

**OPTOELEKTRONİK CİHAZLARIN
MODELLENMESİ İÇİN III-V BİLEŞİKLERİNİN
FİZİKSEL ÖZELİKLERİNE SICAKLIĞIN VE
BASINCIN ETKİSİ**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

Erdoğan Cemal KOCAMAN

**OPTOELEKTRONİK CİHAZLARIN MODELLENMESİ İÇİN III-V
BİLEŞİKLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN VE
BASINCIN ETKİSİ**

Erdiç Cemal KOCAMAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Aralık 2019

Erdoğan Cemal KOCAMAN tarafından hazırlanan “OPTOELEKTRONİK CİHAZLARIN MODELLENMESİ İÇİN III-V BİLEŞİKLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN VE BASINCIN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylıyorum.

Prof. Dr. İdris KABALCI
Tez Danışmanı, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/12/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof.Dr. Fatma KANDEMİRLİ (KÜ)

Üye : Prof.Dr. İdris KABALCI (KBÜ)

Üye : Doç Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

...../...../2019

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Erdoğan Cemal KOCAMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTOELEKTRONİK CİHAZLARIN MODELLENMESİ İÇİN III-V BİLEŞİKLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN VE BASINCIN ETKİSİ

Erdoğan Cemal KOCAMAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İdris KABALCI

Aralık 2019, 52 sayfa

Günümüzde hızla gelişen ileri teknolojilerin en büyük gereksinimlerinin biri, veri iletişimi alanında kullanılan yarı iletken cihazlarda ve entegre devrelerinde kullanılan malzemelerin miktarını en aza indirmek, uzun ömürlü ve daha az enerji harcayarak cihazların kalitesini artırmaya yöneliktir. 1947 yılında Bipolar transistörlerin icadı ile birlikte, yarı iletken esaslı malzemelerin, cihazların üretimi ve potansiyel uygulamaları üzerine araştırmalar hızla gelişmiştir. Yarı iletken cihazlar dört ana grupta sırasıyla, Bipolar Transistörler, Ünipolar Transistör, Fotonik Cihazlar, Mikro Dalga Transistörler olarak sınıflandırılabilir.

GaAs, InGaN ve III-V grup bileşikleri üzerine dayandırılan yarı iletken cihazların bilim ve teknolojideki önemli uygulamalarına rağmen, halen sıcaklık, basınç ve konsantrasyonun artmasına bağlı olarak çözümlenmesi gereken konular bulunmaktadır.

GaAs, InGaN ve III-V grup bileşiklerinin sıcaklığın artmasına bağlı olarak, enerji bant aralığı, elektron ve boşlukların etkin kütlesi azalırken, dielektrik sabiti artış göstermektedir. Dolayısıyla yüksek sıcaklık ve basıncın heteroyapılı Bipolar ve Alan Etkili Transistörlerin performansı, enerji bant aralığına ve malzemenin diğer fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.

Bu tezde, yarı iletken cihazların yapısal ve fiziksel özelliklerinin üzerine, farklı sıcaklık ve iyon konsantrasyonlarının çeşitli yarı iletken diyotların (LED) enerji bant aralıkları, iyon konsantrasyonları ve mobilitelerinin değişimi irdelenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Yarı İletken, Enerji Bant Aralığı, GaAs, Sıcaklık, Mobilite

Bilim Kodu : 92504

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PRESSURE ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF III-V COMPOUNDS FOR MODELING OPTOELECTRONIC DEVICES

Erdiñ Cemal KOCAMAN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Biomedical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İdris KABALCI

December 2019, 52 pages

One of the biggest requirements of today's rapidly developing advanced technologies is to minimize the amount of materials used in semiconductor devices and integrated circuits used in the field of data communication and to increase the quality of devices by consuming less energy and life time. With the invention of bipolar transistors in 1947, research on the production and potential applications of semiconductor based on advanced materials and devices developed. Semiconductor devices can be classified into four main groups as Bipolar Transistors, Unipolar Transistors, Photonic Devices, Microwave Wave Transistors, respectively.

Despite the important applications of semiconductor devices based on GaAs, InGaN and III-V group compounds in science and technology, there are still issues that need to be solved due to increasing temperature, pressure and concentration. Due to the

increase in temperature of the GaAs, InGaN and III-V group compounds, the energy band gap, the effective mass of electrons and holes decrease while the dielectric constant increases. Hence, the performance of high-temperature and pressure of the heterostructured Bipolar and Field Effect Transistors may vary depending on the energy bandgap and other physical properties of the semiconductor material.

In this researches, on the structural and physical properties of semiconductor devices, the changes in energy bandgap, ion concentrations and mobilities of various semiconductor diodes (LEDs) for different temperature and ion concentrations has been investigated.

Key Word : Semiconductor, Energy Bandwidth, GaAs, Temperature, Mobility

Science Code : 92504

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İdris KABALACI 'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili babama anneme kardeőime ve dostlarıma manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için en kalbi hislerimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xiii |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 6 |
| YARI İLETKEN MALZEMELER..... | 6 |
| 2.1.YARI İLETKEN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ | 6 |
| 2.1.1. Katkısız (Saf) Yarı iletkenler..... | 7 |
| 2.1.2. Katkılı Yarı İletkenler..... | 9 |
| 2.1.3. Organik ve İnorganik Yarı İletkenler | 10 |
| 2.2. FERMİ ENERJİ SEVİYESİ VE TAŞIYICI KONSANTRASYONU..... | 11 |
| 2.3. MOBİLİTE | 13 |
| 2.4. III-V GRUBU YARI İLETKENLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ..... | 15 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 18 |
| TEORİ VE DEĞERLENDİRME..... | 18 |
| 3.1. ENERJİ BANT ARALIĞININ TERMODİNAMİK TANIMI | 18 |
| 3.2. GaAs ENERJİ BAND ARALIĞI VE SAF ÖZELLİKLERİ | 25 |
| 3.3. DÜŞÜK ALAN ELEKTRON MOBİLİTESİ | 34 |
| 3.1.1. Katkı Atomları | 35 |

| | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------|---------------------|
| 3.1.2 Akustik Fononlar | 36 |
| 3.1.3 Optik Fononlar..... | 38 |
| | |
| BÖLÜM 4 | 44 |
| SONUÇ | 44 |
| KAYNAKLAR | 45 |
| | |
| EK AÇIKLAMALAR A..... | 48 |
| KISMİ MATLAB KODLARI..... | 49 |
| | |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 52 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Alan Wilson'a ait bant teorisi | 2 |
| Şekil 2.1. Katkılanmamış yarı iletkenin bant yapısı..... | 8 |
| Şekil 2.2. Katkılanmamış yarı iletkenin enerji bant aralığı gösterimi..... | 9 |
| Şekil 2.3. Donör ve Akseptör seviyesi şematik gösterimi..... | 10 |
| Şekil 2.4. Farklı sıcaklık değerlerinde Fermi Enerji dağılımı çizimi | 12 |
| Şekil 2.5. Elektron ve holl mobilitelerinin katkı konsantrasyonuna etkisi..... | 15 |
| Şekil 3.1. Yarı iletkenlerdeki serbest elektron, boşluk ve elektronların-boşluk çiftinin ısısal olarak şematik gösterimi. | 18 |
| Şekil 3.2. Artan sıcaklığa bağı olarak $\Delta C_P(T)$ nin grafiği | 26 |
| Şekil 3.3. GaAs in enerji band aralığının değişimi. Düşük eğri $E_{g\Gamma}$, ortadaki eğri E_{gL} ve yukarıdaki eğri E_{gX} i göstermektedir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi GaAs için sıcaklık arttıkça enerji band aralığı azalma olmaktadır. | 27 |
| Şekil 3.4. GaAs için elektron ve boşluk etkin kütlelerinin sıcaklıkla değişimi. Alttaki eğri elektron için, üsteki eğri boşluk etkin kütlelerini gösterir. 28 | |
| Şekil 3.5. GaAs in taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığı bağı olan değişimi yoğunluk denklemleri ise şöyledir. | 29 |
| Şekil 3.6. GaAs için enerji bantları arasındaki farkın değişim grafiği. | 30 |
| Şekil 3.7. GaAs için dielektrik $\epsilon_\infty(T)$ (alttaki) ve $\epsilon_s(T)$ (üsteki) sabiti nin deneysel ve teorik karşılaştırılması..... | 31 |
| Şekil 3.8. GaAs kritik nokta enerji bant aralığı..... | 32 |
| Şekil 3.9. GaAs için iletim ve değerlik bandı fermi seviyesi. | 33 |
| Şekil 3.10. GaAs için donör ve akseptör enerji seviye diyagramı. | 34 |
| Şekil 3.11. Katkılama ile sıcaklığın mobilite ile değişimi | 35 |
| Şekil 3.12. GaAs için deformasyon potansiyeli nedeniyle oluşan mobilite..... | 37 |
| Şekil 3.13. GaAs için Piezoelektrikten dolayı oluşan mobilitenin sıcaklığa bağı değişimi..... | 38 |
| Şekil 3.14. Polar olmayan mobilitenin sıcaklığa bağı değişimi | 39 |
| Şekil 3.15. Polar optik saçılma nedeniyle oluşan mobilite..... | 40 |
| Şekil 3.16. GaAs için sıcaklığa bağı olarak toplam mobilitenin değişim grafiği..... | 41 |
| Şekil 3.17. GaAs için mobilitenin değişimi. | 42 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 1.1. Bazı metallerin özdirençleri..... | 4 |
| Çizelge 1.2. Bazı yarı iletkenlerin özdirençleri..... | 4 |
| Çizelge 2.1. II ve VI grup saf yarı iletkenler. | 6 |
| Çizelge 2.2. Yarı iletkenlerin enerji bant aralığı değerleri..... | 9 |
| Çizelge 2.3. III-V Grubu yarı iletken bileşikler | 16 |



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- E_c : iletkenlik band sınırı
 E_v : değerlik band sınırı
 E_c : iletkenlik banddaki potansiyel enerji
 E_g : değerlik banddaki potansiyel enerji
 E_f : fermi enerjisi
 γ : birim hacim ağırlığı
 $\Gamma(x)$: gama işlevi
 K : bolztman sabiti
 ρ : öz direnç
 ΔE_c : iletkenlik bandındaki potansiyel enerji
 ΔE_v : değerlik banddaki potansiyel enerji
 e^- : serbest elektron
 e^+ : serbest elektron boşluğu
 T : sıcaklık
 P : basınç
 K : bozltman sabiti
 m_e : elektronun etkin kütlesi
 m_h : boşluğun etkin kütlesi
 v_h : boşluğun hizi
 v_e : elektronun hızı
 ρ : öz direnç
 μ : mobilite
 λ : dalga boyu

Ag : gümüş

Ar : argon

Au : altın

Cu : bakır

GaN : galyum nitrit

CuO : bakır oksit

GaAs : galyum arsenik

Ge : germanyum

Si : silisyum

ZnO : çinko oksit



BÖLÜM 1

GİRİŞ

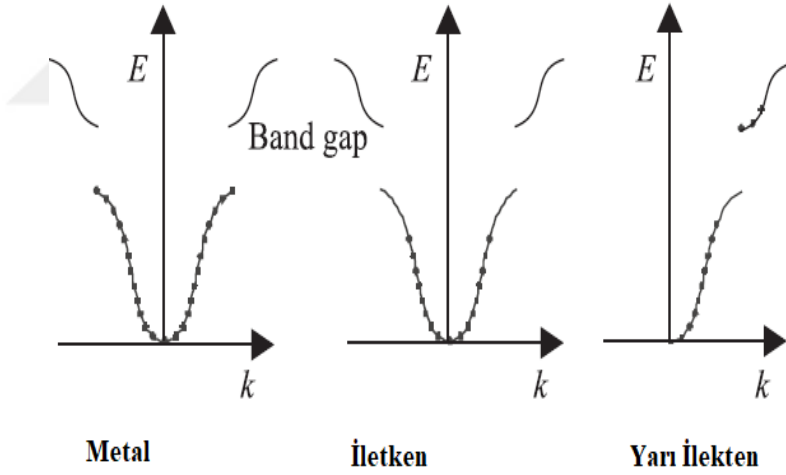
İnsan zihninin anlamakta en çok zorlandığı husus bir şeyin üssel olarak büyümesidir. Üssel büyüme zamana bağlı olarak bir şeyin ikiye beşe yediye katlanmaya devam ettiğinde sayısal ifadenin ne kadar büyüyebileceğidir. Yarı iletken teknolojisinin dünyayı yeniden şekillendirdiğine şüphe yok daha önce bir insanın hayal edilebileceği birçok şeyin ötesindedir.

İlk kez yarı iletken tabiri 1782 yılında Alessandro Volta tarafından kullanılmıştır [1].1883 yılına Michael Faraday tarafından ilk kez bir yarı iletkenin direncinin Ag_2S sıcaklığa bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir [2]. Yarı iletkenlerin sıcaklığa olan bağımlılıklarını kapsamlı bir nicel analizini ve yine aynı şekilde Ag_2S ve Cu_2S 'in sıcaklığın elektrik iletkenliğine etkisini 1851'de Johann Hittorf tarafından yayınlandı [3]. 1874 yılında Karl Ferdinand Braun metal sülfat proplar kullanarak yarı iletken malzemede iletkenliği ve akımı gözlemlemiştir, yine aynı yıl Arthur Schuster tarafından vidalarla bağlanmış bakır tellerden yapılmış bir devrede elektron akışı gözlemlenmiştir. Schuster bunu tespit etmesi ile beraber etkisinin sadece devrelerde kullanılmadığı zamanda gösterdiğini ortaya çıkartarak yeni bir yarı iletken olan bakır oksidi (CuO) keşfetmiş oldu [4]. 1929'da Walter Schottky, bir metal-yarı iletken ara yüzeyi bir bariyer bulunduğunu deneysel olarak doğruladı [5].

Teorik olarak yarı iletkenlerin tarihsel gelişimi ise; 1878'de Edwin Herbert, Hall Etkisini keşfetti bu kuram daha sonra yarı iletken malzemelerin özellikleri incelemek için kullanılmıştır [5-6]. Elektronun J. J. Thomson tarafından keşfedilmesinden kısa bir süre sonra, bazı bilim insanları metallerde elektron bazlı iletim teorilerini önerdiler. Bunlardan en sıra dışı olanı Eduard Riecke (1899) teorisi özellikle ilgi çekicidir, çünkü farklı taşıyıcı (iyon konsantrasyonu) yoğunluğunda ve hareketliliklerde (mobilité) hem

negatif hem de pozitif yük taşıyıcılarının varlığını kuramsallaştırmıştır [7].

1908 senesinde Karl Baedeker bakır iyodürün (CuI) iletkenliğinin stokiyometriye taşıdığı iyot içeriğine bağlı olduğunu gözlemledi [8]. Aynı zamanda, bu malzemede Hall yükünün pozitif yük taşıyan taşıyıcıları belirterek ölçmüştür [9]. 1914'te Johan Koenigsberger katı halde bulunan malzemelerin iletkenliklerine göre sınıflandırma yaptı [9]. Metal iletkenler ve yarı iletkenler malzemeler üzerine, 1930 senesinde Bernhard Guddan gözlemlerine göre kimyasal olarak saf halde yarı iletken olmadığı sadece katılama ile yarı iletken elde edilebildiği yönünde görüş bildirdi [10]. 1930'da Rudolf Peierls, tarafından yarı iletken malzeme fiziğinin de uygulanan yasak alan kuramını sundu. Ayrıca 1930'da Kronig ve Penney analitik bir periyodik potansiyel modeli geliştirdi. 1931 senesinde Şekil 1.1'de görüldüğü gibi Alan Wilson, boş ve dolu enerji bantlarına dayanan katı hal bant teorisini geliştirmiştir [11].



