



TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

**DEBYE YAKLAŞIMINA GÖRE YARIİLETKENLERİN
TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI VE BAZI
REEL SİSTEMLERE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akif SEVİNDİK

Birinci Danışman: Prof. Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif SOMUNCU

TOKAT- 2022

JÜRİ KABUL VE ONAY

AKİF SEVİDİK tarafından hazırlanan “**Debye Yaklaşımına Göre Yarıiletkenlerin Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması ve Bazı Reel Sistemlere Uygulanması**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 07.02.2022 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan):

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

DEBYE YAKLAŞIMINA GÖRE YARIİLETKENLERİN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI VE BAZI REEL SİSTEMLERE UYGULANMASI

Sevindik, Akif

Yüksek Lisans, Fizik Bölümü ve Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif SOMUNCU

Şubat 2022, vii + 43 sayfa

Yarıiletkenlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru ve hassas olarak incelenebilmesi bilimde önemli bir yere sahiptir. Günümüze kadar teorik ve deneysel pek çok yöntem önerilmiştir. Bu teorik yöntemlerden biri de yarıiletkenlerin termodinamik ve taşıma özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan Debye yaklaşımıdır. Bu tez çalışmasında Debye yaklaşımında ortaya çıkan n boyutlu Debye fonksiyonları için yakın zamanda literatürde verilen analitik formül kullanılarak n sayısının tam ve kesir sayılı değerlerinde geniş sıcaklık aralıklarında bazı yarıiletkenlerin öz ısı kapasiteleri incelenmiştir. Isı kapasitesi Debye yaklaşımı için önerilen analitik formüle bağlıdır ve bu formül ile istenilen düzeyde doğru ve hassaslıkta sonuçlar elde edilir. Bu çalışmada $GaAs$, $InAs$ ve ZnO yarıiletkenlerin öz ısı kapasiteleri Debye yaklaşımına göre hesaplanmıştır. Bu yarıiletkenlerin sıcaklığa göre öz ısı kapasitelerinin değişimi n sayısının kesir sayılı değerlerinde geniş sıcaklık aralığında incelenmiştir. Elde edilen hesaplama sonuçları n sayısının kesir sayılı değerlerinde literatür ile karşılaştırılmıştır ve iyi uyumlu olduğu görülmüştür. Geniş sıcaklık aralıklarında elde edilen hesaplama sonuçları yarıiletkenlerin bilimsel ve teknolojik alanlarda faydalı olacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yarıiletkenler; Isı Kapasitesi; Debye Yaklaşımı

ABSTRACT

Calculation of Thermodynamic Properties of Semiconductors by using Debye Method
and Application on Some Real Systems

Sevindik, Akif

Master's Thesis, Physics and Atom and Molecular Physics

Advisor: Prof.Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU

Second Advisor: Assit.Prof.Dr. Elif SOMUNCU

February 2022, vii + 43 pages

The accurate and sensitive examination of the physical and chemical properties of semiconductors has an important place in science. Many theoretical and experimental methods have been proposed so far. One of these theoretical methods is the Debye approach, which is used to calculate the thermodynamic and transport properties of semiconductors. In this thesis, the specific heat capacities of some semiconductors in wide temperature ranges were investigated using the Debye approach. The heat capacity depends on the analytical formula proposed for the Debye approach and with this formula; the desired accurate and sensitive results are obtained. In this study, the specific heat capacities of *GaAs*, *InAs* ve *ZnO* and semiconductors were calculated according to the Debye approach. The variation of these semiconductors with respect to temperature was investigated. The calculation results obtained were compared with the literature and were found to be compatible. Calculation results obtained in wide temperature ranges show that semiconductors will be useful in scientific and technological fields

Keywords: Semiconductor; Heat capacity; Debye Approach

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren ve her türlü yardımı esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU' na ve ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Elif SOMUNCU' ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmalarım boyunca yanımda olan, desteğini bir an olsun eksik etmeyen ve bana umut olan aileme çok teşekkür ederim.

Akif SEVİNDİK

..... 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE ve KISALTMALAR	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	7
2.1. Yarıiletkenler	7
2.1.1. Katkısız yarıiletkenler.....	9
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler	10
2.2. Yarı İletkenlerin Termodinamik Özellikleri için Debye Yaklaşımı.....	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
3.1. Yarı İletkenlerin Isı Kapasitesi için Debye Yaklaşımı	13
4. BULGULAR	19
4.1. GaAs Yarı İletkeninin C_V Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak incelenmesi	22
4.2. InAs Yarı İletkeninin C_V Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak incelenmesi	33
4.3. ZnO Yarı İletkeninin C_V Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak incelenmesi	33

5. TARTIŞMA ve SONUÇ	44
6. KAYNAKLAR	46
7. ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

C_V

Sabit Hacim

$\mathcal{E}_F$

Fermi enerji

E

Enerji

$\hbar$

Planck Sabiti

k_B

Boltzmann sabiti

N

Atom Sayısı

N_A

Avagadro Sayısı

T

Sıcaklık

ω_0

Frekans

θ_D

Debye Sıcaklığı

Kısaltma

Açıklama

Ga

Garyum

Si

Silisyum

Ge

Germanyum

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların iletkenlik band aralıklarının şematik gösterimi.....	5
Şekil 2. Bir yarı iletkende içsel iletkenlik için bant şeması.....	7
Şekil 3. Si kristali içindeki Ga safsızlığının temsili.....	8
Şekil 4. a) Si kristalinde As^+ safsızlık iyonu ve kristalde serbest dolanan fazlalık elektron. b) Verici As^+ iyonu etrafında fazlalık elektronun yörüngesi.....	8
Şekil 5. Hegzagonal yapıdaki ZnO bileşiği.....	9
Şekil 6. GaAs kristal yapısı (çinko sülfür (ZB) kristal yapısı.....	9
Şekil 7. Katıların ısı kapasitesinin sıcaklığa bağımlılığı.....	10
Şekil 8. Einstein modeli.....	11
Şekil 9. Debye modelinin çizimi.....	13

Şekil 10. Debye fonksiyonunun bir grafiği.....	15
Şekil 11. <i>GaAs</i> yarıiletkeninin C_v sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	23
Şekil 12. <i>InAs</i> yarıiletkeninin C_v sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik veriler ile karşılaştırılması.....	25
Şekil 13. <i>ZnO</i> yarıiletkeninin C_v sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik veriler ile karşılaştırılması.....	27

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. <i>GaAs</i> ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5'e göre hesaplanması ve teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	22
Çizelge 2. <i>InAs</i> ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5'e hesaplanması ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılması.....	24
Çizelge 3. <i>ZnO</i> ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5'e hesaplanması ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılması.....	26



1. GİRİŞ

İletken, yalıtkan ve özdirenç bakımından iletkenlerle yalıtkanlar arasında olan yarı iletken maddelerin termodinamik ve taşıma özelliklerinin teorik ve deneysel incelenebilmesi bilimsel ve teknolojik alanlarda önemli bir yere sahiptir (Cao ve ark., 2006; Liu ve ark., 2006). Geçmişten günümüze pek çok bilim insanı bu konular üzerine teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır (Courts ve Tough, 1988; Onnes, 1991; Liu ve ark., 2006). Maddeler iletkenlik özelliklerine göre iletkenler, yalıtkanlar ve yarı iletkenler olarak üç grupta incelenirler.

Süper iletkenlik, süper iletken maddelerin karakteristik bir kritik sıcaklığın altındaki derecelere soğutulmasıyla oluşan, maddenin elektriksel direncinin sıfır olması ve manyetik değişim alanlarının ortadan kalkması şeklinde görülen bir olaydır. Süperiletkenlerle ilgili çalışmalar 1980 li yıllara dayanmaktadır. Leiden ‘ de Heike Kemmerlingh Onnes 1890 yılında hidrojeni, 1906 yılında helyumu sıvılaştırma tekniği geliştirmek suretiyle düşük sıcaklık fiziğine öncülük etmiştir. Leiden ‘ de Heike Kemmerlingh Onnes bu çalışmadan yola çıkarak, 1911 yılında aşırı düşük sıcaklıklarda (kriyojenik=çok soğuk) saf metallerin (civa vb.) direncini gözlemlemek için bir araştırma yapmıştır (Onnes, 1913, 1914; Courts ve Tough, 1988; Wyatt ve Lauter, 1990). O tarihler de elektronların iletkenlerden akışının mutlak sıfır sıcaklık noktasında durabileceği ve özdirencin sonsuz büyük olabileceği düşüncesi hakimdi. Bu durumun tersi olarak; Kemmerlingh Onnes 4.2 Kelvin sıcaklık değerinde civanın direncinin yok olduğunu gözlemledi. Kemmerlingh Onnes bu olayı süperiletkenlik olarak ifade etti (Onnes, 1991).

Süper iletkenliğin keşfinden sonra; süperiletkenliği açıklamak için pek çok bilimsel araştırmalar yapılmıştır. Fenomenolojik (görüngüsel) makroskobik açıklama, John Bardeen, Leon Cooper ve John Robert Schrieffer (“BCS”) tarafından bulunan BCS teorisinin mikroskobik açıklaması yapılmıştır (Hoddeson ve Bullet,n, 1999; Schmalian, 2010). Ayrıca süperiletkenlerin manyetik alan etkisi, Meissner etkisi ve izotop etkisi gibi özelliklere sahip olduğu görülmüştür (Khasanov ve ark., 2004; Hirsch ve Marsiglio, 2021).

Süperiletkenler teknolojinin pek çok alanın da tercih edilen bir malzemedir. İnsan vücudunun içini görebilmek için MRI (Manyetik Rezonans Görüntüleme) cihazı, kütle spektrometrelerde, tokamaklarda ve parçacık hızlandırıcılarında bulunan mıknatıslarda, boyut ve maliyet avantajından dolayı rüzgar türbinlerinde, kriyotron anahtarlı deneysel dijital bilgisayar yapımlarında kullanılmaktadır (Rossi ve Bottura, 2012; Durrell ve ark., 2018; Uglietti, 2019).

Ayrıca SQUID (Süper iletken Kuantum Girişim Cihazı) fizikten biyolojiye kadar geniş bir alanda fayda sağlamaktadır.

Yalıtkanlar, yalıtkan malzeme veya çok zayıf bir elektrik akımı iletkenidir. Bilindiği gibi yalıtkanlar bir elektrik alanına yerleştirildiğinde, metallerin aksine, malzeme içinde sürüklenebilecek zayıf bağlı veya serbest elektronları olmadığından, içerisinden akım geçmez ve elektrik polarizasyonu gerçekleşir (Fu ve ark., 2008). Yalıtkanlar 1843 yıllarına dayanan, ilk olarak elektrik sistemlerinden meydana gelen telgraf hat tellerinin ahşap direklerle temasını engellemek amacıyla kullanılmıştır (Beauchamp, 2001; Huurdeman, 2003). Telgraf, telefon ve elektrik için çeşitli yalıtkanlardan yapılmış olup insanlar tarihsel ilgi, bilimsel gelişim, tasarım ve yüzey kalitesi amacıyla yalıtkanları kullanmaktadırlar.

