotonlar sayesinde üretilir. Klasik PV sistemlerde bu fotonların kaynağı güneştir. Üretim

için bir diğer ihtimal de sıcak bir kaynaktan yayınlanan fotonların kullanılmasıdır ki bu da TPV dönüşüm anlamına gelir. TPV dönüştürücüler, kolay uygulanabilirlik ve yüksek verim vaat etmeleri başta olmak üzere pek çok ilgi çekici özelliğe sahiptir. TPV dönüşüm sistemlerinin en önemli potansiyel avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Yüksek güç yoğunluğu çıkışına sahiptirler. 1 W/cm² civarı güç yoğunlukları elde edilmiştir. Bunun 2-3 W/cm² değerine kadar yükseltilebilme potansiyeli mevcuttur.
- Herhangi bir depolama olmadıkça güneş pili yalnızca güneşin mevcut olduğu durumlarda elektrik üretebilir. TPV'ler için böyle bir zorunluluk yoktur.
- Prensipte olarak nükleer dahil her yakıt türü yayıcı yüzeyi ısıtmak için kullanılabilir.
- Hafiftirler.
- Hareketli herhangi bir parçası olmadığı için TPV sistemler sessiz çalışma özelliğine sahiptir. Bu durum özellikle askeri uygulamalar için büyük önem teşkil etmektedir.
- Hareketli herhangi bir parçası olmadığından dolayı bakımı kolaydır. Ancak, kullanılması planlanan yüksek sıcaklık değerlerinde henüz net bir deneyim mevcut değildir.
- Güvenlidir.
- Uygun yakıtlar ve NO_x üretiminin olduğu sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıkların kullanıldığı sistemler çevre kirliliğine yol açmaz (Coutts 1999).

2.3. Fotovoltaik Teknolojisi ile Karşılaştırma

Yüksek sıcaklıklı termal kaynaktan yayınlanan radyasyondan elektrik üretmek için PV'ler de TPV'ler de fotovoltaik hücre kullanırlar. Aralarındaki en önemli fark ise sistem geometrisi ve ısı kaynağının sıcaklığıdır (Coutts 1999).

Modern yaşam için yenilenebilir enerji kaynaklarının hayati öneminin olduğu çok açıktır. Her geçen gün, başta teknolojiye gelişmeler olmak üzere, çeşitli sebeplerden dolayı enerji ihtiyacı hızlı bir artış göstermektedir. Buna karşılık olarak mevcut enerji kaynakları sınırsız değildir ve uzun vadede tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Güneş enerjisi geleneksel kaynaklara iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Dolayısıyla güneş pili

teknolojisinin hızla gelişiyor olması ve kullanımının yaygınlaşması beklenen bir durumdur.

Güneş pilleri güneş ışığını herhangi bir çevre kirliliği ve gürültü yaratmadan direkt olarak elektriğe çevirebildiğinden dolayı güneşten enerji elde etmenin en iyi yöntemi olarak görülmektedir. İlk olarak, silikon p-n eklem kullanılarak Chapin ve ark. (1954) tarafından geliştirilmiştir. Hemen ardından da Reynolds ve ark. (1954) cadmium-sulfide güneş pilini geliştirdiler (Sze 1981). Güneşin yayınladığı radyasyon yaklaşık olarak 5800 K siyah cisim ışımasına tekabül eder. Atmosferimizin hemen dışında ışınım miktarı 1400 Wm^{-2} kadardır. Ancak, atmosferdeki soğurulmadan sonra dünya üzerinde bu değer 500 Wm^{-2} ile 1000 Wm^{-2} değerleri arasına kadar düşer. Güneşin yayınladığı radyasyonun büyük bir kısmı görünür bölgededir, tepe değeri yaklaşık olarak $0.6 \mu\text{m}$ civarındadır ve $0.3-2 \mu\text{m}$ civarında faydalanılabilir dalgaboyu aralığına sahiptir. Güneş pillerinde amaç bu radyasyonun mümkün olan en geniş aralığında elektrik enerjisi elde etmektir (Wilson ve Hawkes 1998).

PV'ler ışık yoğunluğu, spektrum ve güneş ışıması bakımından çok kararlı değildir. Çünkü bu parametreler konum, mevsim hatta gün, bulut örtüsü ve atmosferik soğurulma gibi etkenlere bağlıdır. Ayrıca, pek çok sistemde hücre sıcaklığı çevresel etkenlere bağlıdır ve kontrol edilmez. Hücre verimi ise düşük sıcaklıklarda yüksek iken yüksek sıcaklık değerlerinde düşüktür. 1000 Wm^{-2} 'lik yaklaşık ışınım miktarı ve %20'lik dönüşüm verimi göz önüne alındığında 200 Wm^{-2} 'lik maksimum elektriksel güç yoğunluğunu ortaya çıkarır (Bauer 2011).

Tarihsel olarak ilk güneş pilleri kristal silikondan (c-Si) elde edilmişti. Birinci nesil güneş hücreleri olarak adlandırılan kristal silikon ve germanyum hücreler %20 civarındaki verimleri ile günümüzde güneş pili pazarının yaklaşık %90'ına hakim durumdadır. Ancak, bahsedilen güneş pillerinin üretim sonrası oluşan fazla miktarda toksik atıklar gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktaydı. Bu da, ikinci nesil olarak nitelendirilen ince film güneş pillerinin geliştirilmesine yol açtı.

Amorf, mikrokristal ya da polikristal silikon, çok bileşenli A_3B_5 (GaP, InP, GaAs) ve A_3B_6 (CdTe) yarıiletkenleri ile birlikte çok bileşenli CIS (copper indium diselenide),

CIGS (copper indium gallium diselenide) ve CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) yarıiletkenleri ikinci nesil hücrelere örnek olarak gösterilebilirler (Song ve ark. 2014, Milichko ve ark. 2016). Üretim süreçlerinde hammadde gereksiniminin ve enerji tüketiminin daha az olması ayrıca üretimlerinin kristal silikon güneş pillerine göre daha kolay olması silikon ve çok bileşenli yarıiletkenlerden oluşan ikinci nesil güneş hücrelerinin hızla gelişmesinin de yolunu açtı. Ancak, ikinci nesil güneş hücreleri beklendiği ölçüde başarılı olamadı. 1980'lerin başında ortalama %15 verim ile ticari ikinci nesil hücreler pazarda ancak %10'luk bir orana ulaşabildi. Bunda çok bileşenli yarıiletkenlerin ve çeşitli başlangıç malzemelerinin yüksek üretim toksisite oranları, çalışmalarının ortam koşullarına bağımlılığı, amorf silikon güneş hücrelerinin dayanıksızlığı gibi pek çok etken rol oynadı. Üretim ve atık toksisitesini azaltmak; imalat materyal ve enerji masrafları; üretim sürecini kolaylaştırmak ve hücrenin farklı hava koşullarında kararlı çalışmasını sağlamak gibi mevcut problemleri çözmeye çabaları üçüncü nesil olarak nitelendirilen organik güneş hücrelerinin gelişiminde önemli etkenlerdi. Üçüncü nesil güneş hücreleri iletken polimerler, pigmentler (organik boyalar), ve organik-inorganik yarıiletkenler gibi materyallerden oluşmaktadır. Bu güneş hücreleri henüz yeterli verime ulaşamadığından pazarda geniş çaplı bir yer edinememiş olsa da geliştirilmeleri adına yoğun çalışmalar devam etmektedir (Milichko ve ark. 2016).

Infrared ışınının direkt olarak elektriğe dönüşümünü sağlayan TPV teknolojisi ise sadece güneş spektrumunun geleneksel PV sistemlerin faydalanamadığı bölgelerini kullanmakla kalmayıp aynı zamanda ısınmış farklı kaynaklardan elektrik enerjisi elde edilmesini de mümkün kılar (Pfiester ve Vandervelde 2016). TPV dönüştürücüler genel olarak sıcaklıkları 1300-2000 K arasında olan ve genelde bir yayıcıyı ısıtmada faydalanılan çok çeşitli ısı kaynaklarını kullanabilirler. PV sistemlerdeki çok uzun mesafe değerinin aksine TPV dönüştürücülerde yayıcı ile TPV diyotun aktif bölgesi arasındaki mesafe santimetre mertebesindedir. Bu da, PV'ler ile karşılaştırıldığında diyot üzerine düşen güç yoğunluğunun çok daha fazla olacağı anlamına gelir. Bununla birlikte, TPV sistemler uzun süre kararlı olarak çalışmalarını sürdürebilirler. PV'lerin üretiminde Si ve GaAs gibi yasak bant genişliği 1 eV'tan büyük yarıiletkenler kullanılırken, TPV'lerin temelini dar bantlı yarıiletkenler oluşturmaktadır. Dolayısıyla, GaSb, InAs, InGaAs, GaInAsSb gibi iki, üç ve dört bileşenli yarıiletkenler TPV yapılar için ilgi çekicidir.

Kısaca özetlersek, TPV sistemler, dizaynı daha karmaşık ve zor olmasına rağmen kararlı çalışma, yüksek verim potansiyeline sahip olma ve ısı kaynaklarının çeşitliliği gibi özellikleri sayesinde PV sistemlere kıyasla özellikle infrared bölgede daha avantajlıdırlar (Bauer 2011).

2.4. Yarıiletken Malzemeler

Katı malzemeler elektriksel iletkenliklerine göre yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar. Yalıtkan malzemelerin elektriksel iletkenlikleri 10^{-18} - 10^{-8} S/cm kadar düşük iken iletkenlerde bu değer 10^4 - 10^6 S/cm civarındadır. Yarıiletken malzemeler ise iletkenlikleri bakımından yalıtkanlar ile iletkenler arasında bulunmaktadır.

Yarıiletkenler için en önemli parametre, iletkenlik bandı ile valans bandını birbirinden ayıran yasak bant aralığıdır (E_g). Yarıiletkenlerde bu aralık oda sıcaklığında yaklaşık 0.26 - 4.5 eV (Sze 1981, Littler ve Seiler 1985) civarındadır. Bu da, yapılacak olan düşük orandaki termal veya optik katkı sayesinde elektronların iletkenlik bandına uyarılmasını sağlar. Si için bant aralığının sıcaklığa göre değişimi

$$E_g(T) = 1.17 - \frac{(4.73 \times 10^{-4}) \cdot T^2}{(T + 636)} \quad (2.1)$$

şeklinde açıklanabilir. Oda sıcaklığında Si için bu değer 1.12 eV'tur. Dolayısıyla oda sıcaklığında Si için elektronların valans bandından iletkenlik bandına uyarılması için bu değere eşit ve daha büyük bir enerji gerekmektedir. Bir elektronun iletkenlik bandına uyarılması sonucu valans bandında "boşluk" olarak adlandırılan elektron eksikliği meydana gelir. Yarıiletkenlerde hem elektronlar hem de boşluklar akıma katkıda bulunurlar (Sze 2002, Chubb 2007).

Bahsedildiği gibi elektronik uygulamalarda yarıiletkenleri en önemli malzemelerden biri yapan özelliği ise iletkenliklerinin sıcaklık, aydınlatma ve manyetik alan gibi etkilerle değiştirilebiliyor olmasıdır.

Yarıiletken malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar 19. yüzyılın ilk dönemlerinde başlamıştır. Silikon ve germanyum gibi element yarıiletkenler periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunurlar. Yarıiletkenlerin gündeme geldiği ilk yıllarda en popüler malzeme germanyumdu. Fakat, germanyum temelli cihazların orta sıcaklıklarda dahi yüksek sızıntı akımına sahip olmaları önemli bir dezavantajdı. Dolayısıyla germanyum zamanla yerini daha düşük sızıntı akımı gösteren ekonomik açıdan daha avantajlı olan ve yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biri olan silikona bıraktı. Günümüzde silikon teknolojisi halen diğer yarıiletken teknolojilerine göre en büyük gelişimi sağlamış teknoloji olarak yerini korumaktadır.

Bileşik yarıiletkenler ise iki veya daha fazla elementin bir araya gelmesi ile oluşurlar. Örneğin ikili bileşik yarıiletken olan GaAs, periyodik cetvelin üçüncü grubundan galyum ile beşinci grubundan arseniğin bileşiminden meydana gelir ve III-V grubu bileşik yarıiletken olarak adlandırılır. İkili bileşiklere ek olarak üçlü ve dörtlü bileşik yarıiletkenler de mevcuttur. III. kolondan Al ve Ga ile V. kolondan As içeren $Al_xGa_{1-x}As$ buna örnek olarak gösterilebilir. $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ gibi dörtlü bileşikler ise pek çok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerden faydalanılarak elde edilebilir. Bugünlerde bileşik yarıiletkenlerin büyük çoğunluğunun silikonda bulunmayan elektriksel ve optik özelliklere sahip olduğu ve gelişime açık bir alan olma özelliği gösterdiği bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla bileşik yarıiletkenlerin cihaz uygulamalarında daha çok tercih edilmesi kaçınılmazdır (Sze 2002). Bundan sonraki bölümde TPV yapılar için en çok tercih edilmiş ve edilmekte olan yarıiletken malzemelerden bahsedilecektir.

2.4.1. TPV yapılar için IV. grup yarıiletkenleri

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi TPV sistemlerin gündeme geldiği yıllarda ilk akla gelen seçenek Si hücrelerdi. Bunda en önemli etken silikon teknolojisinde halihazırda yoğun bir tecrübeye sahip olunması ve silikonun ekonomik açıdan da çok elverişli olmasıydı. Bu avantajlı görüntüsüne rağmen yasak bant genişliğinin çok büyük olması ($E_g = 1.1$ eV) beraberinde çok yüksek sıcaklıklı yayıcı ihtiyacını ortaya çıkarmaktaydı. Si TPV hücreyi ışınlamak için kullanılacak olan Yb_2O_3 yayıcısının ışıma güç yoğunluğu ulaşılacak maksimum sıcaklığın 1800 K civarında olmasından dolayı sınırlıdır. Bu sıcaklık limitinin en önemli sebebi yanma sıcaklığı ile artış gösteren NO_x

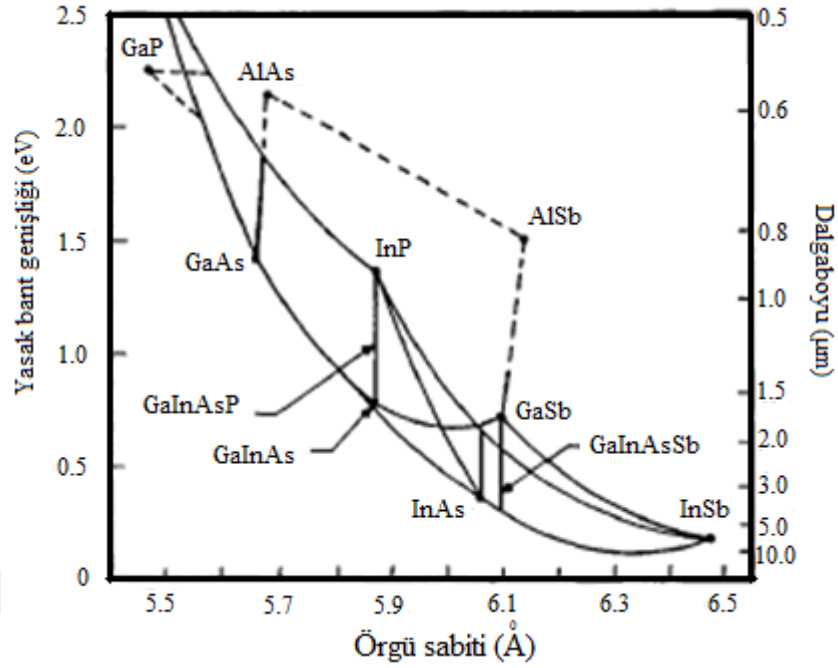
salınımıdır. İzin verilen maksimum NO_x salınımı yasal olarak sınırlandırılmıştır. Bir diğer önemli sebep de sistem içerisinde kullanılan diğer malzemelerin termal dayanıklılığının bu yüksek seviyelere uygun olmamasıdır. Dolayısıyla, bahsi geçen sebepler silikonun TPV uygulamaları için çok kullanışlı olmayan bir malzeme olarak görülmesine sebep olmaktadır (Bitnar 2003).

Silikon gibi ilk zamanlarda kullanılan bir diğer malzeme de germanyumdur. Ekonomik açıdan bakıldığında Si hücrelerden daha pahalı olsalar da GaSb ve GaInAsSb gibi III-V grubu dar bantlı bileşik yarıiletkenlere göre ucuzlardı. 0.66 eV yasak bant aralığı ile silikon diyotlara kıyasla pek çok yayıcı ile spektral uyum sağlayabilmesine rağmen çok avantajlı bir malzeme değildi. Bunun sebebi, benzer bant aralıklı III-V grubu bileşik yarıiletkenleri ile karşılaştırıldığında germanyumun elektron etkin kütle değerinin hayli büyük olmasıdır. Bu durum, iletkenlik bandı durum yoğunluğunun çok yüksek olmasına, dolayısıyla da doğal taşıyıcı konsantrasyon yoğunluğunun yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu da kısaca, Ge diyotların benzer bant aralıklı III-V grubu bileşikleri ile kıyaslandığında yüksek karanlık akım ve küçük açık devre voltajına sahip olacağı anlamına gelmektedir (Mauk 2006, Coutts 1999).

TPV yapılar için kullanılan bir diğer yapı da SiGe alaşımıdır. Bileşen oranlarının değişimi ile yasak bant genişliğinin Ge ile Si arasında değişmesini sağlayan SiGe alaşımlar, fotodiyot ile TPV yayıcı arasında iyi bir spektral uyum sağlanması için elverişli malzemeler olarak görülmektedir. Ayrıca, Si ile karşılaştırıldığında elektronları daha yüksek mobiliteye sahip olan SiGe alaşımlar yüksek hızlı yarıiletken cihazlarda daha yoğun olarak kullanılmaktadır (Bitnar 2003).

2.4.2. Bileşik yarıiletkenler

TPV sistemler ile ilgili yapılan çalışmaların durma noktasına yaklaştıktan sonra III-V grubu bileşik ve alaşım yarıiletkenlerin gündeme gelmesi ile tekrar canlandığından önceki bölümlerde bahsedilmişti. Ancak, şimdiye kadar elde edilen en yüksek dönüşüm verilerine sahip olmalarına rağmen maliyetlerinin istenilen seviyeye düşürülemediği olması kullanımlarının yaygınlaşmasına engel olmaktadır.



Şekil 2.1. III-V bileşikleri ve onların üçlü ve dörtlü alaşımları için örgü sabitine bağlı yasak bant genişlikleri (Dutta ve ark. 1997)

TPV dönüşüm için en ilgi çekici dar bantlı yarıiletkenler GaSb ve InAs temelli üç ve dört bileşenli yarıiletkenler (Kunitsyna ve ark. 2010) olarak sayılabilir. Şekil 2.1'de çeşitli III-V grubu bileşikleri ile üçlü ve dörtlü alaşımların örgü sabitine karşılık bant genişlikleri görülmektedir. Farklı bileşimlerden oluşan bu katmanların meydana getirdiği heteroeklem sınırında kusurların az olması için 'Heteroeklemler' bölümünde belirtildiği gibi, bileşenlerin örgü sabitlerinin çok yakın olması gerekmektedir.

GaSb temelli diyotlar modern TPV sistemlerin temeli olarak nitelendirilmektedir. 90'lı yıllarda TPV teknolojisine olan ilginin yeniden canlanması ağırlıklı olarak GaSb diyotlar sayesinde gerçekleşmiştir. Bu yapıları TPV sistemler için kullanışlı kılan en önemli özelliği daha düşük ışınlama yoğunluğunda çalışabiliyor olmasıdır. Çünkü GaSb 300 K sıcaklığında 0.72 eV (1.72 µm) bant aralığına sahip direkt bant geçişli bir malzemedir (Sze 1981). Germanyuma yakın bant aralığına sahip olmasına rağmen performans açısından daha verimlidir. Ancak, yüksek maliyetli bir malzeme olmasının yanı sıra toksisite seviyesi de bu yapı ile ilgili önemli dezavantajlar olarak sayılabilir (Tan ve ark. 2014, Daneshvar ve ark. 2015).

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yarıiletkeninin yasak bant genişliği x yüzdesinin 0 ile 1 arasında değişmesi ile 1.42 – 0.36 eV (0.87 – 3.44 μm) civarında geniş bir aralıkta değiştirilebilir (Bhat ve ark. 1996). InGaAs temelli hetero yapılar infrared detektörler (fiber optik iletişim sistemleri) ve lazer güç dönüştürücüleri gibi alanlarda halihazırda kullanılmakta olduğundan, üretim açısından tecrübe sahibi olunan malzemelerdir. InP ile örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 0.74 eV bant genişliğine sahiptir ve InP alt tabakalar üzerine yüksek kaliteli epitaksiyel tabakalar halinde büyütülebilirler. Üretim süreçleri ve malzeme ile ilgili edinilmiş bu tecrübe de InGaAs yarıiletkenini TPV çalışmaları için ilgi çekici kılmıştır. Ne yazık ki, bu alanda 0.5 – 0.6 eV gibi daha dar bant genişliğine sahip malzemeye gereksinim duyulduğundan TPV sistemler için çok da uygun değillerdi. Çünkü bu gereksinimi karşılamak için InP üzerine x yüzdesi 0.68 ile 0.79 arasında değişen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütülmesine ihtiyaç vardır. Ancak bu malzemelerin bant genişliklerinin daraltılarak epitaksiyel olarak büyütülmesi de örgü uyumlu alt tabaka bulunmasını zorlaştırır. Çünkü yasak bant genişliğini en uygun hale getirme girişimi örgü uyumsuzluğu nedeniyle dislokasyonlarda artışı da beraberinde getirir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için örgü uyumsuz yapıların kalitesini artırma çalışmaları devam etmektedir. Wojtczuk ve ark. (1995)'in çalışmalarında InP alt tabaka üzerine büyüttükleri InGaAs yarıiletkeninin farklı kompozisyonları için ($0.79 > x > 0.53$) örgü uyumsuzluğuna bağlı TPV hücre performansı incelenmiştir. Kompozisyonlar, 0.74 eV örgü uyumlu durumu göstermek üzere, bant genişliği 0.5 eV ile 0.74 eV arasında değişecek şekilde seçilmiş ve bant genişliği yaklaşık 0.6 eV değerinin altına indiğinde TPV hücre açık devre voltajının dislokasyon yoğunluğunda meydana gelen artıştan dolayı hızla düşüş gösterdiği saptanmıştır. Dolayısıyla, daha yüksek kaliteli dar bantlı InGaAs hücreler üretebilmek için örgü uyumsuzluğunun giderilmesi gerektiği açıktır.

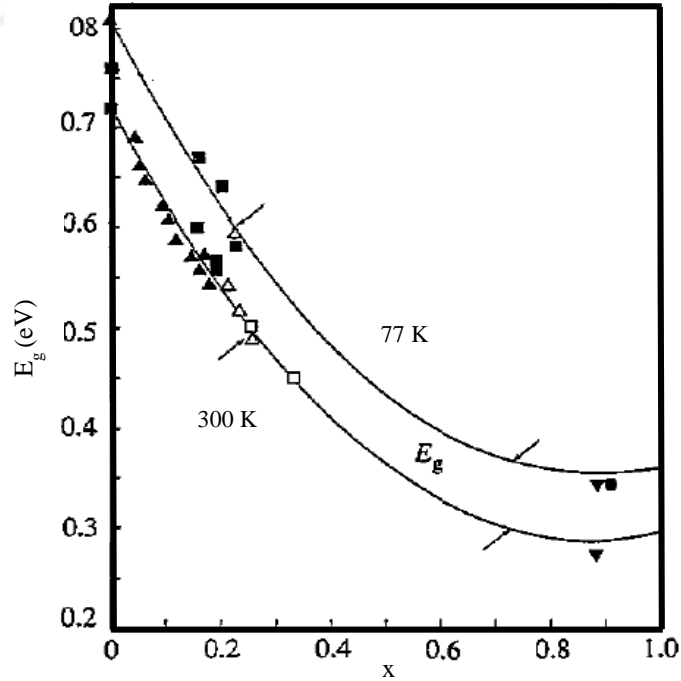
GaInSb bileşiği de hakkında araştırmaların yapıldığı bir diğer malzemedir (Milnes ve Polyakkov 1993). Epitaksiyel tabakaların büyütülmesinde potansiyel tehlike arz eden gazların kullanılmamasından dolayı InGaAs yarıiletkenine göre daha fazla tercih edilebilir bir yapısı vardır. Ayrıca, InP ile kıyaslandığında GaSb altlıklar daha az maliyetlidir. Fakat, GaInSb içerikli sistemlerle ilgili henüz sınırlı sayıda çalışma yapılmış olduğundan, önce malzeme ve üretimi ile ilgili önemli bir gelişim kaydedilmesi gerekmektedir (Bhat ve ark. 1996).

GaInAsSb alaşımları TPV diyotlar için çok önemli özelliklere sahiptir. Dörtlü III-V alaşımları hem yasak bant aralığının hem de örgü sabitinin kontrolünü mümkün kılar. Bu, hem istenen bant aralığına hem de alt tabaka ile örgü uyumuna sahip epitaksiyel tabakaların büyütülebilmesi açısından önemlidir. Farklı kompozisyonlar sayesinde GaInAsSb yarıiletkeni geniş bir aralıkta değişen bant aralığı ile GaSb altlık üzerine örgü uyumlu olarak büyütülebilir. 300 K'de GaSb zerine örgü uyumlu tabakalar için $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ dörtlü alaşımının yasak bant genişliği

$$E_g = 0.725(1-x) + 0.290x - 0.6x(1-x) \text{ eV} \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada y oranı GaSb ile örgü uyumlu yapılar için $y \cong 0.9x$ olarak sınırlandırılmıştır (Mauk ve Andreev 2003).

Dört bileşenli $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ yarıiletkeni tüm alaşım kompozisyonları için direkt geçişli bant aralığına sahiptir. $x < 0.28$ değerleri için E_g 'nin kompozisyona bağımlılığı oldukça kuvvetli iken $x > 0.70$ için zayıfladığı Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ katı çözeltisinin kompozisyonuna bağlı bant aralığı (Mikhailova ve Titkov 1994)

Karışabilirlik aralığı (miscibility gap) yasak bant aralığı için sınırlayıcıdır. GaSb üzerine GaInAsSb yaklaşık 0.5 eV'tan (2.48 μm) 0.6 eV (2.07 μm) değerine kadar difüzyon ve LPE, MOCVD ve MBE gibi epitaksiyel büyütme teknikleri ile üretilebilirler (Bauer 2011).

Çizelge 2.1. GaSb ile örgü uyumlu $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ kompozisyonlarının bazı temel özellikleri (Mikhailova 1999)

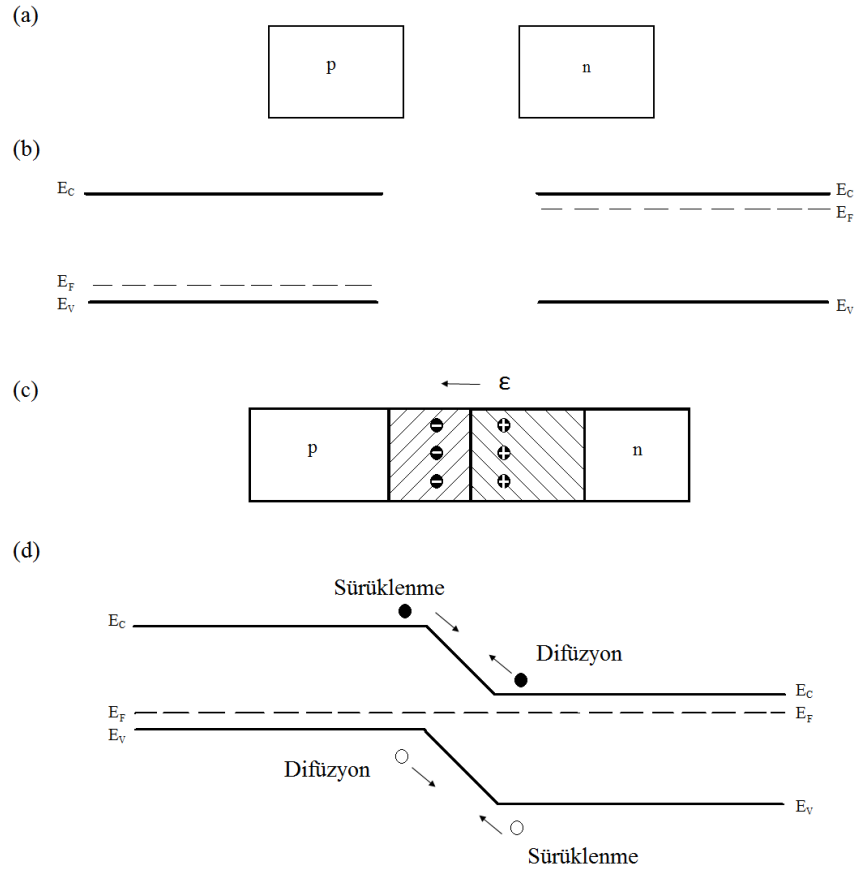
| $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ | | |
|--|----------------|---|
| Yasak bant aralığı (eV) | | $0.29-0.165x+0.6x^2$ |
| Örgü sabiti (\AA) | | 6.0959 |
| Atom/ cm^3 | | $3.53 \cdot 10^{22}$ |
| Yoğunluk (g / cm^3) | | $5.69-0.08x$ |
| Dielektrik sabiti | Statik | $15.3+0.4x$ |
| | Yüksek Frekans | $12.6+1.8x$ |
| Etkin elektron kütlesi (m_e / m_0) | | $0.022+0.03x-0.012x^2$ |
| Etkin boşluk kütlesi (m_h / m_0) | Ağır | 0.4 |
| | Hafif | $0.025+0.025x$ |
| Elektron ilgisi (eV) | | $4.87-0.81x$ |
| Optik fonon enerjisi (eV) | | ≈ 0.03 |
| Etkin iletkenlik bandı durum yoğunluğu (cm^{-3}) | | $2.5 \cdot 10^{19}(0.022+0.03x-0.012x^2)^{3/2}$ |
| Etkin valans bandı durum yoğunluğu (cm^{-3}) | | $2.5 \cdot 10^{19}(0.41+0.16x+0.23x^2)^{3/2}$ |

GaSb ile örgü uyumlu $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ kompozisyonlarının bazı temel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

2.5. p – n Eklemler

p – n eklemler neredeyse tüm elektronik cihazların temelini oluşturduğundan elektronik ve optoelektronik uygulamalarda çok önemli bir yere sahiptir. TPV diyotların da çalışma prensibi p – n eklemlere dayandığından, p – n eklemlerin çalışma prensiplerini anlamak önemlidir.

