

Received: May 2018 Accepted: July 2018

GASE:GE/TE VE GASE:GE/AG SCHOTTKY EKLEMLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hüseyin ERTAP^{1,*}, Mevlüt KARABULUT²

¹ Kafkas Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 36100, Kars/Türkiye

² Gebze Teknik Üniversitesi, Temel Bilimler Fakültesi, Fizik Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye
huseyinertap@kafkas.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, germanyum (Ge) katkılı Galyum Selenit (GaSe) tek kristallerinin elektriksel özellikleri araştırıldı. Germanyum katkılı GaSe tek kristalleri geleneksel Bridgman metodu ile büyütüldü. Schottky eklemleri GaSe:Ge yüzeyleri üzerine Te ve Ag elementleri eritilerek elde edildi. Elektriksel ölçümler için indiyum kontaklar yapıldı. Schottky eklemlerinin karakteristik özellikleri elektrik alan ve sıcaklık fonksiyonuna bağlı olarak araştırıldı. Elde edilen Schottky eklemlerinde düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranının, uygulanan elektrik alan ve ışıkla uyarılmaya bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Schottky eklemleri asimetrik akım-gerilim (I-V) karakteristiği gösterdi. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky ekleminin ışık duyarlılığının In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminde daha yüksek olduğu bulundu. In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemlerinin bariyer yükseklikleri sırasıyla, 52.92 meV ve 41.82 meV olarak hesaplandı. Her iki Schottky ekleminin de bariyer yüksekliği uygulanan elektrik alanla azaldı. Schottky eklemlerinin bariyer yükseklikleri uygulanan elektrik alanın karekökü ile orantılı olarak $\Delta(e\phi) \cong \beta\sqrt{E}$ olarak küçüldüğü ve akımın uygulanan elektrik alanın karekökü ile $I = I_0 e^{\beta\sqrt{E}}$ gibi üstel olarak değiştiği bulundu. Bu sonuçların Frenkel termoelektrik alan teorisi ile uyumlu olduğu görüldü.

Key Words: Bariyer yüksekliği, galyum selenit, schottky eklemleri.

ABSTRACT

In this paper, electrical properties of germanium doped Gallium Selenide (GaSe) single crystals were investigated. Germanium doped GaSe single crystals were grown by conventional Bridgman method. Schottky junctions were obtained by melting Te or Ag elements on the GaSe:Ge surface. In contacts have been made for the electrical measurements. Characteristic properties of Schottky junctions were investigated as functions of temperature and electric field. It was observed that the ratio of forward bias to reverse bias currents in the Schottky junctions varied with both applied electric field and light excitations. Schottky junctions showed asymmetric current-voltage (I-V) characteristics. The light sensitivity of In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky junction was found to be higher than that of In/GaSe:Ge/Te/In Schottky junction. The barrier heights of In/GaSe:Ge/Te/In and In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky junctions were calculated as 52.92 meV and 41.82 meV, respectively. Barrier heights of both Schottky junctions decreased with applied electric field. It was found that barrier heights of the Schottky junctions decreased with the square root of the applied electric field as $\Delta(e\phi) \cong \beta\sqrt{E}$ while the current increased exponentially with the square root of the applied electric field as $I = I_0 e^{\beta\sqrt{E}}$. These results are consistent with the Frenkel thermoelectric field theory.

Key Words: Barrier height, gallium selenide, schottky junctions.

GİRİŞ

Galyum Selenit (GaSe) tek kristali A^{III}B^{VI} yarıiletken bileşik ailesinin önemli bir üyesidir. GaSe yarıiletken tek kristali Se-Ga-Ga-Se atomlarının iki boyutlu tabakalar halinde üst üste yığılması ile oluşmaktadır. Tabakalar içindeki atomlar birbirlerine güçlü kovalent bağlarla bağlı iken tabakalar birbirine zayıf van der Waals bağları ile bağlıdır. GaSe tek kristali tabakalı yapısından dolayı oldukça anizotropik bir materyaldir. Bu anizotropi tabaka içindeki bağlanmaların tabakalar arası bağlanmalardan oldukça güçlü olmasından kaynaklanmaktadır. Tabakalar arası etkileşme oldukça zayıf olmasından dolayı GaSe tek kristali tabakalar boyunca kolaylıkla yarılabirler (Augelli ve ark., 1978; Capozzi ve Minafra, 1981; Capozzi, 1981; Capozzi, 1982; Gousskov ve ark., 1982; Taylor ve Ryan, 1987; Fernelius, 1994; Micocci ve ark., 1997; Gürbulak B, 1997; Shigetomi ve ark., 2000; Kim ve ark., 2004; Shigetomi ve ark., 2004; Seyhan ve ark., 2005; Karabulut ve ark., 2006; Karatay ve ark., 2016; Yuksek ve ark., 2017). GaSe tek kristali 300 K'de 2.02 eV'luk geniş bir yasak bant aralığına sahiptir (Fernelius, 1994; Karabulut ve ark., 2006). GaSe tek kristali özellikle görünür bölgede fotoelektronik ve