Oda sıcaklığında az sayıda serbest elektron içeren ve kristal yapıya sahip olan maddelere yarıiletkenler denir. Yarıiletkenler oda sıcaklığında bir yalıtkan gibi davranır. Elektriksel direncine göre, iletken ve yalıtkan arasında bir değere sahip olurlar. Yarı iletken maddeler üzerine yapılan mekanik işin etkisiyle iletken özelliği kazanabilen, dış etkiler kaldırıldığında yalıtkan olan maddelerdir. Yani normal durumda yalıtkan bu malzemeler manyetik etki, elektriksel gerilim, ısı ve ışık gibi etkiler ile elektronlarını serbest duruma geçirerek iletken özellik gösterirler. Bu özelliklerinden dolayı elektrik teknolojileri alanında çok tercih edilen maddeler olmuşlardır.

Yarıiletken maddelerde elektrik akım iletimi, serbest elektronların veya "deliklerin" hareketi ile oluşur. Katkılı yarıiletken malzemelere katkı atomların eklenmesi ile olup katkılama işlemi olarak adlandırılır. Katkılamalar yük taşıyıcılarının sayısını arttırmaktadır. Katkılı yarıiletkenler p-tipi ve n-tipi olarak ikiye ayrılırlar. Serbest delikler içeren katkılı yarıiletkenler "p-tipi" olarak adlandırılırlar. Serbest elektron içeren katkılı yarıiletkenler "n-tipi" olarak adlandırılmaktadır.

Yarıiletkenlerle ilgili çalışmalar 19. yüzyıla dayanmaktadır. 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel elektrolit içerisine iki elektrot batırmış ve birinin üzerine ışık düşürmüş aralarında potansiyel fark oluştuğunu fark etmiştir (Goetzberger ve Hoffmann – 2005; Orton, 2009). 1883 te Faraday Gümüş Sülfat'ın sıcaklık etkisiyle direncinin azaldığını gözlemlemiştir (Preece, 1883). 20. yüzyılda ise selenyum ve bakır oksit algılayıcılar kullanılmıştır. Yine 20. Yüzyılda Schottky yarıiletkenleri incelemede başlangıç kabul edilen kuru redresör teorisini geliştirmiştir (Pearson ve Brattain, 1955).

20. yüzyıldaki savaşlarda ihtiyaç duyulan radar yarıiletken diyotların geliştirilmesine yönelik çalışmaları artırmıştır (James, 1989). 1958 yıllarında Amerika'da Brattain ve Bordain tarafından nokta temaslı algılayıcılar geliştirilmiştir (Canul ve Ravindra - 2019). 1948 yılında Walter H.Brattain ve John Bardeen kristal redresör yapmak için çalışmışlardır. Deneyler de Germanyum'un ters akıma daha çok direnç gösterdiğini ve çok iyi doğrultma yaptığını keşfedilmiş ve germanyum redresörler icat edilmiştir (Bardeen ve Brattain, 1949). Brattain ve Bardeen Germanyum redresörlerle deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde transistör geliştirerek elektronik alanında büyük buluş yapmışlardır. Transistörün geliştirilmesine William Shockley katılarak Brattain, Bardeen ve William Shockley üçlüsü 1956 yılında Nobel fizik ödülünü almışlardır.

Transistörler yarıiletkenlerden yapılmışlardır ve transistörlerin icadıyla yarıiletken teknolojisi ani gelişme göstermiştir. Cep tipi hesap makineleri, televizyon alıcıları, bilgisayar vb. yapımlarında transistörler kullanılmıştır.

Ayrıca güneş pilleri üretiminde de yarıiletken maddeler kullanılmıştır (Chidichimo ve Filippelli, 2010). 1839 yılında Becquerel elektrolit içerisine daldırılmış olan elektrotlar arasındaki gerilimin elektrotlardan biri üzerine düşürülen ışığa bağlı olduğunu geliştirerek fotovoltaiik (güneş pili) olayını keşfetmiştir (Crossley ve ark., 1967). Buna benzer olay ilk kez katılarda Selenyum kristallerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day keşfetmiştir. Sonraki yıllarda Bakır Oksit ve Selenyuma dayalı foto diyotlar yaygın şekilde fotoğrafçılıkta ışık metrelerinde kullanılmıştır. 1914 de fotovoltaiik (güneş pilleri) diyotların verimliliği %1 değerine ulaştı. 1954 yılında Chapin tarafından Silikon kristalini kullanarak %6 verim elde etti. Bu fotovoltaiik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilmiştir. 1973 yıllarında gerçek anlamda fotovoltaiik elektriksel güç sistemlerine ilgi artmıştır. Avrupa, Japonya ve Amerika'da büyük bütçeler ayrılarak

yatırım ve araştırmalar yapılmıştır. Elektronik aletler küçültülmüştür. Hızlı çalışan, kısa sürede daha çok işlem yapan entegre devreler üretilmiştir. Entegre devrelere daha çok transistör sığdırılmıştır. Aygıtlar çok küçük hacimlere sığdırılarak elektronik aletlerin boyut ve maliyetleri düşürülmüştür.

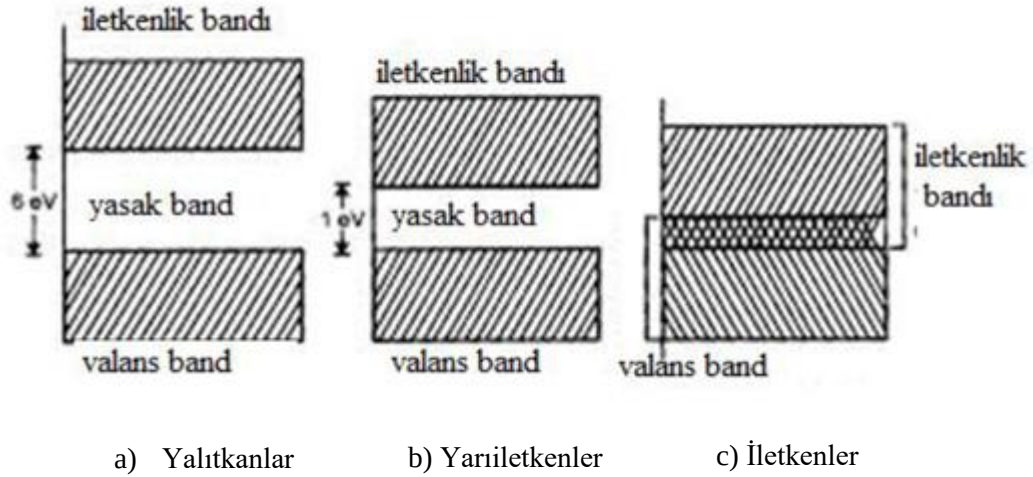
Günümüz bilim dünyasında yarı iletken malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi önemli bir yere sahiptir. Yarı iletken malzemelerin kullanıldığı teknolojik gelişmeler bu malzemelerin önemini arttırmaktadır. Yarı iletkenler teknolojide çeşitli kullanım alanlarına sahiptir Sensörlerde, mikroçiplerde, katkı maddesi ilavesi ile elektronik devre elemanlarında (diyotlar, transistörler, tristörler...), sıcaklık ölçümlerinde, uzay teknolojilerinde, detektörlerde, cep telefonlarında, trafik lambalarında, lazerlerde, termal kameralarda, hedef belirleme ve gece görüşü sistemlerinde ve benzeri teknolojik alanlarda kullanılırlar (Wang ve ark., 1995; Iliadis ve ark., 2002). Bu nedenle yarıiletkenlerin pek çok özelliklerinin incelenebilmesi için deneysel ve teorik çalışmalar önerilmektedir (Chen ve ark., 2008). Bu teorik çalışmalardan biri de Debye yaklaşımıdır (Hung ve ark., 2014; Hur ve Jeon, 2016). Debye yaklaşımı yarı iletkenlerin ısı kapasiteleri, iç enerjileri, entropileri gibi özelliklerinin doğru ve hassas hesaplanmasına olanak sağlamıştır (Shang ve ark., 2010; Nath ve ark., 2016; Nykyruy ve ark., 2019).

Önerilen tez çalışmasında Debye yaklaşımı dikkate alınarak n sayısının tam ve kesir sayılı değerlerinde $GaAs$, $InAs$ ve ZnO geniş sıcaklık aralıklarında ısı kapasiteleri hesaplanacaktır. Yarı iletkenlerin ısı kapasitesi formülünden görüldüğü gibi ısı kapasitesinin hesaplanabilmesi Debye yaklaşımı için oluşturulan analitik ifadelerden alınan sonuçlara bağlıdır. Guseinov ve Mamedov tarafından Debye fonksiyonu için türetilen analitik ifade n sayısının tam ve kesir sayılı değerlerinde istenilen doğrulukta ve hassaslıkta sonuçlar verdiği literatürden görülmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında tercih edilen $GaAs$, $InAs$ ve ZnO yarıiletkenlerin ısı kapasitelerinin hesaplanması önerilen analitik ifadeye göre incelenmiştir (Gaw, 1974; AlQurashi , 2017). Elde edilen hesaplama sonuçlarının yarıiletkenlerin bilimsel ve teknolojik çalışmalarında yararlı olacağı öngörülmektedir.

2. Literatür Özeti

2.1. Yarıiletkenler

Maddenin yalıtkan veya iletken olduğunu anlamak için enerji band teorisine bakmak gerekmektedir. Bazı maddeler metaller ve yalıtkanlar arasındaki enerji band bölgesinin özelliklerini gösterir. Her iki bandın kısmen dolu olan ve elektrik iletimi sağlayan maddeler yarıiletken olarak adlandırılır. Yarıiletkenleri ifade ederken elementlerin Fermi enerji seviyelerine bakılmalıdır. Fermi enerji seviyeleri alt bölgedeki valans (değerlik) bandı ile üst bölgedeki iletkenlik bandı arasındadır. Valans ve iletim bandı bitişik olan maddeler iletken maddeler olup elektrik akımını iletirler. Valans ve iletim bandı arasındaki boşluk çok fazla olan maddeler ise yalıtkan maddelerdir. Yarıiletkenlerdeki boşluk durumu, iletken ve yalıtkanlara göre orta büyüklüktedir. Yarıiletkenler de genelde 1 eV düzeyinde bir bant aralığı vardır, yalıtkanlarda ise 6 eV, iletkenler de ise yoktur (Boyko ve ark., 2014). Ayrıca yarıiletkenlerde oda sıcaklığında yasak enerji band genişliği yalıtkanlardan yaklaşık olarak 2 eV daha düşüktür (Su ve ark., 2020).