Bir p – n eklem n- tipi ve p- tipi malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Eğer eklem aynı yarıiletken malzeme ile oluşturuluyorsa bu tip eklemler homoeklem, iki farklı yarıiletken ile oluşturuluyorsa da heteroeklem olarak adlandırılır. Şekil 2.3 (a)'da eklem oluşturulmadan önce ayrıık durumda olan p- tipi ve n- tipi yarıiletken materyallere ait iki bölge görülmektedir. Fermi enerjisi (E_f) p- tipi bölgede valans bandının kıyasına, n- tipi bölgede ise iletkenlik bandının kıyasına yakındır (Şekil 2.3 (b)). n- tipi malzeme fazla elektron ve az boşluk konsantrasyonuna sahip iken, bunun tam tersi de p- tipi malzeme için geçerlidir. p – n eklem bu iki bölge bir araya getirildiğinde meydana gelir. Ekleme büyük taşıyıcı konsantrasyon farkları taşıyıcı difüzyonuna neden olur. Boşluklar p- tarafından n- tarafına, elektronlar n- tarafından p- tarafına doğru difüze olurlar. Boşluklar p- tarafını terk ederken ekleme yakın negatif akseptör iyonlarının (N_a^-) bazıları dengelenmemiş olarak kalırlar. Çünkü boşluklar hareketli iken akseptör atomları yarıiletken örgüsünde sabittirler. Benzer şekilde, eklem yakınındaki pozitif donör iyonlarının (N_d^+) bazıları elektronlar n- tarafından ayrıldıkça dengelenmemiş olarak kalırlar. Sonuç olarak, p- bölgesinin eklem sınırında negatif uzay yükü bölgesi, n- bölgesinin eklem sınırında ise pozitif uzay yükü bölgesi oluşur. Yük taşıyıcılarının bulunmadığı ve tükenim bölgesi olarak adlandırılan bu bölgede Şekil 2.3 (c)'de gösterildiği gibi bir iç elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan taşıyıcıların zıt yönlerde sürüklenmesine sebep olur. Şekil 2.3 (d)'de elektrik alana bağlı boşluk sürüklenme akımı sağdan sola doğru akarken boşluk difüzyon akımının soldan sağa aktığı gösterilmektedir. Bunun tam tersi de elektronlar için geçerlidir.



Şekil 2.3. (a) eklem oluşmadan önce p- tipi ve n- tipi bölgeler (b) bant diyagramları (c) tükenim bölgesinde elektrik alan (d) termal dengede p-n eklem enerji bant diyagramı

Belirli bir sıcaklık değerinde iç elektrik alan azınlık elektronları p-tipi bölgeden çekme, çoğunluk yük taşıyıcıları da engelleme davranışı gösterir. Bu durum sürüklenme akımı difüzyon akımına eşit oluncaya kadar devam eder. Sonuç olarak termal dengede, yani verilen sıcaklıkta hiçbir dış etkiye maruz kalmayan kararlı hal durumunda, eklemde net akım akışı sıfırdır. Termal denge durumunda difüzyon akımı ve sürüklenme akımı eşit ve zıt yönlü olduğundan, eklem üzerinde elektron ve boşluklara bağlı net akım akışı sıfıra eşittir.

$$e\mu_e n(x)\varepsilon(x) + eD_e \frac{dn(x)}{dx} = 0 \quad (2.3)$$

$$e\mu_h p(x)\varepsilon(x) - eD_h \frac{dp(x)}{dx} = 0 \quad (2.4)$$

Burada e elektron yükünü, μ_e elektron mobilitelerini, μ_h boşluk mobilitelerini, $n(x)$ ve $p(x)$ eklemlerden x uzaklığında taşıyıcı yoğunluklarını, D_e ve D_h sırayla elektron ve boşluk difüzyon sabitlerini göstermektedir.

Elektrik alan $\varepsilon(x)=-dV(x)/dx$ olmak üzere yukarıdaki eşitlikler

$$-e\mu_e n(x) \frac{dV(x)}{dx} + eD_e \frac{dn(x)}{dx} = 0 \quad (2.5)$$

$$e\mu_h p(x) \frac{dV(x)}{dx} + eD_h \frac{dp(x)}{dx} = 0 \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilirler.

Örnek olarak elektronlar için Denklem (2.5)

$$\mu_e \frac{dV(x)}{dx} = D_e \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \quad (2.7)$$

olarak da ifade edilebilir. Bu denklemin, eklemin her iki tarafındaki tükenim bölgesi genişlikleri ile alakalı, uygun limitler üzerinden integralini alarak ve Einstein bağıntısını ($D = \mu k_B T / e$) kullanarak aşağıdaki eşitlik elde edilebilir.

$$V_n - V_p = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (2.8)$$

burada V_n ve V_p eklemin her iki tarafındaki potansiyel, n_n ve n_p tükenim bölgesinin her iki tarafındaki elektron konsantrasyonudur. Potansiyel fark $V_n - V_p = V_{bi}$, $n_n = N_d$ yaklaşımını ve ($n \cdot p = n_i^2$ olduğundan) $n_p = n_i^2 / N_a$ eşitliğini kullanarak bariyer voltajı

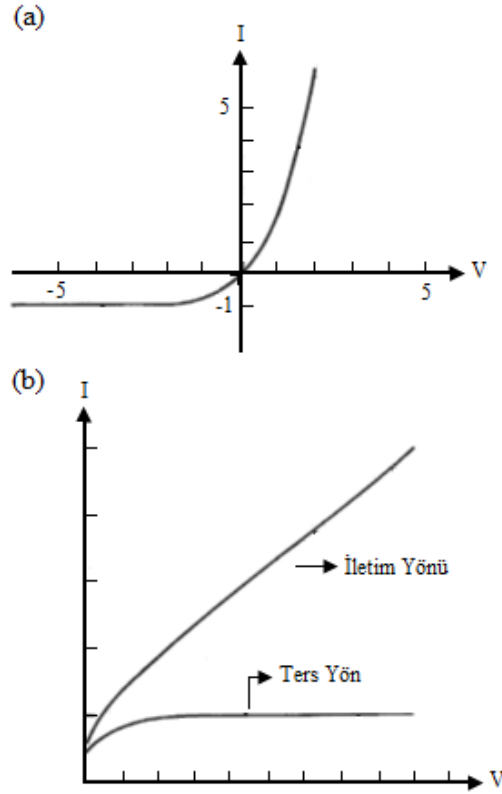
$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (2.9)$$

olarak elde edilir. Burada e elektron yükü, k_B Boltzmann sabiti, n_i doğal taşıyıcı yoğunluğu, N_d ve N_a sırayla donör ve akseptör konsantrasyonlarıdır.

p - n eklemler için bir diğere önemli temel kavram da akım-gerilim (I - V) karakteristiğidir. İdeal bir diyot için,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

eşitliği ile ifade edilir (Sze 1981). Burada I_0 doyma akımı ve T mutlak sıcaklıktır. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi iletim yönünde gerilim uygulanması sonucu akım gerilimle eksponansiyel olarak artarken, ters yönde gerilim uygulanması durumunda ise akım gerilimin artması ile nispeten küçük bir doyma akımına yaklaşmaktadır. Şekil 2.4'te ideal I - V karakteristiği lineer ve yarı logaritmik olarak görülmektedir.



Şekil 2.4. İdeal p-n eklem I-V karakteristiği (a) Lineer (b) Yarılogaritmik (Sze 2002)

Doyma akımı (I_0) azınlık taşıyıcılar ile ilgili çeşitli parametrelere bağlıdır:

$$I_0 = eA \left(\frac{D_e n_p}{L_e} + \frac{D_h p_n}{L_h} \right) \quad (2.11)$$

Burada A eklem kesit alanı, D_e ve D_h elektron ve boşlukların difüzyon sabitleri, L_e ve L_h elektron ve boşlukların difüzyon mesafeleri n_p ve p_n sırasıyla p- bölgesi için elektronların ve n- bölgesi için boşlukların azınlık taşıyıcı konsantrasyonudur (Sze 2002, Yacobi 2003).

p - n eklemelerde tükenim bölgesi, paralel plakalı kapasitörlere benzer şekilde W mesafesi ile birbirinden ayrılmış pozitif ve negatif yüke sahiptir. A kesit alanı olmak üzere tükenim bölgesinde depolanan yük n- tarafında $+Q = eN_d W_n A$ ve p- tarafında $-Q = eN_a W_p A$ olarak ifade edilebilir. Eğer besleme gerilimi dV kadar değişirse, tükenim bölgesi genişliği W da değişeceğinden, tükenim bölgesindeki yük miktarı da $Q + dQ$ olur. Tükenim bölgesi sığası

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (2.12)$$

olarak ifade edilmektedir. Eğer uygulanan voltaj V ise, tükenim bölgesi üzerindeki voltaj $V_0 - V$ olacağından tükenim bölgesi genişliği

$$W = \left[\frac{2\varepsilon(N_a + N_d)(V_0 - V)}{eN_a N_d} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

olarak ifade edilebilir. Tükenim bölgesinin her iki tarafındaki yük miktarlarının ($|Q| = eN_d W_n A = eN_a W_p A$) eşit ve tükenim bölgesi genişliğinin $W = W_n + W_p$ olduğu göz önüne alındığında tükenim bölgesi kapasitansı

$$C = \frac{\varepsilon A}{W} = \frac{A}{(V_0 - V)^{1/2}} \left[\frac{e\varepsilon(N_a N_d)}{2(N_a + N_d)} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

olarak elde edilir (Kasap 2001).

2.6. Karanlık Akım Mekanizmaları

Karanlık akım, herhangi bir aydınlatma etkisi altında değilken fotodetektör üzerinden akan akımdır. Karanlık akımın (I_d), detekte edilecek fotoakımdan belirgin derecede az olması gerekmektedir. İdeal olmayan diyotlar için I_d , ağırlıklı olarak p – n eklem kusurları ve yüzey sızıntı akımından kaynaklanabilir.

Üretim – yeniden birleşme akımı (I_{g-r}) tükenim bölgesi genişliği (W) ile doğru, etkin taşıyıcı ömrü (τ_e) ile ters orantılı bir büyüklüktür. Tükenim bölgesi içinde yer alan kusurlar g – r merkezleri gibi davranabilir. I_{g-r} 'nin en küçük değeri alabilmesi için malzemenin kusur bulundurmayan yüksek kaliteli bir malzeme olması gerekmektedir. I_{g-r} 'nin gerilim (V), etkin taşıyıcı ömrü (τ_e) ve sıcaklığa (T) bağlılığı,

$$I_{g-r} = (qn_i AW / \tau_e) [1 - \exp(-qV / kT)] \quad (2.15)$$

ile verilmektedir. Burada n_i doğal taşıyıcı konsantrasyonudur. Yüksek gerilim değerleri için Eşitlik (2.15)'teki eksponansiyel terim ihmal edilebilir ve

$$I_{g-r} = (qn_i AW / \tau_e) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. I_{g-r} 'nin sıcaklık ve bant aralığına bağlılığı yukarıdaki denklemde verilen,

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-E_g(T) / 2kT) \quad (2.17)$$

olarak ifade edilen n_i sayesinde olmaktadır. Burada N_c ve N_v sırasıyla, iletkenlik ve değerlik bantlarındaki etkin durum yoğunluklarıdır.

Difüzyon akımı, termal olarak üretilen azınlık taşıyıcıların tükenim bölgesini çevreleyen p- tipi ve n- tipi bölgelerden tükenim bölgesine doğru difüzyona uğramalarından kaynaklanır. Yukarıda bahsedilen g – r akımı sıcaklıkla yaklaşık n_i ile doğru orantılı olarak değişirken, difüzyon akımı sıcaklıkla n_i^2 ile doğru orantılı olarak değişir.

p-bölgesinde üretilen difüzyon akımı,

$$I_{dif,n} = qn_i^2(D_n / \tau_n)^{1/2}(A_p / N_A) \quad (2.18)$$

n- bölgesinde üretilen difüzyon akımı,

$$I_{dif,p} = qn_i^2(D_p / \tau_p)^{1/2}(A_n / N_D) \quad (2.19)$$

bağıntıları ile verilmektedir. Burada, D_n ve D_p sırasıyla p- ve n-tipi bölgelerdeki azınlık taşıyıcı difüzyon sabitleri, τ_n ve τ_p azınlık taşıyıcı difüzyon ömürleridir. III – V grubu bileşik yarıiletkenlerin çoğu için $D_n / D_p \approx 10 - 20$ ve $\tau_n \approx \tau_p$ 'dir. Ayrıca, A_p ve A_n p ve n bölge alanları, N_A ve N_D alıcı ve verici konsantrasyonlarıdır.

Dar yasak bant aralıklı yarıiletkenlerde yüksek sıcaklık bölgesinde, karanlık akıma n_i^2 ile orantılı olan difüzyon akımının katkısı n_i ile doğru orantılı olan g-r akımının katkısından daha fazla olmaktadır (Pearsall ve Pollack 1985).

Yeterince yüksek alanlarda karanlık akımı tünelleme mekanizması kontrol eder. Tünelleme mekanizması banttın banda tünelleme ve kapanlar yardımıyla tünelleme gibi farklı şekillerde meydana gelebilir.

Banttın banda tünelleme (BTB) akımı, eklem bir tarafındaki valans bandından diğer tarafındaki iletkenlik bandına enerji kaybı olmaksızın yapılan geçişlerden meydana gelir. Bu akım çok büyük ters besleme durumunda ortaya çıkar. Potansiyel bariyerin üçgen şekle sahip olabileceği yaklaşımı kullanılarak banttın banda tünelleme eşitliği

$$I_{btb} = \left(\frac{2m^*}{E_g} \right)^{1/2} \frac{q^3 E_m V}{4\pi^2 \hbar^2} A \exp \left[\frac{-\theta \sqrt{m_0} (E^*)^{3/2}}{q\hbar E_m} \right] \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilebilir (Forrest ve ark. 1980). Burada m^* tünellenen taşıyıcıların etkin kütlesi, m_0 serbest elektron kütlesi, E^* banttın banda tünelleme durumunda E_g ' ye eşit

olan tünelleme enerjisi, V uygulanan gerilim, A eklem alanı, E elektrik alandır ve bu çalışmada

$$E = E_{\max} = \left[\frac{2qN_D(V_{bi} - V)}{\epsilon_s \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

olarak kabul edilmiştir. θ parametresi ise $\theta = \alpha \sqrt{(m^* / m_0)}$ ile verilmektedir. α ise tünelleme bariyerinin şekline bağlı olan bir sabittir.

Kapanlar yardımıyla oluşan tünelleme (TAT) akımına, tükenim bölgesinin içinde veya yakınında bulunan tuzak konumlarını dolduran ve eklem içinden tünelleme yapan azınlık taşıyıcılar sebep olurlar. Bu durum, termal uyarılma ile valans bandından kapan konumuna geçiş ve bunu takiben sıfır enerji ile iletkenlik bandındaki boş bir konuma tünellemeden meydana gelir. Banttan banda tünellemede olduğu gibi bu akımın da ileri yön akım karakteristiğine ihmal edilebilecek kadar küçük bir katkısı vardır. Kapanlar yardımıyla oluşan tünelleme akımı

$$I_{tat} = \frac{Aq^2 m_e^* V M^2 N_t}{8\pi \hbar^3} \exp \left[\frac{-4 \sqrt{2m_e^*} (E_g - E_t)^3}{3q\hbar E} \right] \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada m_e^* etkin elektron kütlesi, N_t aktif hale getirilmiş tuzak yoğunluğu, M^2 ise tuzak potansiyel değeridir (Nguyen ve ark. 2009).

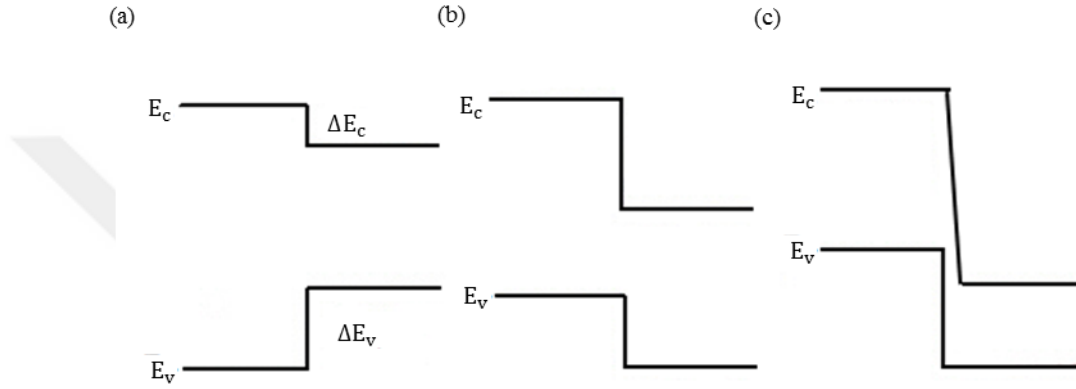
2.7. Heteroeklemler

Farklı enerji bant aralığına sahip iki yarıiletken materyalin arasında oluşan eklemler heteroeklem olarak adlandırılırlar. Enerji bant aralığında değişiklik yapılmasına olanak tanıyarak yük taşıyıcı hareketinin kontrol edilmesini sağlayan heteroeklemler en gelişmiş yarıiletken aygıtların temelini oluşturmaktadır. Çoğu uygulamada aygıtlar birden fazla heteroeklemden oluşur. Yüksek kaliteli heteroyapı elde edebilmek için,

- Kullanılan farklı yarıiletken materyallerin kristal yapılarının aynı ve örgü sabitlerinin birbirlerine mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir.

Örneğin örgü sabitleri neredeyse eşit olan GaAs ile AlAs birbirleri ile iyi bir uyum sağlarken, örgü sabitleri oldukça farklı olan Si ve Ge için aynı şey söz konusu değildir ve dolayısıyla bu durum sonucunda eklem bölgesinde kusur meydana gelir (Frensley 1994).

- Yarıiletkenlerin sıcaklık ile genişleme katsayıları uyumlu olmalıdır,
- Heteroyapıyı üretimde kullanılan sistemlerin hassas tasarlanmış olması gerekmektedir (Milnes ve Feucht 1972).



Şekil 2.5. Heteroeklem tipleri: (a) I. tip iç içe bant düzenli, (b) II. tip basamak bant düzenli (c) II. tip ayrılmış bant düzenli (Mikhailova ve Titkov 1994)

Heteroeklemler kendisini oluşturan yarıiletkenlerin enerji bantlarına göre (Şekil 2.5)

- I. Tip iç içe bant düzenli
- II. Tip basamak bant düzenli
- II. Tip ayrılmış bant düzenli

olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar (Afrailov ve ark. 1990).

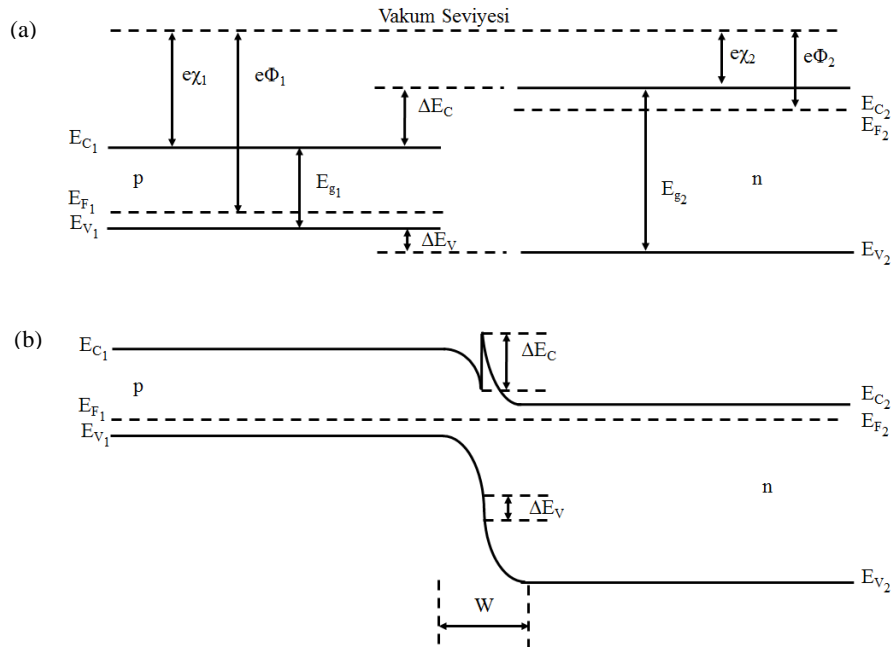
Bir heteroeklemin oluşumundaki en önemli durum heteroeklemi oluşturan yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı farklılıklarından kaynaklanan ve heteroeklemin özelliklerini etkileyebilecek süreksizliklere sebep olan enerji bandı hizalanmasıdır. Bant hizalanması için çeşitli teoriler mevcuttur. Anderson tarafından önerilen elektron alınganlık modeli heteroeklemler için genel olarak kabul gören bir metot olmuştur. Buna göre, heteroeklemlerde yarıiletkenlerin elektron alınganlıkları (iletim bandının en alt seviyesinde bulunan bir elektronu vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerji)

ve yasak enerji aralıkları farklı olduğundan iletim ve değerlik bandı kenarında basamak şeklinde süreksizlikler meydana gelir. Bu süreksizlikler valans bandı süreksizliği (ΔE_v) ve iletkenlik bandı süreksizliği (ΔE_c) olarak adlandırılır. I. Tip heteroeklemlerde (Şekil 2.5 a) dar bant aralıklı yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantları, geniş bant aralıklı yarıiletkenin bant aralığının içinde bulunur. ΔE_c ve ΔE_v bant süreksizlikleri zıt işaretlere sahiptir.

1. Tip heteroeklemler için, farklı yarıiletken malzemelerin arayüzündeki iletkenlik bandı süreksizliği yarıiletkenlerin elektron alınganlıkları arasındaki farktan elde edilebilir.

$$\Delta E_c = e(\chi_1 - \chi_2) \quad (2.23)$$

Bu durum dar bant aralıklı p- tipi yarıiletken ile geniş bant aralıklı n- tipi yarıiletkenden oluşan anizotip heteroeklem için Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Şekil 2.6 (a) ve (b)’de birbirinden ayrı iki yarıiletkenin Tip I heteroeklemi oluşturmadan önceki ve sonraki enerji bant diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.6. p – n heteroeklemin şematik gösterimi: (a) eklem oluşumundan önce (b) eklem oluşuktan sonra enerji bant diyagramları (termal denge halinde) (Yacobi 2003)

Yarıiletkenlerin bir araya getirilmesi Fermi seviyeleri dengeleninceye kadar elektronların p- tipi bölgeye, boşlukların da n- tipi bölgeye geçişi ile sonuçlanır. Bu da, tükenim bölgesinin oluşmasına ve n- tipi bölgede yukarı, p- tipi bölgede aşağıya doğru bant bükülmesine sebep olur. Böylece, farklı elektron alınganlıklarına ve yasak bant genişliklerine sahip yarıiletkenlerin Fermi seviyelerinin dengelenmesi, iletkenlik bandında ΔE_c , valans bandında da ΔE_v süreksizliklerinin oluşumu ile sonuçlanır. Valans bandındaki süreksizlik

$$\Delta E_v = (e\chi_2 + E_{g_2}) - (e\chi_1 + E_{g_1}) \quad (2.24)$$

olarak ifade edilebilir.

II. Tip heteroeklemler iki farklı bant düzeni gösterebilir. II. Tip basamaklı yapılarda (Şekil 2.5 b), yarıiletkenlerden birinin iletkenlik veya valans bantlarından biri, diğer yarıiletkenin bant aralığının dışında bulunur ve bant kırılmaları aynı işarete sahiptir. II. Tip ayrılmış bant düzenli heteroeklemlerde ise (Şekil 2.5 c) dar bant aralıklı yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantlarının her ikisi de geniş bantlı yarıiletkenin bant aralığının dışında bulunur.

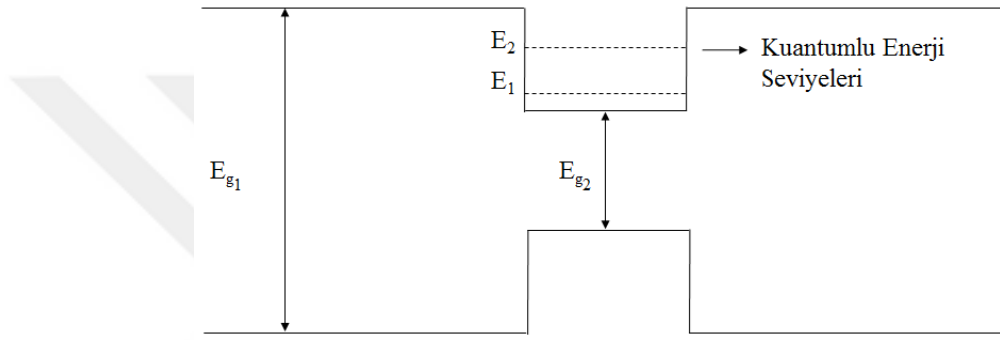
2. Tip heteroeklemler özellikle arayüzün her iki tarafında hem elektronlar hem de boşluklar için bulunan ikili kuantum kuyuları ile potansiyel kuyusunun yalnızca çoğunluk taşıyıcılar için varolduğu 1. Tip heteroeklemlerden farklılık gösterirler. 1. Tip heteroeklemlerde, taşıyıcılar ağırlıklı olarak dar bantlı yarıiletkenin içinde rekombine olurken 2. Tip heteroeklemlerde rekombinasyon süreci daha ziyade arayüzey boyunca tünelleme yoluyla gerçekleşir. Elektronların ve boşlukların bu kuyulara eş zamanlı hapsolmaları bu heteroeklemlerin benzersiz elektriksel ve optik özelliklere sahip olmalarını sağlayarak, optoelektronik cihaz karakteristiklerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Eşsiz fiziksel özellikleri ve önemli bir potansiyele sahip olmaları Tip II heteroyapıların uzun süredir güncel bir konu olarak yerini korumasını sağlamaktadır (Mikhailova ve Titkov 1994).

Bu tez çalışmasında incelenilen GaIn_xAsSb temelli sistem In katkı oranı x 'in her değerinde doğrudan geçişli bant yapısına sahiptir. Ayrıca In yüzdesine bağlı olarak GaSb

ve InAs ikili bileşikleri ile hem II. Tip basamak hem de ayrılmış bant düzenli eklem oluşturabiliyor olmaları en önemli özelliklerindedir (Afrailov ve ark. 1990).

2.8. Kuantum Kuyulu Heteroeklemler

Yarıiletken heteroyapılar günümüzde katıhal fiziğinin en çok ilgi çeken konularından biri haline gelmiştir. Yapılmakta olan çalışmaların büyük çoğunluğu kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktalarını da içeren heteroyapılara odaklanmış durumdadır (Alferov 2001).



Şekil 2.7. Kuantum kuyusunun şematik gösterimi (Sze 1981)

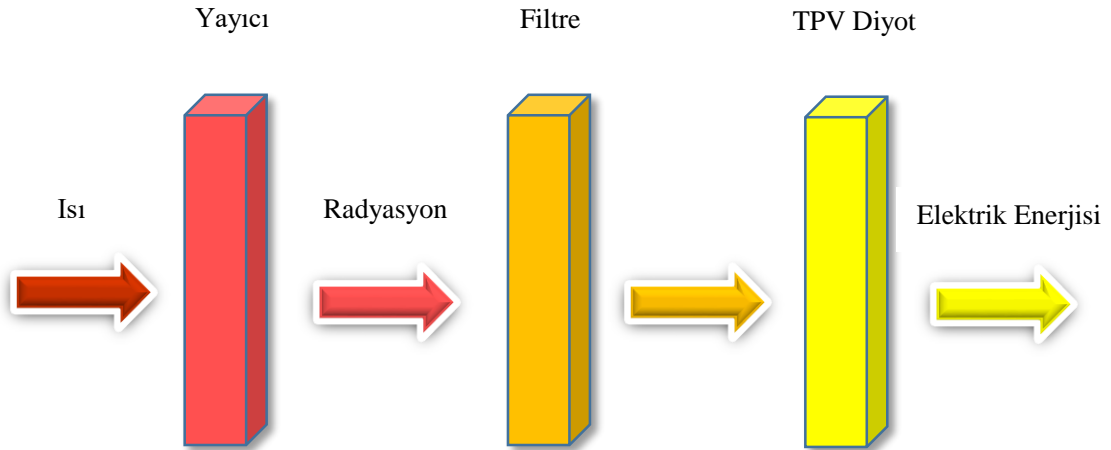
Heteroeklemlerin önemli uygulama şekillerinden biri ΔE_c ve ΔE_v bant kırılmalarının taşıyıcılar için bariyer görevi görebilmesidir. Çok ince tabaka halindeki dar bantlı bir yarıiletkenin daha geniş bantlı yarıiletkenler arasına yerleştirilmesi ile oluşan yapı bir kuantum kuyusudur. Şekil 2.7'deki enerji - bant diyagramı iletkenlik ve valans bandı çıkıntılarının potansiyel bariyer oluşturduğunu göstermektedir. Kuyunun içindeki kesikli enerji seviyeleri kuantum etkilerinin varlığını göstermektedir. Böyle bir kuantum kuyusuna hapsedilmiş bir elektron sahip olduğu enerjiye göre bu kesikli seviyelere yerleşir.

Günümüzde modern epitaksiyel büyütme tekniklerinin gelişmesi sayesinde üretilen diyot lazerlerin aktif bölgesi 10 nm kadar ince bir tabakanın daha büyük bant aralıklı bir malzeme ile çevrenmesiyle oluşan bir kuantum kuyusudur. Bu sayede taşıyıcılar daha büyük bant aralıklı materyalin potansiyel bariyerleri tarafından çok ince bir bölgeye hapsedilebilirler (Behringer 2007).

Dar ve geniş bant aralıklarına sahip tabakaların art arda büyütülmesi ile elde edilen yapılar çoklu kuantum kuyusu olarak adlandırılırlar. Bu yapılarda kuantum kuyuları birbirlerinden kalın bariyer tabakaları ile ayrılmış olduğundan taşıyıcılar ayrı kuyularda sınırlandırılmış olarak kalırlar, dolayısıyla kuyular arası geçiş gözlenmez. Eğer bariyer görevi gören geniş bant aralıklı malzeme yeterince kalın değilse kuyular arasında tünelleme olayı gerçekleşebilir. Böyle yapılar süperörgü olarak adlandırılırlar. Bu durumda kuyuların içerisindeki kesikli enerji seviyeleri bant yapısına benzer minibantlar halini alır (Sze ve Ng 2007). Çoklu kuantum kuyularının günümüzde en önemli uygulamalarından biri “Kuantum Cascade Lazer (QCL)”dir (Dmitriev ve Suris 2005, Mamutin ve ark 2010).

2.9. Termofotovoltaik Yapıların Çalışma Prensibi

Geleneksel PV yapılardaki gibi TPV diyotu da kendi başına çalıştırmak mümkün olsa da performans artışı sağlayabilmek için TPV sistemin bir parçası olarak çalıştırmak gerekmektedir. Tercih edilen dar bant aralıklı malzemeler istenmeyen rekombinasyon etkilerine ve ısınmaya meyilli olduklarından sistem içerisinde TPV diyotun yanı sıra spektral kontrol için seçici yayıcı ve filtre kullanılması gerekmektedir (Pfiester ve Vandervelde 2016). TPV sistemler Şekil 2.8’de de görülebileceği gibi temel olarak üç ana bileşenden oluşurlar:



Şekil 2.8. TPV dönüşüm şeması

- Isı kaynağı: Yayıcı (emitter) sıcaklığını artırmak için gerekli olan ısıyı sağlar. Bunun için çok çeşitli kaynaklar kullanılabilir.

- Seçici yayıcı: Alıcı hücre ile uyum sağlayabilecek fotonların yayınlanması için yayıcılardan faydalanılır. Daha küçük bant aralıklı fotonlar tarafından hücrenin ısınmasını engellemek için seçici yayıcı ile hücre arasında filtre de kullanılabilir.
- Termofotovoltaik hücre: Seçici yayıcı ve filtre sayesinde üzerine gelen uygun fotonları absorbe ederek elektrik üretimini gerçekleştirir (Daneshvar ve ark. 2015).