optoelektronik cihazlarda uygulama alanına sahip olmakla birlikte lineer olmayan optik özelliklerinden dolayı son yıllarda oldukça geniş olarak araştırılmaktadır (Augelli ve ark., 1978; Capozzi ve Minafra, 1981; Capozzi, 1982; Gouskov ve ark., 1982; Anis ve Piercy, 1984; Fernelius, 1994; Micocci ve ark., 1997; Shigetomi ve ark., 2000; Kim ve ark., 2004; Shigetomi ve ark., 2004; Seyhan ve ark., 2005; Karabulut ve ark., 2006; Allakhverdiev ve ark., 2006). GaSe tek kristali p ve n tipi olarak büyütülebilmektedir (Shigetomi ve ark., 2000). Bir başka çalışmada, 77-850 K sıcaklık aralığında yapılan Hall mobilitesi ölçümlerinden değeri 31-310 meV aralığında değişen beş akseptör seviyesi gözlenmiştir (Manfredotti ve ark., 1977). Sb katkılı p-GaSe'nin 77 K'deki fotolüminesans spektrumunda 1.75 eV ve 1.66 eV değerlerinde iki yeni emisyon bandı gözlenmiştir (Shigetomi ve ark., 1993). Ag katkılı p-GaSe'nin 77 K'deki fotolüminesans spektrumunda 2.02 ve 1.74 eV değerlerinde de iki yeni emisyon bandı gözlenmiştir (Shigetomi ve ark., 1997). N iyonları ekilmiş GaSe tek kristalinin direnç değerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak 10^6 - 10^7 Ω .cm değerinden, 10^3 Ω .cm değerine düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca, sıcaklığa bağlı iletkenlikleri incelendiğinde bu kristalin 500 °C ve 700 °C değerindeki tavlama sıcaklıkları için sırasıyla 234-267 meV ve 26-74 meV'lik aktivasyon enerjilerine sahip iki bölge (100-190 K ve 200-320 K) sergilediği belirtilmiştir (Karabulut ve ark., 2003). Sn katkılı GaSe tek kristalinde oda sıcaklığında iletim bandının 0.52 eV altında bir donör merkezinin baskın olduğu, buna ek olarak 0.36 eV ve 0.53 eV değerlerinde iki elektron yakalama merkezi olduğu belirtilmiştir (Micocci ve ark., 1997). GaSe'nin p ve n tipi iletimleri sırasıyla As ve Ge katkısı ile elde edilmiştir. As ve Ge katkılı numunelerde taşıyıcı iletimlerinin sırasıyla valans bandının 0,54 eV yukarısındaki derin akseptör seviyesi ve iletim bandının 0,58 eV altındaki derin donör seviyeleriyle ilgili olduğu belirtilmiştir (Shigetomi ve ark., 2000). Sn ile katılanmış GaSe tek kristalinin 30-700 K sıcaklık aralığındaki direnç ve Hall etkisi ölçümleri yapılmış ve düşük katkı yoğunluklarında kalayın GaSe'de 155 meV ve 310 meV iyonlaşma enerjilerine sahip çift akseptör safsızlığı gibi davrandığı bulunmuştur (Sanchez-Royo ve ark., 1998). Saf GaSe tek kristalinin 10-300 K sıcaklık aralığında ısıl uyarılmış akım ölçümleri sonucunda 0.02 eV, 0.10 eV ve 0.26 eV değerlerinde üç tuzak seviyesi belirlenmiştir (Gasanly ve ark., 2001).