Şekil 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların iletkenlik band aralıklarının şematik gösterimi (Kittel,1996)

Burada band aralığında ki 1 eV değeri Fermi-Dirac dağılımı formülü ile açıklanır. Fermi-Dirac dağılım formülü

$$f(E,T) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/k_B T} + 1} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. Burada E_f Fermi enerjisi, k_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. İletkenlik bandına geçen elektron kadar valans bandında boşluklar-delikler oluşur. Yarıiletkenlerdeki iletkenlik yalnızca dış etkiyle ortaya çıkmaktadır. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki 1 eV' luk enerji aralığı vardır. Dış etki sonucu bu aralıktaki enerji boşluklarından valans bandındaki bazı elektronlar iletkenlik bandına geçerler. Yarıiletkenlerdeki elektrik akımı bu elektronlar ve boşluklardan kaynaklanır. Yani hem boşluklar, hemde elektronlar akım oluşturur. İletkenlerde ise elektrik akımı yalnızca elektronlardan kaynaklanır.

Yarıiletkenlerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Amirtharaj ve Seiler, 1995; Voon ve Willatzen, 2009)

1. Periyodik cetvelde yarıiletkenler, metallerle yalıtkanlar arasında bulunurlar.
2. İletkenlerin öz direnci $10^{-6} \Omega - cm$ 'ye kadardır. Yarıiletkenlerde öz direnç $10^{-2} \Omega - cm$ ile $10^9 \Omega - cm$ değerleri arasındadır. Yalıtkanlarda ise bu değer

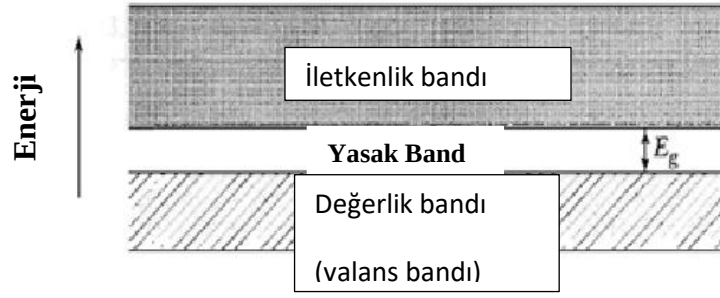
$10^{14} \Omega - cm$ ile $10^{20} \Omega - cm$ değerlerindedir. Yani yarıiletkenlerin dirençleri iletkenlerin direncinden büyük, yalıtkanların direncinden ise küçüktür.

3. Mutlak sıfır sıcaklık noktasında yarıiletkenler yalıtkandırlar.
4. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri sıcaklık yükselmesiyle artar iken öz dirençleri düşer.
5. Yarıiletkenler; iletkenlik kazanabilirler, iletkenlikleri artırılabilir, iletkenlikleri azaltılabilir. Yani iletkenlikleri ayarlanabilir.
6. Yarıiletkenlerin son yörüngelerinde 4 elektron vardır. 4A grubu elementleri Ge, Si, $\alpha - Sn$ (alfa - kalay), 2 ve 6. gruplar (CdS, ZnS) , 3 ve 5. grupların (GaAs, InSb, GaP, InAs, GaSb), 4 ve 6. gruplar (PbTe) bileşikleriyarıiletkenlerdir.
7. Saf olan yarıiletkenler elmas kristal yapıdadırlar.

2.1.1. Katkısız yarıiletkenler

Mutlak sıfır yani 0 K sıcaklığında iletkenlik ve valans (değerlik) bandlarında biraz doluluk yada biraz boşluk yoktur. Bandlar ya tamamen doludur yada tamamen boştur. Valans (değerlik) bandı tamamen doluyken iletkenlik bandı tamamen boşdur.

Yüksek sıcaklıklarda dolu valans bandındaki elektronların yasak enerji aralığını aşabilecek durumda olanları boş iletkenlik bandına geçerler. Böylece valans (değerlik) bandında kısmen boşluklar (holler) oluşurlar. Bu holler pozitif yük gibi davranırlar. Valans (değerlik) bandındaki boşluk (holler) kadar iletkenlik bandında elektron olmuş olur. Hem valans bandındaki boşluklar, hemde iletkenlik bandındaki elektronlar iletkenliği sağlarlar. Sıcaklık dahada artırılırsa iletkenlik bandına geçen elektron sayısı artar. Hem iletkenlik bandındaki elektron sayısı artmış olur. Ayrıca valans bandındaki boşluklar (holler, delikler) artmış olur. Bu durumda iletkenlik daha da artar. Katkısız yarıiletkenlere Se (Selenyum), Si (Silisyum), Ge (Germanyum) örnek olarak verebiliriz.

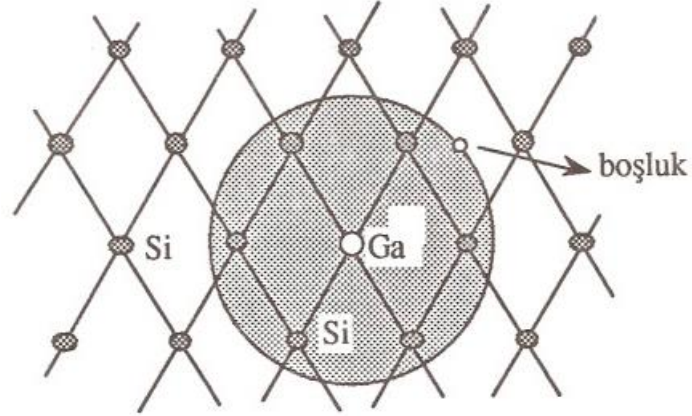


Şekil 2. Bir yarı iletkende içsel iletkenlik için bant şeması

Şekil 2’de valans (değerlik) bandındaki tüm durumlar dolu ve iletim bandındaki tüm durumlar boş olduğu için 0 K’de iletkenlik sıfırdır. Burada sıcaklık arttıkça elektronlar, değerlik bandından iletkenlik bandına termal olarak uyarılır ve o bölgede hareketli hale gelirler (Kittel, 1996).

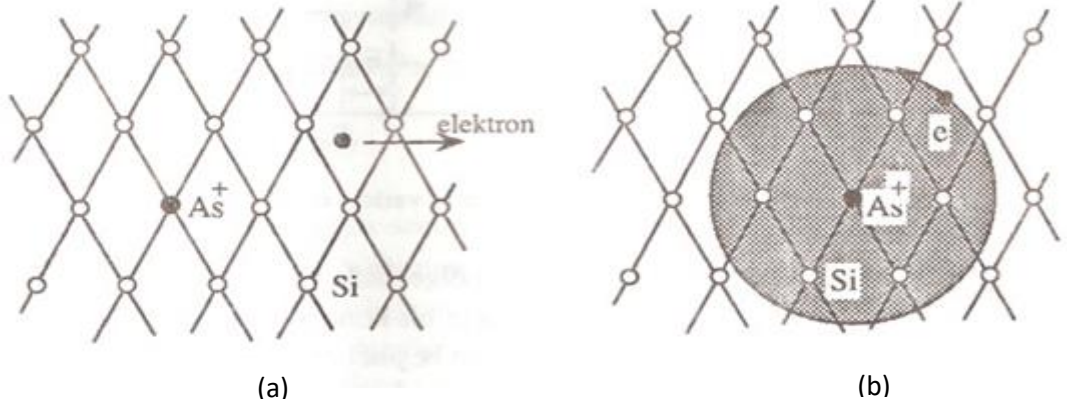
2.1.2.Katkılı yarıiletkenler

Bilindiği gibi yarıiletkenlere bir miktar yabancı madde katkılандığında iletkenlikleri yüksek miktarda artmaktadır. Katkılanma için periyodik cetvelde IV. grup yarıiletken elementlerine III. ve V. grup elementleri katkılanarak katkılama yapılmaktadır. Donör (verici) katkı atomu içeren yarıiletkenler n-tipi yarıiletken ve akseptör (alıcı) katkı atomu içeren yarıiletkenler p-tipi yarıiletken olarak isimlendirilmektedir. Kristale katılıp asıl kristal atomlarından elektron alan katkı atomlarına akseptör atomları denir. Üç değerlikli III.grup B, Al, Ga, In elementleri IV. gruptaki dört değerlikli Ge yada Si yarıiletkenlerine katkılanırlar. Böylece dört kovalent bağdan birinde bir tane elektron eksik olur ve burada bir boşluk oluşur (Fistül, 2012).

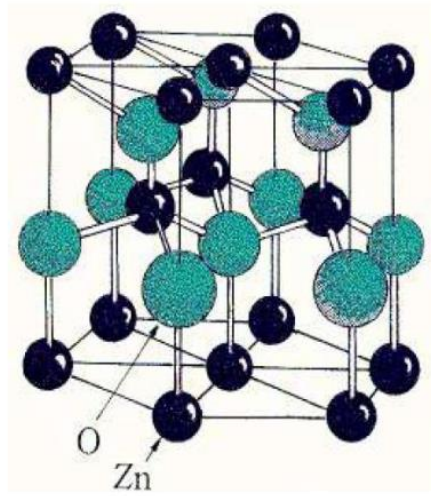


Şekil 3. Si kristali içindeki Ga safsızlığının temsili (Dikici, 1993)

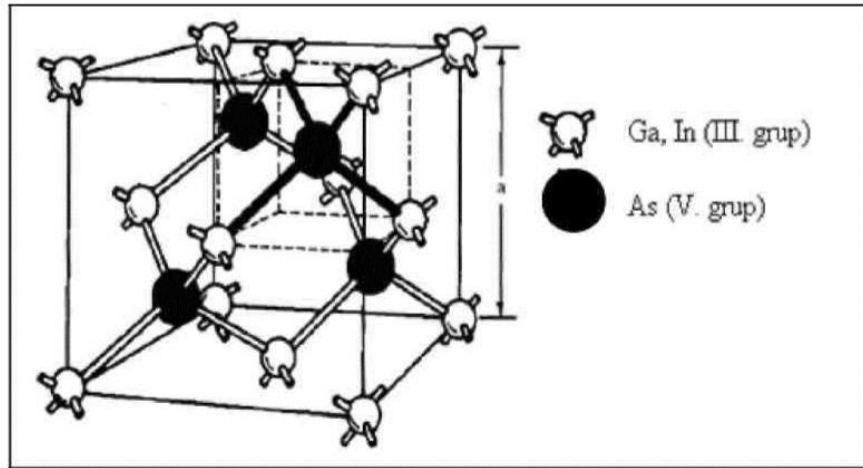
Kristale katılıp asıl kristal atomlarına elektron veren katkı atomlarına donör atomları denir. Beş değerlikli V.grup (antimon, fosfor, arsenik) elementleri IV. gruptaki dört değerlikli Ge yada Si yarıiletkenlerine katkılanırlar. Böylece dört kovalent bağdan birinde bir tane elektron fazlalığı olmaktadır (Dikici, 1993).