2.9.1. Isı kaynağı

TPV sistemlerin önemli özelliklerinden biri yayıcıyı ısıtmak için çok çeşitli ısı kaynaklarının kullanılabilmesi olmasıdır. Tek gereken, sıcaklığın TPV dönüşüm için yeteri kadar yüksek olmasıdır. Prensipte olarak 1000 °C ile 1500 °C arasında sıcaklığa sahip olan her ısı kaynağı TPV sistemlerde kullanılabilir. Güneş enerjisi, nükleer reaktörler, radyoaktif izotoplar ve fosil yakıtlar buna örnek olarak gösterilebilir.

2.9.2. Yayıcı

Tipik ısı kaynakları geniş bir aralığa sahiptir. Ancak TPV diyotlar sadece kendi yasak bant genişliklerine uygun fotonları soğururlar. Dolayısıyla, gelen enerjinin yalnızca küçük bir kısmı elektrığe dönüştürülebilir. Sistem verimini artırmak için yayıcının görevi kendisine ulaşan ısıyı alıcı duyarlılığına uygun bir spektruma dönüştürmektir (Bauer ve ark. 2004).

TPV sistemi içerisinde özel yayıcılar kullanmak, çeşitli fabrikasyon süreçleri sonucunda oluşan atık ısı gibi pek çok ısı kaynağını değerlendirmeyi mümkün kılar. Yayıcı, filtre ve TPV diyottan oluşan bir TPV sistem ısı kaynağı ayırt etmeksizin (güneş, eritme ocağı, bozulan radyoaktif parçacık, yanma süreci) aynı yöntemle elektrik üretir. Yayıcılar geniş bantlı yayıcılar ve seçici yayıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

Geniş bantlı yayıcılar, geniş bir dalgaboyu aralığında yüksek yayıcılığa sahiptirler. Spektral cevapları kara cismininkine benzerdir. Geniş bantlı yayıcı kullanımı TPV diyot üzerine daha yüksek bir gücün ulaşması ile olası çıkış gücünün de yüksek olmasını sağlar. Ancak, dönüştürücüye gelen geniş dalgaboyu aralığına sahip radyasyonun büyük bir kısmının TPV diyot için kullanılabilirliği yoktur ve diyotta ısınmaya sebep olur. Bu da,

diyot performansında düşüşü ve böylece dönüşüm veriminin azalmasını beraberinde getirir. Eğer verimde artış sağlamak isteniyorsa bu fazla dalgaboylu fotonların yayıcıya geri gönderilmesi gerekmektedir.

Modern TPV sistemler için çok daha kullanışlı olan seçici yayıcılar ise yalnızca dar bir dalgaboyu aralığında yayıcılığa sahiptirler ki bu da, enerji dönüşüm veriminde artış anlamına gelir. İdeal bir seçici yayıcıda daha dar veya daha uzun dalgaboylu fotonlar değil yalnızca yasak bant enerjisine yakın olan fotonlar mevcuttur. Yani istenen dar bir bant aralığında yayıcılık var iken bunun dışındaki dalgaboylarında yayıcılık sıfırdır. Bu da, daha kısa veya daha uzun dalgaboylu fotonların sorun yarattığı geniş bantlı seçicilerdekinin aksine enerji dönüşüm veriminde artış anlamına gelir. Kısaca, ısı kaynağından bağımsız olarak her seçici yayıcı kendi karakteristik spektrumunda ışıma yapar. Bu konuda dikkat edilmesi gereken nokta ise dar frekans aralıklı yayılımın daha düşük güce sebep olmasıdır. Seçici yayıcıdan yüksek fayda sağlanabilmesi için verim ve güç arasında iyi bir denge yakalanması gerekmektedir.

Geniş bantlı yayıcı olarak en sık kullanılan malzeme, hemen hemen tüm spektrum boyunca yüksek yayıcılığı olan silikon karbitdir (SiC). Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı çok iyi olan bu seramik malzeme TPV uygulamalar için iyi bir adaydır. Spektral kontrol için kullanılacak bir diğer seramik malzeme grubu da nadir toprak oksitleridir. Ytterbium (Yb), erbium (Eb), thulium (Tm) ve holmium (Ho) oksitler, diyot bant aralığına bağlı olarak bu alanda en sık kullanılan yapılardandır (Mattarolo 2007). Dalgaboyu aralığı ve tepe noktası elektronik yapıları tarafından belirlenen nadir toprak oksitleri nispeten dar bir dalgaboyu aralığında ışıma yapar. Örneğin lanthanide oksitlerin bant dışı yayıcılıkları çok düşük iken bant içi yayıcılıkları yüksektir. Ayrıca yaklaşık 2500 - 2800 K sıcaklık aralığındaki erime noktaları ile ısıya dayanıklı yapıları da önemli bir avantajdır. Ytterbium ve erbium, sırasıyla silisyum ve germanyumun bant aralıklarına karşılık gelen dalgaboylarında ışıma yaparlar (Coutts 1999). Yaklaşık 2000 K civarında yüksek sıcaklıklı ytterbium yayıcı ve silisyum hücre verimli çalışmaya uygundur. Ancak, çok yüksek sıcaklık değerinden dolayı çıkış güç yoğunluğu düşüktür. Erbium seçici yayıcısı ise daha dar bant genişlikli bir yarıiletken ile daha düşük bir sıcaklıkta çalışabilir. Fakat, germanyum daha az voltaja neden olan büyük elektron kütesinden dolayı TPV çevrim için uygun değildir. Dolayısıyla, III-V grubundan oluşan bileşik ve alaşımlar bu

alanda daha elverişli seçenekler olarak görülmektedir. Fakat, nadir toprak oksitleri ideal davranış göstermezler ve önemli derecede bant dışı ışıma da yaparlar. Eğer verimli bir sistem oluşturmak isteniyorsa bu uzun ve kısa dalgaboylu fotonların tekrar seçici yayıcıya geri gönderilmesi gerekmektedir (Nelson 1995, Coutts 1999, Pfiester ve Vandervelde 2016).

Benzer şekilde, metaller de yayıcı olarak faydalanılan malzemelerdir. Orta infrared (3-5 μm) ve uzun infrared (15-1000 μm) bölgelerde düşük yayıcılığa sahip olmakla birlikte yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları oldukça iyidir. Özellikle tungsten (W), GaSb diyotların bant genişliğiyle sağladığı uyum ve 2000 K sıcaklığa kadar gösterdiği yüksek performans ile kullanışlı olarak görülmektedir. Fakat, tüm diğer metaller gibi oksitlenerek seçici yayıcılık özelliklerini kaybetmeye müsait olduklarından gerekli önlemler alınarak kullanılmalıdırlar (Bauer 2011, Coutts 1999).

2.9.3. Filtre

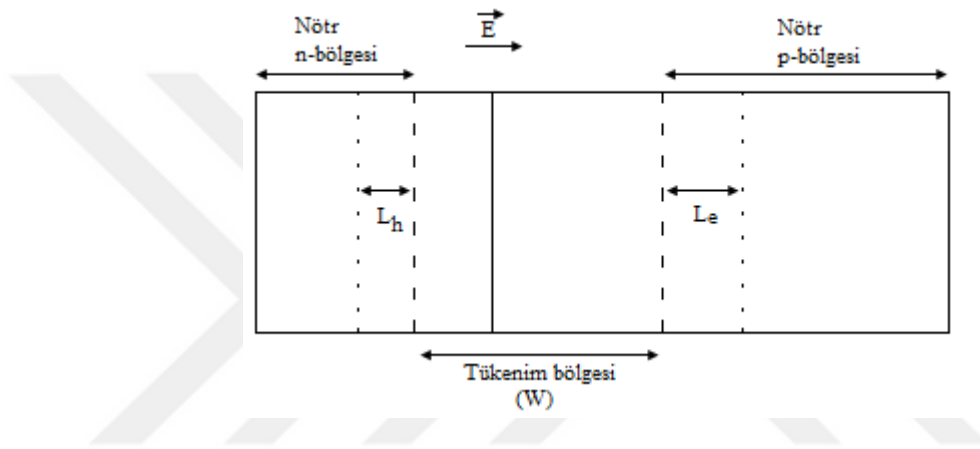
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi TPV enerji dönüşümünde yüksek verim elde edebilmek için en önemli faktör spektral kontroldür. Yayıcı ile diyot arasına bir filtre yerleştirmek de TPV diyot üzerine gelen foton aralığını düzenleyerek spektral kontrol sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde enerji dönüşümü için faydalı olmayan fotonlar yayıcıya geri döndürülürler. İdeal bir filtrede diyot bant aralığından düşük enerjiye sahip fotonların, başka bir deyişle daha uzun dalgaboylu radyasyonun geri yansımaları gereklidir. Yani yalnızca ilgili diyotun bant aralığından biraz daha yüksek enerjili, oldukça dar bir aralıkta foton yayan ideal yayıcının yokluğunda bant aralığının altında kalan radyasyonun yayıcıya geri gönderilmesi için filtre kullanmak faydalı olacaktır. Bu sayede, bu fotonlardan bazıları yayıcı tarafından absorbe edilerek diyot bant aralığından daha yüksek bir enerji ile tekrar salınabilirler (Chubb 2007, Daneshvar ve ark. 2015, Pfiester ve Vandervelde 2016).

2.9.4. Fotovoltaik hücre

Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi yarıiletken p-n ekleme gelen fotonlar ile üretilen elektron-boşluk çiftlerinin bir dış devre üzerinden akarak elektriksel güç üretmesine dayanır. Önceki bölümlerde serbest yük taşıyıcıların bulunmadığı tükenim bölgesinde

sabit iyonların varlığından kaynaklanan bir elektrik alanının varlığından bahsedilmiştir. Yeterli enerjiye sahip bir fotonun Şekil 2.9’da görüldüğü gibi, tükenim bölgesi (W) veya eklemden itibaren difüzyon mesafeleri içerisinde (L_h, L_e) absorbe olmasıyla üretilen elektron-boşluk çifti, bu elektrik alan sebebiyle birbirlerinden ayrılırlar.

Tükenim bölgesi ve difüzyon mesafesi içerisinde üretilmiş olan bu çift p- tipi bölgede üretilmiş ise elektronlar n- tarafına doğru sürüklenirken, absorpsiyon n- tipi bölgede gerçekleştiyse üretilen boşluklar p- tarafına doğru sürüklenirler.



Şekil 2.9. Diyot bölgelerinin şematik gösterimi

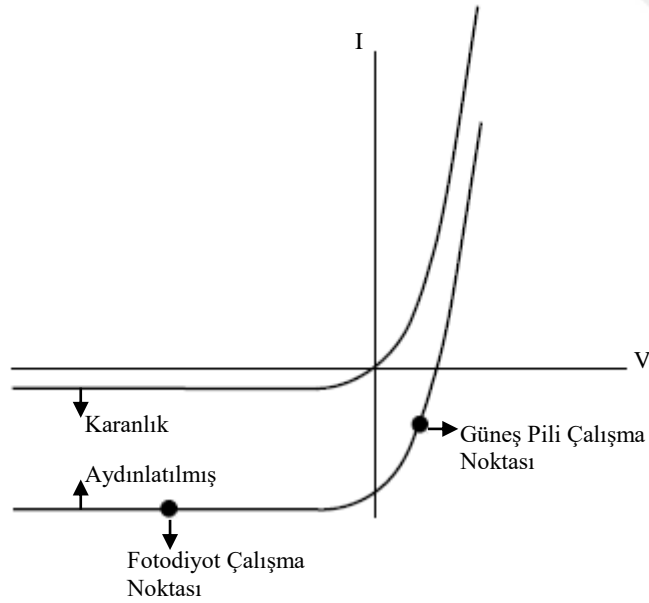
Nötr bölgede üretilmiş olan elektron - boşluk çifti bu bölgede herhangi bir elektrik alan olmadığından ancak difüzyon ile hareket edebilir. Örneğin, p- bölgesindeki elektron ömrü τ_e ve p- tarafındaki elektronun difüzyon sabiti D_e ise $L_e = \sqrt{(2D_e\tau_e)}$ ile ifade edilen ortalama bir mesafe kadar difüze olabilir. Dolayısıyla, eklemden itibaren L_e mesafesi içerisindeki elektronlar tükenim bölgesine doğru difüze olabilir ve buradaki elektrik alan sayesinde karşı bölgeye sürüklenebilir ve fotovoltaik etkiye katkı sağlayabilirler. Bu durumun benzeri n- tipi bölgedeki foto boşluklar için de geçerlidir. Eklemden itibaren difüzyon mesafesinden daha uzakta üretilen elektron - boşluk çiftleri ise yeniden birleşme (rekombinasyon) ile kaybolurlar (Kasap 2001). Yük taşıyıcıların enerjilerini dış devreye vermeden yeniden birleşmelerinin minimuma indirilmesi önemlidir. Çünkü rekombinasyon ısı üretimine sebep olur. Yani üretilen taşıyıcıların akım akışına katkı sağlayabilmesi için rekombinasyona uğramadan tükenim bölgesinden karşı bölgeye geçerek çoğunluk yük taşıyıcısı haline gelebilmesi gerekmektedir (Kitai 2011).

Sonuç olarak p- tipi bölgede biriken foto boşluklar ve n- tipi bölgede biriken foto elektronlar açık devre voltajı (V_{oc}) olarak adlandırılan bir voltaj oluşumuna sebep olurlar. Eğer bir dış yük ile bağlantı sağlanırsa n- bölgesindeki bu fazlalık elektronlar dış devre üzerinden hareket ederek p- tipi bölgeye ulaşabilir ve orada bir fazlalık boşluk ile rekombinasyona uğrayabilirler. Bu şekilde üretilmiş foto taşıyıcıların akışından kaynaklanan akım fotoakım (I_{ph}) olarak adlandırılır (Kasap 2001).

İdeal bir fotodiyot için karanlık akım - gerilim karakteristiği Şekil 2.4'te gösterilmekte olup (2.10) denklemi ile ifade edilmektedir. Eğer fotodiyot bir kaynak tarafından aydınlatılırsa oluşan fotoakım difüzyon akımından daha baskın olacaktır. İdeal durumda akım

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

olarak ifade edilir. Bir fotovoltaik hücrenin tipik I-V karakteristiği Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Güneş pilinin karanlık ve aydınlatılmış durumdaki I-V karakteristiği

Belirli bir aydınlatma altında, herhangi bir elektriksel yükün bulunmaması durumunda TPV hücre tarafından üretilen gerilim açık devre gerilimi (V_{oc}) olarak bilinir ve eşitlik (2.25)'te $I = 0$ alınması ile

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.26)$$

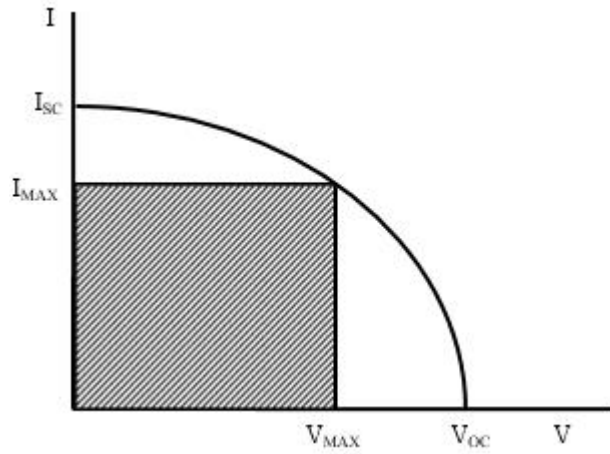
olarak ifade edilir.

TPV diyotun uçları arasındaki potansiyel farkı sıfırken elde edilen akım değeri kısa devre akımını (I_{sc}) olarak bilinmektedir.

Açık devre gerilimi ile kısa devre akımı arasındaki ilişki de

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.27)$$

denklemleri ile verilmektedir.



Şekil 2.11 Güneş pilinin çalışma noktası (Kitai 2011)

Açık devre voltajı ve kısa devre akımı gibi güneş pili karakterizasyonu için kullanılan diğer önemli parametreler maksimum akım ve gerilim (I_{max} , V_{max}) değerleridir. I_{max} ve V_{max} değerlerinin çarpımı Maksimum Güç Noktasını verir. Güneş pilinin sağlayabildiği

maksimum gücün, I_{sc} ve V_{oc} değerlerinin çarpımına oranı ise doldurma faktörü (FF) olarak bilinmektedir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$FF = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.28)$$

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi $I - V$ eğrisine çizilebilecek en büyük dikdörtgen FF ’yi belirler. Güneş pili için $I - V$ eğrisi kareye ne kadar yakın olursa FF o kadar büyük olur.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

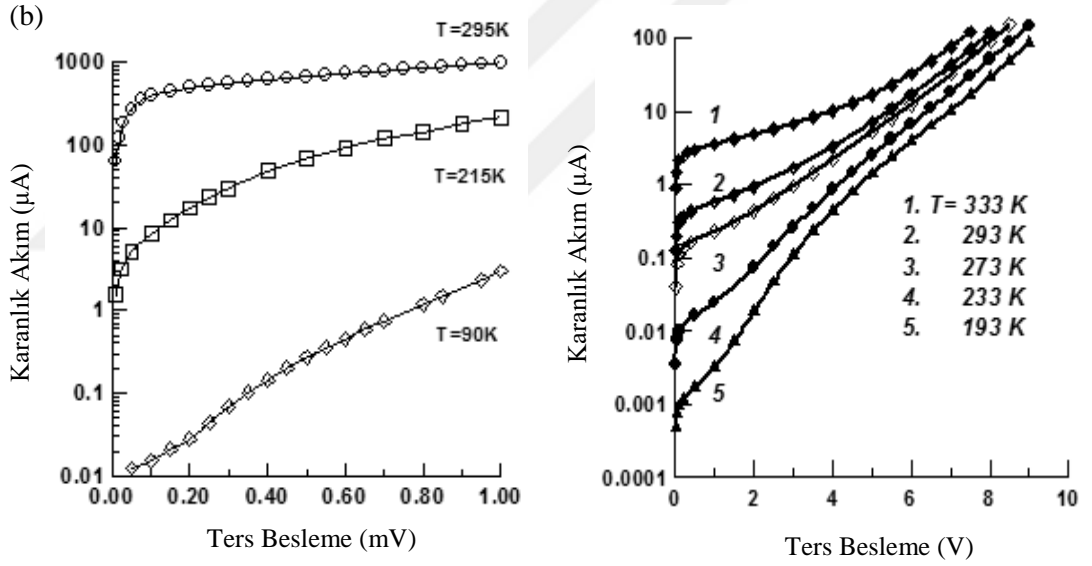
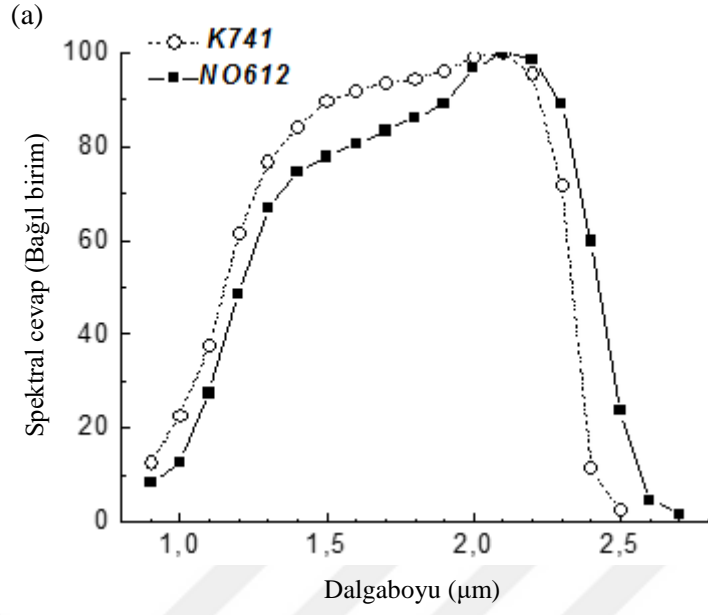
3.1. Malzeme Üretim Teknikleri

Optoelektronik cihaz üretimi için kullanılan en yaygın yöntem epitaksiyel büyütmedir. “Üzerine sıralamak” anlamına gelen epitaksi, tek kristal yarıiletken alttaş üzerine atomik tabakalar halinde tek kristal yarıiletken yapıların büyütülmesi olarak bilinen bir tekniktir. Epitaksiyel büyütme için genel olarak kullanılan teknikler;

- Moleküler Demet Epitaksi (MBE)
- Sıvı Faz Epitaksi (LPE)
- Buhar Faz Epitaksi (VPE)
- Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD)

olarak sıralanabilir.

Son yıllarda sıklıkla tercih edilmeye başlanmış yöntemlerden biri MBE’dir. Bu yöntem bir veya daha fazla atom ya da molekülün termal demetlerinin ultra yüksek vakum (UHV) ($\approx 10^{-10}$ Torr) şartları altında bir kristal alttaş ile etkileşimi sonucu kristal ince filmlerin oluşumunu sağlayan epitaksiyel bir süreçtir. Film kalınlığının, bileşiminin ve katkı seviyesinin tam olarak kontrol edilmesine imkan sağlıyor olması ve atomik mertebede tek kristal çok katmanlı yapıların üretilmesini mümkün kılması MBE tekniğini diğer tekniklerden daha avantajlı hale getiren en önemli özellikleridir. Ayrıca, saflık derecesi çok yüksek olan malzemelerin üretimi bu teknik ile gerçekleştirilebilmektedir (Sze 2002). Tüm bunlarla birlikte, filmler genellikle teker teker tabaka halinde oluşturuldukları için MBE tekniği çok yavaş büyütme hızına sahip olan ve oldukça pahalı bir tekniktir. Dolayısıyla seri üretim için uygun değildir. Ayrıca bu tez çalışmasında incelenen yapılar için, söz konusu yöntemin düşük verimliliğe sahip olduğu Kunitsyna (2012) tarafından gösterilmiştir. Şekil 3.1’de LPE ve MBE yöntemleriyle üretilmiş olan GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapılarının optik ve elektrik özelliklerinin karşılaştırması bulunmaktadır. Şekil 3.1 (a) LPE ile üretilmiş olan numunenin MBE ile üretilmiş olan numuneye göre daha yüksek verime, Şekil 3.1 (b) ise daha düşük karanlık akım değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.

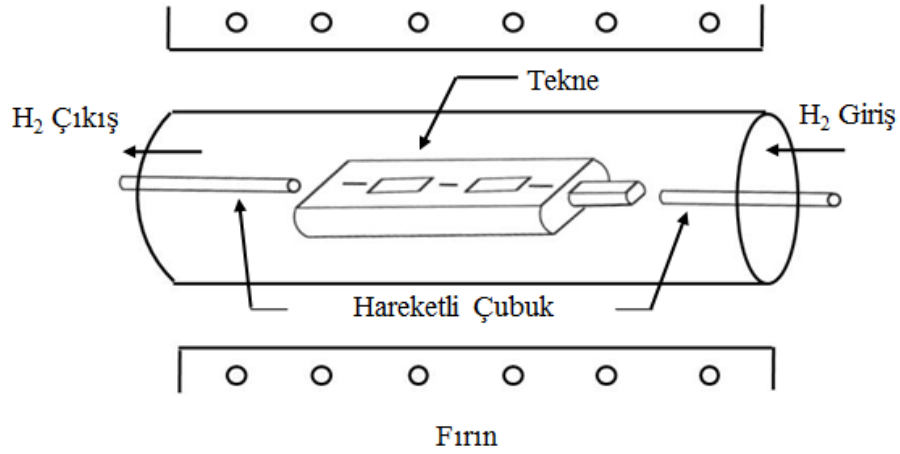


Şekil 3.1. LPE ve MBE ile üretilmiş GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapısı için (a) Spektral duyarlılık (b) Karanlık akım değerlerinin karşılaştırması (Kunitsyna 2012)

Bu çalışmada incelenen numuneler yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı LPE yöntemi ile üretildiği için LPE sistemi daha detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3.1.1. Likit (Sıvı) faz epitaksi yöntemi

Sıvı faz epitaksi (LPE), alttaş ile ısıtılmış yarıiletken çözeltinin kontak haline getirilmesiyle epitaksiyel tabakaların büyütülmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde alttaş hareketli bir sürgü üzerine yerleştirilir. Bu sürgü alttaşın, içerisinde büyütülecek olan eriyik malzemeleri bulunduran farklı teknelere doğru hareket ettirilmesini sağlar. Alttaş, sırayla büyütülmek istenen eriyik malzeme teknesine geldiğinde, teknede bulunan homojen eriyik katılma noktasının altındaki sıcaklıklara getirilir ve malzemenin alttaş üzerine birikmesi sağlanır. Benzer şekilde alttaşın diğer teknelere hareket ettirilmesi uygun sıcaklık değişimleri ile çok katmanlı yapıların büyütülmesini mümkün kılar (Sze 1985). Şekil 3.2 fırın içerisine yerleştirilmiş ve H₂ ortamındaki LPE düzeneğini göstermektedir.



Şekil 3.2. LPE düzeneği (Sze 1985)

İlk kez 1960'lı yılların başında Nelson tarafından önerilen bu yöntem, özellikle III-V grubu olmak üzere II-VI ve IV-VI grubu bileşiklerin ince tabakalarının üretimi için de oldukça kullanışlı bir yöntem olarak yerini korumaktadır (Kuphal 1991). LED'ler, lazer diyotlar, infrared detektörler, heteroeklem bipolar transistörler ve hetero arayüzey güneş pilleri gibi pek çok yarıiletken cihazın üretimi bu teknikten faydalanılarak gerçekleştirilmektedir (Scheel 2007).

Eski bir yöntem olmasına rağmen LPE hala pek çok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek büyütme oranı. LPE ile 0.1–1 µm/dak aralığında büyütme hızı gerçekleştirilebilmektedir. MBE yada MOCVD yöntemlerinden yaklaşık 10 ile 100 kat aralığında daha hızlı olduğu görülen LPE ile kalın yapıların üretimi mümkün olmaktadır.
- LPE ile pek çok katkı maddesi kullanmak mümkündür. Eriyik içerisine eklenen pek çok element epitaksiyel tabakaya dahil edilebilmektedir.
- Yüksek saflıkta yarıiletken malzeme üretilebilir.
- Oldukça düzgün yüzey ve kusursuz yapı üretimi mümkündür.
- Toksik öncüller ya da yan ürünler yoktur.
- Ekipman ve çalışma maliyeti diğer yöntemlere nispeten ucuzdur (Capper ve ark. 2006).
- Uygulanabilirliği diğer yöntemlere göre daha kolaydır.
- GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapılar için daha iyi sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 3.1) (Kunitsyna 2012).

Bunlarla birlikte kompozisyon, kalınlık ve katkı seviyesinin zor kontrol edilebiliyor olması bu yöntemin en önemli dezavantajı olarak görülmektedir.

Tez çalışmasında kullanılmış olan ve üretimleri IOFFE araştırma enstitüsünde gerçekleştirilmiş olan GaSb/Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y} heteroyapıları (1-5) x 10¹⁷ cm⁻³ yoğunluğunda Te ile katkılanmış (100) n-GaSb taban tabaka üzerine LPE yöntemiyle büyütülmüştür. InSb, GaSb ve InAs ikili bileşikleri GaInAsSb epitaksiyel tabakalar için başlangıç bileşenleri olarak kullanılmıştır. GaAlAsSb'nin büyütülmesi için % 99.999 saflıkta Ga, %99.999 saflıkta GaSb ve taban tabaka için As kullanılmıştır. Sabit sıcaklıkta katı ve sıvı fazlardaki denge mol oranları Litvak ve Charykov (1990) tarafından verilen termodinamik yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Taban tabaka ile örgü uyumlu katı çözeltiler elde etmek için, hesaplamalardan elde edilen likit faz katkı oranı deneysel olarak tespit edilmiştir. Yüzeydeki katı çözeltilerin kimyasal kompozisyonu ve kalınlık boyunca değişimi JXA-S Camebax X-ışını mikroanalizörü kullanılarak belirlenmiştir.

Bu şekilde, Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82} epitaksiyel tabakaları, ΔT = 3 °C'lik soğutma ile T = 600 °C'deki moleküler kompozisyonun likit fazından karışabilirlik aralığı sınırında tekrar büyütülebilirler. (111)B GaSb taban tabaka kullanıldığında, katı fazdaki indiyum miktarı,

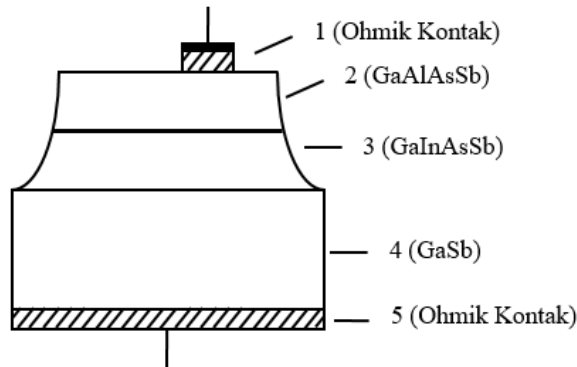
aynı teknolojik şartlar altında $x = 0.24$ 'e yükselmiştir. Heteroyapıların geniş bant aralıklı penceresi $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ tabakalarının $T = 599$ °C'de büyütülmesi ile oluşturulmuştur. GaInAsSb ve GaAlAsSb katı çözeltilerin ortalama büyütme hızları sırasıyla 3.0 – 4.0 ve 1 – 1.5 $\mu\text{m}/\text{dak}$ 'dır. Elde edilen epitaksiyel tabakalara ait parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir (Andreev ve ark. 2003).

Çizelge 3.1. $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ve $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epitaksiyel tabakalarının parametreleri (Andreev ve ark. 2003)

| Katı Çözelti | Büyütme Sıcaklığı (°C) | Kalınlık (μm) | Yasak Bant Aralığı (Eg, eV) T = 300 K |
|--|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ | 600 | 2.2 – 2.8 | 0.53 |
| $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.21}\text{Sb}_{0.79}$ | 600 | 2.2 – 2.8 | 0.51 |
| $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ | 599 | 1.5 – 2.0 | 1.1 |
| $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ | 599 | 1.5 – 2.0 | 1.3 |

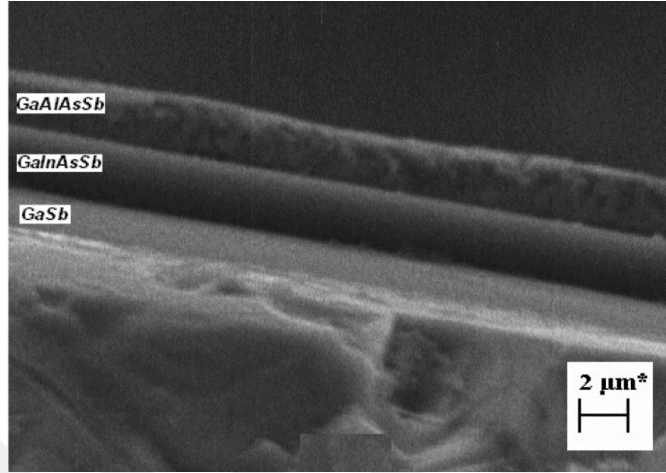
3.2. Dar Bantlı GaInAsSb Temelli TPV Diyot

Üretimi IOFFE Araştırma Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiş olan GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun GaSb alt tabaka, GaInAsSb ve GaAlAsSb epitaksiyel tabakalar ve ohmik kontaklardan oluşan şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



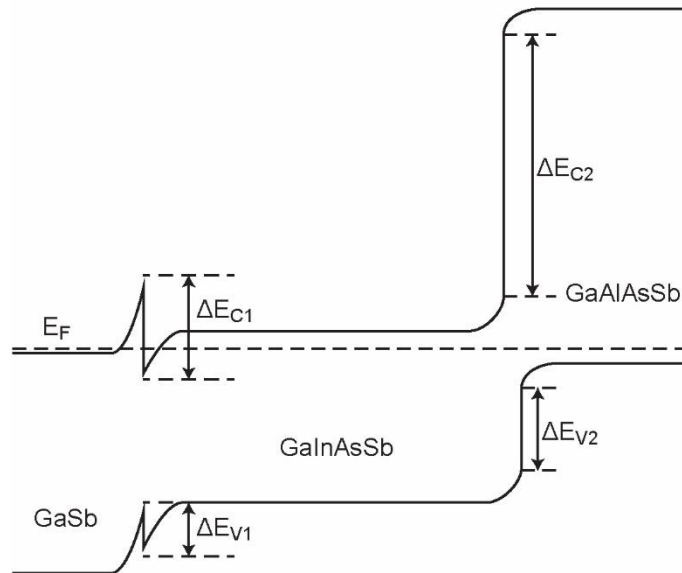
Şekil 3.3. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun şematik gösterimi

Şekil 3.4'te yapının kesit Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. Epitaksiyel tabakaların düzgün yüzey morfolojisine ve düz arayüzey çizgilerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb heteroyapının kesit SEM görüntüsü (Ahmetoglu 2010).