Tabakalı kristal ailesinden olan GaSe kristaline IV-VII grup elementleri (Ge, Sn, As gibi) katkılандığı zaman GaSe kristalin akseptör merkezleri dengelenebilir ve böylece fiziksel, elektriksel ve optik özellikleri geliştirilebilir veya kontrol edilebilir. Ayrıca bu gibi elementlerin katkılanması ile GaSe kristalinin iletkenlik tipi (n ve p) ve öz direncinin değiştiği bilinmektedir (Micocci ve ark., 1997; Sanchez-Royo ve ark., 1998; Shigetomi ve ark., 2000; Mamedov ve

ark., 2005). GaSe kristaline Ge katkılama işlemi yapıldığında akseptör merkezlerinin dengelenmesine paralel olarak, Ge atomları farklı komplekslere girebilir, tabakalar arasına yerleşebilir ve böylece GaSe kristalinde ışığa duyarlı merkezlerin konsantrasyonları arttırılabilir (Bube ve Lind, 1960; Mamedov ve ark., 2005).

Bu çalışmada, germanyum (Ge) katkılı Galyum Selenit (GaSe:0.01Ge) tek kristallerinin yüzeylerine Te ve Ag elementleri eritilerek oluşturulan Schottky eklemelerinin Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği sıcaklığın fonksiyonuna bağlı olarak gerçekleştirildi.

MATERYAL ve METOT

GaSe:Ge Bileşiğinin Sentezlenmesi

Kristal büyütme işlemi öncesi bileşiklerin sentezi gerçekleştirilmiştir. Saf Ga (%99,9999), Se (%99,9999) ve Ge (%99,9999) maddeleri uygun oranda tartılarak, çok titizlikle temizlenmiş kuartz ampüllere doldurularak, 10^{-4} Torr basınçta kapatılmıştır. Stikyometrik oranda Ga, Se ve Ge elementleri ile doldurulmuş ampül fırında $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar $100\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ hızı ile ısıtıldı. $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında ergimiş Ga, Se ve Ge etkileşmesi sonucunda GaSe:Ge oluşumu gerçekleşir. Bu sıcaklıklarda ampülün titreştirilmesi bileşiğin homojen olmasını sağladığından dolayı her sıcaklık artışında ampül çalkalanmış/titreştirilmiştir. $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında 30 dakikalık periyotlarda 4 saat boyunca çalkalanarak/titreştirilerek bekletildi. Bu sıcaklıktan sonra fırının sıcaklığı $50\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ hızı ile $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına çıkarıldı. Bu son sıcaklıkta ampülde bulunan GaSe:Ge bileşiğinin sıvı durumda olduğu gözlemlendi. Bu sıcaklıkta 30 dakikalık periyotlarda 12 saat boyunca titreştirilerek bekletildi. Titreştirme işleminden sonra GaSe:Ge bileşiği $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında 18 saat bekletildi. Son olarak GaSe:Ge bileşiğinin sentezlendiği fırının sıcaklığı $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığından oda sıcaklığına yavaşça düşürüldü. Bütün bu işlemler sonucunda GaSe:Ge bileşiği elde edildi.

GaSe:Ge Tek Kristalinin Büyütülmesi ve Akım-Gerilim Ölçümleri

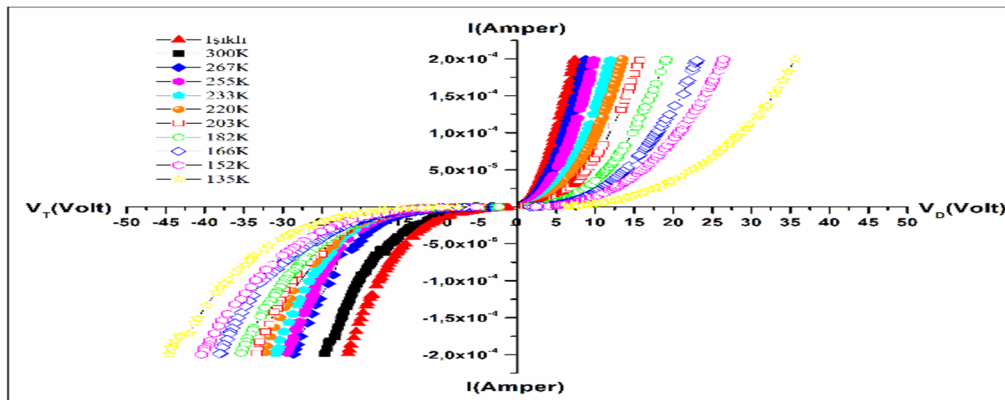
Sentezlenen GaSe:Ge bileşiğinin bulunduğu kuartz ampül dikey Bridgman kristal büyütme fırınının içerisine kuartz çubuklar yardımıyla tam merkezli olacak şekilde yerleştirildi. Kuartz ampülün tam merkezli olacak şekilde yerleştirilmesinin nedeni kristalleşmenin bir noktadan başlamasını sağlamak içindir. Daha sonra 24 saat içerisinde Bridgman fırına GaSe:Ge bileşiğinin eriyik halde olması için gereken sıcaklık olan $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerine ulaşması için gerekli gerilim uygulandı. Bridgman fırınında kuartz ampülün uç bölgesinin bulunduğu kısım Cr-Al termoçift yerleştirilerek sıcaklık değişimi kontrol edildi. İstedığımız sıcaklığı elde