Şekil 1.1. Alan Wilson'a ait bant teorisi [11].

Wilson ayrıca yarı iletkenlerin iletkenliğinin katılanmadan kaynaklandığını ispatladı [12]. Aynı yıl Heisenberg yarı iletkenlerde hole (deşik) kavramını geliştirdi. 1938'de Walter Schottky ve Neville F. Mott birbirlerinden bağımsız metal-yarı iletken birleşimden geçen bir yarı iletken akım modellerini geliştirdiler [13].

1938'de Boris Davydov, bakır oksit (CuO) diyotun ve p-n bağlantısındaki taşıyıcı yoğunluklarının rekombinasyonunu içeren bir bakır oksit (CuO) doğrultucu teorisi

sundu. Ayrıca yüzey durumlarının önemini de belirtti. 1942'de Hans Bethe, termiyonik emisyon kuramını geliştirdi [13].

1940 yılların sonlarına yarı iletken aygıtların (Transistör, MOSFET, BJT, FET, PNP ve diğer entegre elemanları) ortaya çıkmasındaki sonraki elli yıl içinde elektronik endüstrisinde çok köklü değişikliklere gün yüzüne çıktı. Daha önceki devrelerin tek bir elemanından yüzlerce kat küçük bir tabaka üstüne yerleştirme fikri 1958 yılında Jack Kilby nin tüm bileşenleri ve yarı iletken çipi aynı yarı iletken malzemedan yapılmış bir monolit üzerinde denemiştir. Böylece tüm parçalar aynı monolit bloğundan yapılması ve onların birbirine bağlanması için gereken metalin de üst tarafa bir katman olarak eklenmesi ayrı parçalara olan ihtiyacı ortadan kaldırmış oldu. Böylece geliştirilen yöntemler ile yüksek mobiliteli transistörler ve devre elemanları yapılmaya başlanmıştır. Sözü edilen deneysel MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) gibi kristal büyütme yöntemleri ile birkaç atomik tabakalı düşük boyutlu sistemlerin çok temiz olarak büyütülmesi yöntemi ile yeni teknolojik gelişmelere kapı aralamış olup buna binaen yarı iletken araştırmaları ön planda yer alan yeni araştırma geliştirme (AR-GE) konularına ışık tutmuştur [11-12]. Daha sonra ise tüm bileşenlerin tek bir silikon tabaka üzerine yerleşilmesi ile işlemlerin daha sorunsuz bir şekilde yapılmasına imkân tanıdı. Son yıllarda öylesine minimal sistemler tasarlanmıştır ki, minimalizasyonun sınırlarını yarı iletken malzemenin kalitesi (Hetero Yapıları) sıcaklık, basınç termodinamik faktörler tayin etmektedir.

Bilindiği üzere; elektronik malzemeleri göz önüne aldığımızda en önemli özellikler arasında özdirenç önemli bir fiziksel parametre olarak durmaktadır. Elektronik malzemeleri dirençlerine göre sınıflandırılması şu şekildedir.

- Metaller
- Yarı iletkenler
- Yalıtkanlar

Metaller ve yarı iletkenler arasındaki ilişki yarı iletkenlerin özdirencinin sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermesidir. Metaller sahip oldukları serbest elektronlardan

dolayı iyi iletken olup enerji bant aralıkları örtüşmektedir. Ayrıca yarı iletken malzemelerin enerji bant aralıkları 5 eV küçük olup, katkı malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Yalıtkan malzemeler ise cam ve seramik gibi enerji bant aralıkları 5 eV büyük olup iletken özellikleri düşük seviyededir. Kimyasal açıdan saf metallerde özdirenç sıcaklıkla doğrusal olarak artmakta iken katkı yapılmamış yarı iletkende özdirenç, saf metallerin aksine sıcaklık arttıkça üstel olarak küçülmektedir.

Çizelge 1.1. Bazı metallerin özdirençleri.

| Metal | $\rho(\times 10^{-9} \Omega m)$ |
|-----------|---------------------------------|
| Bakır | 15.7 |
| Altın | 22.8 |
| Platinyum | 98 |
| Gümüş | 14.6 |

Çizelge 1.2. Bazı yarı iletkenlerin özdirençleri.

| Yarı iletken | $\rho(\Omega m)$ |
|--------------|---------------------|
| Ge | $10^{-3} - 10$ |
| Si | $0.1 - 10^3$ |
| ZnO | $10^{-2} - 10^{-4}$ |
| GaAs | $10^{-6} - 10^{-2}$ |

Yarı iletkenlerin özdirenci aşağıdaki formül ile hesap edilmektedir.

$$\rho = A \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1.1)$$

Burada E_g yarı iletkenin yasak band aralığını, k Boltzmann sabitini ve A ise temas edilen yüzey alanını ifade eder, T ise sıcaklığı göstermektedir.

Denklem 1.1'den anlaşıldığı üzere, metal ve yarı iletkenlerin iletkenlik özelliği sıcaklığa bağlı olarak değişimi ifade etmektedir.

Genel itibari ile metallerin atomik yapısına baktığımız zaman, atomların tam iyonlaşmış durumda olduğunu gözlemleriz. Bu sebepten dolayı elektronların konsantrasyonu metallerden yüksektir. Metallerde sıcaklık arttıkça elektronların konsantrasyonu değişmemektedir, lakin mobiliteleri ise azalmaktadır [14]. Metallerin özdirenci sıcaklıkla artmakta veya iletkenlik ile küçülmektedir. Katkısız yarı iletkenlerde ise metallerin aksine elektronların konsantrasyonu sıcaklık arttıkça üssel olarak artmakta ve elektronların mobilitesi ise azalmaktadır [15].

Mevcut yarı iletken esaslı optoelektronik cihazlar arasında yaygın potansiyel uygulamaları bulunan diyodlar, transistörler, sensörler ve MOSFET'ler halihazırda AlGaAs, GaAs, InGaN ve GaN gibi buna benzer II-VI ve III-V gruplarını içeren elementler ve bileşiklerden teşekkül ettiği görülmekte ve bu tür bileşiklerin üzerine kurulu yarı iletken optoelektronik cihazların, süreksizlik bölgesinde görülen fiziksel parametrelerin güncel modern cihazların verimliliğini etkileyen faktörler arasında sıcaklık, konsantrasyon ve basınç gibi etkenler yanında dielektrik sabiti artmakta iken, yarı iletken malzemenin etkin kütledeki değişim, aynı şekilde basıncın artmasına bağlı olarak GaAs yarı iletkenlerinin enerji bant aralığı ve heteroyapıların yarı iletkenlerin performansını incelenmesi amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 2

YARI İLETKEN MALZEMELER

2.1.YARI İLETKEN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Yarı iletken malzemeler, enerji bant aralıkları yalıtkan ile iletkenler arasında olan malzemeler olarak tanımlanabilir, diğer bir ifade ile yarı iletkenler mutlak sıfırda elektronlar tarafından tamamen doldurulan bir valans bandına sahip olan ve bu değerlik bandı mutlak sıfırda boş bir banttan küçük bir enerji aralığı ile ayrılmış olan kristal halindeki bir metal bir yarı iletken olarak bilinir. En genel haliyle, yarı iletkenler silisyum, germanyum, selenyum, tellür, galyum arsenik, indiyum arsenik, silisyum karpit, indiyum, antimonin, kurşun, sülfür gibi saf kimyasal elementlerdir [16]. Bu malzemeler, katı cisimlerin en ilginç ve en önemli sınıfını oluşturur. Yarı iletkenler, metallerden yalıtkanlara kadar uzanan, çok farklı kullanım alanlarına sahiptir.

Çizelge 2.1. II ve VI grup saf yarı iletkenler.

| II | III | IV | V | VI |
|----|-----|----|----|----|
| Be | B | C | N | O |
| Mg | Al | Si | P | S |
| Ca | Ga | Ge | As | Se |
| Sr | In | Sn | Sb | As |
| Ba | Tl | Pb | Bi | Sb |

Yarı iletkenlerin özdirençleri oda sıcaklığında 10^{-2} - 10^{-10} Ω .cm aralığındadır. Bu aralık iletkenler için 10^{-6} Ω .cm ve yalıtkanlar için 10^{14} - 10^{20} Ω .cm dır. Mutlak sıfırda yarı iletken malzemeler saf kristal yapıda oldukları için yalıtkan özelliği göstermektedir.

Yarı iletken olma özelliği ise malzemenin çeşitli şekillerde uyarılması, örgü yapı kusurları veya kimyasal düzende meydana gelen değişiklikler sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu tür malzemelerin elektriksel iletkenliği, sıcaklığa olarak değişim göstermektedir. Sıcaklık yükseldiğinde ise yarı iletken malzemelerin özdirençleri küçülmektedir [17].

Yarı iletken malzemelerin metaller ve yalıtkanlardan farklı özellikler göstermesi, bu tür malzemeler üzerinde yapılan yeni araştırmalara yol açmıştır. On dokuzuncu yüzyılın başlarına kadar uzanan bu özellikteki araştırmaların sonucunda yarı iletkenlerin belirlenmesini sağlayan temel özellikler elde edilmişse de bu özellikler ancak yarı iletkenlerin Band Teorisi ile tam olarak ifade edilmiştir [18].

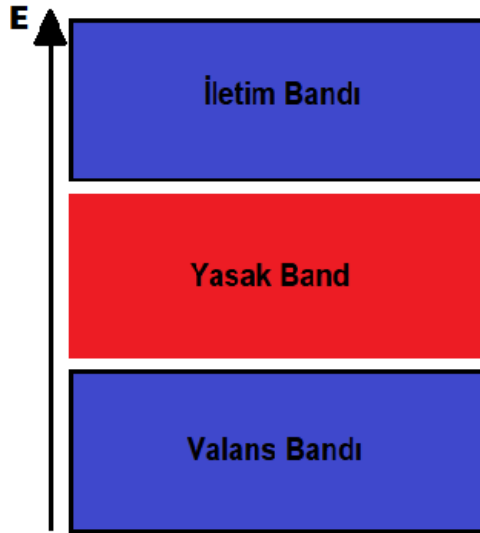
2.1.1. Katkısız (Saf) Yarı iletkenler

Doğada bulunan katı hal malzemelerinin simetri özelliklerine bağlı olarak aynı zamanda karakteristik bir enerji bant aralığı bulunmaktadır. Katılardaki enerji bant yapılarının çeşitliliği elektrik iletiminde belirleyici özellikler ortaya çıkarmaktadır. Mutlak sıfırda yarı iletken malzemelerin tüm elektronları değerlik bandındadır. İletim bandında hiçbir elektron bulunmadığı için bir yalıtkan gibi davranırlar. Band Teorisinde izah edildiği üzere elektronlarla dolu banda valans band (E_v) ve bu bandın akabindeki iletkenliğin gerçekleştiği banda ise iletkenlik bandı (E_c) olarak adlandırılır. Burada iki band arasındaki aralıklı yapı ise yasak enerji band (E_g) aralığı olarak tanımlanır. Yasak enerji band aralığı büyüklüğü iletken malzemenizi tanımlamada ayırt edici bir faktördür. Valans bandı iletkenlik bandında bir enerji ile ayrılıyorsa özdirenci büyük bir malzemedir dolayısı ile yalıtkan olarak sınıflandırılır. İletkenlik bandı valans bandına yakın veya üst üste bir görünüme sahip ise bu sefer malzemeniz iletken dir yani malzemenin özdirenci çok küçük olarak ifade edilir. Elektriği çok iyi bir şekilde ileten malzemeler metaller olarak tanımlanırlar. Genellikle yarı iletken malzeme ile yalıtkan malzeme arasındaki enerji band aralığı çok belirgin değildir.

Bunun için dolu band ile boş band arasındaki band aralığı 0.3 eV den küçük ise yarı iletken malzemeler adlandırılır [19].

Yarı iletkenleri metallere ayıran en önemli özellik sıcaklıktır, iletkenliklerinin metallere ile yalıtkanlar arasında olması ve sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmesidir. Diğer bir ifade ile sıcaklığın artması ile metallere direnci artarken yarı iletkenlerin direnci azalmaktadır.

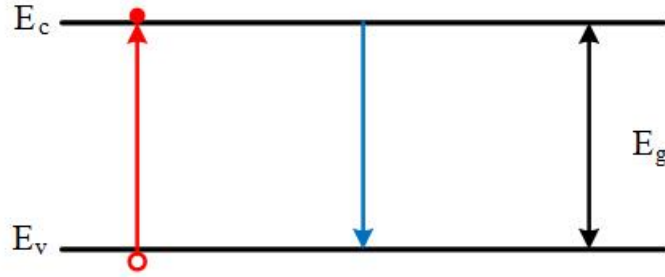
Yarı iletkenlerin valans bandındaki elektronlar, yasak enerji band aralığına geçebilecek kadar enerjiye sahip olduklarında iletkenlik bandına geçerler. Valans bandından ayrılan elektronların bıraktığı bu boşluklu yapıya deşik adı verilir. Böylelikle elektrik alan altındaki holler - deşikler pozitif yüklü bir taşıyıcı gibi işlem yaparlar. İşte bu nedenden ötürü yarı iletken malzemede iki tip taşıyıcı vardır. Metallerde elektriksel iletkenlik sadece elektronlarla sağlanırken yarı iletkenlerde hem elektronlar hem de holler vasıtası ile iletkenlik sağlanmaktadır. Yarı iletkenlerin asıl üstünlüğü buradan gelmektedir.



Şekil 2.1. Katkılanmamış yarı iletkenin bant yapısı [20].

Enerjisi düşük olan enerji bantları difüzyon işlemi ile elektronlar hareketliliği ile dolar. Enerji açısından yüksekçe olan enerji bandındaki elektronlar sistemin fiziki

özelliklerinin tespitinde önemlidirler. Özellikle valans ve iletim bantları ve bu enerji bantları arasındaki E_g enerji aralığı önem arz etmektedir [21]. Valans bandı E_g enerji aralığının alt kısmındadır ve E_v ile sembolize edilir. İletim bandı E_g enerji aralığının üstündedir ve E_c ile ifade edilir [22].



Şekil 2.2 Katkılanmamış yarı iletkenin enerji bant aralığı gösterimi [19].

Çizelge 2.2. Yarı iletkenlerin enerji bant aralığı değerleri [23].