Şekil 3.5 yapının denge durumu için enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi GaSb/GaInAsSb heteroarayüzeyinde elektronlar ve boşluklar için iletkenlik ve valans bantlarında, Afrailov ve ark. (1997) tarafından tespit edilmiş olan sırasıyla $\Delta E_c = 0.3 \text{ eV}$ ve $\Delta E_v = 0.1 \text{ eV}$ derinliklerine sahip kuantum kuyuları oluşur.



Şekil 3.5. n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun enerji bant diyagramının şematik gösterimi (Afrailov 2012)

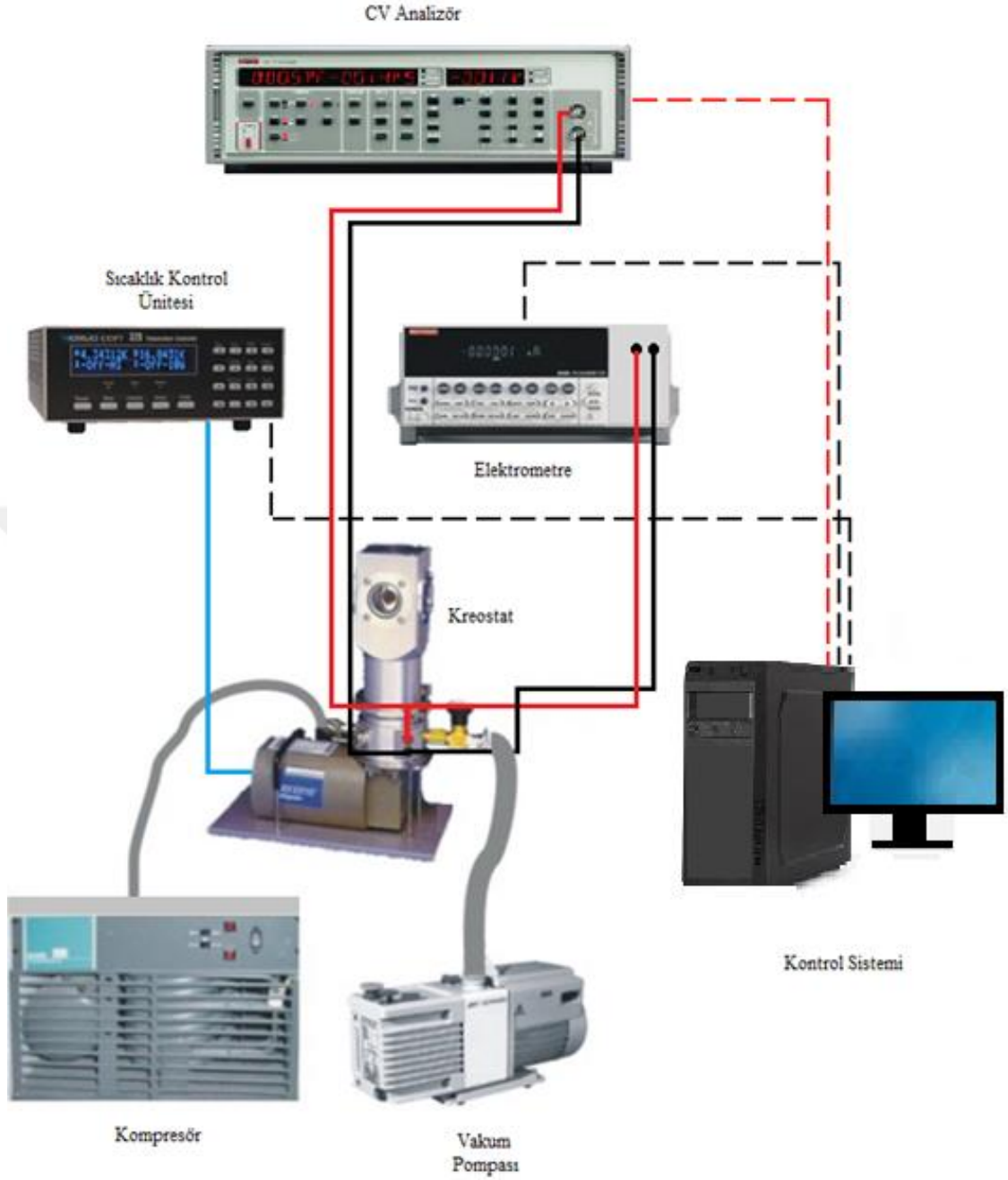
Numune üretildikten sonra dış etkilerden korunması ve dayanıklılığının artırılması amacıyla standart diyot kalıplarına yerleştirilir. Bu işlem, lehimleme ya da yapıştırma yöntemlerinden biri ile gerçekleştirilebilir. İlk yöntemde numune, diyot kalıbına indiyum lehim kullanılarak lehimlenir. Daha sonra üst kontak 50 µm çaplı bir altın tel lehimlenerek oluşturulur. Diğer yöntemde ise numune, diyot kalıbına yerleştirilerek yapıştırılır ve yine altın tel ile yapıştırılarak kontakın oluşması sağlanır (Özer 2005). Şekil 3.6'da diyot kalıbına yerleştirilmiş numune gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Standart diyot kalıbına yerleştirilmiş olan numune

3.3. Elektriksel Ölçüm Deney Düzenegi

Tez çalışmasında kullanılan yapının elektriksel ölçümleri için kurulan deney düzenegi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Ölçümlerin sıcaklık kontrolü altında gerçekleştirilmesi için Janis CCS 150 Kapalı Devre Kreostat Sisteminden faydalanılmıştır. Sistem, su soğutmalı kompresör, pompa istasyonu ve sıcaklık kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Bu sayede numunenin dış etkilerden izole edilmesi sağlanmıştır. Ölçümler süresince kreostatın içi düşük basınç altında tutulmuştur. Sıcaklık kontrol ünitesi ile soğutucu içerisinde bulunan numunenin sıcaklığının sabit kalması sağlanmıştır.



Şekil 3.7. Elektriksel ölçümler için kurulan sistemin şeması

3.3.1. Akım – gerilim ölçüm sistemi

Akım – gerilim ($I - V$) ölçümlerinin farklı sıcaklıklarda alınabilmesi için Keithley 6517A Electrometer / High Resistance Meter, soğutucu içerisindeki numuneye Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bağlanmıştır. Keithley elektrometre ile aynı anda hem voltaj uygulanıp hem de akım ölçülebilmektedir. Ölçümler için LabVIEW programı kullanılarak

elektrometre bilgisayar ile kontrol edilmiş ve ölçümlerin kısa sürede alınması sağlanmıştır. Bilgisayar ile elektrometre arasındaki iletişim IEEE 488 GPIB kablosu ile sağlanmıştır. Farklı sıcaklık değerleri için elde edilen I – V grafikleri Microsoft Excel programı ile çizdirilerek akımın gerilime bağlı değişimi incelenmiştir.

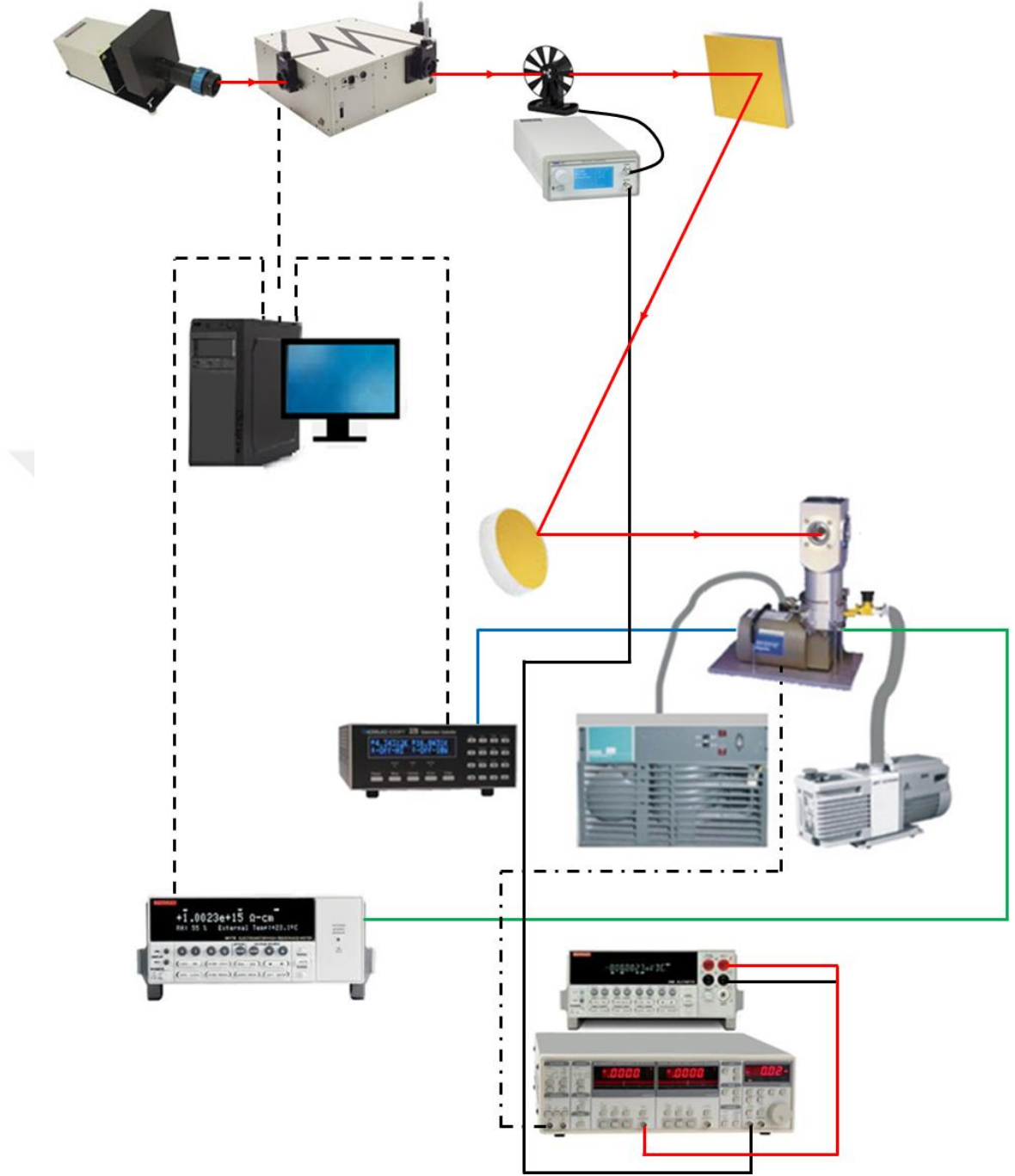
3.3.2. Kapasitans – gerilim ölçüm sistemi

Yapının kapasitans – gerilim (C – V) ölçümleri için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Ölçümler için LabVIEW programı kullanılarak Keithley 590 CV Analizör bilgisayar ile kontrol edilmiş ve ölçümlerin kısa sürede alınması sağlanmıştır. Bilgisayar ile CV Analizör arasındaki iletişim IEEE 488 GPIB kablosu ile sağlanmıştır. Numune ise CV Analizöre BNC kabloları ile bağlanmıştır.

Ölçüm sırasında CV Analizör numuneye frekansı 100 kHz olan puls şeklinde sinyaller göndermektedir. Bu sinyallerin genlikleri, ayarlanan gerilim aralığını tarayacak şekilde değişir. CV Analizör, geri gelen sinyalleri analiz ederek kapasitans değerlerini bilgisayara gönderir. Oda sıcaklığındaki C-V grafiği Microsoft Excel programı ile çizilerek yapının incelenmesi sağlanmıştır.

3.4. Optik Ölçüm Deney Düzeneği

Tez çalışmasında kullanılan yapının optik ölçümleri için kurulan deney düzeneği Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Ölçümlerin yüksek sıcaklık değerlerinde tekrar edilebilmesi için Janis Kreostat kullanılmıştır. Bu sayede numunenin dış etkilerden izole edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca sıcaklık kontrol ünitesi numune sıcaklığının sabit kalmasına yardımcı olmuştur.

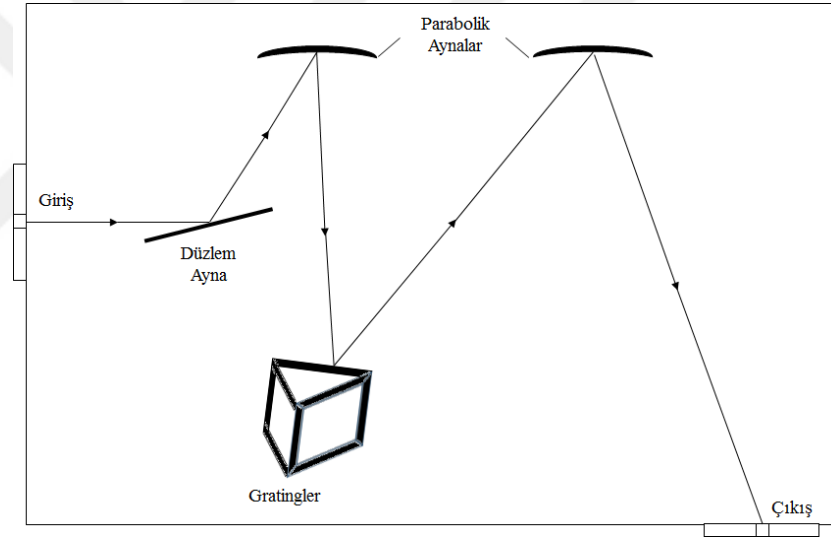


Şekil 3.8. Optik ölçümler için kurulan sistemin şeması

Numunenin optik karakteristiğinin incelenmesi için oluşturulan sistem; Keithley Elektrometre, Apex 2 Quartz Tungsten Halojen (QTH) Işık Kaynağı, 250 W quartz halojen tungsten ışık kaynağı, Oriel Cornerstone 260 VIS-NIR Monokromatör, farklı

optik kesicilere sahip Thorlabs MC2000B Optik Kesici Sistemi, Thorlabs PM100D Dijital Optik Güç ve Enerji Ölçer, farklı dalgaboyu aralıklarına sahip Thorlabs Optik Filtreler, Thorlabs Düzlem ve Parabolik Aynalar, Stanford SR830 DSP Lock-in Yükselteç ve Keithley 2000 Voltmetre gibi cihazlardan oluşmaktadır.

Işık kaynağından gelen ışık demeti, filtre seçme düğmesi yardımı ile uygun optik filtre seçildikten sonra kolimatörden geçerek monokromatörün girişine gönderilir. Filtre, istenen dalgaboyunun daha yüksek mertebeli harmoniklerinin monokromatöre ulaşmasına engel olur. Işık, monokromatörün giriş yarığına geldikten sonra monokromatörün içindeki düzlem ayna tarafından parabolik aynaya yansıtılır. Kullanılan monokromatör hareketli bir plaka üzerine sabitlenmiş farklı dalgaboyu aralıklarında çalışan üç farklı ızgara (grating) içermektedir.

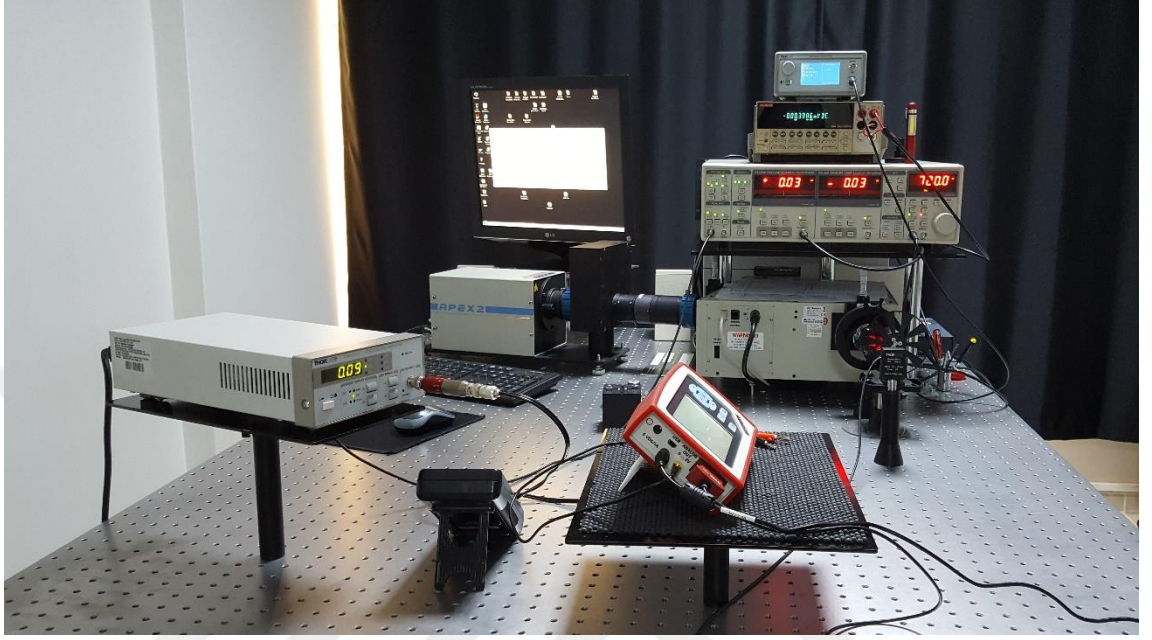


Şekil 3.9. Monokromatör çalışma prensibi

Birinci parabolik ayna ışığın istenen ızgaraya doğru toplanarak iletilmesini sağlar. Izzaralar gelen ışığı sahip oldukları dalgaboyu aralıklarına göre ayırırlar. Daha sonra, ayrılan dalgaboyları ikinci parabolik ayna yardımıyla toplanarak çıkış yarığına doğru iletilirler. Bu durum basitçe Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Bilgisayar kontrollü monokromatörün çıkışındaki ışık demetinin yönlendirilmesi için düzlem ve parabolik aynalar kullanılmaktadır. Numune, parabolik aynanın odağına yerleştirilmiştir. Işık demeti, gerektiğinde optik kesici yardımıyla kare dalga şeklinde

modüle edilmektedir. Modülasyon frekansı, alternatif akım frekansının hiçbir harmoniğine eşit olmayacak şekilde seçilmiştir. Optik deney düzeneğinin çalışır haldeki görünümü Şekil 3.10’da verilmektedir.



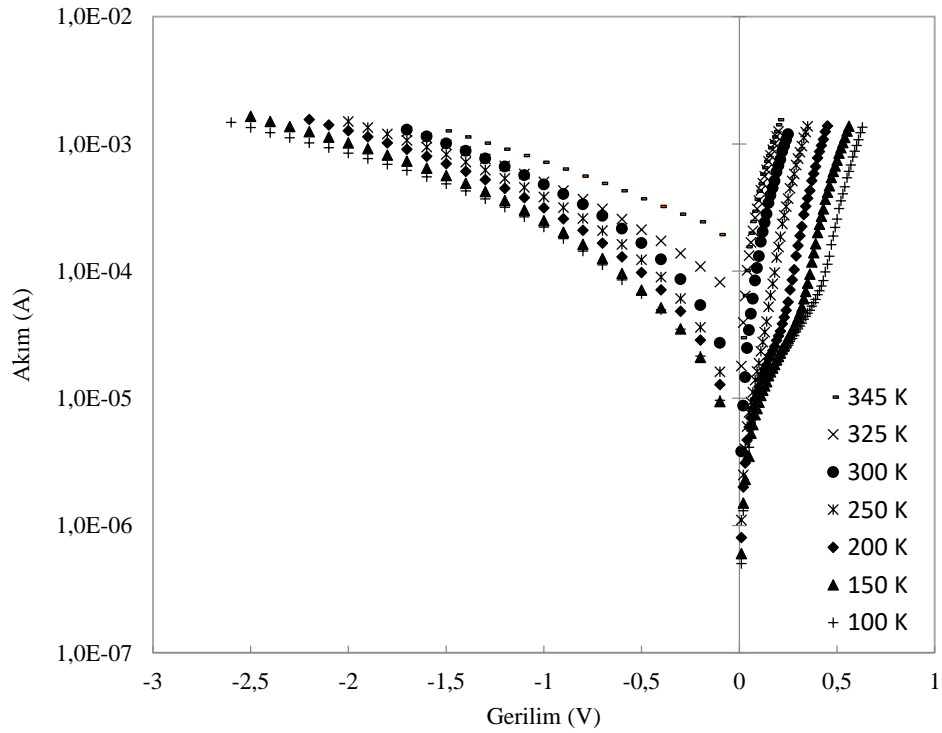
Şekil 3.10. Optik deney düzeneği

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, aktif bölge çapı 1 mm olan p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb, aktif bölge çapı 1 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb ve aktif bölge çapı 2 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotların elektriksel ve optik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n ve n-n-p ile 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p yapıların akım – gerilim (I – V) karakteristikleri elde edilerek karşılaştırması yapıldıktan sonra 2 mm çaplı n-n-p TPV diyotun elektriksel özellikleri I – V ve C – V ölçümleri ile daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Devamında, yapıların optik özellikleri incelenerek TPV uygulamalar için yapının uygunluğu araştırılmıştır.

4.1. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV Diyotların Akım-Gerilim Karakteristikleri

Tez çalışmasında kullanılan TPV diyotların I – V karakteristiklerinin incelenebilmesi için Şekil 3.7’de gösterilen deney düzeneğinden faydalanılmıştır.



Şekil 4.1. 1 mm aktif bölge çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri

Şekil 4.1’de aktif bölge çapı 1 mm olan p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun 100 – 345 K sıcaklık aralığında elde edilmiş olan karanlık I – V karakteristikleri verilmiştir. Yapının, bahsedilen sıcaklık aralığında doğrultucu özellik gösterdiği açıkça anlaşılmaktadır. Bu yapılarda difüzyon, üretim – yeniden birleşme ya da tünelleme gibi akım mekanizmaları baskın olabilir.

İdeallik faktörü (n) diyotlar için önemli parametrelerden biridir. İdeal bir diyot için 1’e eşit olmakla birlikte, tipik ticari diyotlar için bu değer 1.1 – 1.2 aralığında bulunmaktadır. I – V karakteristiği,

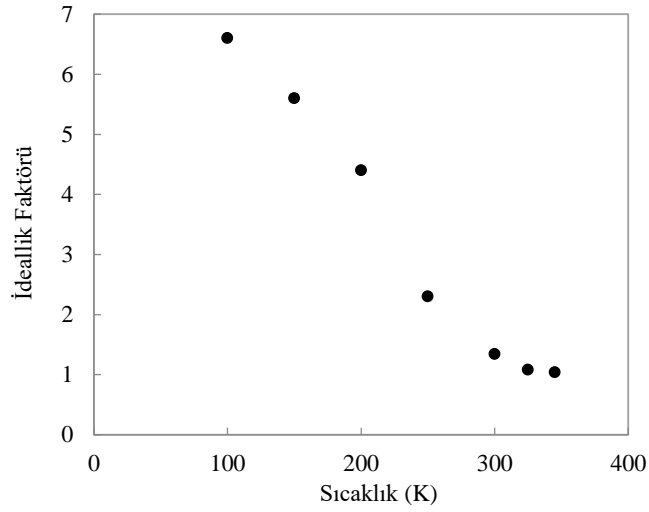
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilir (Sze 1981). İdeallik faktörü, $\ln(I) - V$ grafiğinden elde edilen eğrinin doğrusal bölgesinin eğiminden faydalanılarak

$$n = \frac{e}{kT} \frac{(V_2 - V_1)}{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} \quad (4.2)$$

formülü yardımıyla elde edilir. n değerinin 1’e eşit olduğu ideal durumda akımın difüzyon akımı ile sınırlı olduğu söylenebilir. Ancak, ideal olmayan cihazlar için kusurların varlığı n değerinin 2 civarında olmasına neden olur. Bu durumda da baskın akım mekanizması rekombinasyon akımıdır. Eğer ideallik faktörü değeri 2’den de büyükse tünelleme akımının devreye girdiğinden bahsedilebilir (Mikhailova ve ark. 2002).

Şekil 4.2’de 1 mm aktif bölge çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri verilmiştir.

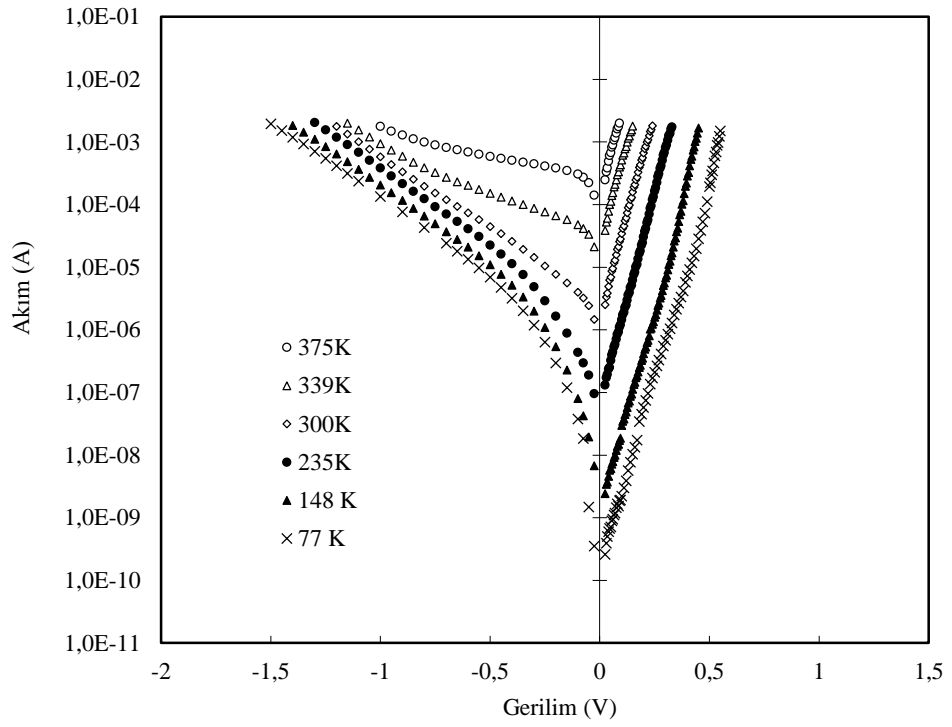


Şekil 4.2. 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n diyotun sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri

İdeallik faktörü değerleri hata hesapları ile birlikte $T = 345 K$ için $n = 1.04 \pm 0.05$, $T = 325 K$ için $n = 1.08 \pm 0.05$, $T = 300 K$ için $n = 1.34 \pm 0.06$, $T = 250 K$ için $n = 2.30 \pm 0.11$, $T = 200 K$ için $n = 4.42 \pm 0.09$, $T = 150 K$ için $n = 5.63 \pm 0.19$ ve $T = 100 K$ için $n = 6.65 \pm 0.32$ olarak elde edilmiştir.

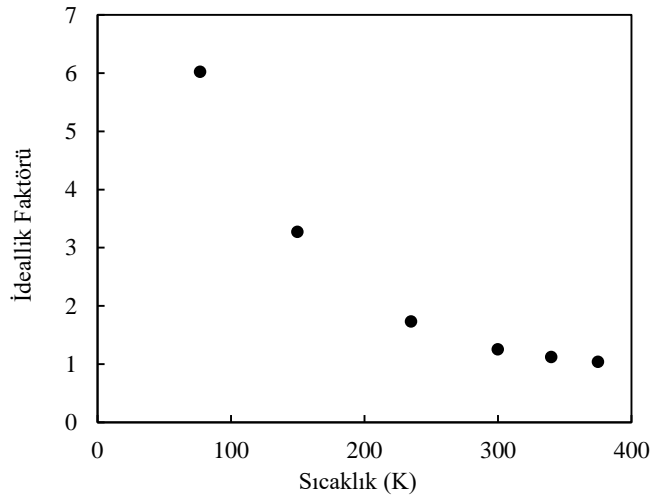
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki verilere göre iletim yönü için 345 – 300 K sıcaklık aralığında elde edilen ideallik faktörü değerlerinin yaklaşık 1 olması, yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığı bölgelerinde difüzyon akımının baskın olduğunu, 250 K sıcaklığı civarında elde edilen ideallik faktörü değerinin yaklaşık 2 olması ise, bu sıcaklık bölgesinde rekombinasyon akımının baskın olduğunu göstermektedir. 250 K'den düşük sıcaklıklarda ise akıma en büyük katkının tünel akımından geldiği söylenebilir. Bunu, akımın sıcaklığa bağımlılığının azalmasından ve ideallik faktörü değerlerinin 2'nin oldukça üzerine çıkmasından anlamaktayız.