Şekil 4. a) Si kristalinde As^+ safsızlık iyonu ve kristalde serbest dolanan fazlalık elektron. b) Verici As^+ iyonu etrafında fazlalık elektronun yörüngesi (Dikici, 1993)



Şekil 5. Hegzagonal yapıdaki ZnO bileşiği (Öföfoğlu, 2014)

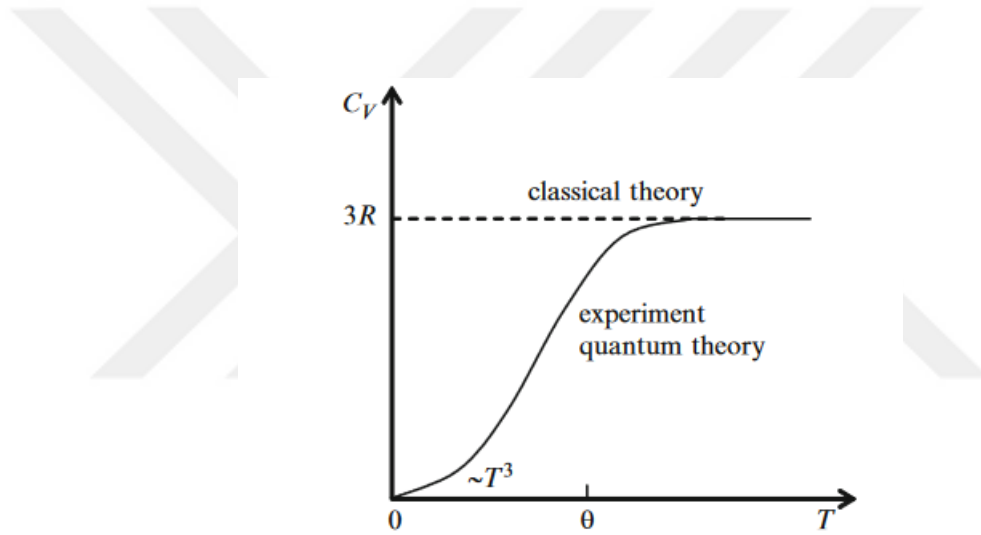


Şekil 6. GaAs kristal yapısı (çinko sülfür (ZB) kristal yapısı (Toprak, 2013))

2.2. Yarı İletkenlerin Termodinamik Özellikleri için Debye Yaklaşımı

Malzemelerin termodinamik özelliklerinin belirlenmesi bilimsel çalışmalarda önemli bir yere sahiptir. Malzemelerin termodinamik özelliklerinden biri de ısı kapasiteleridir. Sıcaklığa bağlı ısı kapasitesi maddelerin iç yapısına, maddenin parçacıkları arasındaki etkileşimlerine ve hareketlerinin doğasına (klasik ve kuantum) bağlıdır. Geçmişten ve günümüze malzemelerin ısı kapasitelerinin deneysel ve teorik incelenmesine büyük ilgi

gösterilmiştir (K Biswas - 2007). İlk kez 1907 yılında Einstein katı maddelerin ısı kapasitesinin incelenebilmesi için kuantum teorisini geliştirmiştir. Katıların termodinamik katsayıları arasında, ısı kapasitesinin sıcaklığa bağımlılığı, maddenin içyapısına, onu oluşturan parçacıklar arasındaki etkileşim türlerine ve doğaya (klasik veya kuantum) çok duyarlı olduğu için özel bir yer tutar. Bu nedenle, katıların ısı kapasitesinin teorik ve deneysel araştırmasına her zaman çok önemlidir. Einstein'ın 1907'de katıların ısı kapasitesiyle ilgilenmesi ve ilk kez kuantum teorisini yaratması sadece bir şans değildir.



Şekil 7. Katıların ısı kapasitesinin sıcaklığa bağımlılığı

19. yüzyılın başlarına kadar P. L. Dulong ve A. T. Petit mevcut deneysel gerçeklere dayanarak oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda ısı kapasitesi katının türüne ve sıcaklığa bağlı değildir. Eşitlik 2.2'den de görüldüğü gibi spesifik ısı kapasitesi

$$C_v \approx 3R \approx 6 \text{ cal.K / mol} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir (Fitzgerald ve Verhoek, 1960). R burada evrensel gaz sabitidir.

Bu yasa klasik teoriyle açıklanabilmektedir. Atomların kafes titreşimleri klasik kabul edilir ve Boltzmann istatistiklerine dayanan enerjinin serbestlik derecelerine eşit dağılımı hesaba katıldığında ve $T \gg \theta$ bölgesinde klasik teorisinin deneyle örtüştüğü görülmektedir. 19. yüzyılın sonlarında düşük sıcaklıklarda ısı kapasitesi ölçülmeye

başlandı ve düşük sıcaklıklarda $T \ll \theta$ deneyle klasik teorinin uyumsuz olduğu görülmüştür. Kısaca klasik teoride Eşitlik 2.2 yüksek sıcaklıklarda geçerli düşük sıcaklıklarda ise geçerli değildir.

Teori ve deney arasındaki bu uygunluk, ısı kapasitesi sadece yüksek sıcaklık aralığında ($T \gg \theta$) ölçüldüğü sürece gözlemlendi. On dokuzuncu yüzyılın sonunda kriyojenik tekniklerin (düşük sıcaklıkların üretilmesi) gelişmesiyle birlikte, oda sıcaklığından çok daha düşük sıcaklıklarda ısı kapasitesinin ölçülmesine başlandı. Dulong-Petit yasasının yerine getirilmediği belirlendi. Sıcaklığın düşürülmesiyle ısı kapasitesi düşüyor ve sıcaklık mutlak sifıra yaklaştıkça Nernst ilkesine uygun olarak sifıra yöneliyordu (Gopal, 2012). Böylece, düşük sıcaklıklarda ($T < \theta$) deney ile o sırada var olan tek teori olan klasik teori (Şekil 6.7) arasında uyumsuzluk ortaya çıktı. Bu fenomen, yirminci yüzyılın başlarına, Einstein'ın bir katının ısı kapasitesinin kuantum teorisini formüle ettiği zamana kadar gözlemlendi.

Bir katının ısı kapasitesinin kuantum teorisi ilk kez 1907'de Einstein tarafından önerildi. O zamanlar kuantum mekaniği yoktu. Bununla birlikte, 1900'de Planck, enerjisel kısım - kuantum kavramını ilk kez tanıttı (Klein, 1965). Planck varsayımına göre, ω frekansında titreşen bir osilatör, enerjiyi tüm $h\omega$ kadar yayar, yani ışıma kuantumludur. Bu varsayımına dayanarak Planck, siyah cisim ışımalarının enerjinin spektral yoğunluğunun fonksiyonunu buldu (Planck formülü) ve bu şekilde geniş sıcaklık ve frekans bölgelerinde ışıma ile ilgili mevcut tüm deneysel gerçekleri açıkladı (Klein, 1961).

Kısaca Planck ilk olarak ω frekanslı doğrusal harmonik osilatörün ortalama enerjisi için kuantumlu ifadesini geliştirdi (Dekker, 1977).

$$\varepsilon = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_0T}} - 1} \quad (2.3)$$

N tane atomdan
oluşan kristal katı
(nokta)

→

Aynı frekansa sahip 3N
sayıda harmonik
osilatörden oluşan ideal
gaz ω_0

Şekil 8 . Einstein modeli

Yüksek sıcaklıklarda $k_0T \gg \hbar\omega$ olur. Doğrusal harmonik osilatör için $\varepsilon = k_0T$ dir.

Titreşen bir kristalin ortalama enerjisinin hesaplanmasını mümkün kılan Planck varsayımını Einstein geliştirmiştir. Einstein modeline göre; N sayıda atomdan oluşan bir kristal katının, aynı frekansta ω_0 titreşen $3N$ sayıda etkileşmeyen harmonik osilatörün toplam enerjisi aşağıdaki formül ile ifade edilmiştir.

$$E = 3N\varepsilon = \frac{3N\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_0T}} - 1} \quad (2.4)$$

Buradan katı maddenin ısı kapasitesi $C_v = (\partial E / \partial T)_v$ değerine eşittir.

$$C_v = 3k_0N \left(\frac{\theta_0}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\theta_0}{T}}}{\left(e^{\frac{\theta_0}{T}} - 1 \right)^2} \quad (2.5)$$

Yüksek sıcaklıklarda $T \gg \theta$

$$C_v = 3k_0N = 3R \quad (2.6)$$

değeri elde edilmiştir.

Düşük sıcaklıklarda $T \ll \theta$ ise

$$C_v = 3k_0N \left(\frac{\theta_0}{T} \right)^2 e^{-\frac{\theta_0}{T}} \quad (2.7)$$

değeri elde edilmiştir.

Eşitlik 2.7'den görüldüğü gibi, düşük sıcaklıklar $T \ll \theta$ bölgesinde ısı kapasitesi sıcaklığa çok güçlü bir şekilde bağlıdır ve sınırlayıcı durumda $T \rightarrow 0 K$ iken C_v üstel

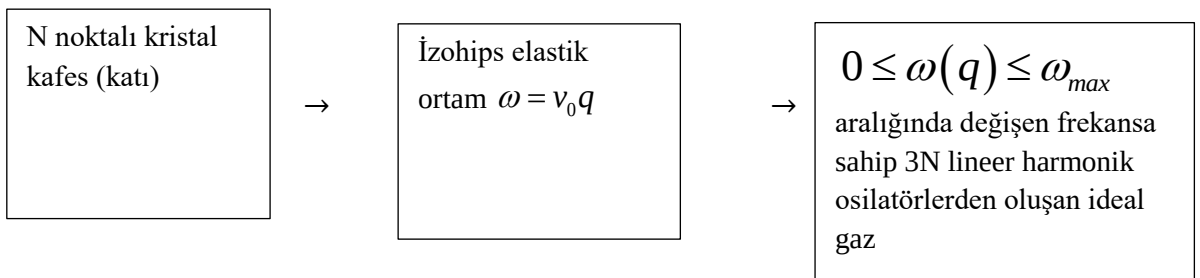
olarak sıfıra yaklaşır. Bu tür bir bağımlılık, bilinen Nernst ilkesini tatmin etse de, deneyle yalnızca niteliksel olarak tutarlıdır. Çok sayıda deney, $C_v(T)$ fonksiyonunun mutlak sıfır bölgesinde bir üstel gibi davranmadığını, ancak $C_v(T) \sim T^3$ olduğunu göstermektedir (Barron ve White, 2012). Einstein'ın kuantum osilatörün Eşitlik 2.3 ortalama enerjisi hakkındaki fikri doğrudur, onun tarafından önerilen model düşük sıcaklıklar bölgesinde gerçeği yansıtmadı. Bu durumda Einstein modelinin mükemmelliği gerekliydi. Bu Debye tarafından gerçekleştirilmiştir (Peierls, 1980).

Debye 1912 de Einstein'ın modelini temele aldı ve geliştirmiştir.