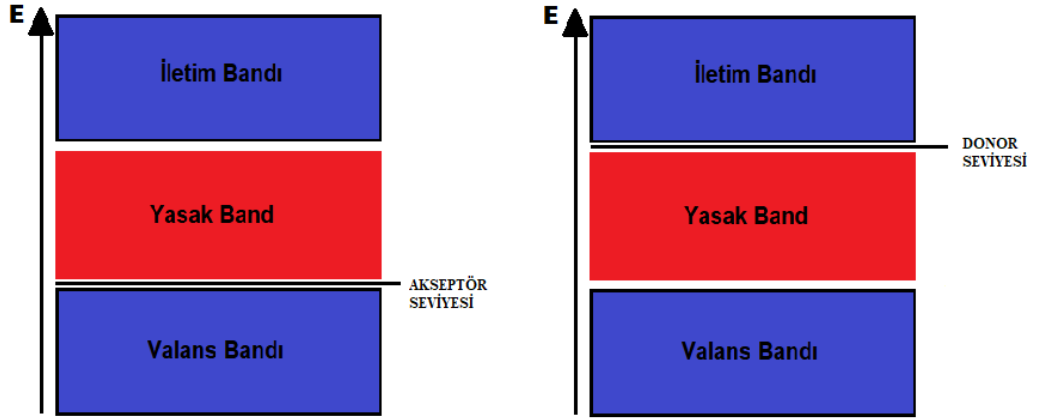
| Kristal Yapı | 0 K E_g (eV) | 300 K E_g (eV) |
|--------------|----------------|------------------|
| Si | 1.17 | 1.14 |
| Ge | 0.744 | 0.67 |
| GaAs | 1.52 | 1.43 |
| ZnS | 3.91 | 3.6 |
| ZnO | 3.436 | 3.2 |
| InP | 1.42 | 1.35 |
| GaP | 2.32 | 2.26 |
| CdS | 2.582 | 2.42 |

2.1.2. Katkılı Yarı İletkenler

Saf yarı iletkenin örgü yapısını bozmayacak bir şekilde, içerisine yabancı atom veya atomlar katılırsa bu işleme katkılama denir. Saf bir yarı iletkende elektron ve hollerin sayısı oldukça düşüktür, katkı atomlarının küçük bir müdahalesi bile yarı iletken malzememizin parametrelerinde büyük bir değişikliğe sebebiyet verir. Eğer IV. Grup elementlerinden yarı iletken olan Ge ve Si, V. Grup elementlerinden herhangi biri ile katkılanırsa yasak enerji bandında ve iletkenlik bandının altında bir seviye oluşur bu seviyeye verici seviye (donor), katkılanan atoma da verici (donor) atom olarak ifade

edilir. Böylece elde edilen yeni tip malzemeye n-tipi malzeme denir. Periyodik tablonun IIIA grubundan bir element, IV. Grup elementlerinden yarı iletken olan Ge ve Si içerisine katılınırsa yasak enerji bandında ve valans bandının üzerinde bir seviye oluşur buna alıcı (akseptör) seviyesi adı verilir. Katkılanan atomda alıcı (akseptör) atom olarak adlandırılır böylece p-tipi malzeme elde edilir. Yine aynı şekilde sıcaklığa bağlı olarak p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerinin valans bandından ve iletkenlik bandından alıcı (akseptör) seviyesi geçiş mümkün olabilmektedir.

Katkılı yarı iletkenler elektronik ve optik özellikleri sayesinde istenilen şekilde ayarlanabilen devre elemanları yapılmasına imkân dâhilindedir. Son yüzyıl içerisinde diyotların, transistörlerin, sensörlerin ve MOSFET'ler ileri teknolojilere ve günlük hayatta ver almasının, teknolojiye geniş kullanım alanlarına sahip olmasının sebebi budur.



Şekil 2.3. Donor ve Akseptör seviyesi şematik gösterimi.

2.1.3. Organik ve İnorganik Yarı İletkenler

Bu yapılar karbon ve hidrojen atomlarını ihtiva ettikleri için organik yarı iletkenler olarak bilinirler. Organik yarı iletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla üstel bir artış göstermektedir. İletkenlik mekanizmaları yarı iletkenlerinkine benzerlik gösterir [24].

İnorganik yarı iletken malzemelere örnek olarak silisyum, germanyum ve galyum arsenik verilebilir. Bu yarı iletkenler katkısız, katkılı yarı iletkenler sınıfındaki yarı iletkenleri de kapsar.

Bu tür malzemelerin başlıcaları, bileşik yarı iletkenler, alaşım yarı iletkenler, oksit yarı iletkenler olarak adlandırılır.

Alaşım tipi yarı iletkenler, CuFeS_2 , CuInSe_2 , AgInSe_2 ve CuFeSnS_4 gibi üçlü ve dörtlü alaşımlardan üretilir. Bunları katkılandırma zor olduğundan dolayı fazla rağbet edilmemiştir. Bunların yasak enerji aralıkları 0.55-3.5 eV aralığındadır ve band yapıları III.-V. ve II.-VI. grubu yarı iletkenlerinden farklılıklar gösterir. Bu malzemeler doğrudan band yapısına sahip olduklarından, optoelektronik ve lazerde kullanılmaktadırlar [25].

Oksit yarı iletkenler; metal oksitler diğer yarı iletkenlere nazaran daha büyük yasak enerji band aralığına sahip yarı iletkenlerdir. Bilinen en iyi oksit yarı iletkenler Cu_2O , ZnO ve ReO_3 dir. VO_2 ve V_2O_3 gibi oksitler ise yüksek sıcaklıkta metalik iletkenlik gösterirken düşük sıcaklıklarda yarı iletken özelliğe sahiptirler. SrTiO_3 ve BaTiO_3 oksitlerin ise katkılama ile yarı iletken özellik gösterdikleri keşfedilmiştir [25].

Yarı iletkenler ikiden fazla elementin birleşmesiyle de elde edilebilir. Bu yarı iletkenlere bileşik yarı iletken denir. İki element içeren yarı iletkenlerin kimyasal formülü AB grubu yarı iletkenleri diye gösterilir. A elementinde üç valans elektronu ve B elementinde de beş valans elektronu var ise bu ikili bileşik yarı iletken grubuna “III-V grubu yarı iletkenler” denir. GaAs, InP ve GaP örnek olarak verilebilir. Üçlü ve dörtlü yarı iletkenlerde mevcuttur. AlGaN, InGaAs, InGaAsP yarı iletkenleri bunlara örnek gösterilebilir [25].

2.2. FERMİ ENERJİ SEVİYESİ VE TAŞIYICI KONSANTRASYONU

Fermi enerjisi, elektronların toplam kimyasal potansiyeli veya elektrokimyasal potansiyeli ile birlikte tanımlanır. Bir cismin Fermi enerji seviyesi, o cismin termodinamik olarak enerji seviyesinin elektronlar tarafında doldurulma seviyesini

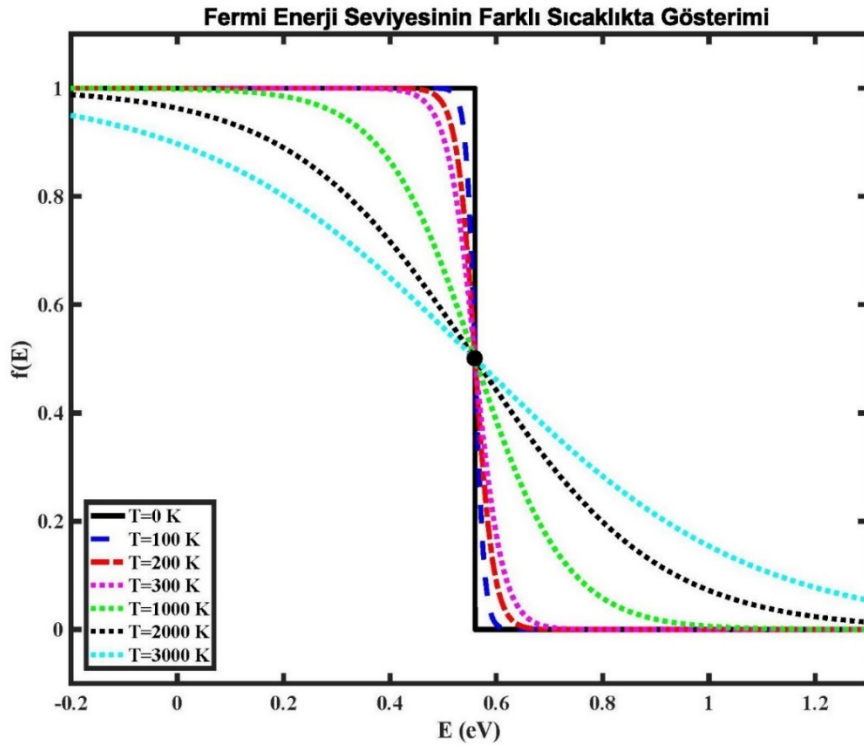
ifade eder, yarı iletkenlerde ise Fermi enerjisi 0 K'de mevcut elektron enerji seviyelerinin en yüksek konumuna karşılık gelir.

Bir yarı iletkenin önemli özelliklerinden birisi de birim hacimdeki taşıyıcı yoğunluğudur ve bu yarı iletkenin elektriksel özelliğini tayin etmektedir. Yarı iletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa değişmekteyken, yarı iletkendeki taşıyıcıların sayısını bulmak için Fermi-Dirac dağılım fonksiyonundan yararlanılır.

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir [26],

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(E - E_F)}{k_B T}\right]} \quad (2.1)$$

Farklı sıcaklık değerlerine ait Fermi dağılımı matlab yardımı ile çizilerek gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı sıcaklık değerlerinde Fermi Enerji dağılımı çizimi.

0 K'de tüm elektronlar Fermi seviyesinden daha küçük enerjiye sahiptir. Bir elektronun Fermi enerjisinin altında bulunma ihtimali 0 K'de yüzde yüzdür. Yarı iletken malzemenin sıcaklığı artınca elektronlar kazandıkları enerji ile Fermi enerjisinin hemen üstündeki seviyelere çıkarlar.

Saf yarı iletkende elektronların ve hollerin sayısı eşittir, iletim bandındaki elektronların konsantrasyonu ise,

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad (2.2)$$

Valans bandındaki konsantrasyonu,

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (2.3)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada, E_F = Fermi seviyesini, E_V = değerlik bandını E_C = iletkenlik bandını, m_e^* = elektronların kütlelerini ve m_h^* = hollerin kütleleridir.

Katkılı yarı iletkenlerde tüm donör elektronlar valans bandına geçtiği için $n=N_d$ dir. Böylelikle taşıyıcı konsantrasyonu;

$$np = 4 \left(\frac{kT}{2\pi h^2} \right) (m_e^* m_h^*)^{3/2} e^{-E_g/kT} \quad (2.4)$$

Denklemini şeklinde ifade edilmektedir [27,28].

2.3. MOBİLİTE

Mobilite, uygulanan elektrik alanın sürüklenme hızının, oranının şiddetinin bir parçasıdır.

$$v_{dn} = -\frac{q\tau p}{m_h^*} \varepsilon \equiv -\mu_n \varepsilon \quad (2.5)$$

μ_n ise iletkenlik bandındaki mobilite olarak hesaplanır. Mobilite birim olarak $cm^2V^{-1}S^{-1}$ dir. 2.5 denklemini kullanarak mobilite şu şekilde ifade edilir [29].

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_e^*} \varepsilon \quad (2.6)$$

Elektronların durulma zamanıyla doğru etkin kütle ile ters orantılıdır. Mobilite durulma zamanı ile doğru orantılı olduğu için sıcaklıkla azalmaktadır. Çünkü termal titreşimleri ya da fononlar artan sıcaklıkla artar. Benzer şekilde safsızlıklar ve kusurlar elektrolar saçılmalarına sebebiyet vermektedir bu yüzden mobilite artan safsızlık ve kusur dengeleri ile de azalır.

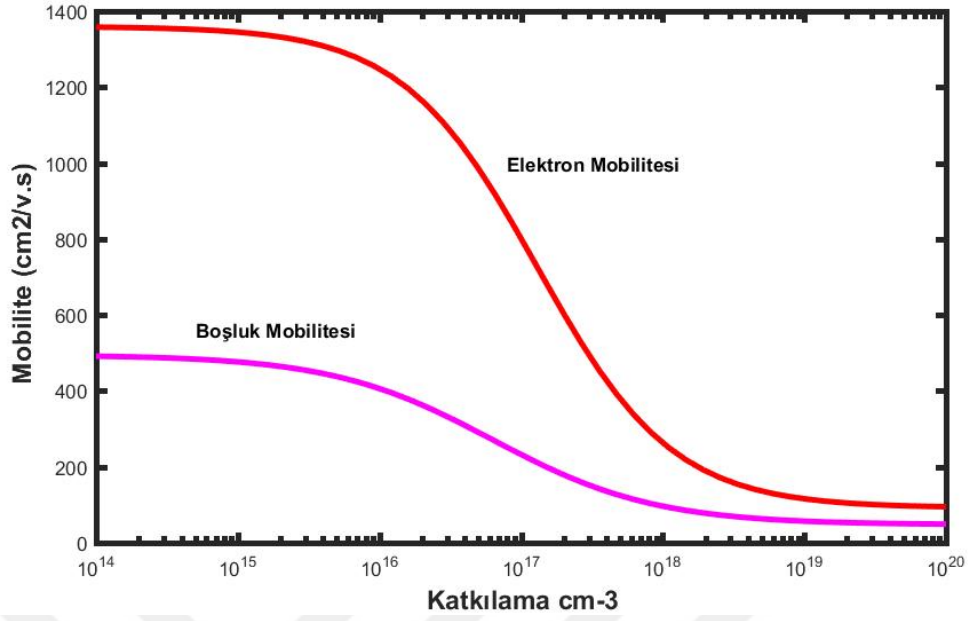
Benzer bir yaklaşım valans bandındaki holler için yapılabilir ve;

$$v = \frac{q\tau p}{m_h^*} \varepsilon \equiv \mu_p \varepsilon \quad (2.7)$$

Burada μ_p ; $\mu_p = \frac{q\tau p}{m_h^*}$ ile ifade edilen hol mobilitesidir. Elektronlar ve hollerin gerçek etkin kütleleri birbirinden farklıdır.

m^* İletkenlik etkin kütlesi olarak tanımlanır. Etkin kütleyi aşağıdaki şekilde nümerik olarak tanımlayabiliriz.

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{m_l^*} + \frac{2}{m_t^*} \right) \quad (2.8)$$



Şekil 2.5. Elektron ve holl mobilitelerinin katkı konsantrasyonuna etkisi.

2.4. III-V GRUBU YARI İLETKENLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Günümüz teknolojisinde III-V ve II-VI yarı iletken bileşikleri, lazer uygulamalarından detektör uygulamalarına ve elektronik alanında ise; diyot, varistör, transistor uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede çalışılan yarı iletken yapılardır. Yarı iletken devre elemanları uygulamaları ilk zamanlarda sadece Si ve Ge tabanlı yarı iletken modellemeleri kapsamaktaydı günümüzün gelişen teknolojisi ile birlikte haberleşme, sağlık ve savunma alanlarında, yukarıda anlatılan bu bileşiklerin ikili, üçlü hatta dördü bileşikleri literatürde ve uygulamada geniş yer kapsamaktadır [1,2].

Çizelge 2.3 II-V Grubu yarı iletken bileşikler

| II-V Grubu Yarı iletken Bileşikler | | |
|---|------|------|
| AlN | GaN | InN |
| AlAs | GaP | InP |
| AlSb | GaAs | InAs |
| | GaSb | InSb |

III-V grubu alaşımlar bilimsel özelliklerinden dolayı son yıllarda detaylı bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır [30]. Yarı iletkenlerin yasak enerji aralıkları yapılarının wurtzite bileşimlerini elde etmek mümkündür [31]. Bu bileşimlerden yeşilden morötesi bölgeye kadar dalga boyu aralığında aktif olan optik cihazlar üretilebilmektedir [32]. Son on yılın ortalarına kadar sadece GaN için yapılmış hesaplamalar vardı [33]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar göstermektedir ki çağımızın veri iletişimi alanında en büyük gereksinimleri biri, kullanılan cihazlarda malzeme miktarını daha aza indirme ve daha az enerji harcayarak cihazların kalitesini arttırmaktır. GaAs ve grup III-IV bileşikleri üzerinde dayandırılarak yarı iletken aletlerin bilim ve teknolojiye etkileyici ilerlemesine rağmen, sıcaklık ve basıncın artmasına bağlı olarak malzemelerle ilgili daha iyi anlaşılacak konular bulunmaktadır [34].