Aktif bölge çapı 1 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapının 77 – 375 K sıcaklık aralığında elde edilmiş olan karanlık I – V karakteristikleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. 1 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri (Afrailov ve ark. 2010)

Bu yapının da yukarıda gösterilmiş olan p-p-n TPV diyotta olduğu gibi bahsedilen sıcaklık aralığında doğrultucu özellik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.4. n-n-p anizotip yapının sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri (Afrailov ve ark. 2010)

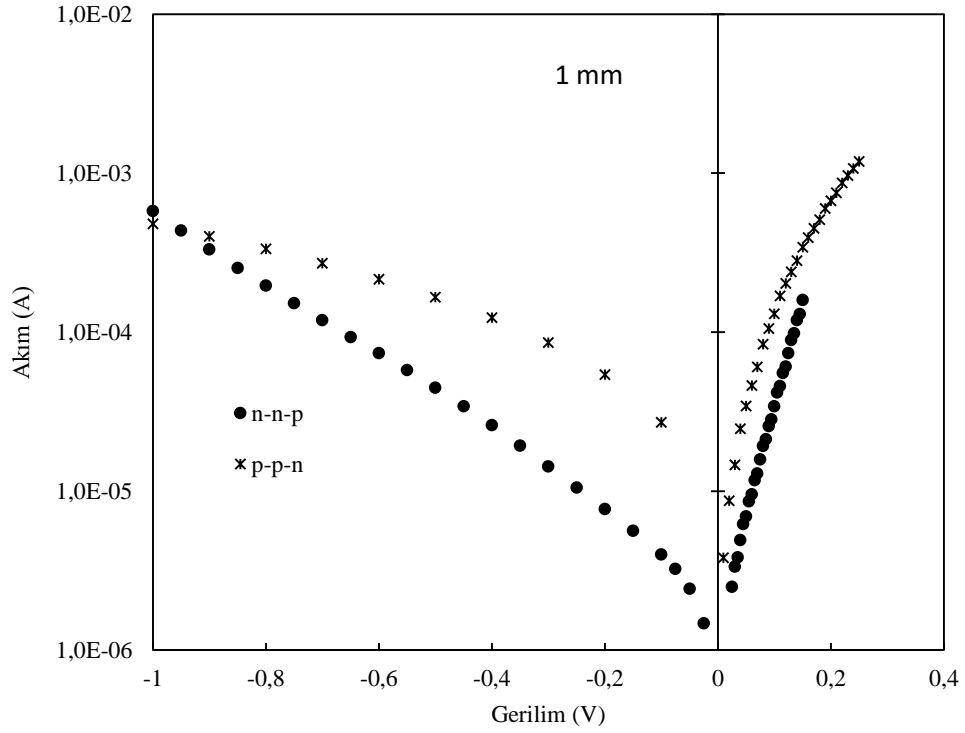
1 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için ideallik faktörü değerleri hata hesapları ile birlikte $T = 375\text{ K}$ için $n = 1.04 \pm 0.07$, $T = 339\text{ K}$ için $n = 1.12 \pm 0.07$, $T = 300\text{ K}$ için $n = 1.25 \pm 0.09$, $T = 235\text{ K}$ için $n = 1.73 \pm 0.12$, $T = 148\text{ K}$ için $n = 3.27 \pm 0.22$ ve $T = 77\text{ K}$ için $n = 6.02 \pm 0.26$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.4).

p-p-n yapısı için ulaşılan sonuçlara benzer şekilde, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki verilerden faydalanarak n-n-p TPV diyot için iletim yönünde $375 - 300\text{ K}$ sıcaklık aralığında elde edilen ideallik faktörü değerlerinin yaklaşık 1 olması, yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığı bölgelerinde difüzyon akımının baskın olduğunu, 235 K sıcaklığında elde edilen ideallik faktörü değerinin yaklaşık 2 olması ise, bu sıcaklık bölgesinde rekombinasyon akımının baskın olduğunu göstermektedir. 235 K 'den düşük sıcaklıklarda ise akıma en büyük katkının tünel akımından geldiği söylenebilir. Bunu, akımın sıcaklığa bağımlılığının azalmasından ve ideallik faktörü değerlerinin 2'nin oldukça üzerine çıkmasından anlamaktayız.

Karanlık akım, herhangi bir ışık etkisi mevcut değilken fotodetektör üzerinden akan toplam akım olarak tanımlanmaktadır. Fotoakımın detekte edilebilmesi için aşması gereken temel akım seviyesini belirlediğinden dolayı karanlık akım fotodetektör karakterizasyonu için en önemli parametrelerden biridir.

Karanlık akım akışının çeşitli sebepleri vardır. Bu sebepler içerisinde en önemlisi termiyonik emisyon olarak görülmektedir. Termiyonik emisyon detektör sıcaklığına bağlı olan bir olaydır. Dolayısıyla, fotodiyotlar düşük sıcaklıklarda çalıştırılarak karanlık akımın daha küçük değerlere indirilmesi mümkündür. Kısaca, karanlık akım cihazın mümkün olan en yüksek çalışma sıcaklığını belirlediğinden dolayı infrared detektörler için genellikle sınırlayıcı bir faktördür (Krier 2006).

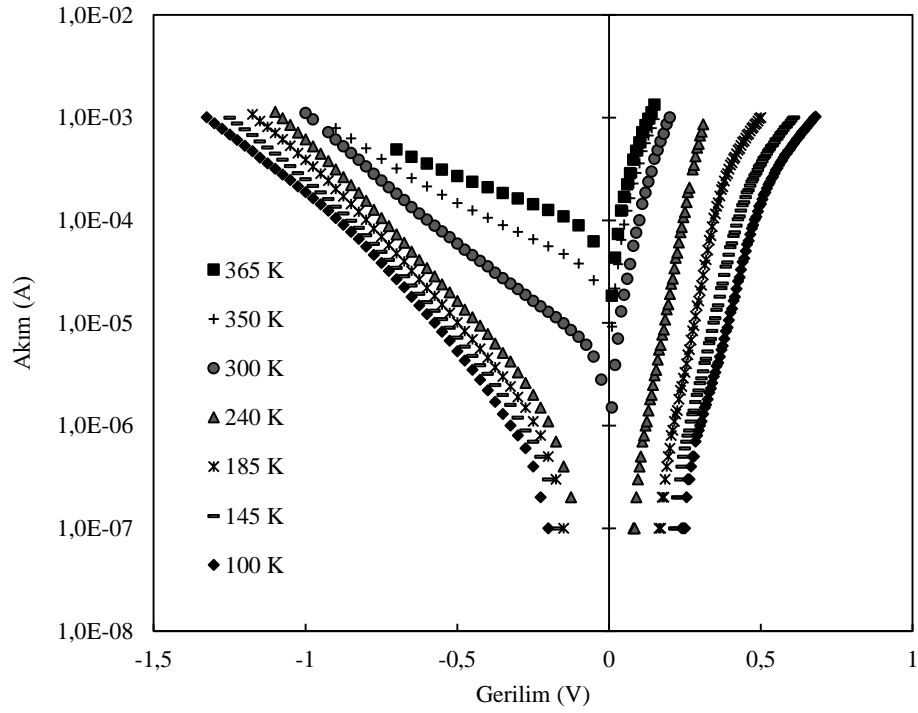
Şekil 4.5 eşit aktif yüzey alanına sahip p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyot ile n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun 300 K sıcaklığında iletim ve ters besleme durumları için karanlık $I - V$ karakteristiklerini göstermektedir. Diyot performansı için karanlık akım değerinin mümkün olduğunca düşük olması önemlidir.



Şekil 4.5. 1 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyot ile p-p-n TPV diyotun karanlık akım karşılaştırması

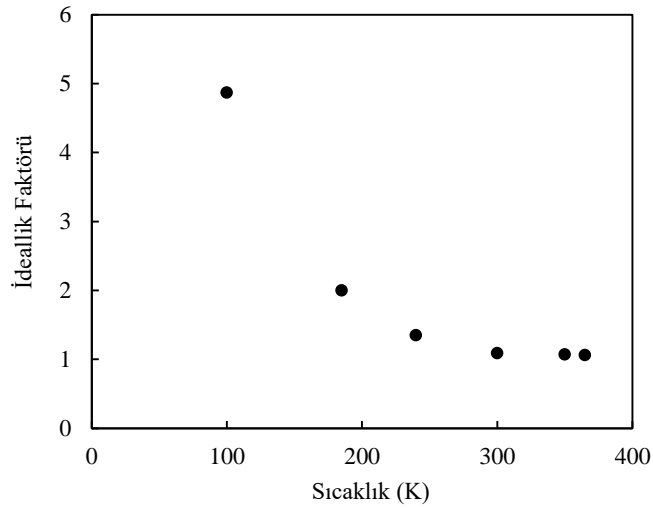
Şekil 4.5'deki verilere göre tez çalışması kapsamında incelemekte olduğumuz örnekler arasından, aynı yöntemlerle üretilmiş olan n-n-p tipi numunenin p-p-n tipi numuneye göre hem iletim hem de ters besleme yönünde daha düşük karanlık akım değerlerine sahip olduğundan dolayı tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, üretilen n-n-p anizotip heteroyapının heterogeçit bölgesinde oluşan kusurların diğer yapıya göre daha az olmasıdır.

Şekil 4.6'da aktif bölge çapı 2 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapının 100 – 365 K sıcaklık aralığında elde edilmiş olan karanlık I – V karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.6. 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun farklı sıcaklıklarda I – V karakteristikleri

Bu yapı da yukarıda incelenmiş olan 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n ve n-n-p TPV diyotlarda olduğu gibi bahsedilen sıcaklık aralığında doğrultucu özellik göstermektedir.



Şekil 4.7. 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun sıcaklığa bağlı ideallik faktörü değerleri

2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için ideallik faktörü değerleri hata hesapları ile birlikte $T = 365\text{ K}$ için $n = 1.06 \pm 0.08$, $T = 350\text{ K}$ için $n = 1.07 \pm 0.05$, $T = 300\text{ K}$ için $n = 1.09 \pm 0.05$, $T = 240\text{ K}$ için $n = 1.35 \pm 0.08$, $T = 185\text{ K}$ için $n = 2.00 \pm 0.06$ ve $T = 100\text{ K}$ için $n = 4.87 \pm 0.14$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.7).

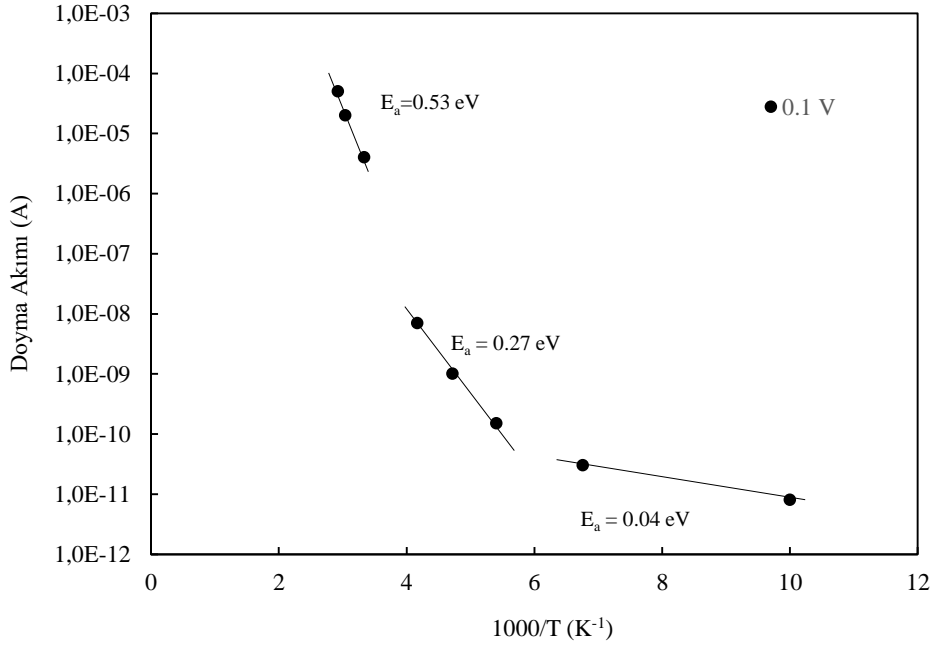
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'deki verilerden faydalanarak 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyot için iletim yönünde 365 – 300 K sıcaklık aralığında elde edilen ideallik faktörü değerlerinin yaklaşık 1 olması, yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığı bölgelerinde difüzyon akımının baskın olduğunu, 240 – 185 K sıcaklığında elde edilen ideallik faktörü değerinin yaklaşık 2 olması ise, bu sıcaklık bölgesinde rekombinasyon akımının baskın olduğunu göstermektedir. 185 K'den düşük sıcaklıklarda ise akıma en büyük katkının tünel akımından geldiği söylenebilir. Bunu, akımın sıcaklığa bağımlılığının azalmasından ve ideallik faktörü değerlerinin 2'nin oldukça üzerine çıkmasından anlamaktayız.

İletim yönü baskın akım mekanizmalarının incelenmesi için sıcaklığa bağlı doyma akımı (I_0) karakteristiği de faydalı olmaktadır. Şekil 4.8 iletim yönü I – V eğrilerinin I eksenine ekstrapole edilmesi ile elde edilen I_0 değerlerinin sıcaklığa göre değişimini göstermektedir.

İletim yönündeki doyma akımının sıcaklığa göre değişiminden herhangi iki sıcaklık değeri için aktivasyon enerjisini,

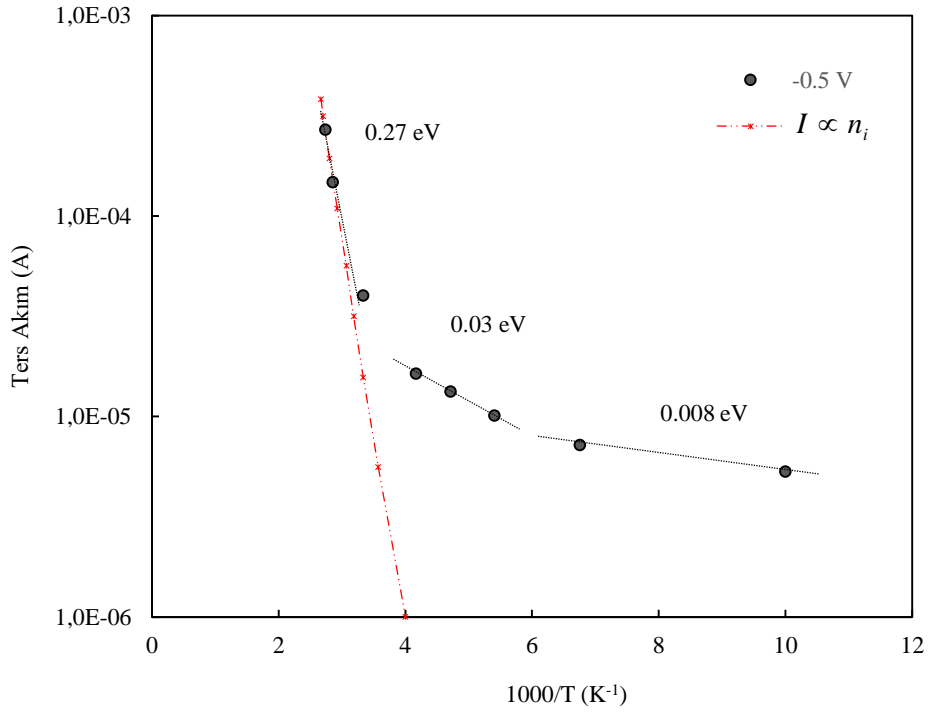
$$E_a = \frac{k \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (4.3)$$

ifadesi ile hesaplamak mümkündür (Sze 1981). Aktivasyon enerjisini eV biriminde elde etmek için, k Boltzmann sabiti $8.62 \cdot 10^{-5}\text{ eV / K}$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.8. 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun I – V karakteristiklerinin I eksenine extrapole edilmesi ile elde edilen doyma akımının sıcaklığa bağlı değişimi

Yüksek sıcaklık bölgesinin eğiminden faydalanılarak aktivasyon enerjisi değeri $E_a = 0.53 \text{ eV}$ olarak elde edilmiştir. Bu değer dar bantlı GaInAsSb'nin yasak bant değerine oldukça yakındır. Bu durum da, yüksek sıcaklık bölgesi için baskın akım mekanizmasının difüzyon akımı olduğunun bir diğer göstergesidir. Benzer şekilde 240 – 185 K sıcaklık aralığında aktivasyon enerjisi $E_a = 0.27 \text{ eV}$ değerine sahiptir. Bu değer GaInAsSb'nin yasak bant genişliğinin yaklaşık olarak yarısına yakındır. Bu durum da bu bölge için baskın akım mekanizmasının rekombinasyon akımı olduğunu ifade eden bir sonuçtur. Düşük sıcaklık bölgesinde ise $E_a = 0.04 \text{ eV}$ değeri, yüksek ideallik faktörü değeri de göz önünde bulundurulduğunda tünel akımın baskın akım mekanizması olduğuna işaret etmektedir. İletim yönünde beslenmiş heteroyapılarda tünel akım mekanizmasının nedeni olarak GaSb/GaInAsSb heteroarayüzeyinde bulunan ince bariyer gösterilebilir.



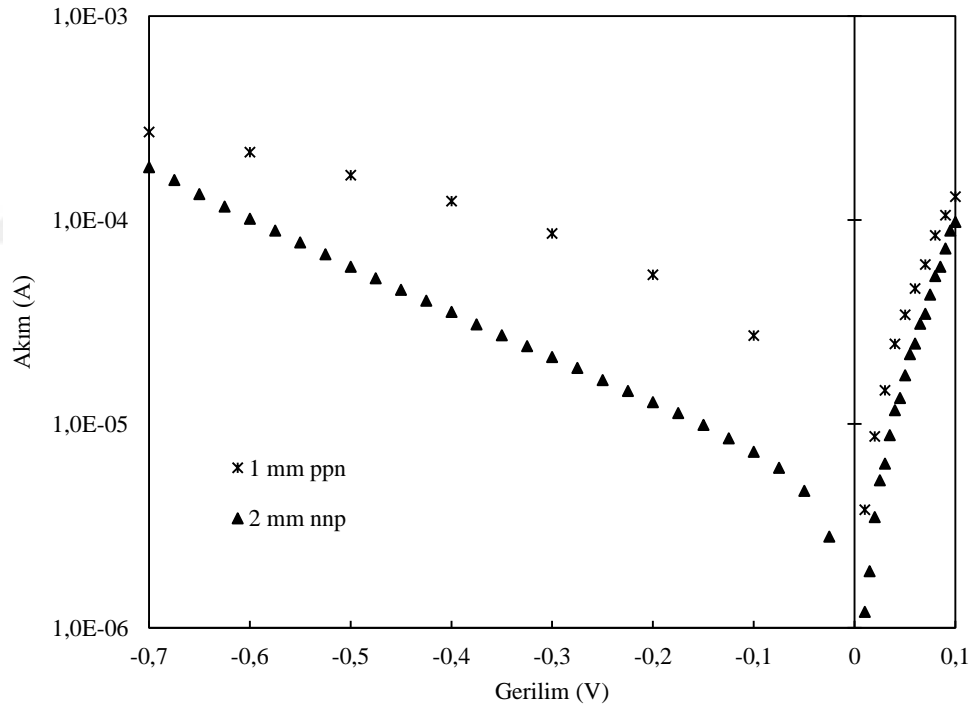
Şekil 4.9. 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için -0,5 V'ta ters yöndeki akımın sıcaklığa göre değişimi

Önceki bölümlerde üretim – yeniden birleşme akımı sıcaklıkla yaklaşık n_i ile doğru orantılı olarak değişirken, difüzyon akımının sıcaklıkla n_i^2 ile doğru orantılı olarak değiştiğinden bahsedilmişti. Şekilde gösterilen kesikli çizgi n_i^α 'nın sıcaklığa bağımlılığını ifade etmektedir. α değerinin 1 olması, baskın akım mekanizmasının üretim ve yeniden birleşme; 2 olması ise difüzyon akımı olduğu anlamına gelir. Şekil 4.9'daki kesikli çizgi yüksek sıcaklık bölgesindeki eğrinin n_i ($n_i \propto E_g / 2kT$) ile uyumlu olduğunu, dolayısıyla bu bölgede üretim ve yeniden birleşme akımının baskın olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, denklem 4.3. kullanılarak yüksek sıcaklık bölgesinde aktivasyon enerjisi $E_a = 0.27$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer GaInAsSb bant aralığının yaklaşık olarak yarısına eşittir ve bahsi geçen bölgede I_{g-r} akımının etkili olduğunun bir diğer göstergesidir. Çünkü, üretim – yeniden birleşme merkezleri yasak bant genişliğinin ortasına yerleştiği zaman yük taşıyıcıların etkin ömürleri birbirine eşit olduğundan I_{g-r}

akımı etkili olmaktadır. Oda sıcaklığından düşük sıcaklıklarda ise ters yönde gerilim uygulandığında GaSb/GaInAsSb heteroarayüzeyindeki bariyerin incilmesi, elektronların GaInAsSb'den tünelleme yoluyla GaSb'ye geçmesini sağlar. Düşük sıcaklıklarda elektronların GaSb/GaInAsSb bariyerini aşması mümkün olmayacağı için tünelleme akımı baskın akım mekanizması olacaktır. Elde ettiğimiz aktivasyon enerjilerinin çok küçük çıkması ve akımın sıcaklığa zayıf bir şekilde bağlı olması bu bölgede tünelleme akımının baskın olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.10'da 1 mm çaplı aktif yüzey alanına sahip p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyot ile 2 mm çaplı aktif yüzey alanına sahip n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun 300 K sıcaklığında iletim ve ters besleme durumları için karanlık I – V karakteristikleri gösterilmiştir.



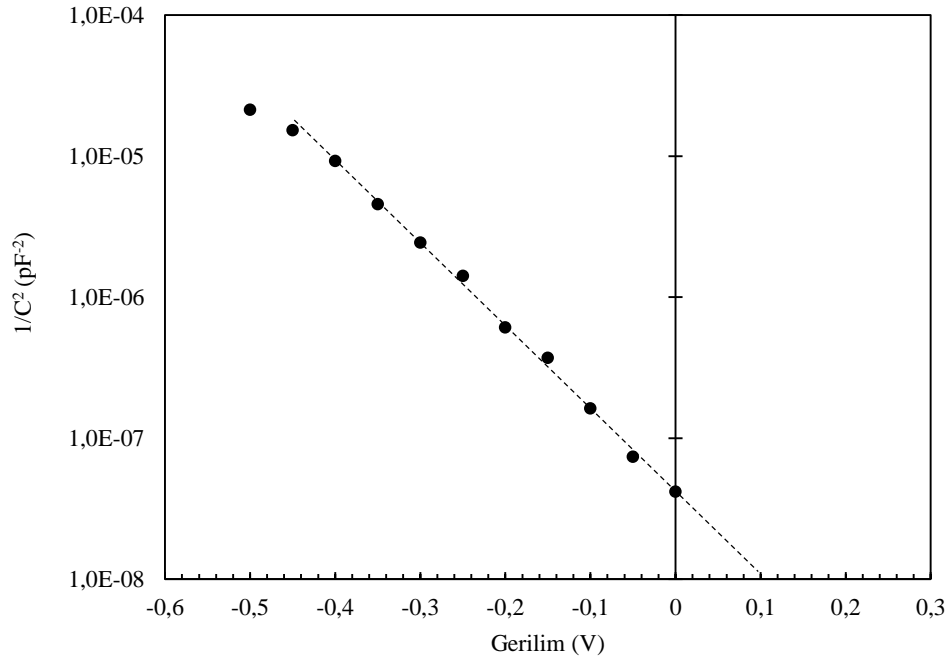
Şekil 4.10. 1 mm aktif bölge çaplı p-p-n TPV diyot ile 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p heteroyapıların karanlık akım karşılaştırması

Şekilden de görülebileceği gibi, kullandığımız örnekler içinden aktif yüzey alanı daha büyük olan n-n-p diyot üzerinden p-p-n diyota göre hem iletim hem de ters besleme yönünde eşit şartlar altında daha az karanlık akım akışı gerçekleşmektedir. Hem daha

düşük karanlık akım değerine sahip olması hem de aktif yüzey alanının daha geniş olması sonraki bölümlerde bahsedilecek olan optik özellikler açısından TPV diyotun performansına olumlu yönde etki edecektir.

4.2. 2 mm Aktif Bölge Çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV Diyotun C – V Karakteristiği

C – V ölçümleri, doğrultucu özelliğe sahip yarıiletken eklemlerin bazı temel özelliklerinin belirlenmesi için kullanılabilir. Temas potansiyeli, derinliğin fonksiyonu olarak katkı yoğunlukları ve tükenim bölgesi genişliği gibi parametreler C – V ölçümlerinin sonuçları kullanılarak elde edilir.



Şekil 4.11. 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun C – V karakteristiği (T = 300 K)

n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun C – V karakteristiğini elde etmek için Şekil 3.7’de gösterilmiş olan deney düzeneğinin ilgili kısmı kullanılmıştır. Ölçüm 300 K sıcaklığında ve $f = 100kHz$ frekans değerinde alınmıştır.

Şekil 4.11’deki $C^{-2} - V$ grafiğinin lineer değişimi n-n-p çift heteroyapının keskin heterogeçitlerden oluştuğunu göstermektedir. C – V ölçümlerinde $C^{-2} - V$ ilişkisi

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{A^2} \frac{2(\varepsilon_1 N_{d_1} + \varepsilon_2 N_{d_2})}{e \varepsilon_1 \varepsilon_2 N_{d_1} N_{d_2}} (V_0 - V) \quad (4.4)$$

formülü ile açıklanabilir (Mebarki ve ark. 1993). Burada A diyot alanı, ε_1 ve ε_2 , sırasıyla GaInAsSb ve GaSb'nin dielektrik sabitleri; N_{d_1} ve N_{d_2} ise bunların net katkı konsantrasyonlarıdır.

$C^{-2} - V$ grafiğinde lineer bölgenin eğimi, dar bantlı GaInAsSb tabakasının yük taşıyıcı konsantrasyonunu vermektedir (Sze 1981). İncelenen yapı için bu değer $N_{d_1} = 2,23 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Yine aynı grafikteki eğrinin V eksenini kestiği nokta yaklaşık 0.1 eV olarak elde edilmiştir. Bu da bize ΔE_V valans bant kırılmasının değerini vermektedir. ΔE_V değeri kullanılarak II. tip basamak yapıli heteroeklem özelliği gösteren n-n-p heteroyapının ΔE_C iletkenlik bandı kırılması

$$\Delta E_C = E_g(\text{GaSb}) - E_g(\text{GaInAsSb}) + \Delta E_V \quad (4.5)$$

formülü ile hesaplanabilir. Oda sıcaklığında $E_g(\text{GaSb}) = 0.73 \text{ eV}$ ve $E_g(\text{GaInAsSb}) = 0.53 \text{ eV}$ olduğundan ΔE_C , benzer heteroyapılar için Afrailov ve ark. (1997) tarafından farklı bir yöntemle elde edilmiş olan 0.3 eV değeri ile oldukça uyumlu olarak elde edilmiştir.

4.3. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV Diyotların Optik Özellikleri

4.3.1. Fotoakım – gerilim karakteristikleri

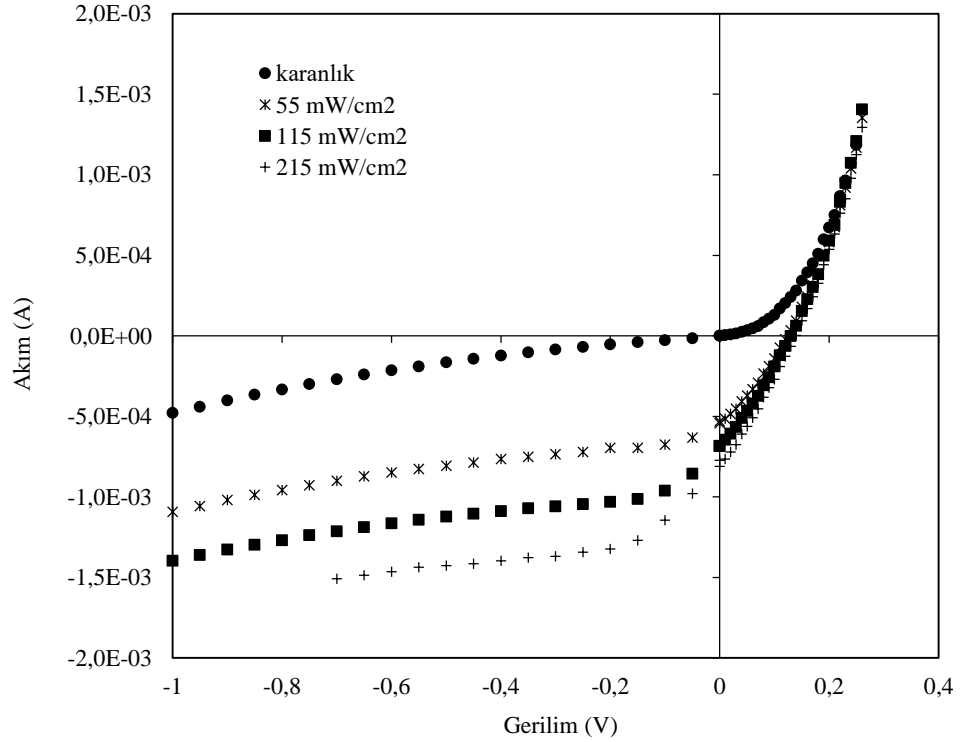
Tez çalışmasında kullanılan TPV diyotların optik özelliklerinin incelenebilmesi için Şekil 3.8'de gösterilen deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Fotoakım – gerilim karakteristikleri için 250 W quartz halojen tungsten ışık kaynağı kullanılmıştır. Thorlabs FES1000 infrared filte sayesinde diyota gelen ışığın dalgaboyu aralığı sınırlandırılarak dönüşüm için faydalı olmayan kısmın diyota ulaşması engellenmiştir. Farklı ışık yoğunlukları kaynağın diyota olan uzaklığı değiştirilerek elde edilmiştir. Bu noktadaki ışık yoğunluğu değerleri DET36A Si Biased Detektör ve DET10D InGaAs Biased Detektör'ün ürün kataloglarındaki duyarlılık verilerinden faydalanılarak

$$R(A/W) = \frac{I_{ph}(A)}{P_0(W)} = \frac{I_{ph}(A)}{I(W/cm^2) \cdot A(cm^2)} \quad (4.6)$$

formülü yardımıyla hesaplanmıştır. Burada R kullanılan detektör için duyarlılık değeri, I_{ph} ölçüm yapılan noktada numune üzerinde gözlenen fotoakım, I infrared radyasyon şiddetinin yoğunluğu ve A aktif bölge alanıdır.

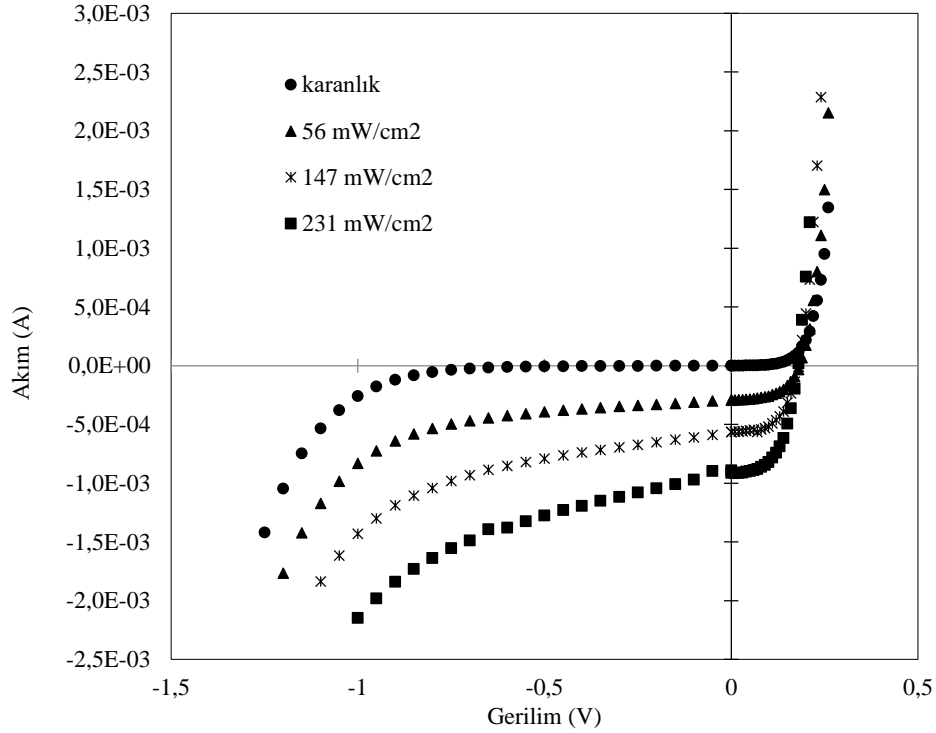
Numuneye ulaşan ışık yoğunluğu değerlerinin doğruluğundan emin olmak için ölçümler Thorlabs S401C yüksek duyarlılığa sahip termal güç sensörü ve Thorlabs PM100D Dijital Optik Güç ve Enerji Ölçer ile tekrar edilmiştir. Sensör ile numune arasındaki aktif yüzey alanı farklılıkları da göz önünde bulundurularak ışık yoğunluğu değerleri hesaplanmış ve daha önce elde edilen veriler ile uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Aktif bölge çapı 1 mm olan p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve 55 mW/cm^2 , 115 mW/cm^2 ve 215 mW/cm^2 ışık yoğunluklarının etkisi altında iken göstermiş olduğu I – V karakteristiği Şekil 4.12’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapının ışık duyarlılığı oldukça kuvvetlidir.