Einstein'a göre kristaldeki iyonlar ya da atomlar birbirlerinden bağımsız olarak eşit frekansta harmonik titreşim yaparlar ve bir kristalin toplam enerjisi

$$E = 3N\varepsilon = \frac{3N\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_0T}} - 1} \quad (2.8)$$

olur. Debye 'ye göre atomlar ya da iyonlar birbirinden bağımsız olarak titreşmezler. Aralarında elastik bir bağ vardır. Bir noktada meydana gelen titreşimler bütün kristale elastik bir dalga şeklinde yayılır.



Şekil 9. Debye modelinin çizimi (Santorelli ve Halloran, 2019)

Burada frekans (ω) ve dalga sayısı ($q = 2\pi/\lambda$) arasında ya da frekans (ω) ile dalga boyu (λ) arasında özel bir ilişki vardır. Frekans (ω) ve hız (v_0) arasındaki ilişki

$$\omega(q) = v_0 q \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. Sürekli ortamda dalga sayısı (q) ve frekans (ω) sonsuz $0 \leq q < \infty$, $0 \leq \omega < \infty$ aralıklarında değişir.

Debye kristalin periyodik yapıya sahip olduğunu ve dalga vektörü ile frekans arasındaki değişimini $0 \leq q < q_{max}$ ve $0 \leq \omega < \omega_{max}$ sonlu aralıkta sınırlı sayıda değere sahip olduğunu varsaydı.

Basit kristal örgülü bir katının toplam enerjisi

$$E = 3 \sum_q \varepsilon(\omega(q)) = 3 \sum_q \frac{\hbar \omega(q)}{e^{\hbar \omega(q)/k_B T} - 1} \quad (2.10)$$

Rastgele bir sıcaklıkta bir kristalin ortalama enerjisi

$$E = 3k_B T N D\left(\frac{\theta}{T}\right) \quad (2.11)$$

olur.

Burada Debye fonksiyonu

$$D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 3 \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (2.12)$$

olarak ifade edilir (Hall, 2000).

Görüldüğü gibi, herhangi bir sıcaklıkta kristalin ortalama enerjisi Eşitlik 2.11, klasik durum enerjisinden ($E = 3k_B T N$; $T \gg 0$), yani debye fonksiyonundan farklıdır. Debye fonksiyonu analitik olarak hesaplanamamaktadır. Bu sebepten farklı asimptotlarını dikkate almaktayız.

$T \gg 0$ sıcaklık değerinde, $x \ll 1$ de,

Eşitlik 2.12’de $(e^x - 1)^{-1}$ ifadesini aşağıdaki gibi genişletebiliriz.

$$\frac{1}{e^x - 1} \approx \frac{1}{x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \dots} \approx \frac{1}{x} \left(1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{12} \right) \quad (2.13)$$

Yüksek sıcaklık bölgesindeki Debye fonksiyonunun aşağıdaki şekilde elde ederiz.

$$D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 1 - \frac{3}{8}\left(\frac{\theta}{T}\right) + \frac{1}{20}\left(\frac{\theta}{T}\right)^2; \quad T \gg 0 \quad (2.14)$$

Burada Debye fonksiyonu sınırlı durumdadır

$$\lim_{T \rightarrow \infty} D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 1 \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.14'ü Eşitlik 2.11 'de yerine koyduğumuzda Debye fonksiyonuna bağlı yüksek sıcaklıklardaki enerji

$$E = 3k_o T N - \frac{9}{8} k_o N \theta + \frac{3}{20} k_o N T \left(\frac{\theta}{T}\right)^2; \quad T \gg \theta \quad (2.16)$$

olarak ifade edilir.

Düşük sıcaklıklarda: $T \ll \theta$. Debye fonksiyonundaki integralin üst sınırı θ/T 'ye eşit kabul edilmektedir.

$$D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 3 \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx; \quad T \ll \theta \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.16'da (alınan) aşağıdaki yaklaşımı dikkate alalım.

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \Gamma(4) \zeta(4) = 6 \frac{\pi^4}{90} = \frac{\pi^4}{15} \quad (2.18)$$

Buradan düşük sıcaklıklarda Debye fonksiyonu

$$D\left(\frac{\theta}{T}\right) = \frac{\pi^4}{5} \left(\frac{T}{\theta}\right)^3; \quad T \ll \theta \quad (2.19)$$

olur.

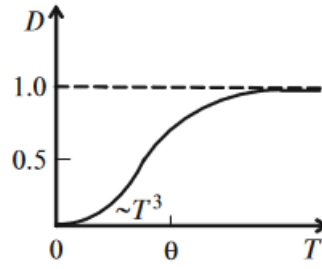
$$\lim_{T \rightarrow \infty} D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 0 \quad (2.20)$$

Burada

$$\lim_{T \rightarrow \infty} D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 1 \quad \text{ve} \quad \lim_{T \rightarrow 0} D\left(\frac{\theta}{T}\right) = 0$$

Buradan Debye fonksiyonunun asimptotik değeri 0-1 limit değerinde değiştiği anlaşılmaktadır.

Debye fonksiyonu için grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 10. Debye fonksiyonunun bir grafiği

Eşitlik 2.11 ve 2.19 'e göre bir kristalin düşük sıcaklıklar bölgesinde ortalama enerjisi aşağıdaki gibidir:

$$E = \frac{3\pi^4}{5} k_0 T N \theta \left(\frac{T}{\theta}\right)^4; \quad T \ll \theta \quad (2.21)$$

Enerjinin genel enerji ifadesinin sıcaklığa göre türevi alındığında ısı kapasitesi

$$C_v = 3k_0 N \left(D\left(\frac{\theta}{T}\right) + T \frac{\partial D(\theta/T)}{\partial T} \right) \quad (2.22)$$

olur. Debye fonksiyonunun sıcaklığa göre türevi

$$\frac{\partial}{\partial T} D\left(\frac{\theta}{T}\right) = \frac{3}{T} D\left(\frac{\theta}{T}\right) - \frac{3\theta}{T^2} \left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.23)$$

olur. Bu durumda

$$C_v = 3k_0 N \left(D\left(\frac{\theta}{T}\right) + 3D\left(\frac{\theta}{T}\right) - \frac{3\theta}{T} \left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1\right)^{-1} \right) = 3k_0 N \left(4D\left(\frac{\theta}{T}\right) - \frac{3\theta}{T} \left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1\right)^{-1} \right) \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.22’de $L_v \left(\frac{\theta}{T} \right)$ ifadesini olarak adlandırır isek

$$L_v \left(\frac{\theta}{T} \right) = 4D\left(\frac{\theta}{T}\right) - 3\frac{\theta}{T} \left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1\right)^{-1} \quad (2.25)$$

Isı kapasitesi $L_v \left(\frac{\theta}{T} \right)$ ifadesine bağlı olur.

Debye fonksiyonundaki integrali bir kez integral alıp sonucu Eşitlik 2.25 ile değiştirsek

$$L_v \left(\frac{\theta}{T} \right) = 3 \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (2.26)$$

olur. $L_v \left(\frac{\theta}{T} \right)$ ifadesi analitik değil asimptotiktir.

Yüksek sıcaklıkta $T \gg 0$

Eşitlik 2.26 ‘de $x \ll 1$ olarak $\frac{1}{(e^x - 1)^2}$ ifadesini basitleştirebiliriz.

$$\frac{1}{(e^x - 1)^2} \approx \frac{1}{x^2} \left(1 - x + \frac{5x^2}{12} \right); \quad x \ll 1 \quad (2.27)$$

$$\frac{e^x}{(e^x - 1)^2} \approx \frac{1}{x^2} \left(1 - x + \frac{5x^2}{12} \right) \left(1 + x + \frac{x^2}{2} \right) \approx \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{x^2}{12} \right); \quad x \ll 1 \quad (2.28)$$

Bu sayede $\left(\frac{\theta}{T} \right)^2$ ’li Eşitlik 2.26 $\left(\frac{\theta}{T} \right)^2$ ‘li olarak hesaplırsak

$$L_v\left(\frac{\theta}{T}\right) = 1 - \frac{1}{20}\left(\frac{\theta}{T}\right)^2; \quad T \gg 0 \quad (2.29)$$

Bu eşitliği yüksek sıcaklıklar bölgesindeki ısı kapasitesini ifade etmek amacıyla C_v eşitliğinde yerine koyarsak

$$C_v = 3k_0N\left(1 - \frac{1}{20}\left(\frac{\theta}{T}\right)^2\right); \quad T \gg 0 \quad (2.30)$$

Düşük sıcaklıklarda $T \ll 0$; Eşitlik 2.26 'ün üst sınırı sonsuz ile değiştirirsek

$$\int_0^\infty \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx = \frac{4\pi^4}{15} \quad (2.31)$$

ifadesini elde ederiz.

$$L_v\left(\frac{\theta}{T}\right) = \frac{4\pi^4}{15}\left(\frac{T}{\theta}\right)^3; \quad T \ll 0 \quad (2.32)$$

Düşük sıcaklıklarda $T \ll 0$; ısı kapasitesini belirtmek için $C_v = 3k_0NL_v\left(\frac{\theta}{T}\right)$ 'deki

$L_v\left(\frac{\theta}{T}\right)$ 'nin asimptotunu aldığımızda

$$C_v = \frac{12\pi^4}{5}k_0N\left(\frac{T}{\theta}\right)^3; \quad T \ll 0 \quad (2.33)$$

elde ederiz. Sonuç olarak Debye teorisi düşük sıcaklıklarda Einstein 'nin elde ettiği üstel değerın Eşitlik 2.7'nin aksine düşük sıcaklıklarda ısı kapasitesi, $C_v \sim T^3$ şeklinde sıfıra gider ve deneyle oldukça tutarlıdır (Kuznetsov ve Khromov, 2008).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Yarı İletkenlerin Isı Kapasitesi için Debye Yaklaşımı

Peter Debye tarafından önerilen bir metot ile 1912 yılında bir katının ısı kapasitesi hesaplandı ve bu metot Debye Modeli olarak adlandırıldı. Daha birçok termodinamik özelliklerin hesaplanması için de bu yöntem kullanılmıştır ve teorik olarak incelemeler yapılmıştır. Debye fonksiyonu özellikle katıların ısı kapasitesinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Literatürde pek çok sayısal yöntemler, n-boyutlu Debye fonksiyonunu ve Debye sıcaklığına göre belirlenmesi için kullanılmıştır (Guseinov ve Mamedov, 2007).

Bu tez çalışmasında, Debye fonksiyonu için yakın zamanda verilen yaklaşım (Guseinov ve Mamedov, 2007) kullanarak ,bazı yarı iletkenlerin ısı kapasitelerinin sıcaklığa göre değişmesi hesaplanmıştır.