GaAs ve III.-V. grup bileşiklerinin enerji band aralığı, elektronun ve hollerin etkin kütlesi sıcaklığın artmasına bağlı olarak azalırken, dielektrik sabiti artmaktadır. Basıncın artmasına bağlı olarak ise GaAs ve grup III-V bileşiklerinin enerji bant aralığı artarken, dielektrik sabitleri azalmaktadır. Yani yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle heteroyapılı bipolar ve alan etkili transistorların performansı enerji band aralığına ve diğer saf özellikleri bağlı olarak değişmektedir. Böylesi cihazların modellenmesi ve tasarımı için GaAs ve grup III-V bileşiklerinin saf özelliklerine sıcaklığın ve basıncın iyice anlamak gerekmektedir.

Sıcaklığın artmasıyla yarı iletken enerji band aralığındaki değişmeler iki şekilde olmaktadır.

- Örgü sabitlerinin termal genişmesi
- Serbest elektronların ve boşlukların fononların etkileşmesi

Enerji bandına sıcaklığın etkisinde inceleyen teorik çalışmalara müteakiben, deneysel modellerde geliştirilmiştir. Dolayısıyla bir termodinamik model ile yarı iletken enerji band aralığına ve diğer saf özelliklerine sıcaklığına etkisini belirlemek mümkün olmaktadır.

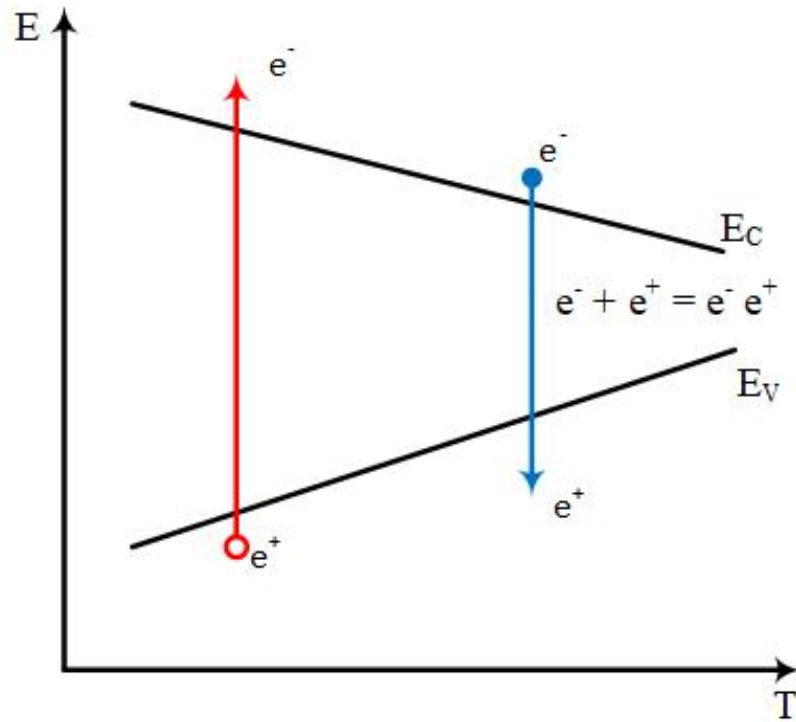


BÖLÜM 3

TEORİ VE DEĞERLENDİRME

3.1. ENERJİ BANT ARALIĞININ TERMODİNAMİK TANIMI

Yarı iletkenlerdeki serbest elektronların, boşluklar ve birleştirilmiş elektron-boşluk çiftleri arasında dengeyi verilen sıcaklık ve basınçta kimyasal parçacıklar için Gibbs denge şartı geçerlidir [35].



Şekil 3.1. Yarı iletkenlerdeki serbest elektron, boşluk ve elektronların-boşluk çiftinin ısısal olarak şematik gösterimi.

Sıcaklık 0K üzerinde yükseldikçe değerlik bandındaki elektronların iletim band kuyusunda hareket ederler ve değerlik bandında boşluklara bırakırlar. Geriye kalan elektronların deşik çifti, Gibbs denge şartıyla verilir.

$$e^{-} + e^{+} = e^{-} \cdot e^{+} \quad (3.1)$$

Burada e^{-} serbest elektronun e^{+} ise serbest boşlukların ve $e^{-} \cdot e^{+}$ birleştirilmiş elektron boşluk çiftini göstermektedir. Elektron ve boşluklar elektrik yükü kimyasal parçacıklar olarak göz önüne alınırsa Gibbs denge denkleminde verilen denklem serbest elektron, serbest boşluk ve birleştirilmiş elektron boşluk çiftinin elektrokimyasal potansiyel cinsinden yazılabilir [35].

$$\mu_n(T, P, n,) + \mu_p(T, P, p) = \mu_o(T, P, x_o) \quad (3.2)$$

Burada $\mu_n(T, P, n,)$, $\mu_p(T, P, p)$, $\mu_o(T, P, x_o)$ sırasıyla serbest elektronların serbest boşluklarının ve elektron- boşluk çiftlerinin elektrokimyasal potansiyelidir [36].

Dejenere olmamış katlandırılmış yarı iletkenlerde serbest elektronların elektrokimyasal potansiyelleri quasi-kimyasal yaklaşımı [veya quasi-Fermi enerji (E_{F_n})], elektronların kimyasal potansiyeli (μ_n) ile mikroskobik elektrostatik potansiyel enerjinin $[-qV(x)]$ toplamı olarak yazması uygundur.

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= E_{F_n} = \mu_n - qV(x) \\ &= \mu_n^0 + kT \ln[n(x) / N_c(x)] - qV(x) \end{aligned} \quad (3.3)$$

μ_n^0 dejenere olamamış elektronların, sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu cinsinden, serbest elektronların standart kimyasal potansiyeli olarak adlandırılır. $[\mu_n^0 = \mu_n^0(T, P)]$

Yani $\mu_n^0(T, P) = \mu_n^0(0, P) + C_{nP}^0(1 - \ln T) + \int_0^P V_{nT}^0(P) dP$ Gibbs serbest enerjisinin

$[\mu_n^0(T, P) = E_c(T, P)]$ olarak yazmak mümkündür. Sabit basınçta μ_n^0 serbest elektronların, örgü fononlarıyla etkileşme enerjisine ve artan sıcaklıkta örgü sabitinin lineer genişlemesinin termal basınç enerjisine eşit olduğu anlaşılır. $kT \ln[n(x) / N_c(x)]$ μ_n^0 nin konsantrasyonu olup, $N_c(x)$ ise iletkenlik band seviyesinin etkin yoğunluğudur. Dejenere ve parabolik olmayan bantlar için $Nv(x) = 2(2\pi m_p kT / h^2)^{3/2}$ dir. Burada h Planck sabiti ve k ise Boltzmann sabitidir.

Kimyasal parçacıklar standart kimyasal potansiyelin tanımından $\mu_n^0(T, P)$ aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mu_n^0(T, P) = \mu_n^0(0, P) + C_{nP}^0(1 - \ln T) + \int_0^P V_{nT}^0(P) dP \quad (3.4)$$

$\mu_n^0(0, P)$, $\mu_n^0(T, P)$ nin 0K deki değeridir. ($P_0 = 1$ bar) C_{nP}^0 dejenere olmamış elektronların standart ısı kapasitesidir ve sabit basınçta ve sıcaklıkta bağımsız olarak değeri $(5/2)k$ ya eşittir. $V_{nT}^0(P) = (\partial \mu_n^0 / \partial P)_T = (\partial E_c / \partial P)$ ise dejenere olmamış elektronların standart hacmi olup sabit sıcaklıkta değeri E_c nin basınç katsayılarına eşittir.

Benzer işlemler quasi kimyasal yaklaşımlarından yararlanarak, serbest boşlukların elektrokimyasal potansiyeli μ_p kimyasal potansiyelinin ve mikroskobik elektrostatik potansiyel enerjisinin toplamı ($qV(x)$) cinsinden yazılır. μ_p Serbest boşluklarının standart kimyasal potansiyeli olarak adlandırılır. Dejenere olmayan boşluklar için sıcaklığın ve basıncın birer fonksiyonudur. $[\mu_n^0(T, P) = -E_v(T, P)]$ μ_p Valans bandında üst kenarından tanımlı olan referans seviyesine hareket eden boşlukların minimum Gibbs serbest enerjisi olarak tanımlanır.

Sabit basınçta μ_p serbest boşlukların örgü fononlarıyla etkileşmesinin titreşim enerjisi ve artan sıcaklığa bağlı olarak örgü sabitinin lineer genişleme enerjidir.

$N_v(x)$ $P(x)$ yoğunluğundaki boşlukların etkin valans band yoğunluğudur. Dejenere ve parabolik olmayan valans bantlar için $N_v(x) = 2(2\pi m_p kT / h^2)^{3/2}$ değerine eşittir $m_p(x)$ boşlukların etkin kütesidir.

Standart kimyasal potansiyelin tanımından $\mu_p^0(T, P)$ aşağıdaki gibi yazılır.

$$\mu_n^0(T, P) = \mu_n^0(0, P) + C_{pP}^0 T(1 - \ln T) + \int_0^P V_{pT}^0(P) dP \quad (3.5)$$

$\mu_n^0(0, P)$, $\mu_n^0(T, P)$ nin 0K deki değeridir. ($P_0 = 1$ bar) C_{pP}^0 dejenere olmamış elektronların standart ısı kapasitesidir ve sabit basınçta ve sıcaklıkta bağımsız olarak değeri $(5/2)k$ ya eşittir. $V_p^0(P)$ Dejenere olmayan boşluklar için standart hacimdir ve sabit sıcaklıktaki eV nin basınç katsayısıdır.

Ancak birleştirilmiş elektron-boşluk çiftleri için elektrokimyasal potansiyel (μ_0) mikroskobik kimyasal potansiyeli içermektedir.

$$\mu_0^0(T, P) = \mu_0^0(0, P) + C_{0P}^0 T(1 - \ln T) \quad (3.6)$$

$\mu_0^0(T, P)$ Standart kimyasal potansiyeli olup, X_0 ise birleştirilmiş elektron-boşluk çiftinin yoğunluğudur. $\mu_0^0(T, P)$ Elektron-Boşluk çiftinin örgü fononlarının etkileşmesinin oluşturduğu titreşim enerjisidir. $kT \ln(x_0)$, $\mu_0(T, P, x_0)$ ye bağlı yoğunluktur.

Elektron- hole çiftinin yoğunluğundaki değişme, serbest elektron ve boşlukların yoğunluktaki değişmeye göre küçük ise Denklem 3.6'daki logaritmik terim ihmal edilir. Böylece $\bar{\mu}_0$ sabit sıcaklıktaki $\mu_0^0(T, P)$ cinsinden yazılır.

$$\mu_0^0(T, P) = \mu_0^0(0, P) + C_{0p}^0 T(1 - \ln T) \quad (3.7)$$

$\mu_0^0(0, P)$, $\mu_0^0(T, P)$ nin 0K deki değeridir. C_p^0 Elektron -Hole çifti için standart ısı kapasitesidir. Elektron- boşluk çifti için, sabit sıcaklıkta $[v_{0T}^0(P)]$ değeri sıfır alınır, $\mu_0^0(T, P)$ basınca bağlı bir terim içermez.

Fermi enerji seviyesinde, termodinamik dengedeki elektronlar, boşluklar ve elektronların boşluk çiftleri için dejenere olmamış katkılı yarı iletkenlerden kütlelerin hareket kanunu şu şekilde yazılır termodinamik denge halinde Denklem 3.2, Denklem 3.3, Denklem 3.5 ve Denklem 3.7 birleştirilirse $E_{F_n} = E_{F_p} = E_F$ halinde,

$$n(x)p(x) = N_c(x)N_v(x) \exp[-\Delta\mu^0(T, P) / kT] \quad (3.8)$$

Yazılır. Burada $\Delta\mu^0(T, P)$ enerji band $E_g(T, P)$ aralığına eşittir. Bu ise elektronların boşlukların ve elektron boşluk çiftlerinin elektrostatik potansiyellerinin toplamına eşittir [36].

$$E_g(T, P) = \mu_n^0(T, P) + \mu_p^0(T, P) - \mu_0^0(T, P) = E_g(T, P) \quad (3.9)$$

Standart basınçta,

$$E_g(T, P) = E_g(0, P) + \Delta C_p^0 T(1 - \ln T) + \int_0^P \Delta V_T^0(P) dP \quad (3.10)$$

$E_g(0, P)$ $T = 0K$ $P_0 = 01$ bar da enerji band aralığıdır.
 $\Delta C_P^0 = C_{nP}^0 + C_{pP}^0 - C_{0P}^0 = (5/2)k + (5/2)k - C_{0P}^0$ Kimyasal reaksiyonun standart ısı kapasitesidir.

$\Delta V_T^0(P) = V_{nT}^0(P) + V_{pT}^0(P) - V_{0T}^0(P)$ Kimyasal reaksiyonun standart hacimdeki değişme olup, basınca bağlılığı aşağıdaki gibidir.

$$\Delta V_T^0(P) = \Delta V_T^0(P_0) [1 - P/B - (1+B')P^2/2B^2] \quad (3.11)$$

$\Delta V_T^0(P)$, P_0 standart basınçtaki kimyasal reaksiyonunun standart hacimdeki değişme enerji band aralığının basınç katsayısı cinsinden yazmak mümkündür.
 $[\Delta V_T^0(P_0) = (\partial E_g / \partial P) T]$ A_1 ve A_2 hacim ve sıkıştırma arasındaki termodinamik ilişkiyi belirler. $[(\partial V_T / \partial P = -V / B)]$ Kimyasal reaksiyon için bu ifadeyi;

$$\Delta V_T^0(P) / \partial P = -\Delta V_T^0(P) / B \quad (3.12)$$

Yazılır. Her iki taradın kısmi türevi alınırsa

$$\partial^2 \Delta V_T^0(P) / \partial P^2 = -(1+B') \Delta V_T^0(P) / B^2 \quad (3.13)$$

B' Bulk modülü olarak adlandırılır ve B' ise basınca göre birinci türevdir. $P = 0$ da $A_1 = -(1/B)$ ve $A_2 = -(1+B')/B^2$ dir. Denklem 3.12'de A_1 değeri A_2 ile yer değiştirilirse,

$$\Delta V_T^0(P) = \Delta V_T^0(P_0) [1 - P/B - (1+B')P^2/2B^2] \quad (3.14)$$

Denklemini yazılır. Sabit dış basınç ve dejenere olmamış katlandırmada, enerji bandı üzerindeki basıncın etkisi 0K sıcaklığından itibaren artmaya başlar. Bir dT sıcaklık

artarsa, yarı iletkenlerde basınç dP kadar artış gösterir. Hacimsel termal $[3\alpha(T) = V^{-1}(\partial V / \partial T)_P]$ genleşme katsayısı ve Bulk Modülü $[B^{-1} = -V^{-1}((\partial V / \partial T)_T)]$ arasındaki ilişkiyi kullanarak, sabit ($dV = 0$) hacimde yarı iletkendeki dT sıcaklığı dP cinsinden yazılır. $dP = -3B\alpha(T)dT = -(b/V)dV = -3B\alpha(T)dT$. Sıcaklığın ve sabit dış basıncın fonksiyonu olarak yarı iletkenin enerji bant aralığının lineer genleşme katsayısı $\alpha(T)$ olarak adlandırılır.