Şekil 4.12. 1 mm aktif bölge çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği ($T = 300 \text{ K}$)

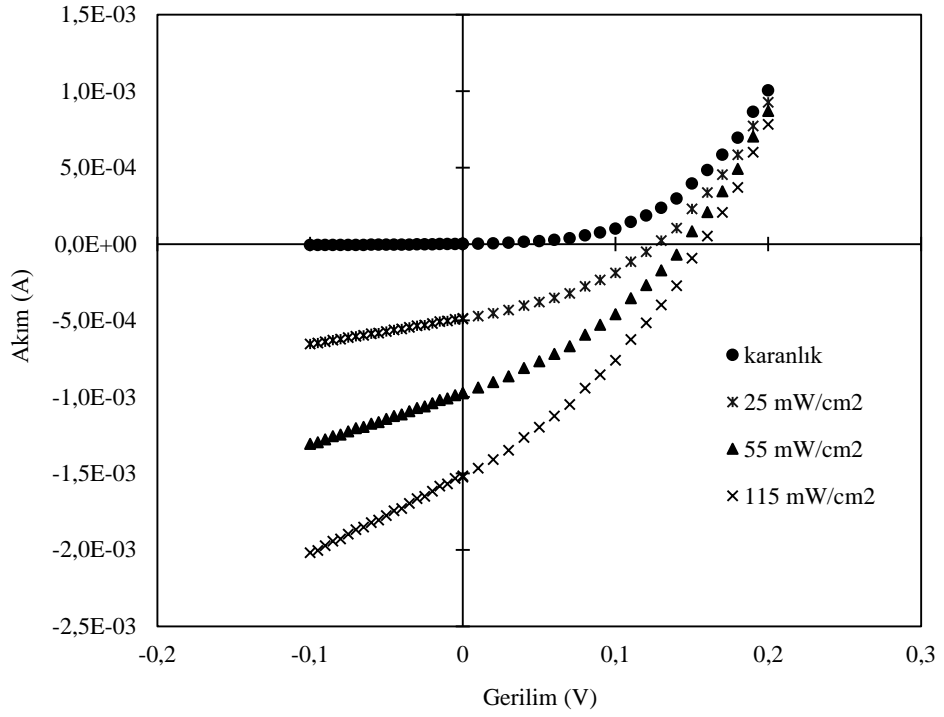
Şekil 4.13'te aktif bölge çapı 1 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapının karanlıkta ve numune üzerine düşen 55 mW/cm^2 , 145 mW/cm^2 ve 230 mW/cm^2 ışık şiddetlerinin etkisi altında I – V karakteristiği verilmiştir.



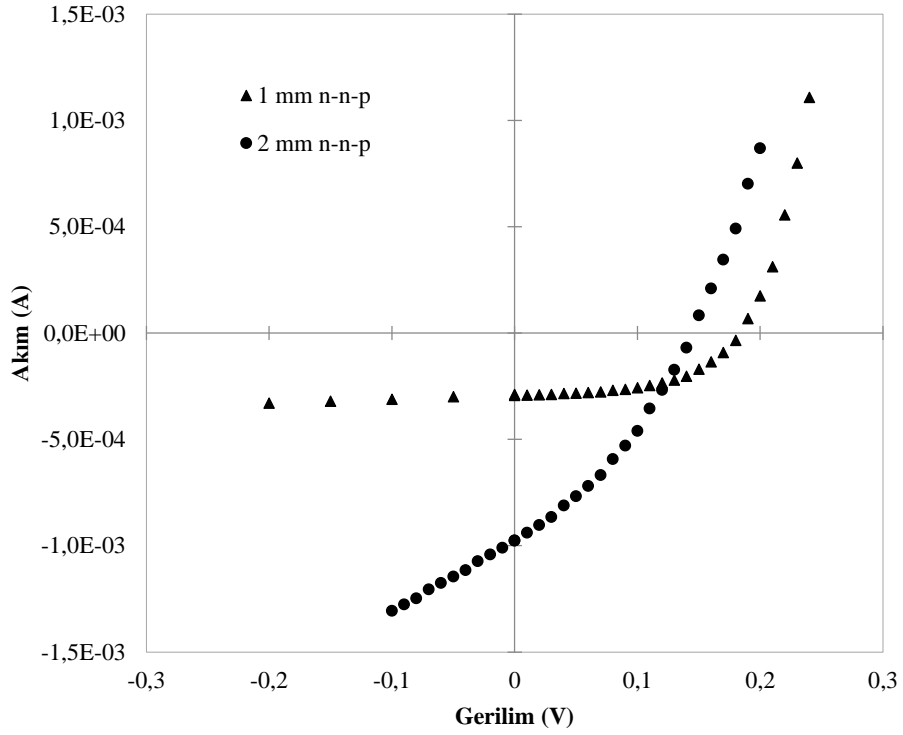
Şekil 4.13. 1 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği ($T = 300 \text{ K}$)

Şekil 4.12 ve 4.13 hem 1 mm çaplı p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb yapının hem de 1 mm çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb yapının aydınlatmaya karşı oldukça duyarlı olduklarını göstermektedir. Bu da, bahsi geçen yapıların optoelektronik cihaz uygulamalarında tercih edilebilir yapılar olarak kabul edilmesini sağlar.

Aktif bölge çapı 2 mm olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapının karanlıkta ve 25 mW/cm^2 , 55 mW/cm^2 ve 115 mW/cm^2 ışık yoğunluklarının etkisi altında iken göstermiş olduğu I – V karakteristiği Şekil 4.14'te görülmektedir.

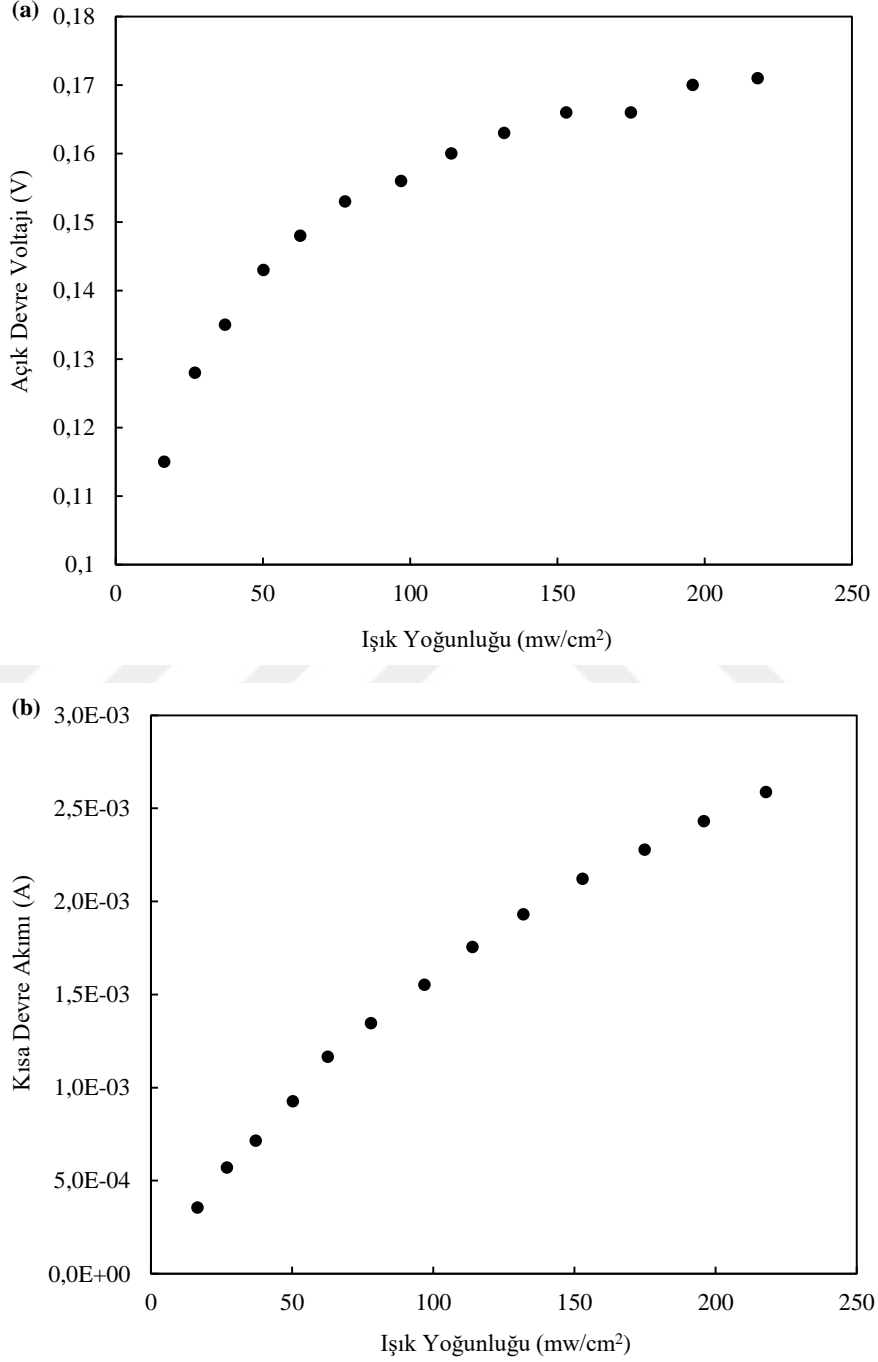


Şekil 4.14. 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun karanlıkta ve farklı ışık yoğunlukları etkisi altında I – V karakteristiği ($T = 300\text{ K}$)



Şekil 4.15. Sabit ışık yoğunluğunda 1 mm ve 2 mm çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotların I – V karşılaştırması

Şekil 4.15 aynı yapıya ve farklı çap değerlerine sahip numunelerin sabit aydınlatma değeri ($55 \text{ mW} / \text{cm}^2$) altındaki fotoakım karşılaştırması görülmektedir. Beklenildiği üzere aktif bölge çapı arttıkça numunenin ışık duyarlılığında artış elde edilmiştir.



Şekil 4.16. 2 mm aktif bölge çaplı n-n-p TPV diyotun ışık yoğunluğuna bağlı (a) açık devre gerilimi (b) kısa devre akımı

Şekil 4.16 TPV diyot üzerine düşen ışık yoğunluğuna bağlı olarak değişen açık devre gerilimi ve kısa devre akımı grafiklerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi diyot üzerine gelen ışık yoğunluğunun yüksek değerlerinde I_{sc} ve V_{oc} 'nin ışık yoğunluğuna bağlı değişimlerinin lineerlikten saptığı görülmektedir.

I_{sc} 'deki bu sapmanın sebebi olarak aktif bölge seri direnci üzerine düşen voltajın yükselmesi görülmektedir. V_{oc} değerinin ışık yoğunluğu ile artışındaki yavaşlama ise n-GaInAsSb bölgesinde elektronların, p-GaAlAsSb bölgesinde de boşlukların biriktiği GaInAsSb/GaAlAsSb heteroarayüzeyindeki potansiyel bariyeri yüksekliğinin düşüşü ile açıklanabilir. Bunun sonucu olarak, p – n heteroeklemin elektrik alanının foto taşıyıcıları birbirinden ayırma gücü zayıflayacak ve V_{oc} 'nin artışı yavaşlayacaktır (Afrailov 2012).

Şekil 4.16'daki verilerden faydalanarak yapının farklı ışık yoğunluklarının etkisi altında olduğunda I_{sc} değerleri yaklaşık olarak 0.5 – 1.5 mA, V_{oc} değerleri 0.14 – 0.16 V olarak elde edilmiştir. Doldurma faktörü ise 0.32 – 0.34 civarında tespit edilmiştir. Bu değerlerin benzer yapı için Kunitsyna ve ark. (2010) tarafından TPV diyotların seri bağlanması ile aktif yüzey alanı artırılarak elde edilmiş sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Bir fotodiyotun duyarlılığı, belli bir dalgaboyunda detektör üzerine düşen optik güç (P_0) ile üretilen fotoakım (I_{ph}) arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu ilişki Eşitlik (4.6) ile gösterilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 2 mm çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için maksimum duyarlılık değeri $\lambda = 2000 \text{ nm}$ dalgaboyunda $R = 0.98 \text{ A/W}$ olarak elde edilmiştir.

Detektör üzerine düşen tüm fotonlar soğurularak fotoakıma katkı sağlayacak serbest elektron – boşluk çifti oluşturamazlar. Gelen fotonun, serbest elektron – boşluk çifti oluşturma olasılığı kuantum verimi (η) olarak ifade edilir.

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu} \quad (4.7)$$

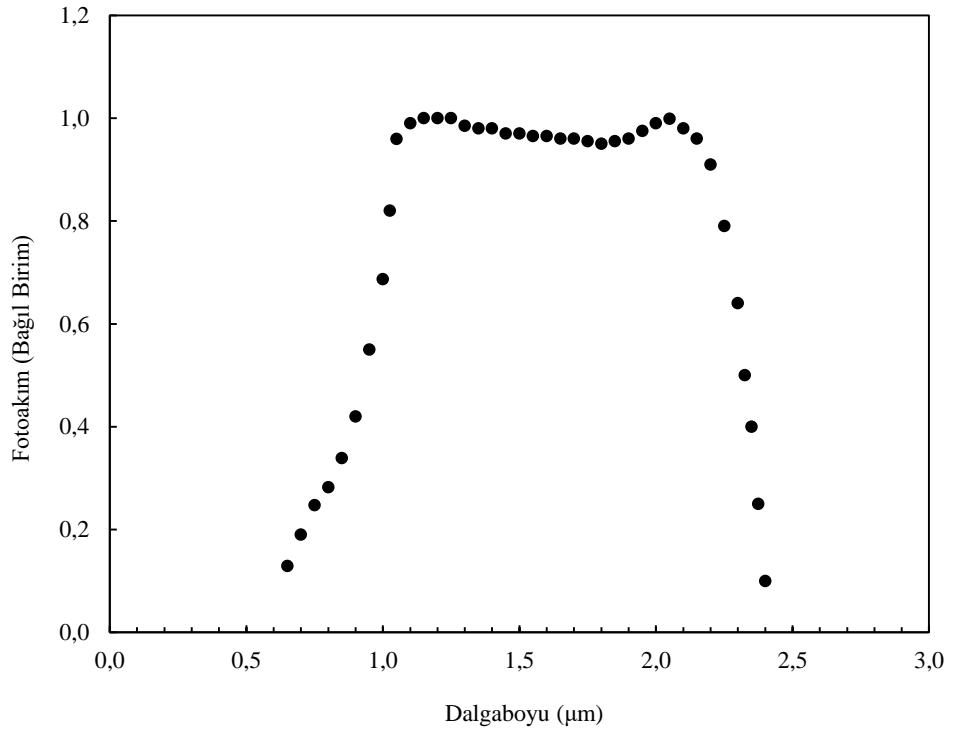
Eşitlik (4.6) göz önünde bulundurularak, duyarlılık ile kuantum verimi arasındaki ilişki

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (4.8)$$

olarak verilebilir (Kasap 2001). İncelenen TPV diyot için kuantum verimi 61% olarak hesaplanmıştır.

4.3.2. GaInAsSb temelli TPV diyotun spektral karakteristiği

Yapının spektral dağılımını incelemek için Şekil 3.7’de gösterilmiş olan optik ölçüm düzeneğinden faydalanılmıştır. Ölçümler için quartz tungsten halojen ışık kaynağı ile bağlantı halinde olan monokromatör kullanılmıştır. Işık kaynağı ile monokromatör arasında ilgilenilen dalgalınlara uygun filtreler yerleştirilmiştir. Monokromatörden çıkan ışığın odaklanarak numuneye yönlendirilmesi için konkav aynalardan faydalanılmıştır.



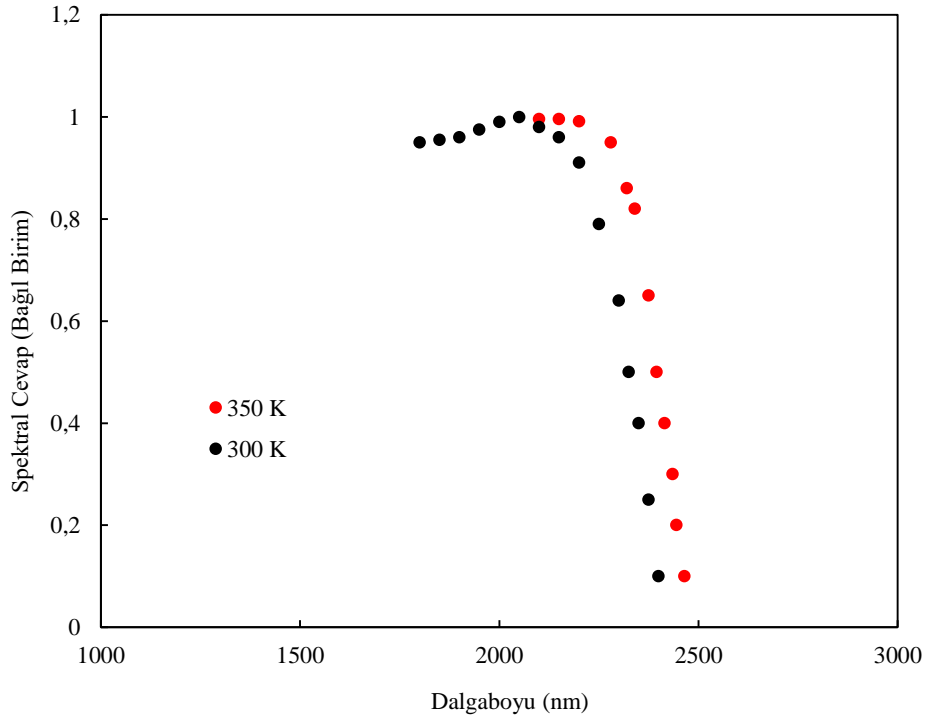
Şekil 4.17. Fotoakımın spektral dağılımı ($T = 300 K$)

Şekil 4.17’de GaInAsSb temelli yapının ışığa duyarlılığının spektral dağılımı görülmektedir. Oda sıcaklığında alınan verilerde yapının uzun dalgaboyu sınırı yaklaşık $2.4 \mu m$ olarak tespit edilmiştir.

$$E_g = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} eV \quad (4.9)$$

Denklem 4.10’den faydalanarak yapının yasak bant genişliği $E_g = 0.52 eV$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değer GaInAsSb için literatürde verilen E_g değeri ile uyum sağladığı gözlenmiştir (Mikhailova 1999).

GaInAsSb epitaksiyel tabakasının yasak bant genişliğinin sıcaklığa göre değişimini belirlemek için, ölçülen fotoduyarlılığın uzun dalgaboyu sınırının iki farklı sıcaklıktaki değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. GaInAsSb temelli TPV diyotun farklı sıcaklıklardaki spektral dağılımı

Teorik olarak, GaSb ile örgü uyumlu $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ alaşımları için yasak bant aralığı $T = 300 K$ için,

$$E_g \cong 0.725x + 0.290(1-x) - 0.6x(1-x) \quad (eV) \quad (4.10)$$

$T = 77 K$ için,

$$E_g \cong 0.801x + 0.354(1-x) - 0.6x(1-x) \quad (eV) \quad (4.11)$$

olarak verilmektedir (Mikhailova 1999).

$Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82}$ için bu değerler sırasıyla 0.526 eV ve 0.600 eV olarak hesaplanmıştır.

Yasak bant aralığının sıcaklıkla değişim katsayısı

$$\sigma(T) = \frac{E_g(300 K) - E_g(77 K)}{\Delta T} \quad (4.12)$$

formülü yardımıyla teorik olarak $\sigma(T) = -3.32 \cdot 10^{-4} \text{ eV} / K$ olarak hesaplanmıştır.

Sıcaklıkla değişim katsayısını deneysel olarak elde etmek için Şekil 4.18'deki spektral duyarlılıkların uzun dalgaboyu sınırının maksimum değerlerinin yarısı göz önüne alınmıştır. Bu değerler 300 K ve 350 K için sırasıyla 2325 nm ve 2400 nm olarak elde edilmiştir. Belirlenen bu dalgaboyu değerlerine karşılık gelen bant genişliği (Sze 1981):

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.13)$$

formülü yardımıyla 300 K için 0.533 eV, 350 K için 0.517 eV olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 4.12 kullanılarak sıcaklıkla değişim katsayısı deneysel olarak $\sigma(T) = -3.20 \cdot 10^{-4} \text{ eV} / K$ elde edilmektedir. Deneysel verinin teorik değere oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Spektral duyarlılıktaki sıcaklığa bağlı dalgaboyunun kayma miktarı (Kasap 2001)

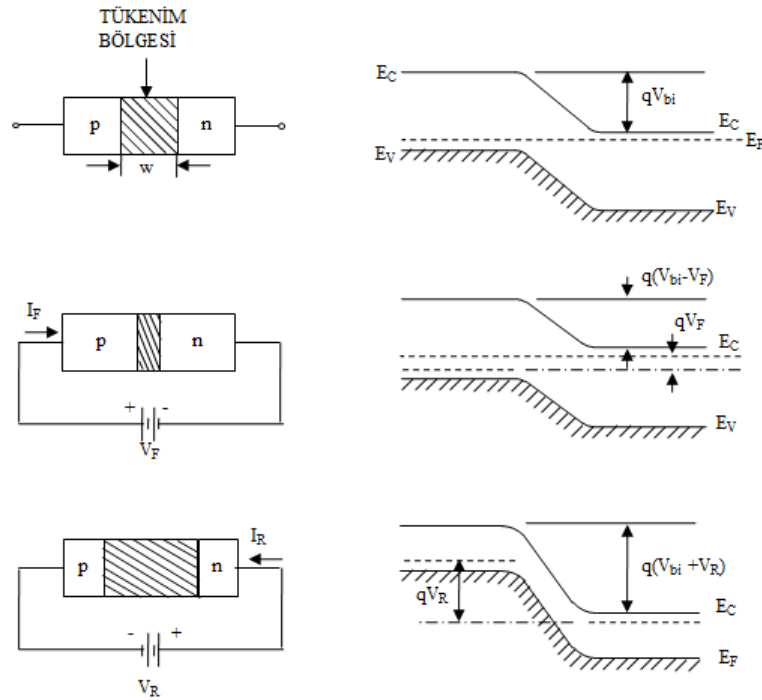
$$\frac{d\lambda}{dT} \approx -\frac{hc}{E_g^2} \left(\frac{dE_g}{dT} \right) \quad (4.14)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Elde edilen deneysel verilerden faydalanarak bu değer $d\lambda / dT = 1.44 \text{ nm} / K$ olarak belirlenmiştir.

4.4. Optik Yöntem ile Temas Potansiyeli Ölçümleri

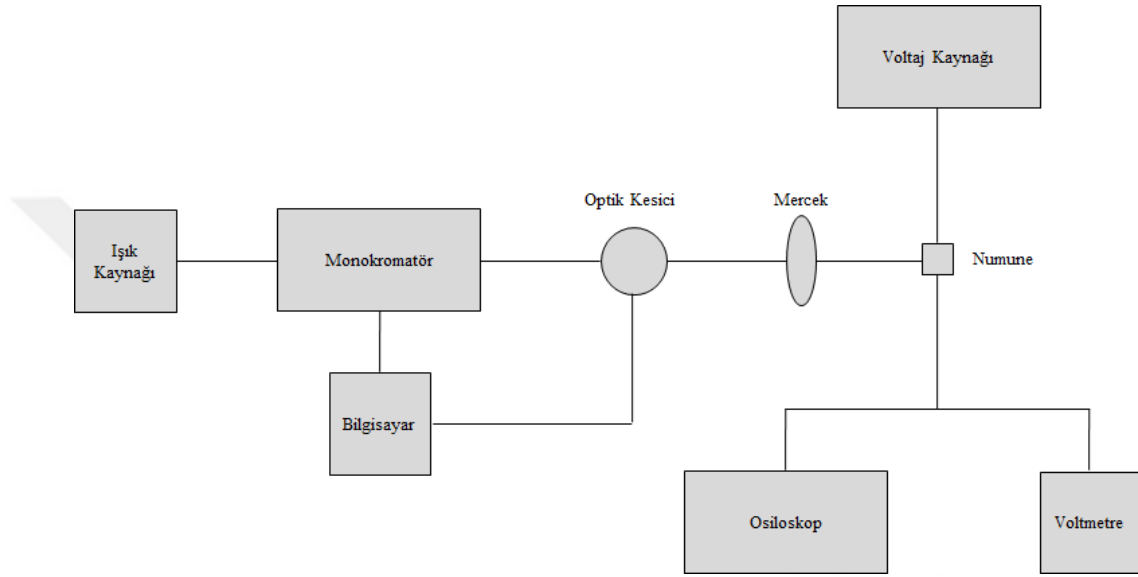
Önceki bölümlerde p – n eklem bant diyagramı oluşumundan bahsedilmişti. n– tipi bölgenin iletkenlik bandındaki elektronlar p– tipi bölgeye doğru, p– tipi bölgenin valans bandındaki boşluklar da n– tipi bölgeye doğru giderken bir potansiyel bariyeri ile karşılaşır. Bu bariyer, yapı potansiyeli (built-in potential) olarak adlandırılır ve V_{bi} olarak gösterilir.

V_{bi} , n– tipi bölgedeki çoğunluk yük taşıyıcı elektronlar ile p– tipi bölgedeki azınlık yük taşıyıcı elektronlar arasında ve benzer şekilde p– tipi bölgedeki çoğunluk yük taşıyıcı boşluklar ile n– tipi bölgedeki azınlık yük taşıyıcı boşluklar arasında dengenin korunmasını sağlar. Hiçbir elektronik cihaz yapı potansiyelinin varlığı olmadan işlev yapamaz. Ancak, eklem üzerindeki bu potansiyel farkının herhangi bir voltmetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bunun sebebi, bağlantı yapıldığında voltmetrenin probları ile yarıiletken arasında yeni potansiyel bariyerlerinin oluşacak olmasıdır (Neamen 2003). Şekil 4.19 bir p – n eklem dengede, iletim yönünde beslenmiş ve ters yönde beslenmiş durumlarda iken bant yapısını göstermektedir.



Şekil 4.19. (a) Dengede (b) İletim yönünde beslenmiş (c) Ters yönde beslenmiş p – n eklem (Sze 2002)

Yapı potansiyeli değerinin ölçülebilmesi için genel olarak I-V ve C-V karakteristiklerinden faydalanılmaktadır. Tez çalışmasında elektriksel ölçüm tekniklerinin yanı sıra, ilk olarak bizim tarafımızdan tasarlanmış olan optik deney düzeneği ile de yapı potansiyeli ölçümünün optik bir yöntem ile gerçekleşmesi sağlanmıştır. Bunun için oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.20’de görülmektedir. Elde edilmiş olan V_{bi} değerleri, literatürde var olan değerler ile örtüşmektedir.



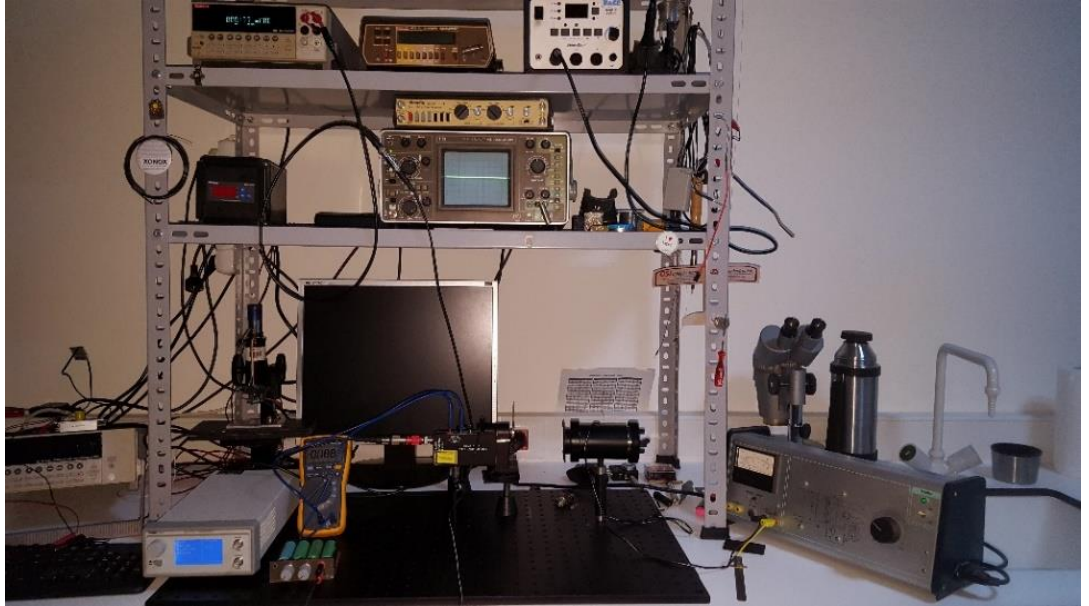
Şekil 4.20. Yapı potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneği şeması

Aydınlatma için 978 nm lazer, 1064 nm lazer ve halojen lamba kullanılmış ve kare dalga işareti elde edebilmek için optik bölücü kullanılmıştır. Bunun sonucunda osiloskop ekranı üzerinde net bir kare dalga sinyali elde edilmiştir. Başlangıçta p – n eklemi ışık ile aydınlattığımızda fotoelektron ve fotoboşlukların oluşturduğu elektrik alan, diyotun iç elektrik alanı ile zıt yönde olduğundan potansiyel engelde bir küçülme gözlenmektedir. p – n ekleme dışarıdan iletim yönünde bir potansiyel uyguladığımızda meydana gelen dış elektrik alan da diyot ışıkla aydınlatıldığında oluşan elektrik alan ile aynı yöndedir. Bundan dolayı, potansiyel engel daha da küçülür. Dışarıdan uyguladığımız gerilim arttıkça potansiyel engel yüksekliğinin değeri sifıra yaklaşır. Yükseklik tam olarak sıfırlandığı zaman fotodiyot üzerinden okunan voltaj değeri ile başlangıçtaki (fotodiyota herhangi bir gerilim uygulanmadan önceki) ışık etkisiyle meydana gelmiş olan küçülme miktarının toplamı potansiyel engel yüksekliği değerini vermektedir.

Yöntemin kullanılabilirliğini test etmek için ölçümler öncelikle temas potansiyeli değeri bilinen ticari diyotlar ile gerçekleştirilmiştir. Ticari diyotlar için optik yöntemden elde edilen değerlerin $I - V$ ve $C - V$ karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar ile uyum sağladığı görülmüştür. Aşağıda Vishay BPV10, Laser Components InGaAs ve Laser Components Germanyum ticari fotodiyotları ile birlikte, üretimi Physical - Technical Research Institute (IOFFE)'de gerçekleştirilmiş olan GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb termofotovoltaik diyotun $I - V$, $C - V$ ve optik ölçümlerinden elde edilen grafikler verilmiştir. Her bir numune için $I - V$ ve $C - V$ ölçümlerinden elde edilen temas potansiyeli değerleri optik ölçümlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılarak sonuçlar arasında uyum olduğu gözlenmiştir.