$D(\theta_D/T)$ ifadesi Debye fonksiyonudur ve genel olarak aşağıdaki gibidir.

$$D_n(\beta, x) = \frac{n}{x^n} \int_0^\infty \frac{t^n}{(e^t - 1)^\beta} dt \quad (3.1)$$

Debye fonksiyonu için n sayısının tam ve kesir sayılı değerleri için aşağıdaki formülü verilmiştir (Guseinov ve Mamedov, 2007).

$$D_n(\beta, x) = \frac{n}{x^n} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^N (-1)^i F_i(-\beta) \frac{\gamma(n+1, (i+\beta)x)}{(i+\beta)^{n+1}} \quad (3.2)$$

Burada $F_i(-\beta)$ binomial katsayılarıdır (Guseinov ve Mamedov, 2007; Eser ve ark., 2009) ve

$$F_m(n) = \begin{cases} \frac{n(n-1)\dots(n-m+1)}{m!} & n' \text{ in tam sayılı değerleri için} \\ \frac{(-1)^m \Gamma(m-n)}{m! \Gamma(-n)} & n' \text{ in kesir sayılı değerleri için} \end{cases} \quad (3.3)$$

Formülüne göre hesaplanır.

Eşitlik 2.33'deki $\gamma(n+1, (i+\beta)x)$ tam olmayan Gamma fonksiyonları olup integral şekli aşağıdaki gibidir

$$\gamma(\alpha, y) = \int_0^y t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (3.4)$$

Debye yaklaşımı sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Debye modeliyle katıların ısı kapasitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi açıklanmış oldu. Bu yaklaşımdan faydalanılarak literatürde bir çok katının ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi incelenmiş ,incelenmekte ve teknolojiye uygulanmasında büyük katkı sağlamıştır (Seyidoy ve ark., 2008; Pässler, 2011; Li ve ark., 2011)

Bu tez çalışmasında, Debye fonksiyonu için yakın zamanda verilen yaklaşım (Guseinov ve Mamedov, 2007) kullanarak, bazı yarıiletkenlerin ısı miktarının sıcaklığa bağlı değişimi hesaplanmıştır (Guseinov ve Mamedov, 2007). Bu tez çalışmasında, Debye fonksiyonu n sayısının tam ve kesir sayılı değerleri için Eşitlik 3.1 formülü ile ifade edilmiştir. Uygulama olarak Debye modeli kullanılarak GaAs, InAs, ZnO yarıiletkenlerinin ısı kapasitelerinin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir.

Isı kapasitesinin Debye yaklaşımına bağlılığı

$$C_V = \frac{\partial E}{\partial T} = 3k_B N_A L_V \left(\frac{\theta_D}{T} \right). \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir (Eser ve Koc, 2016). Burada $L_V \left(\frac{\theta_D}{T} \right)$ fonksiyonu Debye yaklaşımına göre belirlenir ve aşağıdaki gibi yazılır (Kelley, 2007).

$$L_V \left(\frac{\theta_D}{T} \right) = 4D_3 \left(\frac{\theta_D}{T} \right) - 3 \left(\frac{\theta_D}{T} \right) \frac{1}{e^{\theta_D/T} - 1}. \quad (3.6)$$

$L_V \left(\frac{\theta_D}{T} \right)$ fonksiyonun integral ifadesi

$$L_V \left(\frac{\theta_D}{T} \right) = 3 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx. \quad (3.7)$$

olur. Eşitlik 3.5 de Eşitlik 3.4 dikkate alındığında ve Eşitlik 3.7 yerine yazıldığında tüm sıcaklık aralıklarında C_V ısı kapasitesi Debye yaklaşımına göre hesaplanabilmektedir.

4. BULGULAR

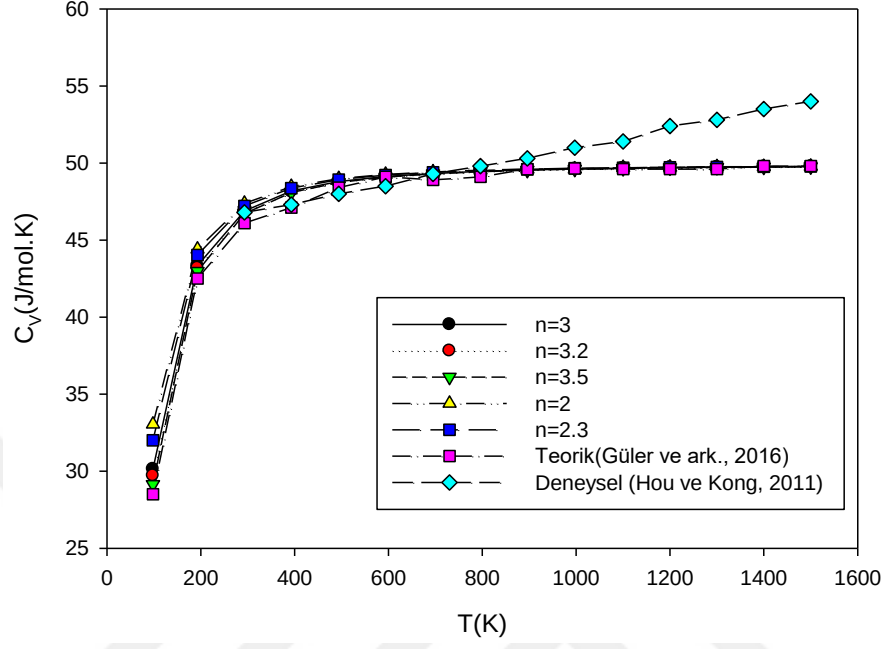
Bu bölümde, Debye fonksiyonu için Bölüm 3’de verilen formül kullanılarak *GaAs*, *InAs* ve *ZnO* katı malzemelerin ısı kapasitelerinin Çizelge 1-3’de hesaplama sonuçları ve literatür ile karşılaştırmaları verilmiştir.

4.1. *GaAs* Yarı İletkeninin C_v Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak İncelenmesi



Çizelge 1. GaAs ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5 'e göre hesaplanması ve teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

$T(K)$	$\theta_D = 328.4 K$						Teorik (Güler ve ark., 2016)	Deneysel (Hou ve Kong, 2011)
	Eşitlik 3.5							
	$n = 3$	$n = 3.2$	$n = 3.5$	$n = 2$	$n = 2.3$			
97.9	30.1446	29.7175	29.1437	33.0413	32.008	28.5	-	
193	43.3503	43.1901	42.9726	44.4033	44.0337	42.5	-	
293	46.8888	46.8135	46.7109	47.3812	47.2089	46.1	46.8	
393	48.1878	48.1447	48.086	48.468	48.3704	47.1	47.3	
494	48.8018	48.7742	48.7366	48.9807	48.9187	48.4	48.0	
594	49.1328	49.1136	49.0874	49.2565	49.214	49.1	48.5	
695	49.3184	49.3204	49.3011	49.4109	49.3938	48.9	49.3	
796	49.465	49.4542	49.4395	49.5325	49.51	49.1	49.8	
896	49.5535	49.545	49.5333	49.6055	49.5887	49.3	50.3	
997	49.6174	49.6105	49.6011	49.658	49.6454	49.8	51.0	
1100	49.6653	49.6597	49.652	49.6971	49.6879	49.6	51.4	
1200	49.7006	49.6959	49.6894	49.7255	49.7191	49.6	52.4	
1300	49.728	49.7241	49.7185	49.7473	49.7432	49.6	52.8	
1400	49.7498	49.7464	49.7417	49.7644	49.7623	49.8	53.5	
1500	49.7674	49.7645	49.7604	49.7778	49.7775	49.8	54.0	

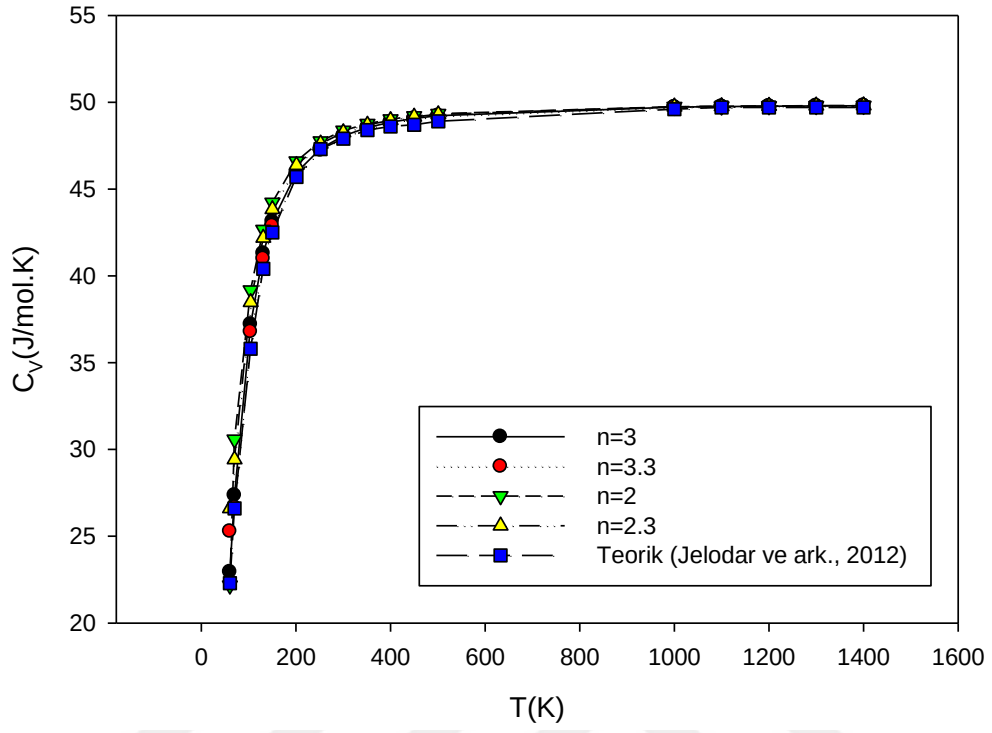


Şekil 11. *GaAs* yarıiletkeninin C_V sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik ve deneysel veriler ile karşılaştırılması

4.2. *InAs* Yarı İletkeninin C_v Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak İncelenmesi

Çizelge 2. *InAs* ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5'e göre hesaplanması ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılması

$\theta_D = 260 \text{ K}$					
$T(K)$	Eşitlik 3.5				Teorik (Jelodar ve ark., 2012)
	$n = 3$	$n = 3.3$	$n = 2$	$n = 2.3$	
60.5	22.9426	22.1706	26.6083	25.2837	22.3
70.2	27.3573	26.6672	30.5771	29.4234	26.6
104	37.2084	36.7746	39.1739	38.4795	35.8
131	41.2927	40.988	42.6605	42.1795	40.4
150	43.1284	42.8852	44.2156	43.834	42.5
201	45.9505	45.8059	46.5935	46.3685	45.7
252	47.3295	47.2346	47.75	47.6032	47.3
300	48.0626	47.9946	48.3633	48.2585	47.9
351	48.5447	48.4945	48.7661	48.6892	48.4
400	48.8488	48.8099	49.0199	48.9606	48.6
450	49.0641	49.0333	49.1993	49.1527	48.7
501	49.2216	49.1966	49.3304	49.2932	48.9
1000	49.7187	49.7124	49.7399	49.735	49.6
1100	49.7477	49.7426	49.7627	49.7605	49.7
1200	49.7699	49.7656	49.7796	49.7797	49.7
1300	49.7871	49.7835	49.7923	49.7944	49.7
1400	49.8007	49.7977	49.8019	49.806	49.7