ettikten sonra sıcaklık dengesinin sağlanması için voltaj sabit tutuldu ve Bridgman fırını bu sıcaklıkta 12 saat beklemeye bırakıldı. Daha sonra Bridgman fırının hareketini sağlayan motor çalıştırıldı. Bridgman fırını 2 mm/saat hızıyla hareket etmektedir ve GaSe:Ge tek kristalinin büyümesi için gerekli olan sıcaklık gradyan bölgesinin geçilmesi 72 saat sürmektedir. Bridgman fırınına uygulanan voltaj kristal büyütme işlemi tamamlandıktan sonra 24 saat içerisinde sıfırlandı.

Büyütülen GaSe:Ge tek kristallerinden Schottky eklemleri yapmak için 100 μm kalınlıklarda örnekler hazırlandı. Daha sonra GaSe:Ge numunelerinin üzerine Te ve Ag elementleri eritilerek Schottky eklemleri elde edildi. I-V ölçümleri için yapılan Schottky eklemlerine In kontaklar yapıldı. Schottky eklemlerinin akım-gerilim ölçümleri Keithly 2400 I-V Sourcemeter ile sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirildi.

BULGULAR VE TARTIŞMA

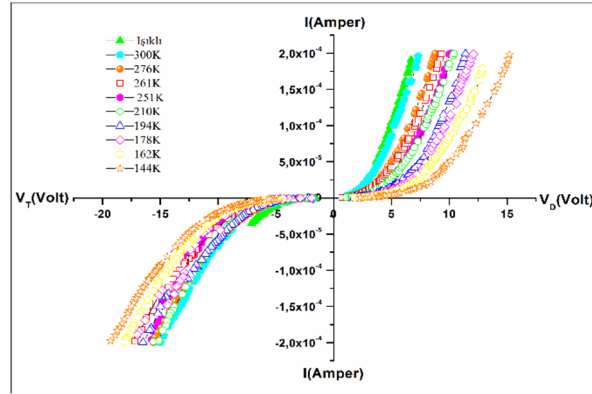
Germanyum katkılı Galyum Selenit tek kristallerinden yapılan Schottky eklemlerinin akım-gerilim (I-V) karakteristiği ölçümleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak araştırıldı. Şekil 1'de In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminin sıcaklığa bağlı I-V grafiği verilmektedir.



Şekil 1. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminin sıcaklığa bağlı I-V grafiği

DeneySEL sonuçlardan elde edilen verilerden düz ve ters yöndeki I-V karakteristiğinin asimetriklik durumunun oldukça büyük olduğu görülmektedir. Yani, aynı gerilim değerinde düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranı oldukça büyüktür. Bu farkın kristal yüzeyine Te elementi eritilirken oluşan oksitleşmeden kaynaklandığı fikrindeyiz. Çünkü Te elementi eritilirken oluşan oksitleşme olayında elektronlar oksit yardımı ile bağa katılır ve bu böylece