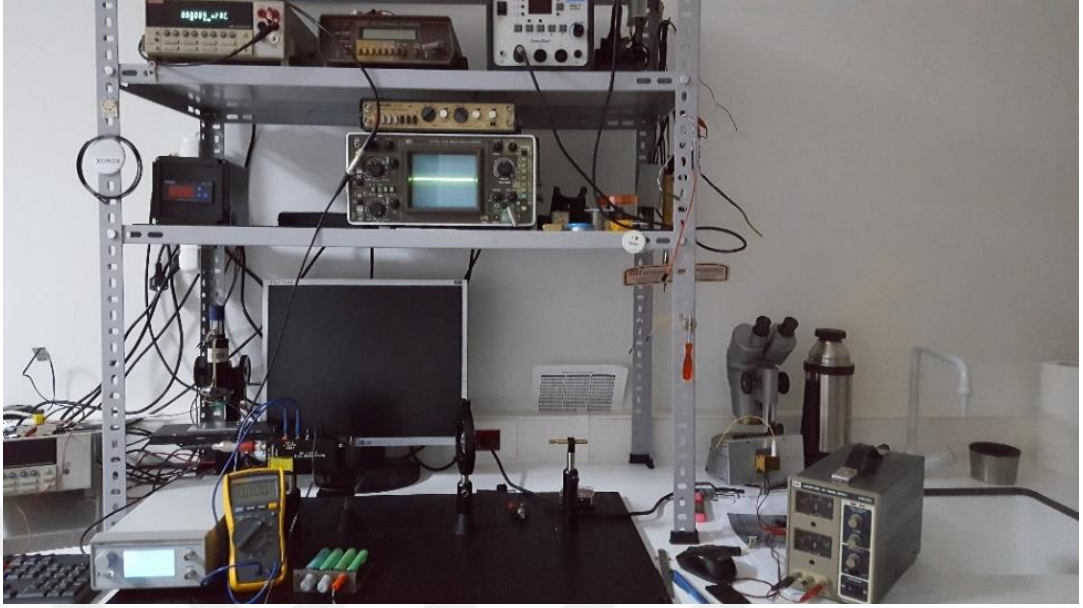
Temas potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneğinin çalışır haldeki görünümü Şekil 4.21'de verilmektedir.

(a)

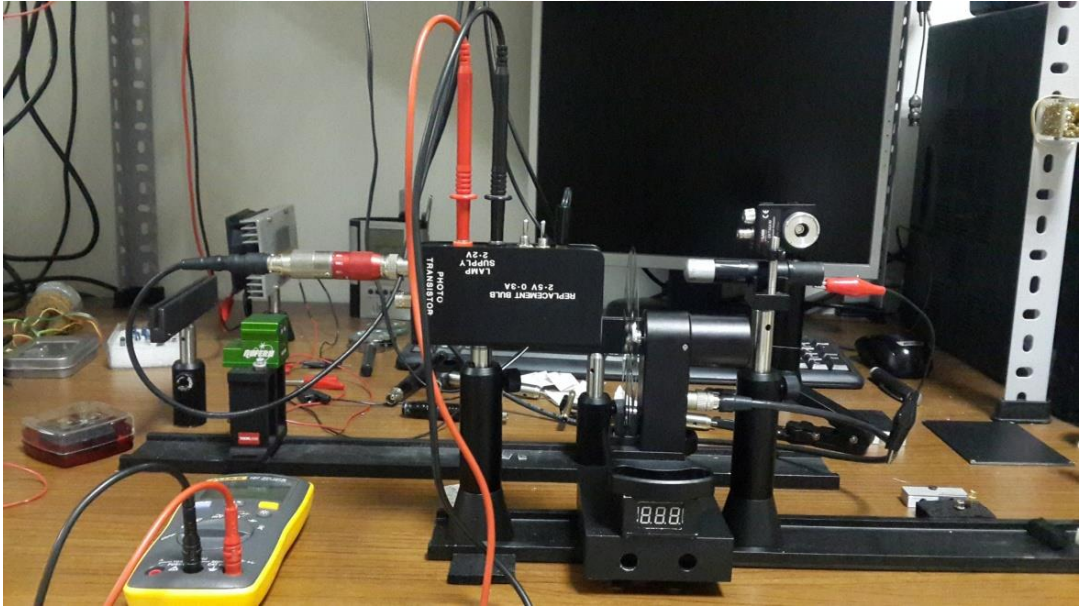


Şekil 4.21 Temas potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneği

(b)

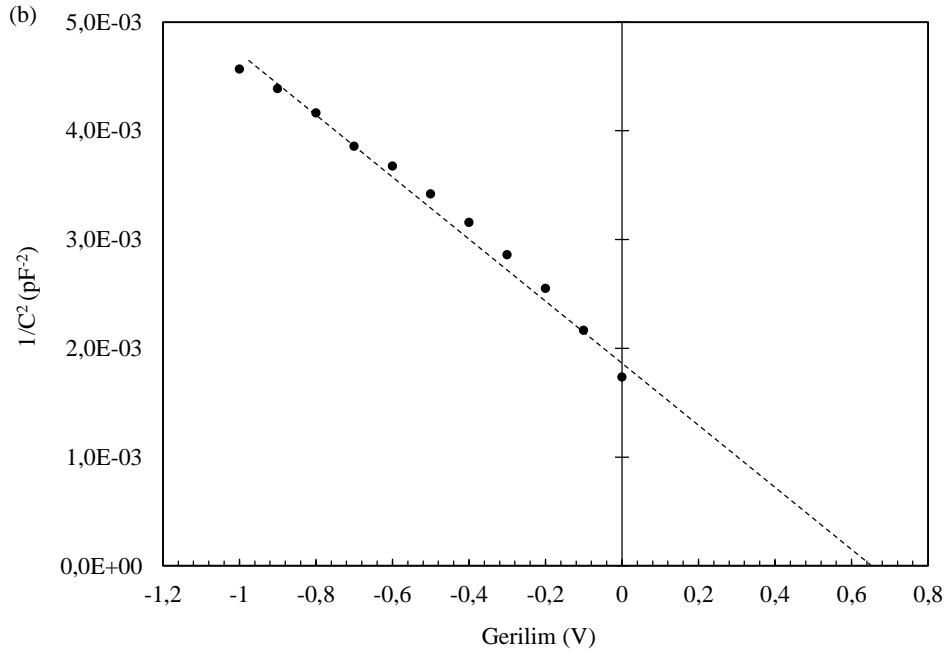
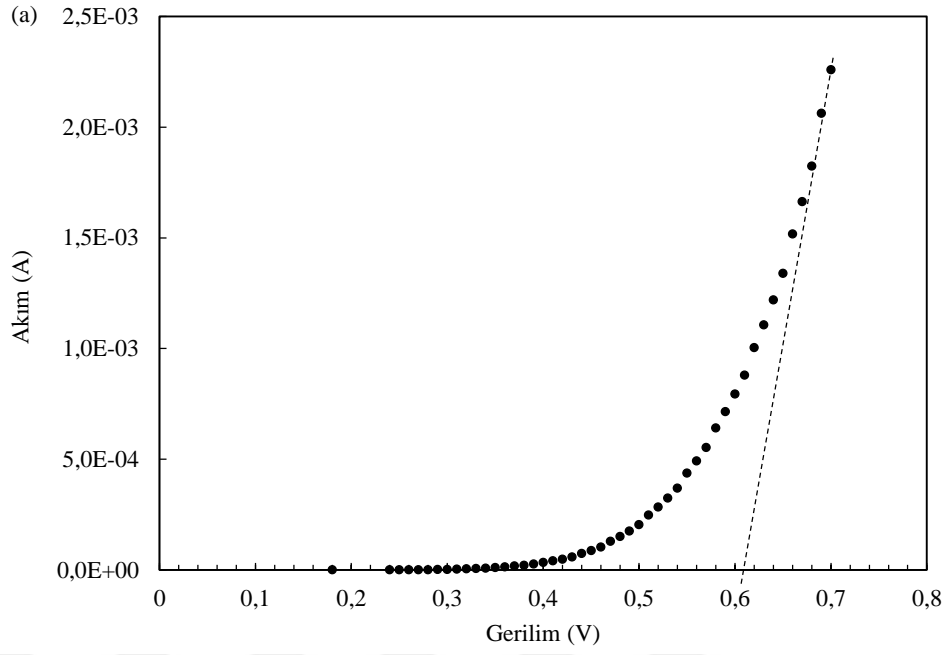


(c)

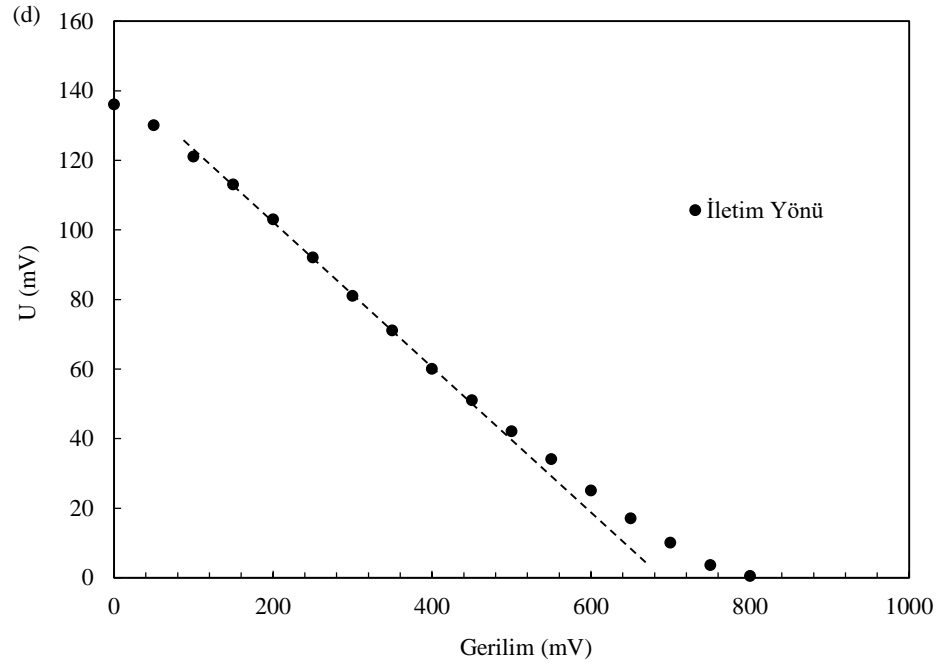
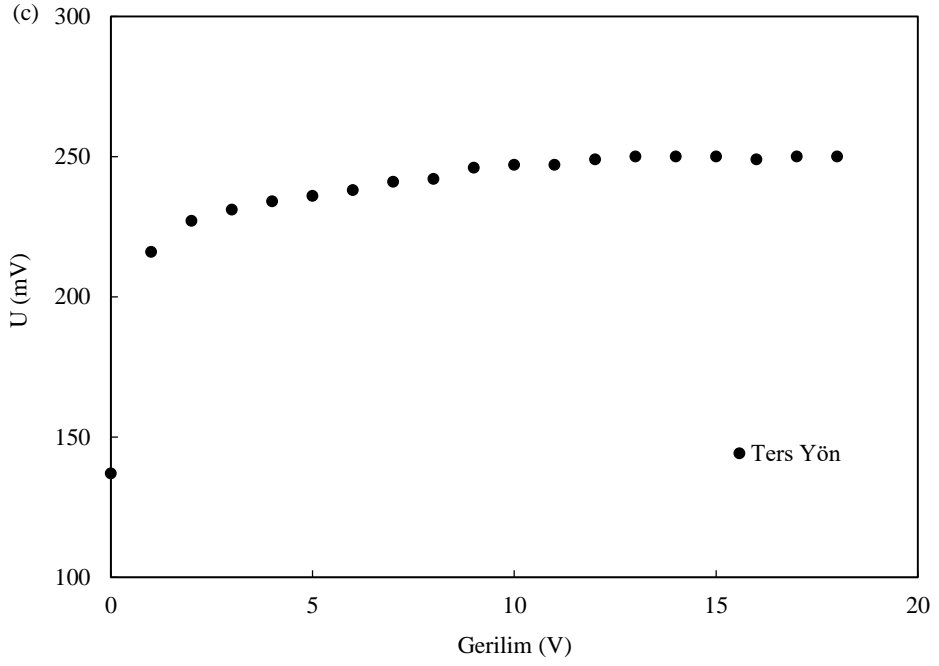


Şekil 4.21-devam Temas potansiyeli ölçümü için kurulan deney düzeneği

Şekil 4.22 Vishay firması tarafından üretilmiş olan BPV10 silikon fotodiyotun I – V, C – V ve optik ölçüm grafiklerini göstermektedir.



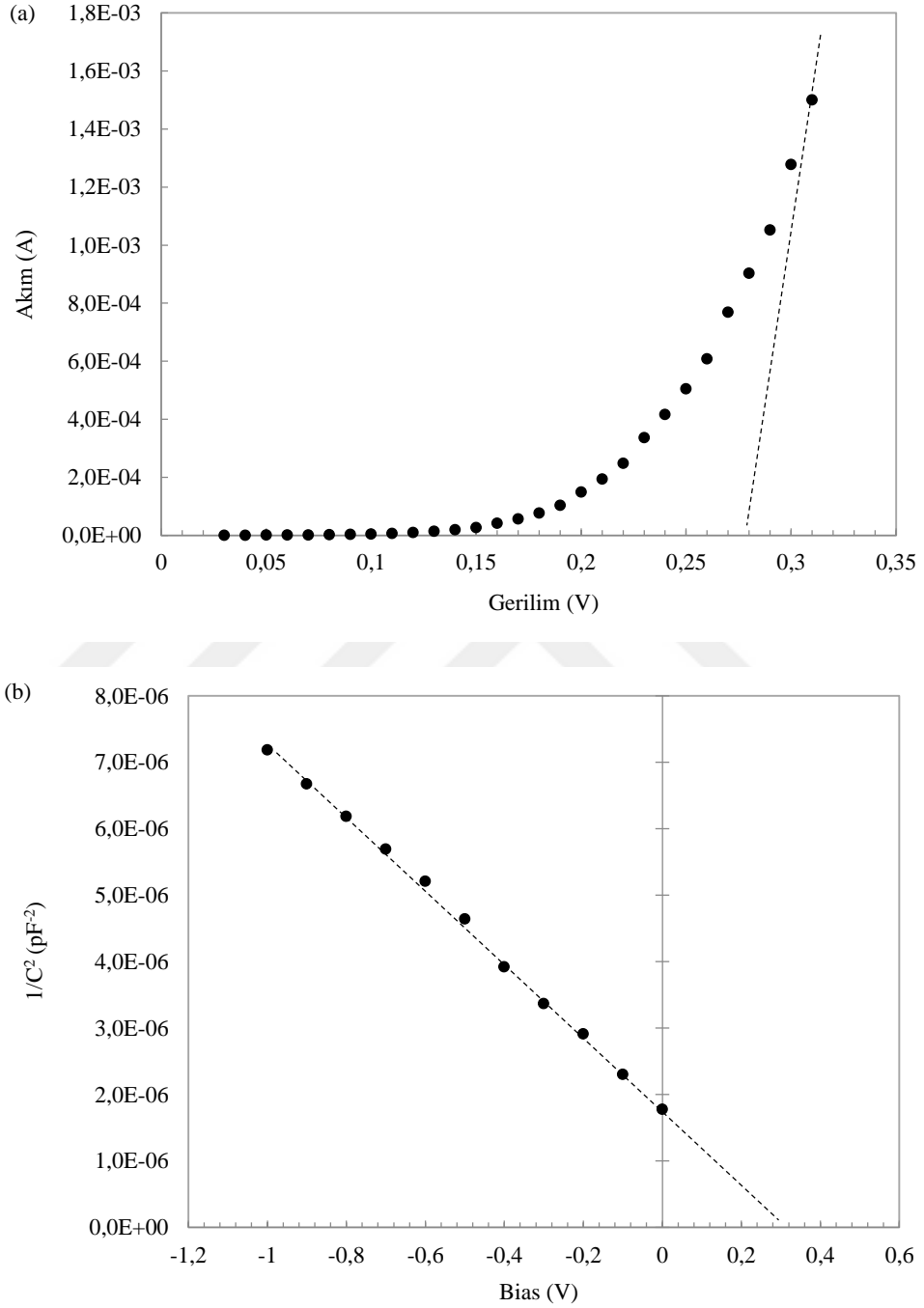
Şekil 4.22. Vishay BPV10 silikon fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri



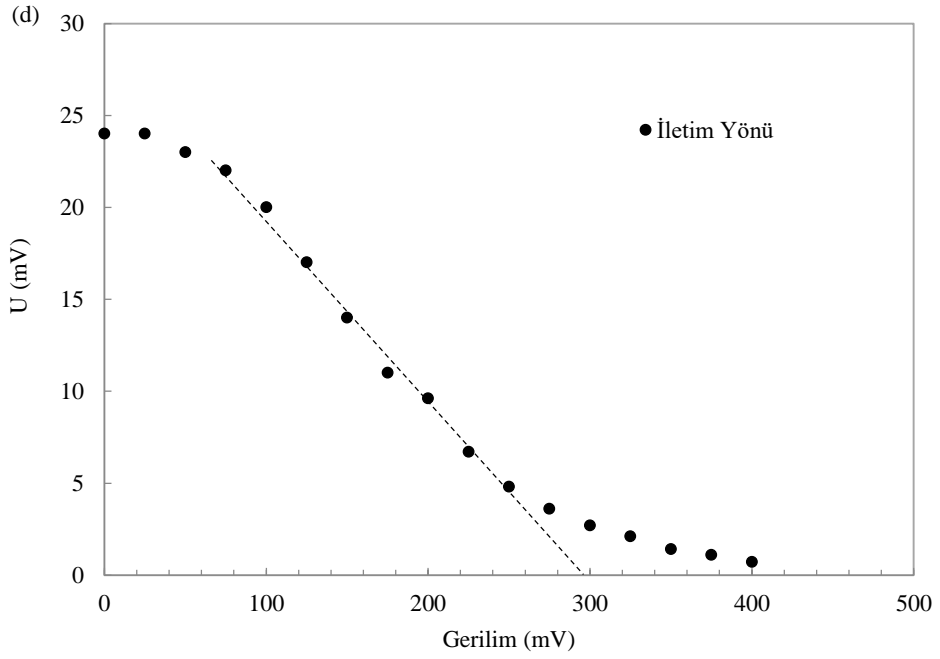
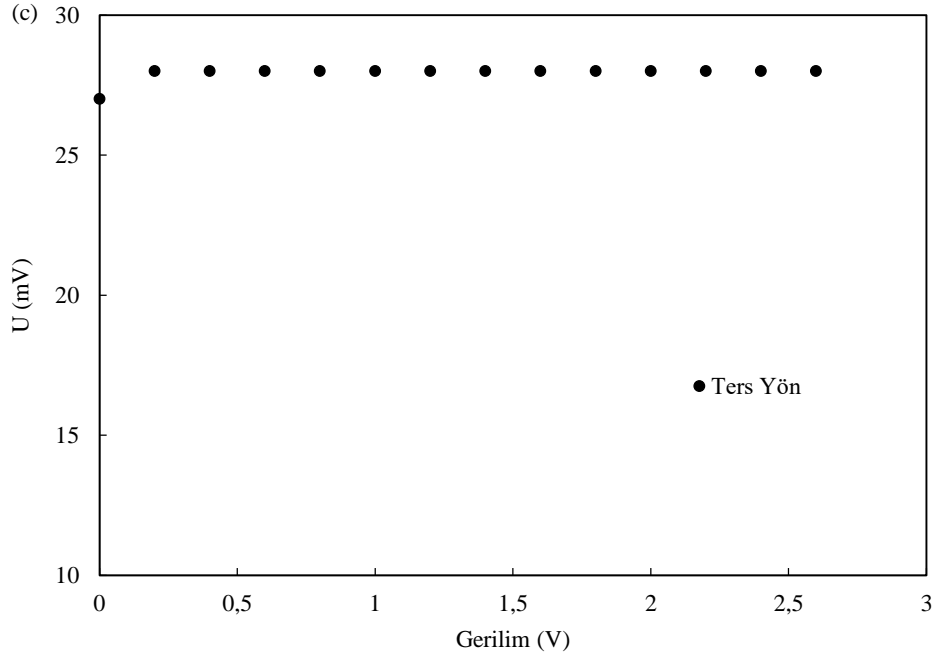
Şekil 4.22 (Devam). Vishay BPV10 silikon fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri

Silikon fotodiyot için yapı potansiyeli I – V grafiğinden 0.61 V, C – V grafiğinden 0.64 V olarak elde edilmiştir. Aynı değer optik ölçüm yönteminden faydalanılarak yaklaşık 0.68 V bulunmuştur. Elde edilen verilerin, silisyum için bilinen 0.6 – 0.7 V aralığı ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.23 Laser Components firmasının üretmiş olduğu InGaAs fotodiyotun I – V, C – V ve optik ölçüm grafiklerini göstermektedir.



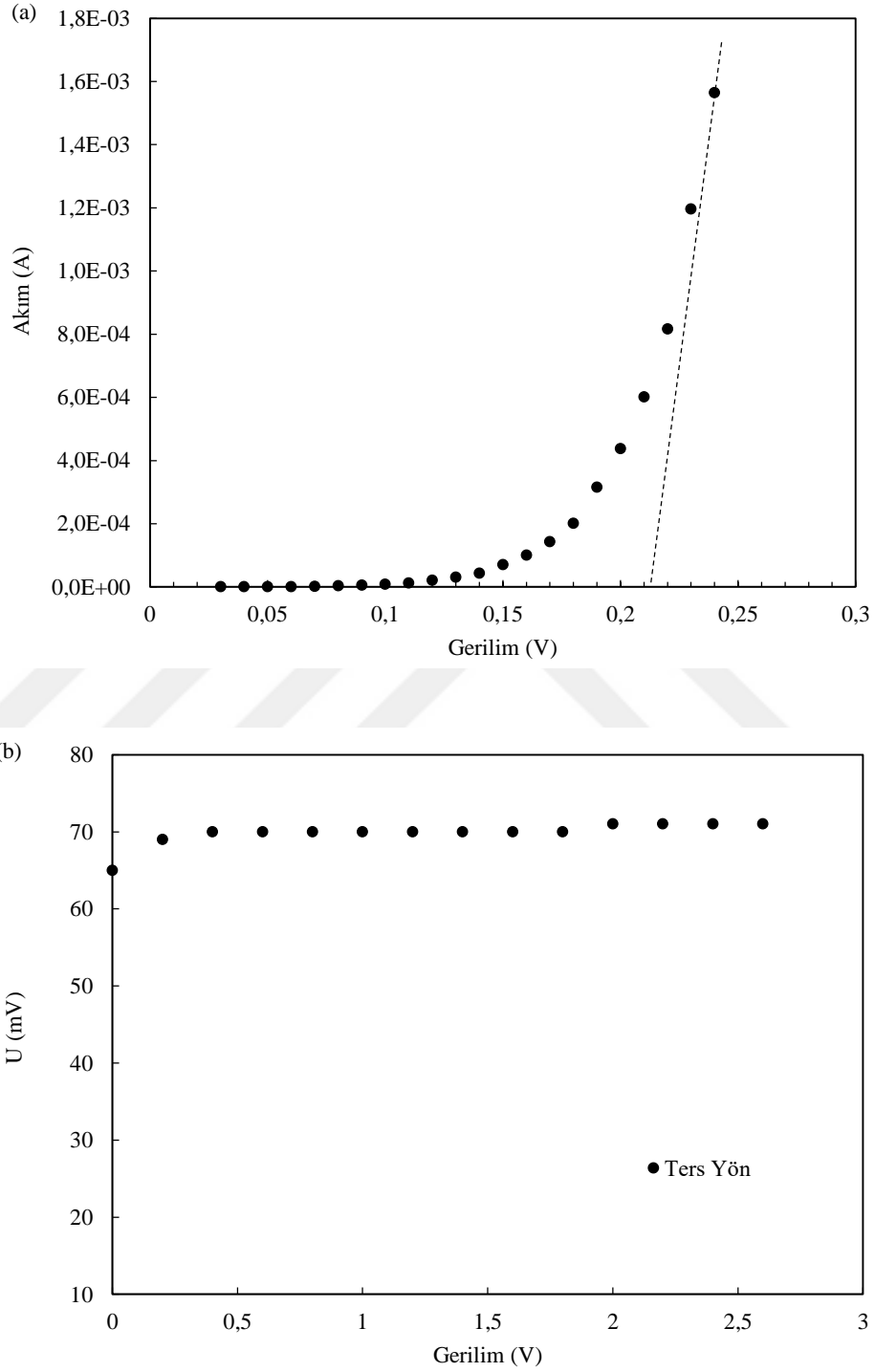
Şekil 4.23. Laser Components InGaAs fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri



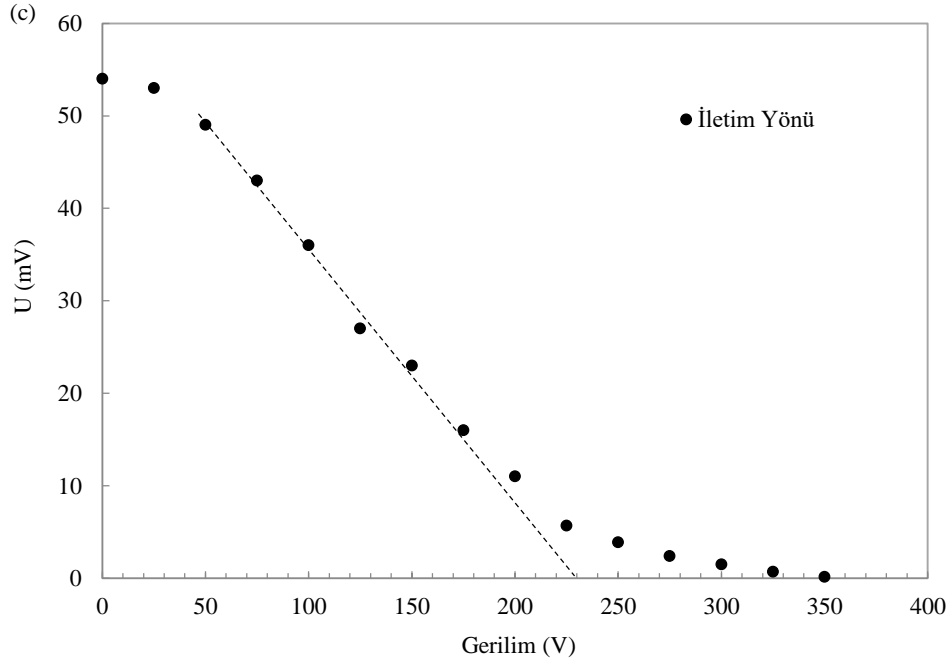
Şekil 4.23 (Devam). Laser Components InGaAs fotodiyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri

InGaAs fotodiyot için yapı potansiyeli I – V grafiğinden 0.28 V, C – V grafiğinden 0.30 V olarak elde edilmiştir. Aynı değer optik ölçüm yönteminden faydalanılarak yaklaşık 0.29 V bulunmuştur. Elde edilen verilerin, InGaAs için literatürde geçen değerler ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.24 Laser Components firması tarafından üretilmiş olan germanyum fotodiyotun I – V ve optik ölçüm grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.24. Laser Components Germanyum fotodiyotun (a) I – V (b) Ters yön optik ölçüm (c) İletim yönü optik ölçüm grafikleri



Şekil 4.24 (Devam). Laser Components Germanyum fotodiyotun (a) I – V (b) Ters yön optik ölçüm (c) İletim yönü optik ölçüm grafikleri

Germanyum fotodiyot için yapı potansiyeli I – V grafiğinden 0.21 V olarak elde edilmiştir. Aynı değer optik ölçüm yönteminden faydalanılarak yaklaşık 0.23 V bulunmuştur. Elde edilen verilerin, germanyum için bilinen 0.2 – 0.3 V aralığı ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

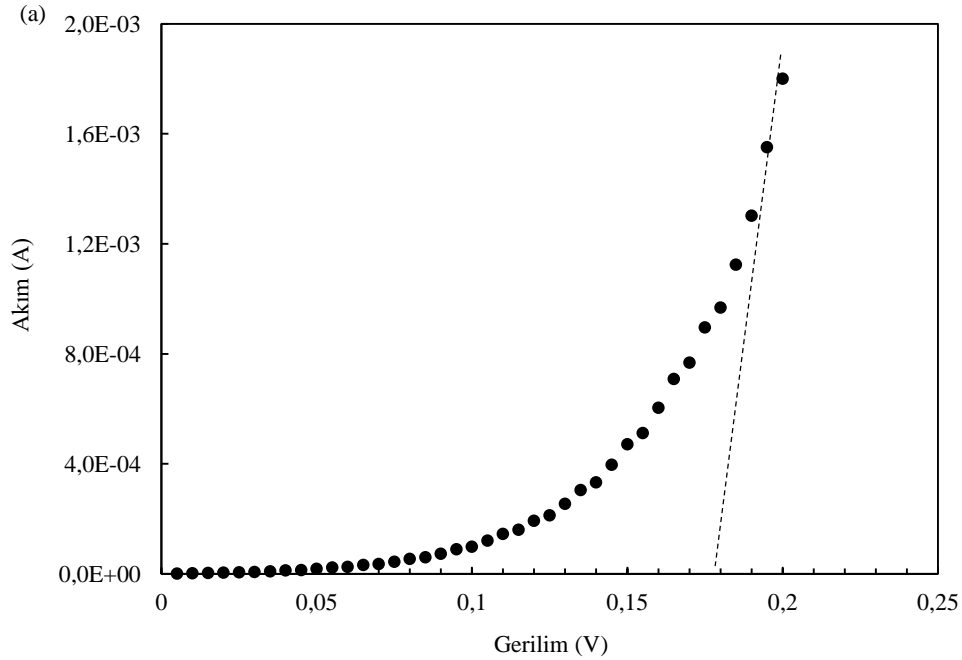
Optik ölçüm şekillerinde görüldüğü gibi, ters yöndeki voltajın başlangıç değerlerinde çıkış sinyalinde bir artış gözlenmektedir. Bunun nedeni, ters gerilim uygulandığı zaman tükenim bölgesinin öncelikle yük taşıyıcılardan tamamen arınıyor olmasıdır.

İletim yönünde ise, uygulanan gerilim eklemine iç elektrik alanına zıt yönde bir elektrik alan oluşmasına sebep olur. Uygulanan potansiyel fark arttıkça elektrik alan değeri de artarak eklemine optik yolla oluşan yük taşıyıcıları ayırma gücünü azaltır ve belli bir değerde bariyer tamamen ortadan kalkar. Bu noktada diyot üzerinden okunan potansiyel fark V_{bi} değerini verecektir.