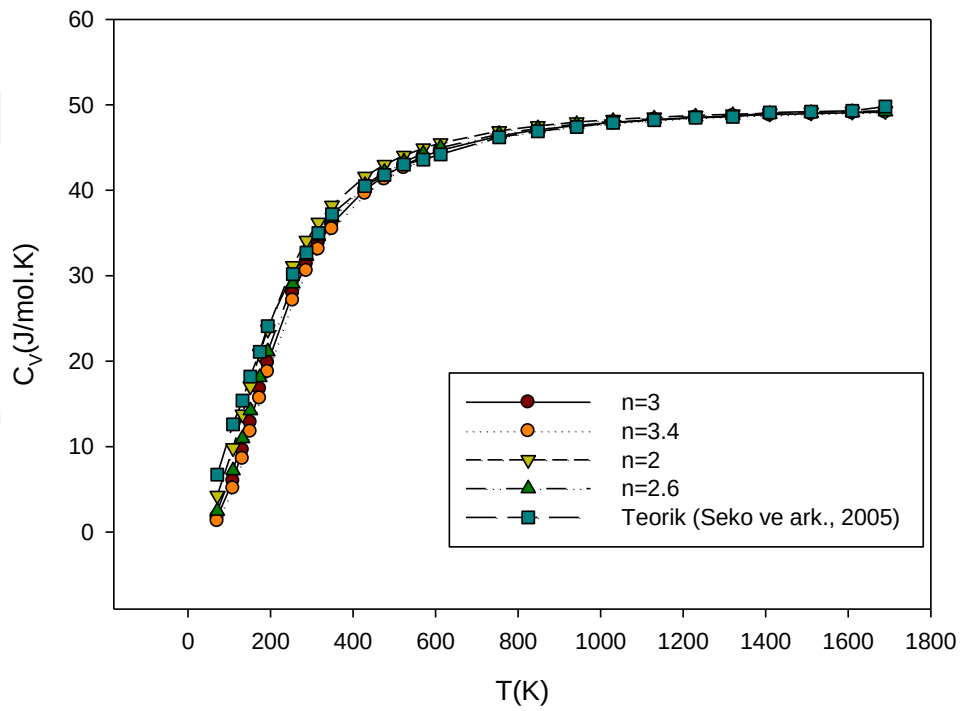
Şekil 12. *InAs* yarıiletkeninin C_v sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik veriler ile karşılaştırılması

4.3. ZnO Yarı İletkeninin C_V Isı Kapasitesinin Debye Yaklaşımı Kullanılarak İncelenmesi

Çizelge 3. ZnO ısı kapasitesinin Eşitlik 3.5'e göre hesaplanması ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılması

$\theta_D = 920 K$					
$T(K)$	Eşitlik 3.5				Teorik (Seko ve ark., 2005)
	$n = 3$	$n = 3.4$	$n = 2$	$n = 2.6$	
70.9	1.77306	1.30822	4.26996	2.46622	
109	6.00505	5.12066	9.83745	7.18629	6.72
132	9.61641	8.58705	13.7857	10.9443	12.6
151	12.8491	11.7661	17.0732	14.2192	15.4
174	16.754	15.6663	20.8618	18.1073	18.2
193	19.8147	18.7563	23.7357	21.1187	21.1
254	27.9985	27.1164	31.1465	29.0644	24.1
287	31.3626	30.584	34.1094	32.2979	30.2
316	33.7997	33.1048	36.2326	34.6311	32.7
349	36.0869	35.4767	38.2096	36.8146	35.0
429	40.0635	39.613	41.6152	40.598	37.2
476	41.6828	41.3013	42.9915	42.1344	40.5
523	42.9467	42.6207	44.062	43.3322	41.8
570	43.9483	43.6672	44.908	44.2803	43.0
612	44.6754	44.4273	45.5209	44.9681	43.6
754	46.3622	46.1923	46.9391	46.5623	44.2
848	47.0702	46.9337	47.5328	47.2308	46.2
942	47.5865	47.4747	47.9651	47.7181	46.9
1030	47.9523	47.858	48.2711	48.0632	47.4
1130	48.272	48.1931	48.5383	48.3647	47.9
1230	48.5189	48.452	48.7446	48.5976	48.2
1320	48.696	48.6377	48.8924	48.7646	48.5
1410	48.841	48.7897	49.0134	48.9012	48.6
1510	48.9732	48.9284	49.1236	49.0258	49.1
1610	49.0819	49.0424	49.2142	49.1283	49.2

1690	49.1555	49.1196	49.2755	49.1977	49.3 49.8
------	---------	---------	---------	---------	--------------



Şekil 13. ZnO yarıiletkeninin C_v sabit hacimde ısı miktarının n farklı değerlerinde teorik veriler ile karşılaştırılması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yarı iletkenlerin malzemelerin termodinamik özelliklerinin hassas ve doğru hesaplanabilmesi amacıyla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Debye yaklaşımı yarı iletkenlerin termodinamik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan güvenilir yöntemlerden biridir. Farklı sıcaklık aralıklarında ısı kapasitesinin belirlenmesinde teorik uygulamalar çok önemlidir. Bu çalışmada Debye yaklaşımına göre yarıiletkenlerin termodinamik özelliklerinden sabit hacimde öz ısı kapasitelerinin sıcaklığa göre değişmesi incelenmektedir. Bu çalışmada Debye yaklaşımı kullanılarak *GaAs*, *InAs* ve *ZnO* yarıiletkenlerinin öz ısı kapasitelerinin sıcaklığa göre değişimi incelenmektedir. Hesaplamaların güvenilirliği, n boyutlu tamsayı ve tamsayı olmayan Debye fonksiyonlarının yeterli doğrulukta ve hassas hesaplanmasına bağlıdır. Hesaplamalarda n boyutlu tamsayı ve tamsayı olmayan değerlerde Debye fonksiyonlarının hesaplanması için literatürde Guseinov ve Mamedov tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Koc ve ark, 2011). Son zamanlarda yapılan çalışmalardan görülüyor ki Guseinov ve Mamedov tarafından verilen formül sıcaklığın geniş aralığında yarıiletkenlerin termodinamik özellikleri için geçerli olup daha hassas sonuçlar verir. Önerilen yöntemin doğruluğu bu tezde örnek olarak incelediğimiz yarıiletkenlerin termodinamik özelliklerinin hesaplanmasından alınan sonuçlardan da görülmektedir.

Bu çalışmada, Debye fonksiyonları için geliştirilen formülün bir uygulaması olarak *GaAs*, *InAs* ve *ZnO* yarıiletkenlerinin C_v sabit hacimde ısı kapasitelerinin sıcaklığa göre değişmesi incelenmiştir. n 'nin tamsayı değerlerinde Debye fonksiyonları için Eşitlik 3.2 analitik formülü kullanılarak *GaAs*, *InAs* ve *ZnO* yarıiletkenlerinin için öz ısı kapasitelerinin C_v hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar Mathematica 7.0 Software programında yapılmıştır. $n=3$, $n=2$, $n=2.3$, $n=2.6$, $n=3.4$, $n=3.3$, $n=3.5$,

$n=3.3$ değerleri için elde edilen sonuçları izelge (1-3) ve ekil (11-13) olarak verilmiştir. Çizelge 1’ de görüldüğü gibi *GaAs* için elde edilen sonuçlar literatürdeki teorik ve deneysel veriler ile oldukça uyumludur (Gusey, 2021). Çizelge 1’ de görüldüğü gibi, $n=3.5$ ve $n=2.3$ değerleri için *GaAs* ısı kapasitesi literatür sonuçları (Gusey, 2021) farklı sıcaklıklarda daha iyi uyumludur. Çizelge 2’de görüldüğü üzere *InAs* için $n=3$ değerlerinde teorik hesaplamalar (Zhou ve ark., 2011) ile daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca izelge 2’de $n=3.3$ değerlerinden alınana hesaplama sonuçları teorik sonuçlar ile daha da iyi uyum içerisindedir (Zhou ve ark., 2011). Çizelge 3’de görüldüğü üzere *ZnO* için $n=3.4$ ve $n=2.6$ tam sayılı olmayan değerleri için elde edilen ısı kapasitesi hesaplama sonuçları n ’nin tam sayılı değerlerinden elde edilen sonuçlara göre teorik verilere daha yakın olduğu görülmektedir (Mamedov ve ark., 2009; Gusey, 2016).

Ayrıca ekil (11-13) ‘den görüldüğü gibi n sayısının tamsayı ve tam sayı olmayan değerlerinde elde edilen verilerin yakın olması da önerilen yöntemin yarıiletkenlerin termodinamik özelliklerinin hesaplanması için uygun olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak önerilen yöntemi kullanarak yarıiletkenlerin öz ısı kapasitelerini tüm sıcaklık aralıklarında daha hassas ve doğru hesaplamaya imkn sağlayacaktır. Ayrıca Debye yaklaşımı istatistik fizik ve katıhal fiziği ile ilgili birçok katıhal denkleminde yer almaktadır. Bu nedenle Debye yaklaşımı teknoloji alanında kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin incelenmesine öncülük etmiştir.

KAYNAKLAR

- Algurashi, A. (2017). A New Approximation of Fermi-Dirac Integrals of Order $1/2$ by Prony's Method and Its Applications in Semiconductor Devices. Corpus ID:56280232.
- Amirtharaj, P. M., . Seiler, D. G. (1995). *Optical properties of semiconductors*, Handbook of Optics, Part II.
- Arthur, G. C. (1979). Optical, Electrical, And Structural Characterization of the Variable Bandgap Semiconductor Indium(1-X)Thallium(X)Telluride for Infrared Photodetector Applications. Northwestern University. ProQuest Dissertations Publishing. 7927348.
- Askerov, B. M., Figarova, S. (2009). *Thermodynamics, Gibbs Method and Statistical Physics of Electron Gases*. Springer Science & Business Media.
- Bardeen, J., Brattain, W. H. (1949). Physical Principles Involved in Transistor Action. *Physical Review*. 75, 1208.
- Beauchamp, K. G. (2001). A History of Telegraphy: Its History and Technology (I E E History of Technology Series): Its Technology and Applications (History and Management of Technology). Kindle Edition.
- Boyko, T. D., Gross, T., Schwarz, M., Fuess, H., Moewes, A. (2014). The local crystal structure and electronic band gap of β -sialons. *Journal of Materials Science* . 49, 3242–3252.
- Cao, Q. , Hur, S. H., Zhu, Z. T., Sun, Y. G., Wang, C. J., Meitl, M. A., Shim, M., Rogers, J. A. (2006). Highly Bendable, Transparent Thin-Film Transistors That Use Carbon-Nanotube-Based Conductors and Semiconductors with Elastomeric Dielectrics. *Advanced Materials*, 18 (3) 304-309.