$\Delta V_T^0(P)$ Standart hacmine bağlı olarak enerji band aralığını yazmak mümkündür. Sabit bir dış basınçta ve dejenere olmamış katlandırmada enerji band aralığına basıncın etkisinde sadece sıcaklığın artmasına bağlı olarak artacaktır.

$$E_g(T, P_0) = E_g(0, P_0) + \Delta C_p^0(1 - \ln T) - 3B \times \left[\frac{\partial E_g(T)}{\partial P} \right]_T \alpha(T) T - \partial E_g(T) \quad (3.15)$$

Burada $\partial E_g(T) = (9/2)B(\partial E_g / \partial P)_T \alpha^2(T) T^2 [1 - (1+B)\alpha(T)T]$ olarak verilir ve artan sıcaklığının bağlı olarak örgü sabitinin örgü sabitinin ikinci ve üçüncü mertebe etkileridir. Benzer olarak, Denklem 3.15 ve Denklem 3.11'de kullanılırsa ve integral P 'ye göre alınırsa basıncın parametresi olarak enerji band aralığı bulunur [37].

$$E_g(T, P) = E_g(T, P_0) + (\partial E_g / \partial P)_T \times [1 - P/2B - (1+B)P^2/6B^2] P \quad (3.16)$$

$E_g(T, P)$, T sıcaklığında ve P_0 basıncındaki enerji band aralığıdır.

Denklem 3.15'de termal titreşim enerjisiyle, termal genleşme enerjisini ihtiva etmektedir. Termal titreşim enerjisi, elektronların, boşlukların ve elektron boşluk çiftlerinin örgü fotonlarıyla etkileşmesinden kaynaklanıyor. Termal genleşme enerjisi ise artan sıcaklıkla örgü sabitinin lineer olarak genleşmesinden kaynaklanıyor.

Termal basınç enerjisi ise artan sıcaklığa bağlı olarak, örgü sabitinin lineer genişleme katsayısı neticesinde oluşur.

Denklem 3.16'daki T sıcaklığındaki kimyasal reaksiyonun değişmesiyle ve artan basınçla ilgili olarak elmas yapısındaki yarı iletkenin enerji bant aralığını belirler.

3.2. GaAs ENERJİ BAND ARALIĞI VE SAF ÖZELLİKLERİ

Yüksek sıcaklık ve basınçta yarı iletken cihazların analizinde uygun geçiş denklemlerinin kullanılmasıyla, Fermi enerji denge seviyesi, donör ve akseptör seviyeleri, iletkenlik ve değerlik band kenarlarına göre hesaplanır. Örneğin, yarı iletken bir cihazın saf bölgesinde donör ve akseptör yoğunluğu sıfır alınırsa, Fermi enerji seviyesi iletkenlik ve değerlik banda göre aşağıdaki denklemleri ifade edilir.

$$\begin{aligned} E_c(x) - E_F &= \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln(m_n / m_p) \\ E_F - E_v(x) &= \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln(m_p / m_n) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dejenere olmayan katlandırılmış yarı iletkende donör ve alıcı seviyeleri şu şekildedir.

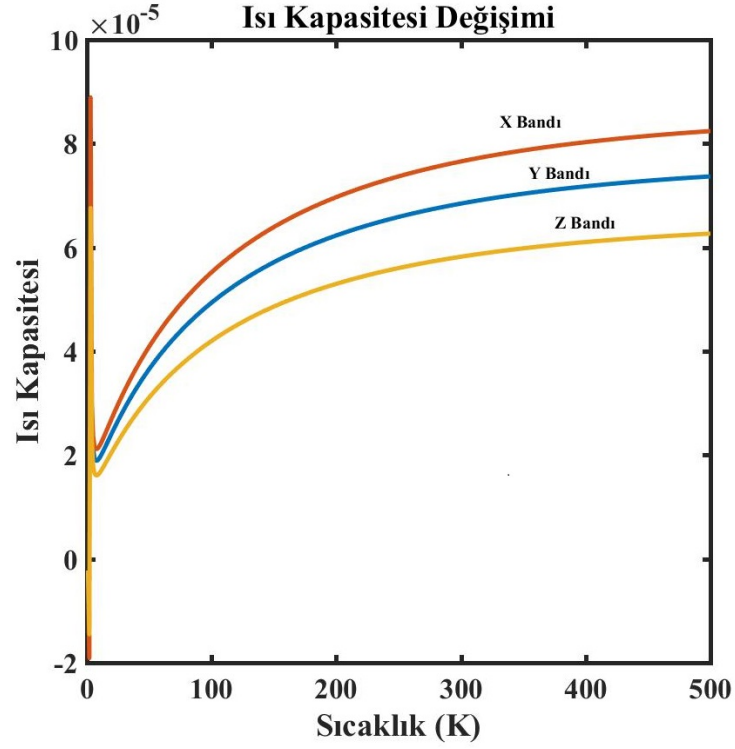
$$\begin{aligned} E_c(x) - E_d(x) &= 13.6 m_n / \epsilon_s^2 \\ E_a(x) - E_v(x) &= 13.6 m_p / \epsilon_s^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

ϵ_s Yarı iletken statik dielektrik sabitidir. GaAs için enerji band aralığı, Varshni'nin yarı deneysel ifadesi ile karşılaştırılır [30].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (3.19)$$

Burada α ve β deneysel verilerdir. GaAs için Varshni'nin deneysel değeri, termodinamik model sonuçları karşılaştırılarak Şekil 3.2'de elde edilir.

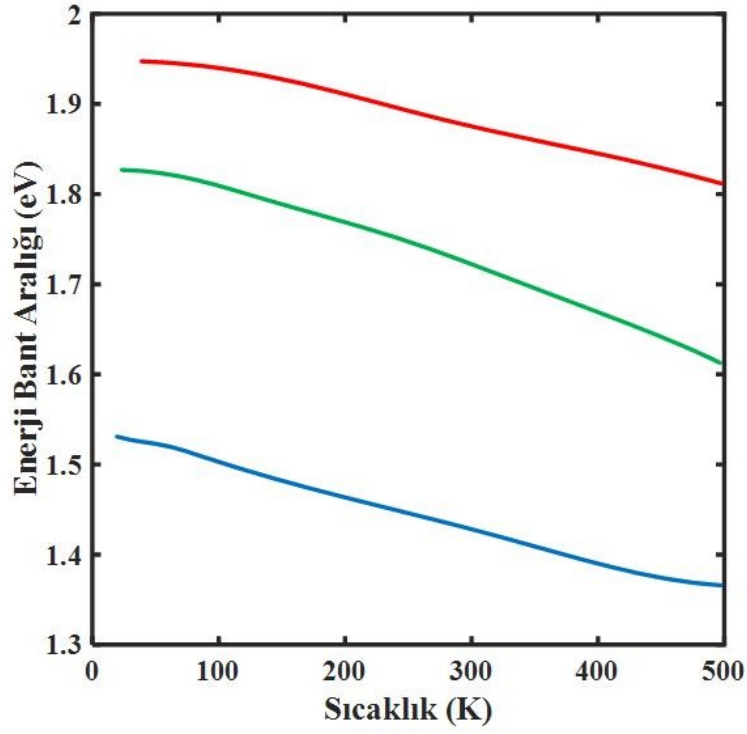
Denklem 3.16 ve Denklem 3.21'de birbirine eşit olması durumunda, $\Delta C_p(T)$ nin artan sıcaklığına bağlı olarak değişim grafiği Şekil 3.2'de gibidir.



Şekil 3.2. Artan sıcaklığı bağlı olarak $\Delta C_p(T)$ nin grafiği.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi ısı kapasitesinin değeri, enerji band aralığındaki bantlara göre, sıcaklık arttıkça artmaktadır.

Denklem 3.16'da ısı kapasitesinin ve artan sıcaklığı bağlı olarak örgü sabitinin lineer genişmesinin ikinci, üçüncü mertebeden etkileri göz önünde alınırsa enerji band aralığı Şekil 3.3'deki gibi çizilir.



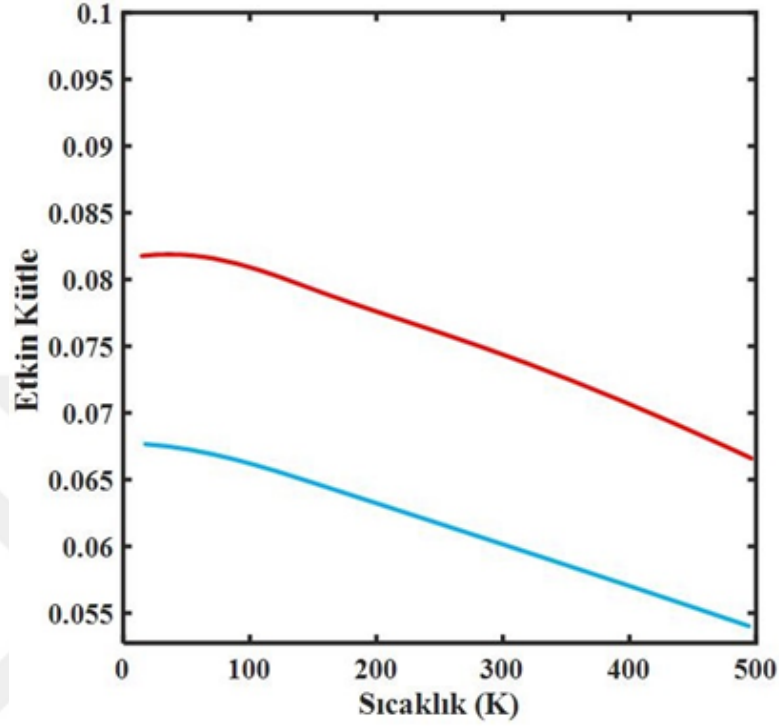
Şekil 3.3. GaAs in enerji band aralığının değişimi. Düşük eğri $E_{g\Gamma}$, ortadaki eğri E_{gL} ve yukarıdaki eğri E_{gX} i göstermektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi GaAs için sıcaklık arttıkça enerji band aralığı azalma olmaktadır.

Artan sıcaklıkla beraber enerji band aralığı değişirken, elektronun ve boşluklarının etkin külesinden aynı şekilde değişecektir. Sıcaklığın daha çok Γ iletkenlik elektronun etkin külesi ile boşluk etkin külesine olan etkisini, Kane’nin etkin kütle yaklaşımından hesaplamak mümkündür.

$$m_n \left\{ 1 + \chi_c \left[\left(2 / E_{g\Gamma} \right) + \left[1 / \left(E_{g\Gamma} + \Delta_{so} \right) \right] \right] \right\}^{-1} \quad (3.20)$$

$$m_{th} = E_{g\Gamma} / \left[2\chi_1 - E_{g\Gamma} \right]$$

Kane'nin etkin kütle yaklaşımının kullanılarak, etkin kütle grafiği Şekil 3.3'deki gibi çizilir.



Şekil 3.4. GaAs için elektron ve boşluk etkin kütlelerinin sıcaklıkla değişimi. Altta ki eğri elektron için, üstteki eğri boşluk etkin külesini gösterir.

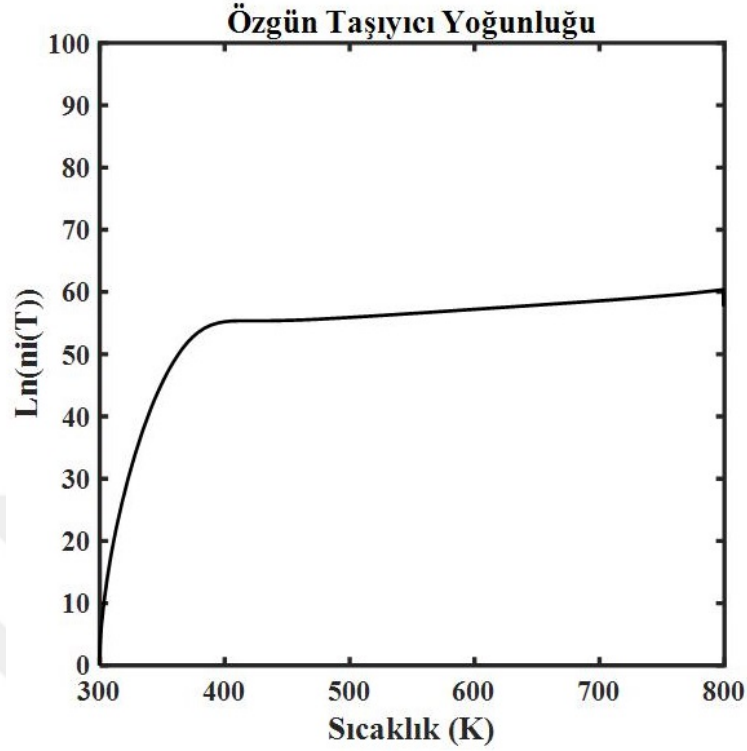
Şekil 3.4'den anlaşıldığı gibi sıcaklık arttıkça elektron ve boşlukların etkin kütleleri azalmaktadır. Burada χ_c ve χ_v matris elemanıdır.

Yüksek sıcaklıkta seviyelerdeki iletkenlik ve değerlik band yoğunluğu göz önüne alınırsa, dejenere olmamış GaAs için saf taşıyıcı yoğunluğu Denklem 3.21 ile verilir.

$$n_i = \left(N_C^* N_V^* \right)^{1/2} \exp\left(- E_{g\Gamma} / 2kT \right) \quad (3.21)$$

Burada GaAs için N_C^* ve N_V^* seviyelerinde iletkenlik band yoğunluklarıdır. GaAs için özgün taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı grafiği Şekil 3.15'de verilmiştir.

GaAs için saf taşıyıcı yoğunluğu Şekil 3.3'deki sıcaklığı artmasıyla birlikte artma göstermektedir.



Şekil 3.5. GaAs in taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığı bağlı olan değişimi yoğunluk denklemleri ise şöyledir.