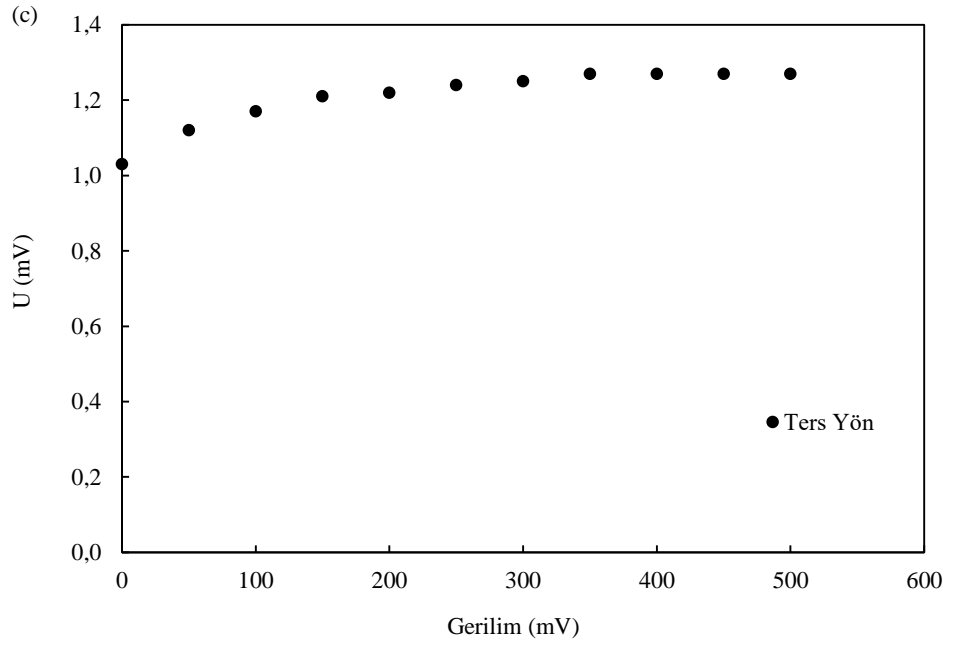
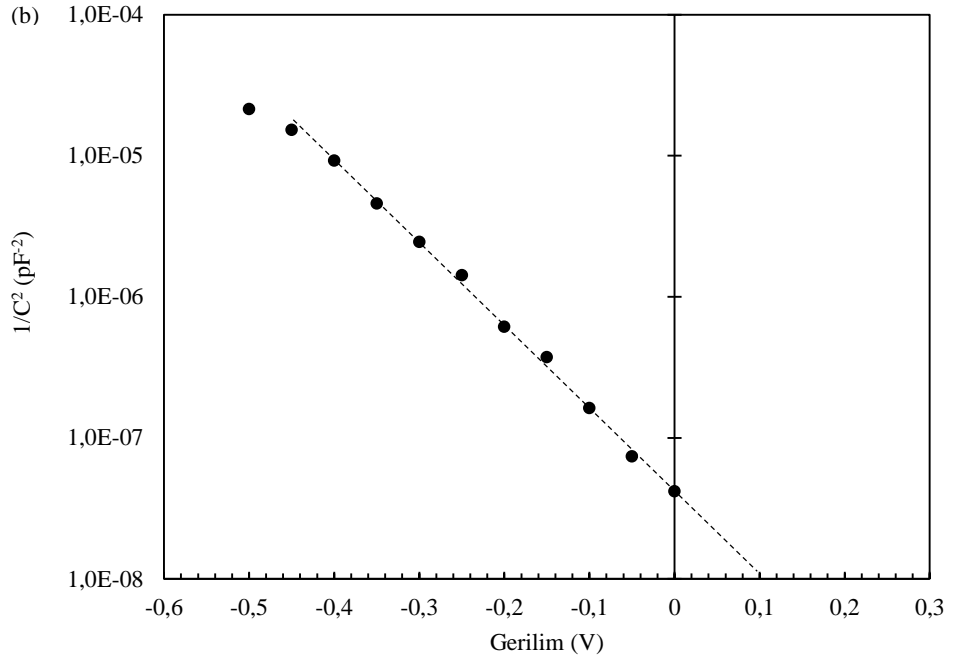
4.4.1. GaInAsSb temelli TPV diyot için optik ölçüm yöntemi

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi farklı bant aralıklarına sahip iki materyalin bir araya gelmesi ile oluşmuş olan heteroeklemlerin enerji bant diyagramları, klasik silikon p-n eklem gibi yalnızca tek bir yarıiletken içeren homoeklemlerin bant diyagramlarına göre oldukça karmaşıktır. Bunun en önemli sebeplerinden biri iletkenlik ve değerlik bantlarında meydana gelen ΔE_C ve ΔE_V bant süreksizlikleridir. Bir heteroeklemin eklem oluştuktan sonraki bant diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmişti. p – n eklemlerde olduğu gibi heteroeklemlerde de yapının elektriksel özelliklerini akım – gerilim ve kapasitans-gerilim karakteristikleri belirler.

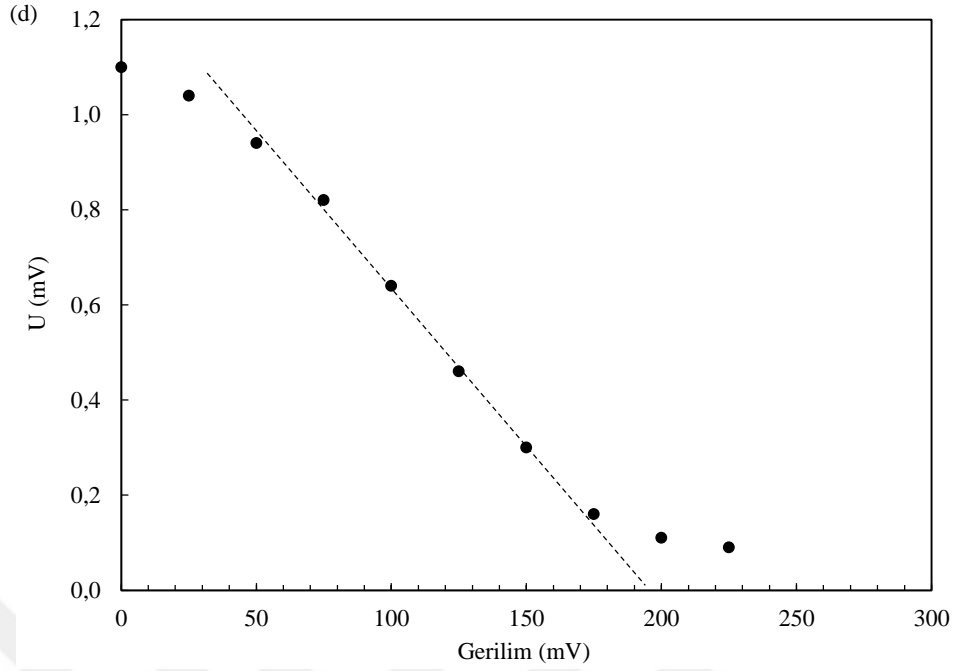
Bilindiği gibi heteroeklem, kullanılan yarıiletkenler benzer tip iletkenliğe sahiplerse izotip, farklı tip iletkenliğe sahiplerse anizotip heteroeklem olarak adlandırılır. Şekil 4.25 bu tez çalışmasında kullanılan ve anizotip heteroyapıya sahip n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyotun I – V, C - V ve optik ölçüm grafiklerini göstermektedir. Diğer ticari diyotlarda olduğu gibi bu yapı için de temas potansiyeli elektriksel yöntemler ile elde edildikten sonra optik ölçüm yöntemi kullanılarak da tespit edilmiştir.



Şekil 4.25. GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri



Şekil 4.25 (Devam). GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri



Şekil 4.25 (Devam). GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV diyotun (a) I – V (b) C – V (c) Ters yön optik ölçüm (d) İletim yönü optik ölçüm grafikleri

Tez çalışmasında incelenen n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb TPV diyot için yapı potansiyeli I – V grafiğinden 0.18 V olarak bulunmuştur. Kullanılan optik ölçüm yöntemi ile tespit edilen 0.19 V değerinin, literatürde verilen (Afrailov ve ark. 1997) ve C – V yöntemi ile de GaSb/GaInAsSb heterogeçitinde gözlenmiş olan $\Delta E_v = 0.1 \text{ eV}$ bant süreksizliği değerinden beklenildiği üzere daha büyük olduğu ve valans bandında ışık etkisiyle oluşan fotoboşluklar için GaSb/GaInAsSb heterogeçitinde bulunan potansiyel engelin büyüklüğüne yakın olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, üretimi IOFFE (Physical - Technical Research Institute, St. Petersburg) araştırma enstitüsünde gerçekleştirilmiş olan $\text{GaSb/Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}/\text{GaAlAsSb}$ TPV diyotun elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir.

Elektriksel özellikler kapsamında öncelikle aynı konsantrasyon ve eşit aktif bölge çapına sahip p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb ile n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip yapıların karanlık akım – gerilim karakteristikleri incelenmiştir. Yapıların ideallikten ne kadar saptığının bir ölçüsü olan ideallik faktörü değerleri de göz önünde bulundurularak yapıların farklı sıcaklıklardaki baskın akım mekanizmaları tespit edilmiş, ayrıca yapıların ilgilenilen sıcaklık aralığında doğrultucu özellik gösterdiği görülmüştür. I – V ölçümleri ile farklı sıcaklık aralıklarında elde edilen veriler sayesinde aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmış ve genel olarak yapıların yüksek sıcaklık bölgesinde difüzyon akımının, oda sıcaklığı civarında üretim – yeniden birleşme akımının ve düşük sıcaklık bölgesinde de tünelleme akımının baskın olduğu görülmüştür.

Herhangi bir aydınlatma etkisi altında değilken diyot üzerinden akan akım karanlık akım olarak adlandırılmaktadır. Kaliteli bir yapı üzerinden geçen karanlık akım miktarının detekte edilecek fotoakımdan oldukça az olması gerekmektedir. İncelediğimiz iki numune arasında, 1 mm aktif bölge çapına sahip olan n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapının benzer sıcaklık ve gerilim değerleri altında 1 mm aktif bölge çapına sahip olan p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb anizotip heteroyapıya göre daha düşük karanlık akım değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, üretilen n-n-p heteroyapının heteroçerçit bölgesinde oluşan kusurların diğer yapıya göre daha az olmasıdır.

Yapılan bu karşılaştırmadan sonra TPV uygulamaları için kullanılması düşünülen yapının optik özellikleri için avantaj sağlayacağı düşünüldüğünden dolayı benzer incelemeler 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb anizotip heteroyapı için de tekrarlanmış ve bu yapının yüksek aktif bölge alanına rağmen incelediğimiz üç anizotip heteroyapı numunesi içinde en düşük karanlık akım değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kapasitans – gerilim ölçümleri de doğrultucu özelliğe sahip yarıiletken eklemlerin bazı temel özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb heteroyapının C – V karakteristiğinin incelenmesi sonucunda dar bantlı n-GaInAsSb tabakasının yük taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık olarak $N_{d_1} = 2,23 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve ΔE_v valans bandı süreksizliği 0.1 eV olarak bulunmuştur. Tespit edilen valans bandı süreksizliği değerinin, benzer izotip heteroyapılar için farklı bir yöntemle elde edilmiş olan ΔE_v değeri ile (Afrailov ve ark. 1997) oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Optik ölçümler kapsamında ise öncelikli olarak 1 mm aktif bölge çapına sahip olan p-GaSb/p-GaInAsSb/n-GaAlAsSb ve n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb yapılar ile 2 mm aktif bölge çaplı n-GaSb/n-GaInAsSb/p-GaAlAsSb heteroyapılar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Beklenildiği gibi 2 mm çaplı numunenin benzer ışık yoğunluklarına maruz kaldığında diğerlerine nazaran ışık duyarlılığının daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Yapının maksimum duyarlılık değeri 2000 nm dalgaboyunda 0.98 A/W, kuantum verimliliği ise 61% olarak elde edilmiştir.

Işık duyarlılığının spektral dağılımının incelenmesi sonucu oda sıcaklığında 2 mm aktif bölge çapına sahip yapının uzun dalgaboyu kenarının yaklaşık 2.4 μm değerinde bulunduğu görülmüş ve benzer yapılar için literatürde elde edilmiş olan değerler ile uyum sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca iki farklı sıcaklık için elde edilen spektral dağılımlar ile dar bantlı GaInAsSb tabakasının yasak bant genişliğinin sıcaklık katsayısı deneysel olarak hesaplanmış ve elde edilen $\sigma = -3.20 \cdot 10^{-4} \text{ eV} / \text{K}$ değerinin teorik değer ile uyum sağladığı görülmüştür.

p – n eklemlerin geçiş bölgesinde oluşan temas potansiyelinin tespit edilebilmesi için genel olarak I – V ve C –V karakteristiklerinden faydalanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yarıiletken eklemlerdeki temas potansiyeli ölçümü ilk kez geliştirmiş olduğumuz optik düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yöntem farklı ışık kaynakları ile çalışılmasını mümkün kılan bir yöntemdir. Yöntem, optik bölücü yardımıyla elde edilmiş olan optik kare dalga biçimindeki ışık etkisi altında bulunan fotodiyotun oluşturduğu çıkış işareti sıfırlanmaya kadar, yani bariyer yüksekliği tamamen ortadan kalkmaya kadar fotodiyota dışarıdan iletim yönünde gerilim

uygulanması prensibine dayanır. Sinyal sıfırlandığı durumda diyot üzerinden okunan gerilim ile başlangıçta ışık etkisi ile meydana gelmiş olan küçülme miktarının toplamı potansiyel engel yüksekliği değerini vermektedir. Yöntemin kullanılabilirliğini test etmek için öncelikle temas potansiyeli değerleri bilinen ticari numuneler için $I - V$, $C - V$ ve optik yöntem ile ölçülmüştür. Optik yöntem ile elde edilen sonuçların $I - V$ ve $C - V$ karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar ile uyum sağlaması kullandığımız optik yöntemin güvenilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Daha sonra, aynı yöntem GaInAsSb temelli TPV diyot için de tekrar edilerek GaSb/GaInAsSb heterogeçitindeki potansiyel engelin büyüklüğü tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Afrailov, M.A., Baranov, A.V., Dmitriev, A.P., Mikhailova, M.P., Smorchkova, Y.P., Timchenko, I.N., Sherstnev, V.V., Yakovlev, Y.P., Yassievich, I.N., 1990.** Narrow-gap type-II heterojunctions made of GaSb-InAs solid-solutions. *Soviet Physics Semiconductors*, 24(8): 876-882.
- Afrailov, M.A., Mikhailova, M.P., Rahimov, N.R. 1997.** Determination of the Values of Band-Edge Discontinuities ΔE_v and ΔE_c at the Heterojunction of N-GaSb/n-GaInAsSb Isotype Structures by Photovoltaic Method. *Turkish Journal of Physics*, 21(12):1229.
- Afrailov, M.A., 2012.** Photoelectrical characteristics of GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb heterojunction photodiodes under illumination by photons with wavelength of 0.95–1.0 μm . *Thin Solid Films*, 520: 5014-5017.
- Ahmetoglu (Afrailov), M., Kucur, B., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P. 2010.** Electrical and optical properties of the GaInAsSb-based heterojunctions for infrared photodiode and thermophotovoltaic cell application. *Infrared Physics & Technology*, 53: 399-403.
- Alferov, Z.I., 2001.** The double heterostructure: The concept and its applications in physics, electronics and technology (Nobel Lecture). *Chemphyschem*, 2: 500-513.
- Andreev, I.A., Il'inskaya, N.D., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P., 2003.** High-efficiency GaInAsSb/GaAlAsSb photodiodes for 0.9- to 2.55- μm spectral range with a large-diameter active area. *Semiconductors*, 37(8): 974-979.
- Bauer, T., Forbes, I., Pearsall, N., 2004.** The potential of thermophotovoltaic heat recovery for the UK industry. *International Journal of Ambient Energy*, 25(1): 19-25.
- Bauer, T. 2011.** Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design. Springer, Germany, 197 pp.
- Behringer, M. 2007.** High-Power Diode Laser Technology and Characteristics: High Power Diode Lasers Technology and Applications, Ed.: Rhodes, W.T., Adibi, A., Asakura, T., Hänsch, T.W., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Ohtsu, M., Venghaus, H., Weber, H., Weinfurter, H., Springer Science+Business Media, Inc., New York, USA, pp: 5-74.
- Bhat, I.B., Borrego, J.M., Gutmann, R.J., Ostrogorsky, A.G., 1996.** TPV energy conversion: A review of material and cell related issues. *IEEE*, 4: 968-973.
- Bitnar, B., 2003.** Silicon, germanium and silicon/germanium photocells for thermophotovoltaics applications. *Semicond. Sci. Technol.*, 18: 221-227.
- Boriskina, S.V., Green, M.A., Catchpole, K., Yablunovich, E., Beard, M.C., Okada, Y., Lany, S., Gershon, T., Zakutayev, A., Tahersima, M.H., Sorger, V.J., Naughton, M.J., Kempa, K., Dagenais, M., Yao, Y., Xu, L., Sheng, X., Bronstein, N.D., Rogers, J.A., Alivisatos, A.P., Nuzzo, R.G., Gordon, J.M., Wu, D.M., Wissler, M.D., Salleo, D., Dionne, J., Bermel, P., Greffet, J.J., Celanovic, I., Soljacic, M., Manor, A., Rotschild, C., Raman, A., Zhu, L., Fan, S., Chen, G., 2016.** Roadmap on optical energy conversion. *J. Opt.*, 18: 1-48.
- Capper, P., Irvine, S., Joyce, T. 2006.** Epitaxial Crystal Growth: Method and Materials: Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Ed.: Kasap, S., Capper, P., Springer Science+Business Media, Inc., Würzburg, pp: 271-301.
- Chapin, D.M., Fuller, C.S., Pearson, G.L. 1954.** A new silicon p – n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *J. Appl. Phys.*, 25: 676-677.
- Chubb, D.L. 2007.** Fundamentals of Thermophotovoltaic Energy Conversion. Elsevier, The Netherlands, 515 pp.

- Connolly, J.P., Rohr, C., 2003.** Quantum well cells for thermophotovoltaics. *Semicond. Sci. Technol.*, 18: 216-220.
- Coutts, T.J., 1999.** A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3: 77-184.
- Coutts, T.J., 2001.** An overview of thermophotovoltaic generation of electricity. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 66: 443-452.
- Daneshvar, H., Prinja, R., Kherani, N.P., 2015.** Thermophotovoltaics: Fundamentals, challenges and prospects. *Applied Energy*, 159: 560-575.
- Dashiell, M.W., Beausang, J.F., Ehsani, H., Nichols, G.J., Depoy, D.M., Danielson, L.R., Talamo, P., Rahner, K.D., Brown, E.J., Burger, S.R., Fourspring, P.M., Topper, W.F., Baldasaro, J.P.F., Wang, C.A., Huang, R.K., Connors, M.K., Turner, G.W., Shellenbarger, Z.A., Taylor, G., Li, J., Martinelli, R., Donetski, D., Anikeev, S., Belenky, G.L., Luryi, S., 2006.** Quaternary InGaAsSb Thermophotovoltaic Diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 53(12): 2879-2891.
- Dingle, R., Wiegmann, W., Henry, C.H., 1974.** Quantum states of confined carriers in very thin $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures. *Physical Review Letters*, 33(14): 827-830.
- Dmitriev, I.A., Suris, R.A., 2005.** Quantum cascade lasers based on quantum dot superlattice. *Phys. Stat. Sol. A*, 202(6): 987-991.
- Dutta, P.S., Bhat, H.L., Kumar, V. 1997.** The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material. *J. Appl. Phys.*, 81(9): 5821-5870.
- Forrest, S.R., DiDomenico, M., Smith, J.R.G., Stocker, H.J., 1980.** Evidence for tunneling in reverse-biased III-V photodetector diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 36: 580-582.
- Frensley, W.R. 1994.** Heterostructure and Quantum Well Physics: Heterostructures and Quantum Devices, Ed.: Frensley, W.R., Einspruch., Academic Press, San Diego, pp: 3-24.
- Guazzoni, G., Matthews, S., 2004.** A Retrospective of Four Decades of Military Interest in Thermophotovoltaics. *AIP Conf. Proc.*, 738(3): 3-12.
- Kasap, O.S. 2001.** Optoelectronics and Photonics. Prentice-Hall, New Jersey, 314 pp.
- Kitai, A. 2011.** Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes. John Wiley&Sons, Inc., United Kingdom, 316 pp.
- Kunitsyna, E.V., Andreev, I.A., Mikhailova, M.P., Parkhomenko, Y.A., Yakovlev, Y.P., 2000.** Fabrication details of GaInAsSb-based photodiode heterostructures. *Proc. SPIE*, 4340: 244-253.
- Kunitsyna, E.V., Andreev, I.A., Sherstnev, V.V., L'vova, T.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P., Ahmetoglu, M., Kaynak, G., Gurler, O., 2010.** Narrow gap III-V materials for infrared photodiodes and thermophotovoltaic cells. *Optical Materials*, 32: 1573-1577.
- Kunitsyna E.V. 2012.** Yazılı görüşme. Uludag University, Bursa, (Görüşme tarihi: 11.2012).
- Kuphal, E., 1991.** Liquid Phase Epitaxy. *Appl. Phys. A*, 52: 380-409.
- Littler, C.L., Seiler, D.G. 1985.** Temperature dependence of the energy gap of InSb using nonlinear optical techniques. *Appl. Phys. Lett.*, 46: 986-988.
- Litvak, A.M., Charykov, N.A. 1990.** *Zh. Fiz. Khim.*, 64:2331.
- Mamutin, V.V., Ustinov, V.M., Boettcher, J., Kuenzel, H., 2010.** MBE growth and characterization of 5 μm quantum cascade lasers. *Semiconductors*, 44(7): 962-968.
- Mauk, M.G., Andreev, V.M., 2003.** GaSb-related materials for TPV cells. *Semicond. Sci. Technol.*, 18: 191-201.

- Mauk, M.G. 2006.** Survey of Thermophotovoltaic (TPV) Devices: Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics, Ed.: Rhodes, W.T., Asakura, T., Brenner, K.-H., Hänsch, T.W., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Venghaus, H., Weber, H., Weinfurter, H., Springer Science+Business Media, Inc., Germany, pp: 673-738.
- Mattarolo, G. 2007.** Development and modelling of a thermophotovoltaic system. *Ph.D. Thesis*, Kassel University, Germany.
- Mebarki, M., Boukredimi, D., Sadik, S., Lazzari, J.L., 1993.** Electrical determination of band offsets in a p-Ga_{0.77}In_{0.23}As_{0.20}Sb_{0.80}/ n-GaSb type-II heterojunction. *J. Appl. Phys*, 73(5): 2360-2363.
- Mikhailova, M.P., Titkov, A.N., 1994.** Type II heterojunctions in the GaInAsSb/GaSb system. *Semicond. Sci. Technol.*, 9: 1279-1295.
- Mikhailova, M.P. 1999.** Gallium Indium Arsenide Antimonide: Handbook Series on Semiconductor Parameters, Ed: Levinshtein, M., Rumyantsev, S., Shur, M., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, pp: 180-204.
- Mikhailova, M.P., Stoyanov, N.D., Andreychuk, O.V., Moiseev, K.D., Andreev, I.A., Yakovlev, Y.P., Afrailov, M.A., 2002.** Type II GaSb based photodiodes operating in spectral range 1.5-4.8 μm at room temperature. *IEE Proc.-Optoelectron*, 149(1): 41-44.
- Mikhailova, M.P., Moiseev, K.D., Yakovlev, Y.P., 2004.** Interface-induced optical and transport phenomena in type II broken-gap single heterojunctions. *Semicond. Sci. Technol.*, 19: 109-128.
- Milichko, V.A., Shalin, A.S., Mukhin, I.S., Kovrov, A.E., Krasilin A.A., Vinogradov, A.V., Belov, P.A., Simovski, C.R., 2016.** Solar photovoltaics: current state and trends. *Physics – Uspekhi*, 59(8): 727-772.
- Milnes, A.G., Feucht, D.L. 1972.** Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions. Academic Press, Inc., New York, 408 pp.
- Milnes, A.G., Polyakov, A.Y., 1993.** Review Gallium Antimonide device related properties. *Solid-State Electronics*, 36(6): 803-818.
- Neamen, D.A. 2003.** Semiconductor Physics and Devices Basic Principles. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 729 pp.
- Nelson, R.E., 1995.** Thermophotovoltaic Emitter Development. *AIP Conf. Proc.*, 321: 79-96.
- Nelson, R.E., 2003.** A brief history of thermophotovoltaic development. *Semicond. Sci. Technol.*, 18: 141-143.
- Nguyen, J., Ting, D.Z., Hill, C.J., Soibel, A., Keo, S.A., Gunapala, S.D. 2009.** Dark current analysis of InAs/GaSb superlattices at low temperatures. *Infrared Physics & Technology*, 52(6): 317-321.
- Özer, M. 2005.** N-GaSb/n-GaInAsSb/N-GaAlAsSb izotip heteroyapıların elektrik ve fotoelektrik özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Pearsall, T.P., Pollack, M.A. 1985.** Compound Semiconductor Photodiodes: Semiconductors and Semimetals, Ed.: Tsang, W.T., Willardson, R.K., Beer, A.C., Academic Press, Inc., Orlando, Florida, pp: 174-245.
- Pfiester, N.A., Vandervelde, T.E., 2016.** Selective emitters for thermophotovoltaic applications. *Phys. Stat. Sol. A*, 214(1): 1-24.
- Piskorski, M., Piotrowska, A., Piotrowski, T.T., Golaszewska, K., Papis, E., Katcki, J., Ratajczak, J., Barcz, A., Wawro, A. 2004.** LPE growth and characterisation of GaInAsSb and GaAlAsSb quaternary layers on (100) GaSb substrates. *Thin Solid Films*, 459: 2-6.

- Reynolds, D.C., Leies, G., Antes, L.L., Marburger, R.E. 1954.** Photovoltaic effect in cadmium sulfide. *Phys. Rev.*, 96: 533-534.
- Rohr, C., Abbott, P., Ballard, I.M., Bushnell, D.B., Connoly, J.P., Ekins-Daukes, N.J., Barnham, K.W.J. 2004.** Quantum wells in photovoltaic cells: Next Generation Photovoltaics, Ed: Marti, A., Luque, A., Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, pp: 91-103.
- Scheel, H.J. 2007.** Introduction to Liquid Phase Epitaxy: Liquid Phase Epitaxy of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials, Ed.: Capper, P., Mauk, M., John Wiley&Sons, Inc., Great Britain, pp: 1-19.
- Sharma S., Jain, K.K., Sharma, A., 2015.** Solar Cells: In Research and Applications-A Review. *Materials Sciences and Applications*, 6(12): 1145-1155.
- Song, X., Ji, X., Li, M., Lin, W., Luo, X., Zhang, H., 2014.** A Review on Development Prospect of CZTS Based Thin Film Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*, 2014: 1-11.
- Sze, S.M. 1981.** Physics of Semiconductor Devices. John Wiley&Sons, Inc., Canada, 868 pp.
- Sze, S.M. 1985.** Physics of Semiconductor Devices. John Wiley&Sons, Inc., USA, 523 pp.
- Sze, S.M. 2002.** Semiconductor Devices Physics and Technology. John Wiley&Sons, Inc., USA, 564 pp.
- Sze, S.M., Ng, K.K. 2007.** Physics of Semiconductor Devices. John Wiley&Sons, Inc., New Jersey, 815 pp.
- Tan M., Ji, L., Wu, Y., Dai, P., Wang, Q., Li, K., Yu, T., Yu, Y., Lu, S., Yang, H., 2014.** Investigation of InGaAs thermophotovoltaic cells under blackbody radiation. *Applied Physics Express*, 7(9): 1-3.
- Wilson, J., Hawkes, J. 1998.** Optoelectronics. Prentice Hall Europe, Great Britain, 559 pp.
- Wojtczuk, S., Gagnon, E., Geoffroy, L., Parodos, T., 1995.** In_xGa_{1-x}As thermophotovoltaic cell performance vs. bandgap. *AIP Conference Proceedings*, 321: 177-187.
- Yacobi, B.G. 2003.** Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 228 pp.

EKLER

EK 1 İdeallik Faktörünün Hata Hesabı



EK 1 İdeallik Faktörünün Hata Hesabı

$$n = \frac{e (V_2 - V_1)}{kT \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$$

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial V_1} \Delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial V_2} \Delta V_2\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial I_1} \Delta I_1\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial I_2} \Delta I_2\right)^2}$$

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = 0.001 \text{ V}$$

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 = 0.001 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Banu KUCUR EFENDİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa – 04.04.1986
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Erkek Lisesi – 2004
Lisans : U. Ü. Fen – Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü - 2008
Yüksek Lisans : U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik ABD – 2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü 2009 – ...
İletişim (e-posta) : banukucur@uludag.edu.tr
Yayımları :

Ahmetoglu (Afrailov), M., Kucur, B., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P. 2010. Electrical and optical properties of the GaInAsSb-based heterojunctions for infrared photodiode and thermophotovoltaic cell application. *Infrared Physics & Technology*, 53: 399-403.

Ahmetoglu, M., Tekgül, A., Alper, M., Kucur, B. 2012. The electrical characterization of electrodeposited Ni thin film on silicon: Schottky Barrier diodes. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 6(1-2): 304-306.

Ahmetoglu, M., Kucur, B., Gücüyener, İ. 2012. Electrical properties of GaAs-GaAlAs near infrared light emitting diodes. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 6(9-10): 782-784.

Ahmetoglu, M., Kucur, B. 2013. Determination of Carrier Concentrations in P-GaSb / N-InGaAsSb Type II Misaligned Heterojunctions by The Conductivity-Magnetic Field Dependence. *Sensor Letters*, 11(1): 202-204.

Ahmetoglu, M., Kucur, B., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P. 2015. Electrical and Optical Characteristics of n-GaSb/n-GaIn_{0.24}AsSb/p-GaAl_{0.34}AsSb Heterostructure Photodiode. *Acta Physica Polonica A*, 127(4): 1007-1009.

Ahmetoglu, M., Kara, A., Kucur, B. 2016. Poly(ethylene glycol dimethacrylate-co-1-vinyl-1,2,4-triazole/carbon nanotube, single-walled)/n-GaAs Diode Formed by Surface Polymerization. *Acta Physica Polonica A*, 130(1): 206-208.

Ahmetoglu (Afrailov), M., Kırsoy, A., Asimov, A., Kucur, B. 2016. The electrical properties of Au/MEH-PPV: PCBM/n-type GaAs Schottky barrier diode. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 10(11-12): 825-830.

Asimov, A., Ahmetoglu (Afrailov), M., Kucur, B., Özer, M., Güzel, T. 2013. The determination of series resistance and interface state density distributions of Au/p-type GaAs Schottky barrier diodes. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 7(7-8): 490-493.

Asimov, A., Ahmetoglu, M., Kucur, B., Gücüyener, I., 2014. Electrical characteristics of Al/n-type GaAs Schottky barrier diodes at room temperature. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 8(3-4): 306-310.

Kirsoy, A., Ahmetoglu (Afrailov), M., Asimov, A., Kucur, B. 2015. The Electrical Properties of Au/P3HT/n-GaAs Schottky Barrier Diode. *Acta Physica Polonica A*, 128(2-B): 170-173.

Kucur, B., Ahmetoglu, M., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P. 2014. Electrical Properties of GaInAsSb/GaSb/GaAlAsSb Double Heterostructure with Low Diameter. *Acta Physica Polonica A*, 125(2): 411-413.

Kucur, B., Ahmetoglu, M., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Y.P. 2016. Electrical Characteristics and Temperature Dependence of Photovoltaic Parameters of GaInAsSb Based TPV Diode. *Acta Physica Polonica A*, 129(4): 767-769.