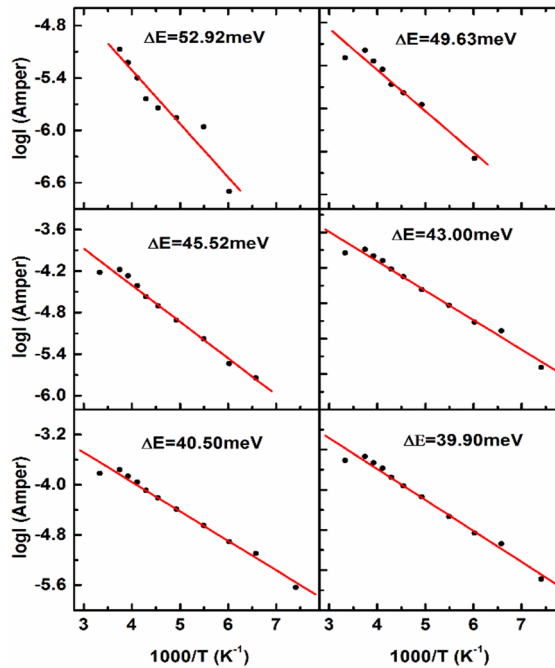
tüketilmiş tabaka artırılır ve potansiyel engelin yüksekliği de artmış olur. 300 K'de engelli yapının I-V karakteristiğinden elde edilen verilerden, numune beyaz ışıkla uyarıldığı zaman ek yük taşıyıcıların da uyarıldığı görülmektedir. Bu yük taşıyıcıların valans bandından iletim bandına veya akseptör (alıcı) merkezlerine uyarılmaları sonucu serbest boşlukların ve elektronların yoğunluğunun artmasından kaynaklanır. Sıcaklık düşürüldüğü zaman I-V karakteristiğinin voltaj eksenine yaklaştığı görülmektedir. Bu durumda sıcaklık düşürüldüğünde In/GaSe:Ge/Te/In Schottky eklemının tüketilmiş tabakasında uyarılan yük taşıyıcı yoğunluklarının azaldığı ve böylece akımın azaldığı görülmektedir. Elde edilen deneysel verilerden, 135 K sıcaklık ve 8.9 V gerilim değerinde düz yöndeki akım 2.90×10^{-6} A iken ters yöndeki akımın ise 4.00×10^{-7} A olduğu görülmektedir. Şekil 2'de In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemının I-V karakteristiği verilmektedir.



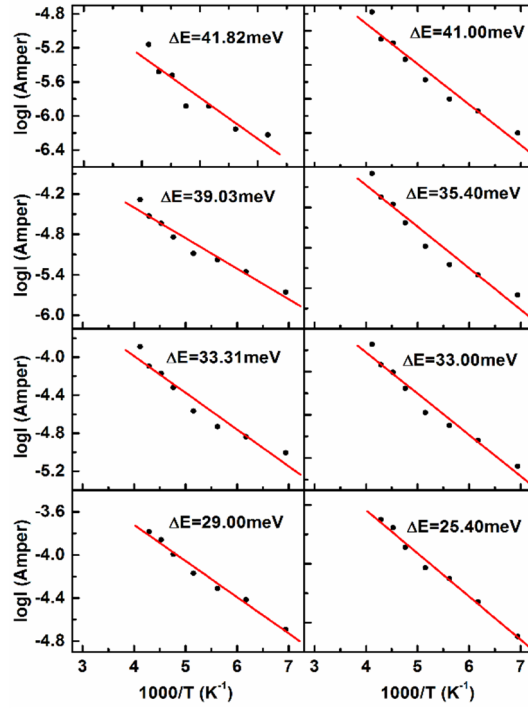
Şekil 2. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemının sıcaklığa bağımlı I-V grafiği

I-V karakteristiğinden elde edilen verilerin analizinden aynı gerilim değerinde düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranının oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bu farkın kristal yüzeyine Ag elementinin eritilirken oluşan oksitleşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemi beyaz ışıkla uyarıldığında fotoiletkenliğinin yeterince büyük olduğu görülmektedir. Fotoiletkenlikte görülen bu artışın nedeni oluşturulan engel bölgesinde uyarılan eksiton fotoiletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Bu Schottky eklemının I-V karakteristiği ölçümlerinden elde edilen veriler aynı gerilim değerinde düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranı, In/GaSe:Ge/Te/In Schottky eklemine nazaran daha büyük olmaktadır. I-V karakteristiğinden sıcaklık azaldığı zaman iletkenliğin de azaldığı görülmektedir. Yani, In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemının tüketilmiş tabakasında sıcaklıkla uyarılmış yük taşıyıcıların yoğunluğu küçülür ve akım azalır. Elde edilen deneysel