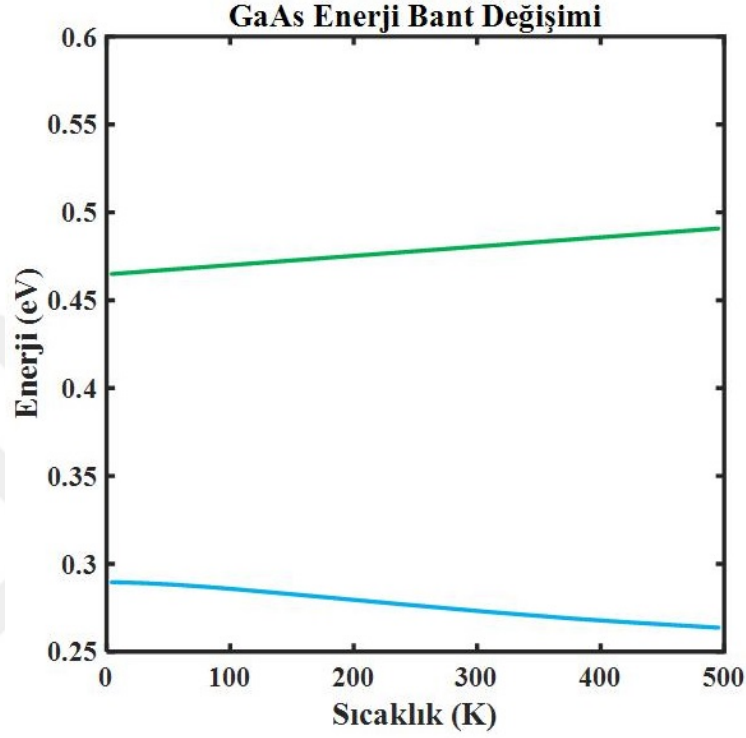
$$N_V^* = 2 \left(2\pi kT / h^2 \right)^{3/2} \left\{ m_{hp}^{3/2} + m_{lp}^{3/2} \left[1 - 15\beta^*(T)kT / 4E_{g\Gamma} \right] \right\} \quad (3.22)$$

$$N_c^* = N_{c\Gamma} \left[1 + \frac{N_{cL} \exp(-\Delta_{\Gamma L})}{N_{c\Gamma}} + \frac{N_{cX} \exp(-\Delta_{\Gamma X})}{N_{c\Gamma}} \right] \quad (3.23)$$

$N_{c\Gamma}$, N_{cL} ve N_{cX} seviyelerinin etkin yoğunluklarıdır. $\Delta_{\Gamma L} = E_{gL} - E_{g\Gamma}$ ve $\Delta_{\Gamma X} = E_{gX} - E_{gL}$ ile verilir. Sıcaklığın fonksiyonu olarak band aralıklarındaki değişim grafiği Şekil 3.6 ile verilir. $\Delta_{\Gamma L} = E_{gL} - E_{g\Gamma}$ ve $\Delta_{\Gamma X} = E_{gX} - E_{gL}$ dir. Γ iletkenlik aralığındaki parabolik olmayan seviyelerin etkin yoğunluğu $N_{c\Gamma}$ ile verilir.

$$N_{c\Gamma} = N_{co} \left[1 - 15\alpha^*(T)kT / E_{gL} \right] \quad (3.24)$$

$N_{co} = 2(2\pi m_n kT / h^2)^{3/2}$ Parabolik Γ_{ic} iletkenlik seviyesinin etkin yoğunluğu olup, sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olarak, parabolik olamayan faktör $\alpha^*(T)$ cinsinden yazılır.



Şekil 3.6. GaAs için enerji bantları arasındaki farkın değişim grafiği.

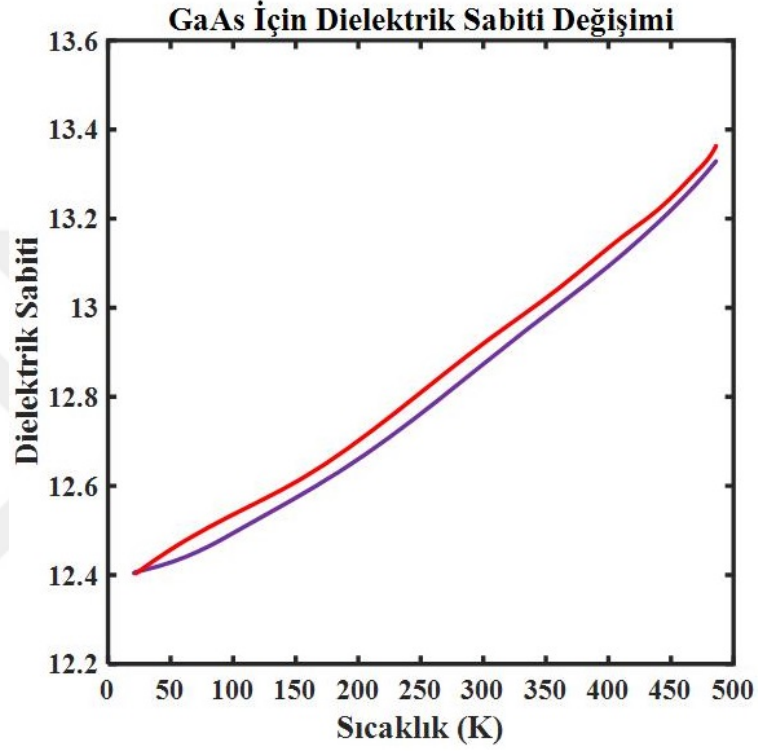
Şimdi iletkenlik ve değerlik bantlarını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ele aldığımızda, donör ve alıcıların durumlarını statik ve optik dielektrik sabitiyle ilişkilendiren **Lyddane-Sachs-Teller** bağıntısından hesaplamak gerekir:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_\infty (\omega_{LO} / \omega_{TO})^2 \quad (3.25)$$

Burada ω_{LO} boyuna ve ω_{TO} enine optik mod frekansıdır. Optik dielektrik sabiti ise Penn modeliyle verilir.

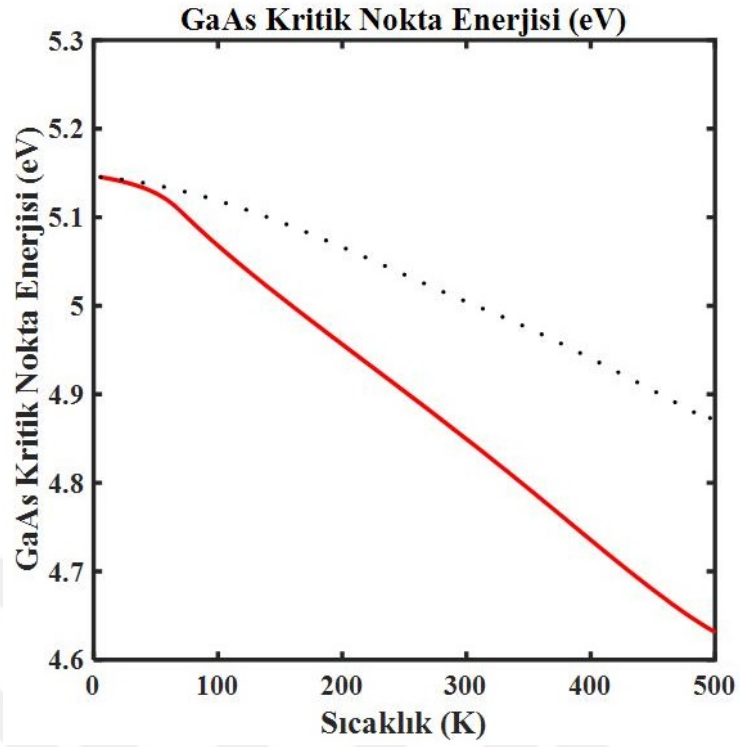
$$\varepsilon_\infty = 1 + D(\omega_p / \omega_g)^2 \quad (3.26)$$

D düzetme parametresi ω_p plazma frekansı ve ω_g Penn aralığıdır. $D=1$ Ve $\omega_g = 15.6eV$ olarak alınır. Denklem 3.25 ve Denklem 3.26'dan yararlanarak dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.3'deki gibi çizilir.



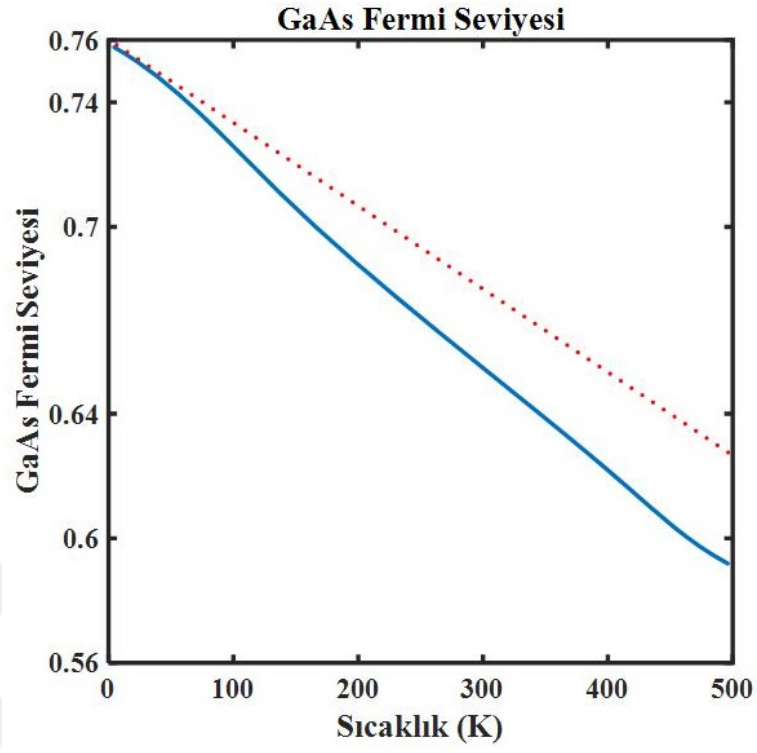
Şekil 3.7. GaAs için dielektrik $\epsilon_\infty(T)$ (alttaki) ve $\epsilon_s(T)$ (üsteki) sabiti nin deneysel ve teorik karşılaştırılması.

Denklem 3.7'yi Varshni nin deneysel değerleriyle karşılaştırarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişen E_2 için GaAs in kritik nokta enerji band aralığını Şekil 3.3'deki gibi çizmek mümkündür.



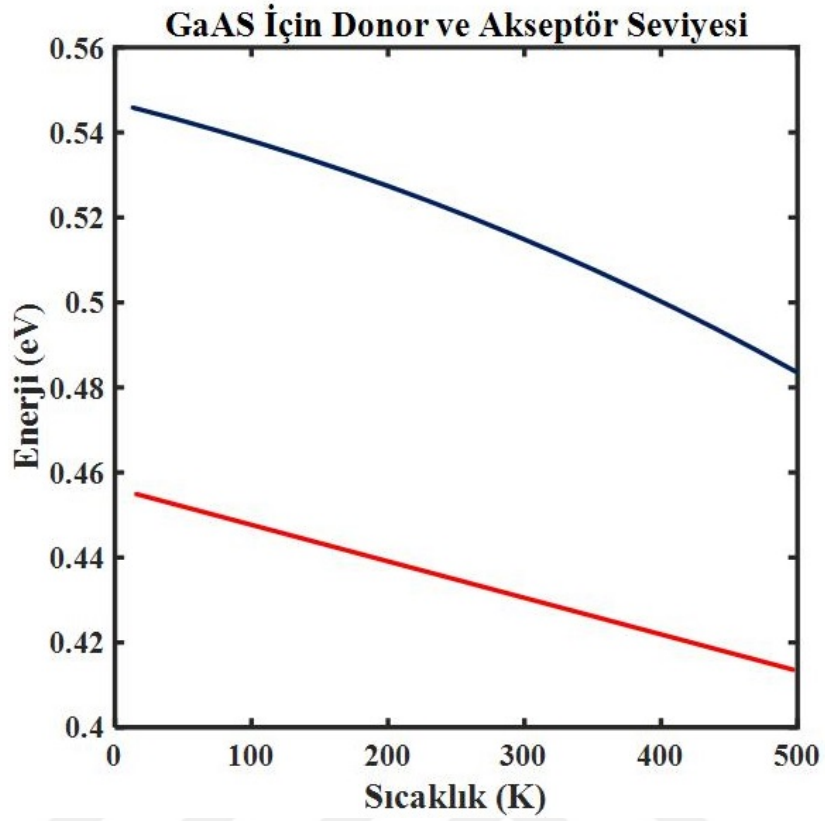
Şekil 3.8. GaAs in kritik nokta enerji bant aralığı.

Yine aynı sıcaklığa bağlı olarak dejenere olmamış GaAs için iletkenlik ve değerlik bandına göre Fermi seviyesinin değişim grafiği Şekil 3.9'daki gibi elde etmek mümkündür.



Şekil 3.9. GaAs için iletim ve değerlik bandı fermi seviyesi.

Aynı şekilde denklem (3.18) eşitlikler kullanılarak donör ve akseptörlerle ilgili enerji seviyeleri Şekil 3.10'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.10 GaAs için donör ve akseptör enerji seviye diyagramı.

Burada önerilen termodinamik etkenli model, yarı iletkenlerin elektronik özelliklerine basıncın etkisi görülmektedir.

3.3. DÜŞÜK ALAN ELEKTRON MOBİLİTESİ

Bir periyodik kristal içindeki elektronların hareketi iki şekilde olmaktadır.

- Örgü saçılması
- Katkı saçılması. Genellikle verilen sıcaklık ve katkı yoğunluğundaki elektronların mobilitesi bu iki saçılmaya bağlıdır [31].

Toplam mobilite şu şekilde ifade edilir.

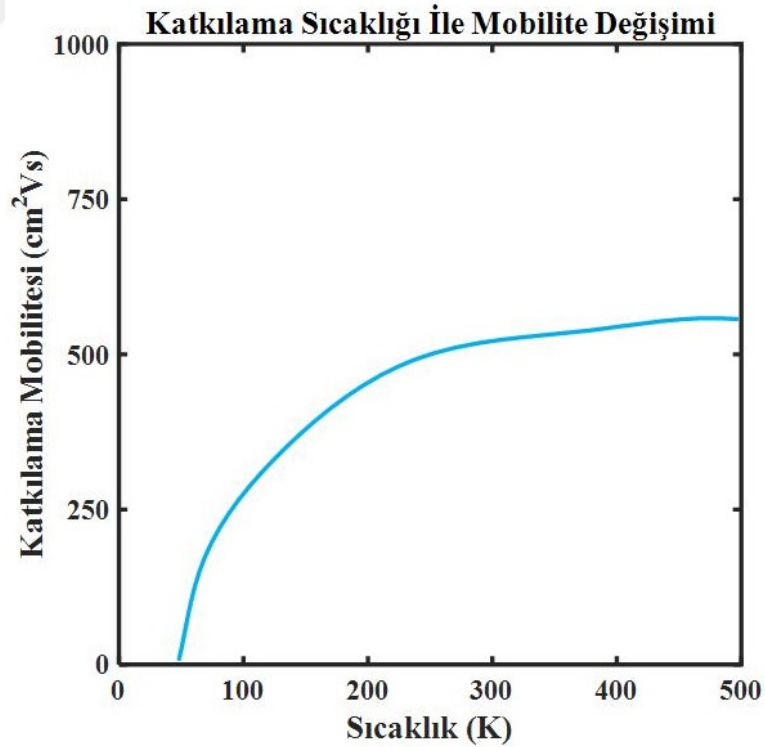
$$\frac{1}{\mu} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \dots \quad (3.27)$$

3.1.1. Katkı Atomları

Katkı atomları enerji aralığında (donor ve akseptör) enerji seviyeleri meydana getirir. Düşük sıcaklıklarda bu seviyelerde uyarlımlar yok ve katkı atomları nötraldir. Sıcaklık arttığı zaman katkı seviyeleri iyonlaşır. İyonlaşmış katkıdan dolayı sürüklenme mobilitesi,

$$\mu_i = \frac{2^{\tau} (2\pi)^{1/2} \varepsilon^2 (k_B T)^{3/2}}{N_i Z^2 e^3 m_n^{*1/2}} \ln[1 + (28\pi \varepsilon k_B T / 2 Z e^2 N_c^{1/3})^2]^{-1} \quad (3.28)$$

Olarak yazılır. m_n^* Elektronların etkin kütlesi, N_c iletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu, ε dielektrik sabiti, k_B Boltzmann sabiti, N_i Birim hacim başına katkı miktarı. Sıcaklığa bağlı olarak katkılandırma ile mobilite aşağıdaki Şekil 3.11'deki gibi değişir.