- Chen, J. G., Menning, C. A., Zellner, M. B. (2008). Monolayer bimetallic surfaces: Experimental and theoretical studies of trends in electronic and chemical properties. *Surface Science Reports*. 63 (5) 201-254.
- Chidichimo, G., Filippelli, L. (2010). Organic Solar Cells: Problems and Perspectives. *International Journal of Photoenergy*. 2010, 11.
- Crossley, P. A., Noel, G. T., Wolf, M. (1967). *Review and evaluation of past solar cell development efforts*. National Aeronautics and Space Administration.
- Courts, S. S., Tough, J. T. (1988). Transition to superfluid turbulence in two-fluid flow of He II. *Physical Review B*. 38, 74.
- Dekker, H. (1978). Quantization of the linearly damped harmonic oscillator. *Physical Review A*. 17, 2126.
- Dikici, M. (1993). *Katıhal Fiziği*. Seçkin Yayıncılık.
- Durrell, J. H. Ve ark., (2018). Bulk superconductors: a roadmap to applications. *Superconductor Science and Techonology*. 31, 103501.
- Eser, E., Koc, H. (2016). Investigations of temperature dependences of electrical resistivity and specific heat capacity of metals. *Physica B: Condensed Matter*. 492, 7-10.
- Eser, E., Askerov, I. M., Mamedov, B. A. (2009). Calculation of the Debye–Waller factor of crystals using the n-dimensional Debye function involving binomial coefficients and incomplete gamma functions. *Hyperfine Interactions*. 194 (1), 381-389.
- Fistul, V. I. (1969). *Heavily Doped Semiconductors*. Springer.

- Fitzgerel, R. K., Verhoek, F. H. (1960). The law of Dulong and Petit. *Journal of Chemical Education*. 37 (10), 545.
- Fu, M., Dissado, L. A., Chen, G., Fothergill, J. C. (2008). Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 15 (3).
- Goetzberger, A., Hoffmann, V. U. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer Science & Business Media.
- Gopal, E. S. R. (2012). *Specific heats at low temperatures*. The International Cryogenics Monograph Series book series (INCMS).
- Gusev, Y. V. (2021). Experimental verification of the field theory of specific heat with the scaling in crystalline matter. *Scientific Reports*. 11 (18155).
- Gusev, Y. V. (2016). The field theory of specific heat. *Russian Journal of Mathematical Physics* volume 23, 56–76.
- Guseinov, I. I., Mamedov, B. A. (2007). Calculation of Integer and Noninteger n -Dimensional Debye Functions Using Binomial Coefficients and Incomplete Gamma Functions. *International Journal of Thermophysics* volume 28, pages1420–1426.
- Güler, E., Güler, M., Aldırmaz, E. (2016). Some vibrational and thermodynamic properties of gallium arsenide. *Journal of Engineering and Fundamentals (JEF)*. 3 (1), 9-16.
- Hall, B. D. (2000). Debye function analysis of structure in diffraction from nanometer-sized particles. *Journal of Applied Physics*. 87, 1666.
- Hirsch, J. E., Marsiglio, F. (2021). Meissner effect in nonstandard superconductors. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 587, 1353896.
- Hoddeson, L., Bulletin, M. R. S. (1999). *John Bardeen and the BCS theory of superconductivity*. Cambridge.org.
- Hou H. J. and Kong F. J. (2011). Theoretical investigation on the structural, dynamical, and thermodynamic properties of the zinc-blende InX (X = P, As, Sb). *Phys. Stat. Sol. (b)* 248, 1399–1404.
- Huurdeman, A. A. (2003). *The worldwide history of telecommunications*. Wiley-IEEE Press.
- Hur, J. H., Jeon, S. (2016). III–V compound semiconductors for mass-produced nano-electronics: theoretical studies on mobility degradation by dislocation. *Scientific Reports* . 6 (22001).
- Hung, N. V., Thang, C. S., Toan, N. C., Hieu, H. K. (2014). Temperature dependence of Debye–Waller factors of semiconductors. *Vacuum*. 101, 63-66.
- Iliadis, A. A., Vispute, R. D., Venkatesan, T., Jones, K. A. (2002). Ohmic metallization technology for wide band-gap semiconductors *Thin Solid Films*. 420-421, 478-486.
- James, R. J. (1989). A History of Radar. IEE Review, IET, 35 (9).

- Kelley, D. F., Destan, T. J., Luebbers, R. J. (2007). Debye Function Expansions of Complex Permittivity Using a Hybrid Particle Swarm-Least Squares Optimization Approach. *IEEE Xplore*. 55 (7).
- Kittel, C. (1996). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley&Sons, Inc.
- Klein, M. J. (1961). Max Planck and the beginnings of the quantum theory. *Archive for History of Exact Sciences*. 1, 459-479.
- Klein, M. J. (1965). Einstein, Specific Heats, and the Early Quantum Theory. *American Association for the Advancement of Science*, 148 (3667), 173-180.
- Koushik, B. (2007). Theoretical investigation of type II clathrate materials. <http://hdl.handle.net/2346/21742>.
- Koc, H., Eser, E., Mamedov, B. A. (2011). Calculation of heat capacity of the nuclear fuels UO₂ and NpO₂ using integer and non-integer n-dimensional Debye functions. *Nuclear Engineering and Desing*. 241 (9), 3678-3682.
- Kuznetsov, V. M., Khromov, V. I. (2010) Fractal modification of the continuum approximation of the quantum theory of lattice heat capacity. *Technical Physics Letters*, 36. 535-537.
- Liu P., Wu, Y., Beng, Y. L., Ong, S. (2006). Shiping Zhu. Enabling Gate Dielectric Design for All Solution-Processed, High-Performance, Flexible Organic Thin-Film Transistors. *J. Am. Chem. Soc.*, 128 (14) 4554–4555.
- Li, Y. Ve ark., (2011). Computational insight into the effect of monovalent cations on the electronic, optical, and lattice dynamic properties of XInSe₂ (X=Cu, Ag, Li). *Journal of Applied Physics*. 109, 113535.
- Jelodar, M. S., Paul, A., Boykin, T., Klimeck, G. (2012). Calculation of phonon spectrum and thermal properties in suspended aOE (c) 100>In (X) Ga1-XAs nanowires. *Journal of Computaional Electron*. 11, 22-28.
- Khasanov, R., ve ark., (2004). Direct Observation of the Oxygen Isotope Effect on the In-Plane Magnetic Field Penetration Depth in Optimally Doped Y B a 2 C u 3 O 7 – δ . *Physical Review Letters*. 92 (5), 057602.
- Mamedov, B. A., Eser, E., Koc, H. (2009). Accurate Evaluation of the Specific Heat Capacity of Solids and its Application to MgO and ZnO Crystals. *International Journal of Thermophysics*. 30, 1048-1054.
- Martin, I., Canul, P., Nuggehalli, M. R. (2019). *Semiconductors: Synthesis, Properties and Applications*. Springer.
- Naidych, B. P., Voznyak, O. M., Parashchuk, T. O., Ilnytskyi, R. V. (2019). Account of surface contribution to thermodynamic properties of lead selenide films. *Semiconductor physics*. 22 (2), 156-164.
- Nath, P. Ve ark., (2016). High-throughput prediction of finite-temperature properties using the quasi-harmonic approximation. *Computational Materials Science*. 125, 82-91.
- Onnes, H. K. (1991). *Through Measurement to Knowledge: The Selected Papers of Heike Kamerlingh Onnes*. Kluwer Academic Publishe.
- Onnes, H. K. (1913). *Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium*. Nobel Lecture.
- Orton, J. W. (2009). *Semiconductors and the information revolution: Magic crystals that made IT happen*. Cambridge, MA Academic Press.

- Öföfoğlu, G. 2014. *Opto-elektronik uygulamalarda kullanılabilecek katkısız ve Al katkılı ZnO filmlerinin üretilmesi*. acikbilim.yok.gov.tr.
- Passler, R. (2011). Non-Debye behaviours of heat capacities of cubic II–VI materials. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 72 (11), 1296-1311.
- Pearson, G. L., Brattain, W. H. (1955). History of semiconductor research. IEEE, Proceedings of the IRE, 43 (12).
- Peierls, S. R. (1980). Model-making in physics. *Contemporary Physics*. 21 (1).
- Preece, W. H. (1883). *I. The effects of temperature on the electromotive force and resistance of batteries*. Proceedings of the Royal Society of London.
- Rossi, L., Bottura, L. (2012). Superconducting Magnets for Particle Accelerators. *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 05, 51-89.
- Santorelli, A., Halloran, M. O. (2019). *Patient-Specific Debye Parameters for Human Blood*. 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).
- Seko, A., Oba, F., Kuwabara, A., Tanaka, I. (2005). Pressure-induced phase transition in ZnO and ZnO–MgO pseudobinary system: A first-principles lattice dynamics study. *Physical Review B*. 72, 024107.
- Seyidov, M. H. Y., Suleymanov, R. A., Babaev, S. S., Mamedov, T. G., Sharifov, G. M. (2008). Effect of external fields on the memory effect of the incommensurate phase in the ferroelectric-semiconductor TiGaSe_2 . *Physics of the Solid State*. 50 (1), 108-117.
- Schmalian, J. (2010). Failed theories of superconductivity. *Modern Physics Letters B*, 24 (27) 2679-2691.
- Shang, S. L., Wang, Y., Kim, D. E., Liu, Z. K. (2010). First-principles thermodynamics from phonon and Debye model: Application to Ni and Ni_3Al . *Computational Materials Science*. 47 (4) 1040-1048.
- Su, R. Ve ark., (2020). Observation of exciton polariton condensation in a perovskite lattice at room temperature. *Nature Physics*. 16, 301-306.
- Toprak, M. A. 2013. *GaAs/In_xGa_{1-x}As kuantum kuyularının elektronik enerji spektrumu*. acikbilim.yok.gov.tr.
- Uglietti, D. (2019). A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors. *Superconductor Science and Technology*. 32 (5) 053001.
- Voon, L. C. L. Y., Willatzen, M. (2009). *The kp method: electronic properties of semiconductors*. Springer Science & Business Media.
- Zhou, F. Ve ark., (2011). Thermal conductivity of indium arsenide nanowires with wurtzite and zinc blende phases. *Physical Review B*. 83, 205416.
- Zomorodpoosh, S. (2020). Development and Application of Data Mining for Property Prediction of Applied Materials. Thesis. Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum.

- Wang, C. C., Davidson, F., Trivedi, S. (1995). Simple laser velocimeter that uses photoconductive semiconductors to measure optical frequency differences. *Applied Optics*. 34 (28), 6496-6499.
- Wyhatt, A. F. G., Lauter, H. J. (1990). *Excitations in Two-Dimensional and Three-Dimensional Quantum Fluids*. Plenum Press.