verilerden, 210 K sıcaklık ve 4 V gerilim değerinde düz yöndeki akım 1.44×10^{-5} A iken ters yöndeki akımın ise 1.30×10^{-6} A olduğu görülmektedir. Elde edilen her iki Schottky eklemine de düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranının uygulanan elektrik alan ve ışıkla uyarılmaya bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Her iki Schottky eklemi de asimetrik akım-gerilim (I-V) karakteristiği gösterdi. I-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemine ışık duyarlılığının In/GaSe:Ge/Te/In Schottky eklemine ışık duyarlılığından daha yüksek olduğunu gösterdi. Ayrıca, elde edilen sonuçlardan I-V karakteristiğinin p-n eklem karakteristiğine benzer olduğu görüldü ve bu ideal bir durumdur. Daha önce yapılan çalışmalarda tabakalı tek kristallerin I-V karakteristiğinde tuzaklanmalarla (yapışma merkezleri) ilgili $I \sim V^n$, $n = 1$ lineer, $n = 2$ kuadratik ve süper lineer bölgeler olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda, bu kristallerde I-V karakteristiği değişiminde Pool-Frenkel termal alan iyonizasyonunun karakteristik olduğu belirtilmiştir (Allers, 2004; Yakuphanoglu et al., 2007). In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemelerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri (aktivasyon enerjileri) hesaplandı. Uygulanan farklı elektrik alanlarda (gerilimlerde) $\log I - 1000/T$ değişimleri $I = I_0 e^{-\frac{e\phi}{k_B T}}$ eşitliğine fit edilerek In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemelerinin engel yükseklikleri hesaplandı. Hesaplanan bu engel yüksekliklerinden elde edilen grafikler In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemeleri için sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 3. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky eklemine LogI-10³/T grafiği



Şekil 4. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky ekleminin LogI-10³/T grafiği

Teorik fitlerden elde edilen Schottky eklemlerinin engel yükseklikleri (aktivasyon enerjileri) her bir grafik içinde verilmektedir. In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemlerinin bariyer yükseklikleri aynı elektrik alanda sırasıyla 52.92 meV and 41.82 meV olarak hesaplandı. Her iki Schottky ekleminde de bariyer yüksekliğin uygulanan elektrik alanla azaldığı görüldü. Uygulanan elektrik alanın bir kısmı numunenin taban bölgesine büyük bir kısmı ise tüketilmiş tabakaya yani Schottky engeli bölgesine düşer. Deneysel sonuçlardan görüldüğü gibi her iki Schottky eklemine uygulanan elektrik alan potansiyel engelin küçülmesine neden olmaktadır. Bu durumda ki metal-yarıiletken kesişimlerinde, akım iletim mekanizmalarından birisi olan termoiyonik emisyon Pool-Frenkel mekanizması oluşturduğumuz Schottky eklemleri için karakteristiktir (Lui ve Migliorato, 1997; Harrell ve Gopalakrishnan, 2002; Allers, 2004; Kambur, 2005; Zeyrek, 2005). In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemleri için farklı elektrik alanlarda hesaplanan potansiyel engellerin değerleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmektedir.

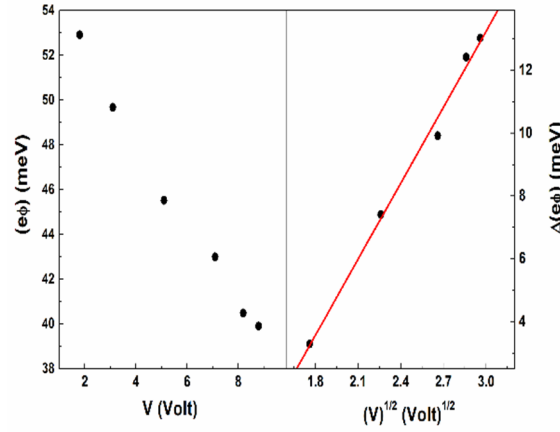
Çizelge 1. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky eklemleri için hesaplanan değerler

V (Volt)	(eφ) (meV)	\sqrt{V} (Volt) ^{1/2}	Δ(eφ) (meV)
1.8	52.92	-	-
3.1	49.63	1.76	3.29
5.1	45.52	2.26	7.40
7.1	43.00	2.66	9.92
8.2	40.50	2.86	12.42
8.8	39.90	2.96	13.02