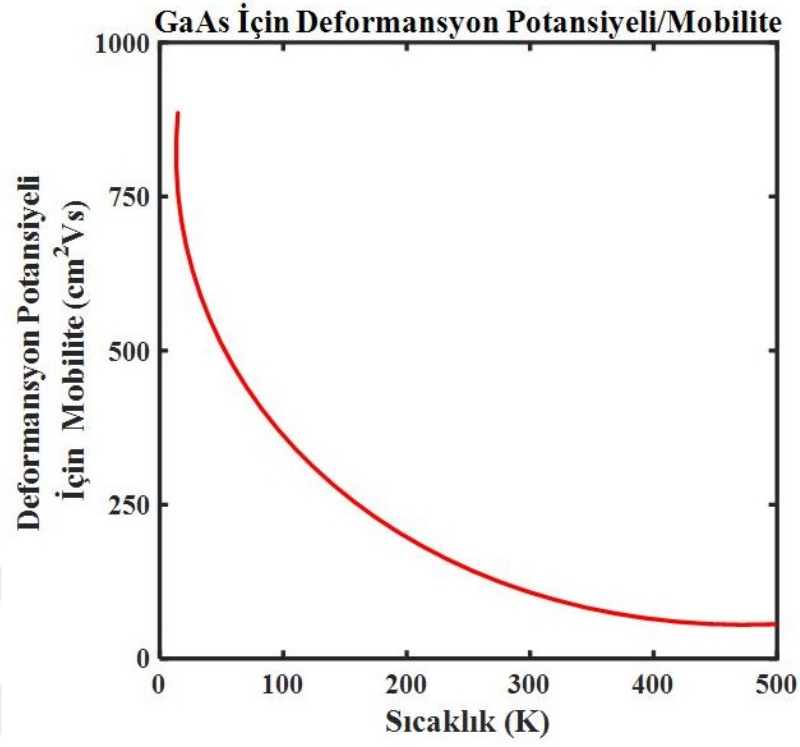
Şekil 3.11. Katkı ile sıcaklığın mobilite ile değişimi.

3.1.2 Akustik Fononlar

Bir katı kristal içinde iki çeşit fonon vardır. Atomların aynı fazda titreşimine karşı gelen titreşimler akustik fononlar, zıt fazda titreşime karşı gelen titreşimler ise optik Fononlar olarak adlandırılır. Akustik fononlar iki çeşit saçılma mekanizmasına sahiptir. Birincisi deformasyon potansiyel saçılması, ikincisi piezoelektrik saçılmasıdır. Deformasyon potansiyel saçılmasına bağlı sürüklenme mobilitesi;

$$\mu_d = \frac{2(2\pi)^{1/2} \rho h^4 s^2 e}{3E_{ac}^2 m_n^{*1/2} (k_B T)^{3/2}} \quad (3.29)$$

Olarak verilir. Akustik fononlarda deformasyon potansiyeli nedeniyle sürüklenme mobilitesi Şekil 3.12 ile verilir.

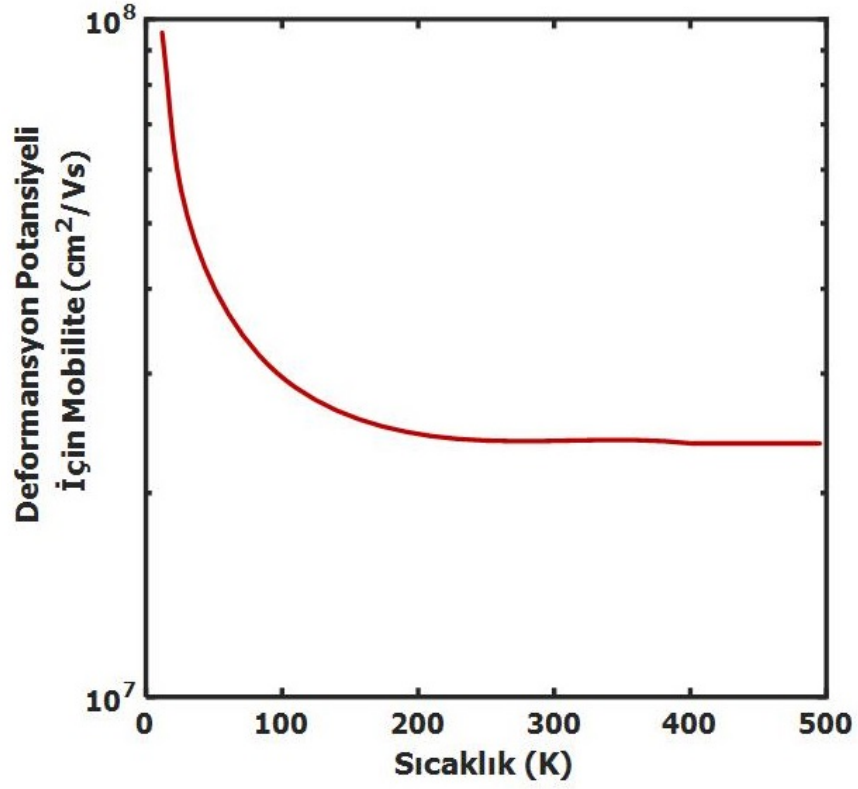


Şekil 3.12. GaAs için deformasyon potansiyeli nedeniyle oluşan mobilite.

Yeni piezoelektrik saçılmasından dolayı sürüklenme mobilitesi,

$$\mu_{pz} = \frac{16(2\pi)^{1/2} \rho h^2 s^2 e \pi}{3(eh_{pz} / \epsilon)^2 m_n^{*3/2} (k_B T)^{3/2}} \quad (3.30)$$

Şeklinde yazılır. μ_{pz} piezoelektrik sabiti, ρ Malzemenin yoğunluğu, s fononların hızı, E_1 Akustik deformasyon sabitidir. Piezoelektrikten dolayı oluşan mobilite Şekil 3.13'deki gibidir.



Şekil 3.13. GaAs için Piezoelektrikten dolayı oluşan mobilitenin sıcaklığa bağlı değişimi.

3.1.3 Optik Fononlar

Optik fononlar iki gruba iki gruba ayrılır. Birincisi polar olmayan optik fononlar, optik titreşimlerinden dolayı kristalin yapısının bozulması optik gerilme ile orantılı bir pertürbasyon meydana gelir.

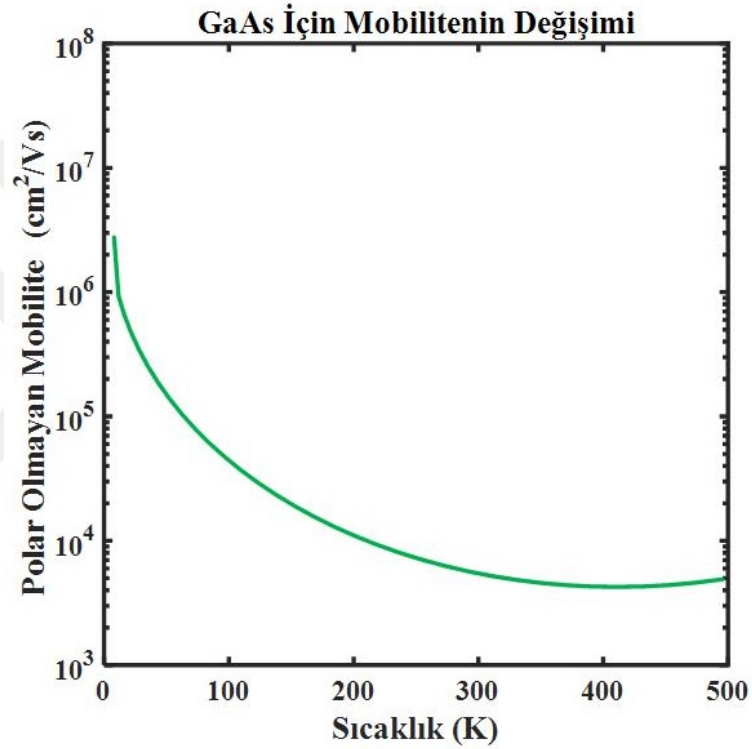
$$\mu_{po} = \frac{2^{1/2} \pi \rho h^4 e w_o^2}{3 D_o^2 m_n^{*5/2} (k_B T)^{3/2}} \quad (3.31)$$

Burada D_o deformasyon potansiyeli, $D_o = \frac{3d_o^2}{2a_o^2}$ şeklinde d_o optiksel deformasyon potansiyeli, a_o örgü sabitidir. $hw_o LO$ fonon enerjisidir.

Aynı zamanda, fononların ortalama sayısı,

$$n(w) = 1 / \exp\left(\frac{hw}{kT}\right) - 1 \quad (3.32)$$

Olarak verilir. Polar olmayan mobilitenin sıcaklığa bağlı değişimi grafiği Şekil 3.14'-de gösterilmiştir.

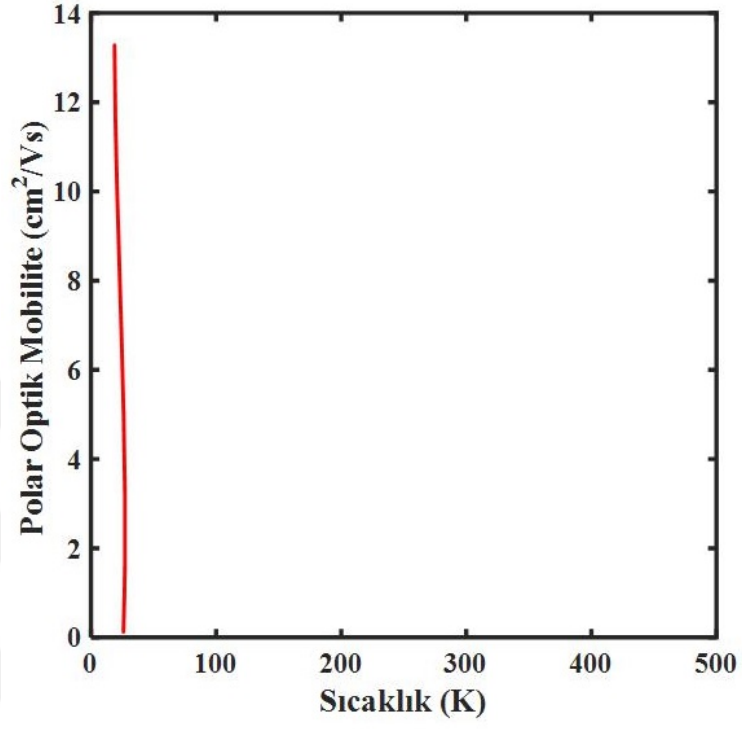


Şekil 3.14. Polar olmayan mobilitenin sıcaklığa bağlı değişimi

İkinci polar optik saçılması olup oldukça önemlidir. Burada zıt iyonik yüklerin komşu atomların yer değiştirmesi neticesinde dipol neticesinde dipol momentler oluşur. Böylesi bir potansiyel elektronların saçılması neden olacaktır. Polar optik saçılmasından dolayı sürüklenme mobilitesi aşağıdaki gibidir.

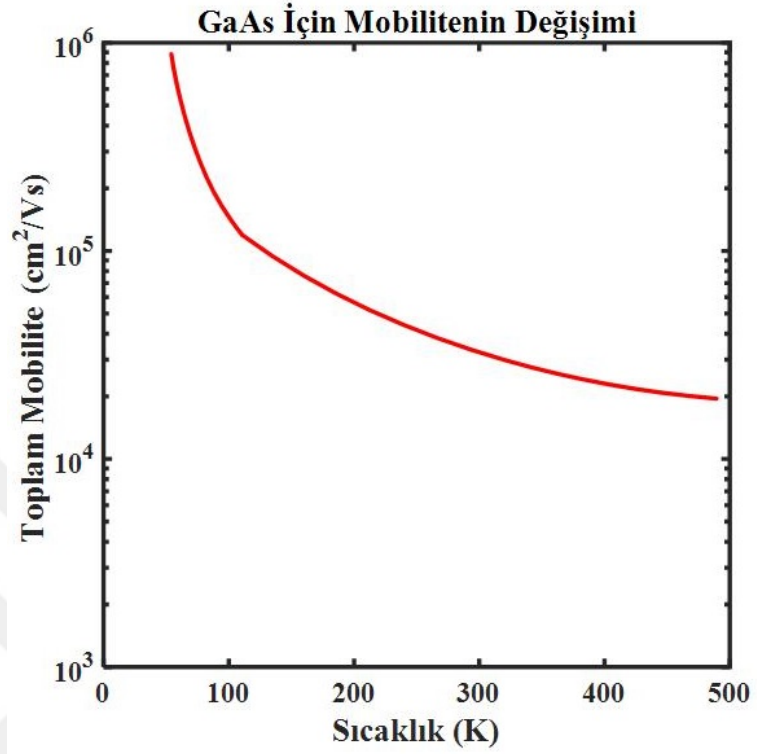
$$\mu_p = \frac{2^{1/2} \pi \rho h^2 (hw_o)^{1/2} e}{D_o^2 m_n^{*5/2} n_o} \quad (3.33)$$

Polar optik fonon saçılma nedeniyle sürüklenme mobilitesi Şekil 3.15'deki gibidir.



Şekil 3.15. Polar optik saçılma nedeniyle oluşan mobilitte.

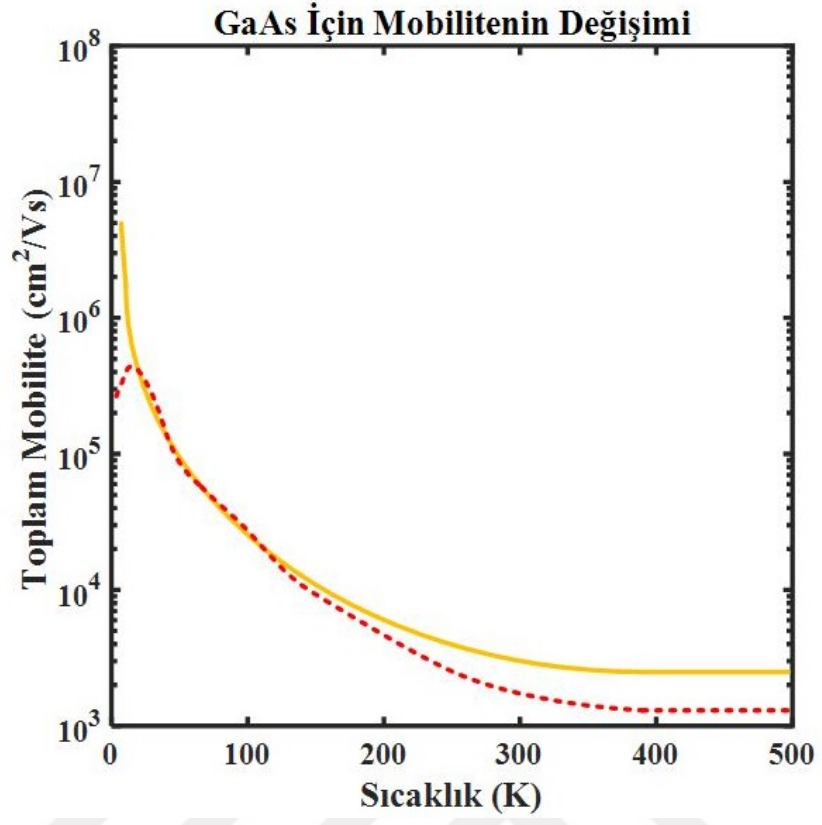
Toplam mobilite ise aşağıdaki şekilde verilir.



şekil 3.16. GaAs için sıcaklığa bağlı olarak toplam mobilitenin değişim grafiği.

şekil 3.16. da gsterildiği gibi GaAs için toplam mobilite sıcaklığın artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalma yarı iletken malzeme içindeki yüklü parçacıkların hızını dşrdği için, cihazların da performansını negatif yönde etkilenmektedir.

GaAs için toplam mobilitenin deneysel ve teorik verilerle değişimi şekil 3.17’de verilmiştir. şekil 3.16’da gsterildiği gibi sıcaklığın artmasına bağlı olarak mobilitenin bir azalma gsterilmektedir.



şekil 3.17. GaAs için mobilitenin değişimi.

BÖLÜM 4

SONUÇ

Bu tezin araştırılması süresinde, günümüzde hızla gelişen teknolojik cihazların alt yapısını oluşturan yarı iletken malzemelere ait fiziksel parametrelerin kuramsal anlamda araştırılması ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yarı iletken malzemeler arasında önemli yer tutan GaAs için enerji band aralığının, artan sıcaklıkla azalması, elektron ve hollerin kütlelerinin azalması, ancak dielektrik sabitinin artması gibi ilginç fiziksel sonuçların yarı iletken esaslı optoelektronik cihazların performanslarını etkilemektedir. Araştırma süresince kuramsal olarak katı hal elektroniği ve kuantum uygulamalarının yarı iletken malzemelere ait önemli parametrelerin hesaplanarak, MATLAB dilinde sayısal olarak hesaplanması, deneysel uygulamalara öncül, açıklayıcı ön araştırmalara zemin oluşturmuştur. Kurumsal ifadelerle ait temel noktaları ve bulgular aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir:

- GaAs için hesaplanan enerji bant aralığı değişimi artan sıcaklıkla birlikte dereceli olarak azalma gösterdiği hesaplanmıştır. Buna göre GaAs yarı iletken malzemesinin enerji bant aralığı sıcaklıkla doğrudan etkilenmektedir. Dolayısıyla iletkenlik özelliği artmaktadır.
- GaAs yarı iletken malzemesi için kuramsal olarak hesaplanan verilere göre hem elektron hem de deşiklere ait etkin kütle sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Sıcaklığın yarı iletken malzemenin etkin kütlelerinin hareketi neticesinde enerji transferine yol açmasıyla ilgili olabileceği yaklaşımı ile etkin kütlelerin sıcaklıkla azaldığı sonucuna ulaşılabilir.
- İlgili yarı iletken malzemeye ait Dielektrik sabiti sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Sıcaklık arttıkça artma eğiliminde olduğu yapılan hesaplar neticesinde ortaya çıkmaktadır.

- Yarı iletken malzemelerin iletkenlik özelliğini doğrudan etkileyen en önemli etkenlerden biri olan katlı atomları neticesinde malzemenin yapısındaki yük taşıyıcıları hareketliliği (Mobilite) sıcaklığa bağlı olarak artış göstermektedir.

Dejenere olamamış GaAs için sıcaklığın ve basıncın yarı iletkenin saf özellikleri üzerinden etkisi bir termodinamik model ile verilmektedir. Bunun tersine, Varshni nin deneysel modeli artan sıcaklıkla örgü sabitinin elektronlarla, hollerle ve elektron holl çiftlerinin etkileşmesinin etkilerini ayırmaktadır. Bu da metal yarı iletken heteroyapıların tabakalarında önemli sonuçtur.

Yapılan kurumsal çalışmalarda görüldüğü üzere sıcaklığın artmasıyla, yarı iletkenlerin enerji band aralığı azalmaktadır. Buna binaen elektronik devre elemanlarının üretilmesinde ve heteroyapılı bipolar transistörlerin yüksek sıcaklık ve basınçta elde edilmesinden kaynaklı olarak enerji bant aralıklarını etkilenmektedir.

Bu tez çalışmasıyla birlikte günümüzde gereksinim duyulan ileri teknoloji çerçevesinde yaygın olarak kullanılan yarı iletken esaslı cihazların ve LED'lerin verimliliği ciddi bir iş teşkil etmektedir. Bu amaçla, tezin kapsamı dâhilinde yarı iletken malzemelerle ilgili olan GaAs ve AlGaN gibi LED'lere temel teşkil eden malzeme ve cihazların özellikleri ele alınmıştır. Bu adımlar bizlere ileriye yönelik etkin verimli ve düşük maliyet gerektirecek uygulamaların ve teknolojilerin anlaşılmasını sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Busch, G., “Early history of the physics and chemistry of semiconductors from doubts to fact in a hundred years”, *European Journal of Physics*, 254–263 (1989).
2. Laeri, F., Schüth, F., Simon, U., and Wark, M., “Host-Guest-Systems Based on Nanoporous Crystals”, *John Wiley & Sons*, Weinheim, 435–436 (2003).
3. Sarkar, T. K., Mailloux, R., Oliner, A. A., Salazar-Palma, M. and Sengupta, D. L., “The History of Wireless”, *Wiley*, Hoboken (2006)
4. Orton, J., “Semiconductors and the Information Revolution: Magic Crystals that Made IT Happen”, Academic Press/Elsevier, Amsterdam: 35–36 (2009).
5. Mönch, W., “Semiconductor Surfaces and Interfaces”, *Springer*, Berlin-Heidelberg 78-80 (2001).
6. Smith, Z. A. and Taylor, K. D., “Renewable and Alternative Energy Sources”, *ABC-CLIO Inc.*, Santa Barbara, 157 (2008).
7. Orton, J., “The Story of Semiconductors”, *Oxford University Press*, Oxford, 359 (2004).
8. Perlin, J., “The Story of Solar Electricity”, *Harvard University Press*, Cambridge 17 (2002).
9. Grundman, M., “The Physics of Semiconductors”, *Springer*, Berlin-Heidelberg 33-42 (2006).
10. Hoddeson, L., Braun, E., Teichmann, J. and Weart, S., “History of Solid State Physics”, *Oxford University Press*, New York 78 -80 (1992).
11. Lojek, B., “History of Semiconductor Engineering”, *Springer*, Berlin-Heidelberg , 89-96 (2007).
12. Bondyopadhyay, P. K., “Sir J. C. Bose’s diode detector received Marconi’s first transatlantic wireless signal of December 1901 the “Italiannavy coherer” scandal revisited”, *Proc. IEEE*, 86(1): 259–285 (1998).

13. Riordan, M. and Hoddeson, L., "The origins of the p-n junction", *IEEE Spectrum*, 34(6): 46 (1997).
14. CAFEROV, T., "Yarı iletken Fizigi-1", *Yıldız Teknik Üniv. Fen. Edebiyat Fak. Birinci Baskı*, İstanbul, 226 (1998).
15. Duygu, Y., "Fosfin Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 7-8 (2007).
16. Kittel C., "Katılmal Fiziğine Giriş", *Güven Yayınları*, (1996)
17. Burns, G., "Solid State Physics", *Academi Press*, London, 712 (1990).
18. Ashcroft, N.W., Mermin, N. D. "Solid State Physics", *John Wiley*, U.S.A. 259 (1976)
19. Erol, A., "Düşük Boyutlu Yarı İletkenlerde Optik Olaylar", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İSTANBUL, 20-22 (1997).
20. CAFEROV, T., "Yarı iletken Fizigi-1", *Yıldız Teknik Üniv. Fen. Edebiyat Fak. Birinci Baskı*, İstanbul, 220 (1998).
21. Wilson, W.J., "Optoelektronik", Dr. Okur, G., *Değişim Yayınları*, Adapazarı, 34-84 (2000).
22. Durlu, T.N., "Katılmal Fiziğine Giriş", *Bilim Yayınları*, Ankara 75 (1996).
23. Kittel, C., "Introduction To Solid State Physics", *Wiley*, New York 353-355 (2004).
24. SMITH R. A., "Semiconductors", *Cambridge University Press*, Cambridge, 178 (1978).
25. Colinge, J. P. and Colinge C. A., "Physics Of Semiconductor Devices", *Springer*, California 37 (2005).
26. Colinge, J. P. and Colinge C. A., "Physics Of Semiconductor Devices", *Springer*, California 30-35 (2005).
27. Colinge, J. P. and Colinge C. A., "Physics Of Semiconductor Devices", *Springer*, California 51-56 (2005).
28. Marius G., "The Physics of Semiconductors", *Springer*, New York, 96 (2010).

29. Razeghi, M., Rogalski, A., “Journal Research Nitride Semiconductor”, *J. Appl. Phys.*, 79 (2): 7433-7473 (1996).
30. Monemar, B., “Fundamental Energy Gap of GaN”, *Phys. Rev. B*, 10 (7): 676-681 (1974).
31. Perry, P.B., Rutz, R.F., “The Rate of Radiative Recombination in the Nitride Semiconductors and Alloys”, *Appl. Phys. Lett.*, 33: 319 (1978).
32. Shan, W., Ager, J.W., Yu K.M., Walukiewicz, W. Haller, E.E., Martin, M.C., McKinney, W.R., Yang, W. “Effect of Nitrogen on The Electronic Band Structure of group III-N-V Alloys” , *J. Appl. Phys.*, 85: 8505 (1999).
33. Unlu H., “Solid State Electronic”, *J. Appl. Phys.* 35(9):, 1343-1352,1992
34. Kabalcı, İ., “Optoelektronik Cihazlar ”, *Karabük Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü*, Karabük (2017).
35. Garriga, M., Cardona, M. and Logothetides, S., “Interband critical points of GaAs and their temperature dependence ”, *Physical Review B* 14 (2): 9178-9179 (1986).
36. Bessa, M., “Dynamics of generic 2-dimensionallinear differential systems”, *Journal of Differential Equations*, 09-15 (2006).
37. Marius G., “The Physics of Semiconductors”, *Springer Science and Business Media LLC*, Berlin 76-80 (2010)



EK AÇIKLAMALAR A.

KİSMİ MATLAB KODLARI

```

% Isı kapasitesi Değişimi for GaAs
x=0:1:500;
a1=5.409e-4;Ep1=10.8-6;B=7.55E-5;B1=4.09;
d1=4.24e-6+5.82e-9*x-2.82e-12*x.^2;
d2=(9/2)*B.*Ep1.*d1.^2.*x.^2.*(1-(2+B1).*d1.*x);
c1=(1./(x.*(1-log(x)))).*(((a1.*x.^2)./(204+x))+3*B.*Ep1.*d1.*x-d2);
a2=6.05e-4;Ep2=5.5e-6;
c2=(1./(x.*(1-log(x)))).*(((a2.*x.^2)./(204+x))+3*B.*Ep2.*d1.*x-d2);
a3=4.6e-4;Ep3=-1.8e-6;
c3=(1./(x.*(1-log(x)))).*(((a3.*x.^2)./(204+x))+3*B.*Ep3.*d1.*x-d2);
plot(x,c1,x,c2,x,c3)
xlabel('SICAKLIK(K)')
ylabel('ISI KAPASITESI')
title('ISI KAPASITESI DEGISIMI')
axis('square')
%gttext('x')
%gttext('y')
%gttext('z')
%grid
axis('square')
gttext('X Bandı')
gttext('Y Bandı')
gttext('Z Bandı')
plottools
%% Fermi Enerji Seviyesi Hesabı
kB = 8.617e-5;
Ef = 0.56;
E = -0.2:0.0007:2.4;
fTo = zeros(size(E));
for k=1:length(E)
    if E(k)<Ef fTo(k)=1;
    elseif E(k)==Ef fTo(k)=0.5;
    end
end

```



```

end
T1 = 100;
T2 = 200;
T3 = 300;
T4 = 1000;
T5 = 2000;
T6 = 3000;
fT1 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T1) ));
fT2 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T2) ));
fT3 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T3) ));
fT4 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T4) ));
fT5 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T5) ));
fT6 = 1 ./ (1 + exp( (E-Ef*ones(size(E)))/(kB*T6) ));
figure(1); clf
plot(E,fTo,'k','LineWidth',3);
grid on; hold on
plot(E,fT1,'b--','LineWidth',2)
plot(E,fT2,'r-','LineWidth',2)
plot(E,fT3,'m:','LineWidth',2)
plot(E,fT4,'g:','LineWidth',2)
plot(E,fT5,'k:','LineWidth',2)
plot(E,fT6,'c:','LineWidth',2)
axis([-0.2 1.3 -0.1 1.1])
set(1,'Position',[34 88 634 538]);
xlabel('E (eV)'); ylabel('f(E)');
title('Fermi Enerji Seviyesinin Farklı Sıcaklıkta Gösterimi')
legend('T=0 K','T=100 K','T=200 K','T=300 K','T=1000 K','T=2000 K','T=3000
K','Location','SouthWest')
plot(Ef,0.5,36)
% nc - için katkılama konsantrasyonu
nc = logspace(14,20);
un = (5.1e18 + 92*nc.^0.91)/(3.75e15 + nc.^0.91);
up = (2.90e15 + 47.7*nc.^0.76)/(5.86e12 + nc.^0.76);

```

```

semilogx(nc,un,'b',nc,up,'g')
text(8.0e16,1000,'Elektron Mobilitesi')
text(5.0e14,560,'Boşluk Mobiliyesi')
title('Mobiliye Göre Katkılama')
xlabel('Katkılama konsantrasyonu cm-3')
ylabel('Mobilitenin yoğunluğu (cm-2)')
x=0:10:500;
E1=1.519;
a1=5.409e-4;
b1=204;
y1=E1-(a1*x.^2./(b1+x));
E2=1.815;a2=6.05e-4;b2=204;
y2=E2-(a2*x.^2./(b2+x));
E3=1.981;a3=4.6e-4;b3=204;
y3=E3-(a3*x.^2./(b3+x));
Ep1=10.8e-6;b=0.75;c1=0.553e-4;
E4=5.133;a4=6.4e-4;b4=109;
y4=E4-(a4*x.^2./(b4+x));
plot(x,y1,x,y2,x,y3,x,y4)
xlabel('Sıcaklık (K)')
ylabel('Enerji Bant Aralığı (eV)')

```

ÖZGEÇMİŞ

Erdinç Cemal KOCAMAN 1986 yılında Karabük’te doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2005 yılında Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde öğrenime başlayıp 2009 yılında iyi derece ile mezun olup. Sırası ile Yıldızlar SSS Holding Granito-Grarto iştirakinde Bakım Onarım Mühendisi Alarko Alsim Ortaklığının faaliyet göstermiş olduğu Ankara metro projesinde test ve devreye alma mühendisi, Türkiye Elektrik Dağıtım AŞ’de Elektrik Elektronik Mühendisi olarak halen görev yapmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Gökçek Mahallesi Yağmur Sokak 32-4
ANKARA

Tel : +90 546 921 2270

E-posta : erdinckocaman78@gmail.com