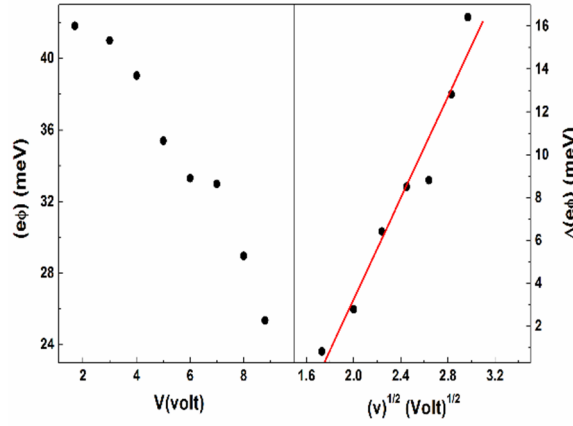
Çizelge 2. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemleri için hesaplanan değerler

V (Volt)	(eφ) (meV)	\sqrt{V} (Volt) ^{1/2}	Δ(eφ) (meV)
1.8	41.82	-	-
3.0	41.00	1.73	0.82
4.0	39.03	2.00	2.79
5.0	35.40	2.24	6.42
6.0	33.31	2.45	8.51
7.0	33.00	2.64	8.82
8.0	29.00	2.83	12.82
8.8	25.40	2.97	16.42

Elde edilen deneysel verilerin analizi sonucunda elde edilen (eφ)-V grafikleri ve $I = I_0 \cdot e^{\beta\sqrt{E}}$ denkleminde lineer fitlerden elde edilen Δ(eφ)- \sqrt{V} grafikleri In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemleri için sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir.

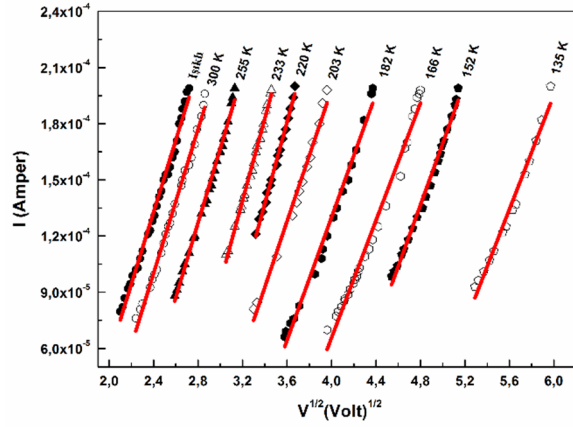


Şekil 5. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminin engel yüksekliğinin elektrik alan ve elektrik alanın karekökü ile değişimi

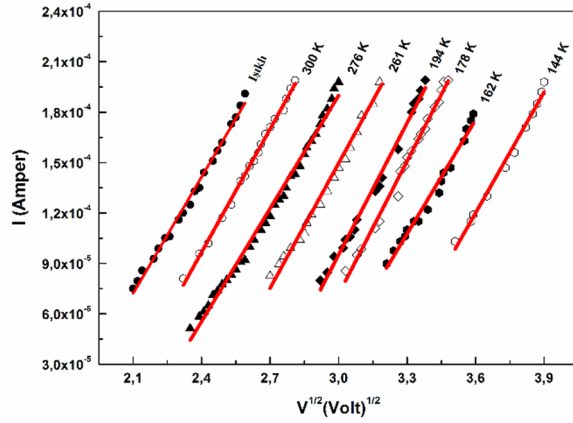


Şekil 6. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky ekleminin engel yüksekliğinin elektrik alan ve elektrik alanın karekökü ile değişimi

Deneyisel sonucu elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi Schottky eklemlerinin potansiyel engel yüksekliklerinin küçülmesi elektrik alanın karekökü ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Potansiyel engelin küçülmesi Pool-Frenkel mekanizmasındaki termoelektrik alan akımının küçülmesi $I \sim \exp \beta \sqrt{E}$ gibi değişmesine neden olduğu görülmektedir. Burada β Frenkel katsayısıdır (Yakuphanoglu et al., 2007). Şekil 7 ve Şekil 8'de I-V karakteristiği verilerinin $I - \sqrt{V}$ gibi değişimi verilmektedir.



Şekil 7. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminin $I - \sqrt{V}$ değişim grafiği



Şekil 8. In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky ekleminin $I - \sqrt{V}$ değişim grafiği

Şekil 7 ve Şekil 8'de I-V karakteristiği verilerinin $I \sim \sqrt{V}$ gibi, yani elektrik alanın karekökü ile üstel değişimi GaSe tek kristali ile yapılan Schottky eklemlerinde yük taşıyıcılarının elektronların potansiyel engelini sıcaklık ile aşmasının elektrik alan ile kolaylaştığını göstermektedir. Schottky eklemine uygulanan elektrik alan arttığında potansiyel engelin küçüldüğü ve $I \sim \sqrt{V}$ değişiminin lineer olduğu elde edilen grafiklerden açıkça görülmektedir. Ayrıca, bu şekilde oluşturulan Schottky eklemlerinde potansiyel engellerin dış alanla alçalması, katkı atomlarının termik iyonizasyonunun elektrik alanı ile kolaylaşmasından kaynaklanmaktadır.

SONUÇ

Tabakalı kristaller ailesinden olan GaSe tek kristalinden yapılan In/GaSe:Ge/Te/In ve

In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemlerinin I-V karakteristikleri 77-300 K sıcaklık aralığında araştırıldı. In/GaSe:Ge/Te/In ve In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky eklemleri için aynı elektrik alanda düz yöndeki akımın ters yöndeki akıma oranının hem sıcaklığa hem de ışıkla uyarılmaya bağlı olarak değiştiği görüldü. In/GaSe:Ge/Te/In Schottky ekleminin potansiyel engel yüksekliği 52.92 meV, In/GaSe:Ge/Ag/In Schottky ekleminin potansiyel engel yüksekliği ise 41.82 meV olarak hesaplandı. Deneysel I-V karakteristiğinin analizi şiddetli elektrik alanında Schottky engellerinin elektrik alanın karekökü ile $\Delta(e\phi) \cong \beta\sqrt{E}$ gibi orantılı küçüldüğünü, akımın elektrik alanın karekökü ile $I = I_0 e^{\beta\sqrt{E}}$ gibi eksponansiyel arttığı görüldü. Ayrıca, deneysel sonuçların Frenkel termoiyonizasyonu teorisine uygun olduğu görüldü.

KAYNAKLAR

- Allakhverdiev K, Baykara T, Ellialtıođlu Ő, Hashimzade F, Huseinova D, Kawamura K, Kaya A A, Kulibekov A M, Onari S, 2006. Lattice vibrations of pure and doped GaSe. *Mat. Res. Bull.*, 41: 751-763.
- Allers K H, 2004. Prediction of dielectric reliability from I-V characteristics: Poole-Frenkel conduction mechanism leading to pE model for silicon nitride MIM capacitor. *Microelectronics Reliability*, 44: 411-423.
- Anis M K, Piercy A R, 1984. Electrical conduction in p-GaSe. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 17: 1229-1232.
- Augelli V, Manfredotti C, Murri R, Vasanelli L, 1978. Hall-mobility anisotropy in GaSe. *Phys. Rev. B*, 17: 3221-3226.
- Bube R H, Lind E L, 1960. Photoconductivity in gallium sulfo-selenide solid solutions. *Physical Review*, 119: 1535-1537.
- Capozzi V, 1981. Direct and Indirect Excitonic Emission in GaSe. *Phys. Rev. B*, 23: 836-840.
- Capozzi V, 1982. Kinetics of radiative recombinations in GaSe and influence of Cu doping on the luminescence spectra. *Phys. Rev. B*, 28: 4620-4627.
- Capozzi V, Minafra A, 1981. Photoluminescence properties of Cu-doped GaSe. *J. Phys. C: Solid State Physics*, 14: 4335-4346.
- Fernelius N C, 1994. Properties of gallium selenide single crystal. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 28: 243-249.
- Gasanly N M, Aydınlı A, Salihođlu Ö, 2001. Thermally stimulated current observation of trapping centers in undoped GaSe layered single crystals. *Cryst. Res. Technol.*, 36: 295-301.
- Gousskov A, Camassel J, Gousskov L, 1982. Growth and characterization of III-VI layered crystals like GaSe, GaTe, InSe, $\text{GaSe}_{1-x}\text{Te}_x$ and $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}$. *Prog. Crystal Growth and Charact.*, 5: 323-413.
- Gürbulak B, 1997. İkili (InSe:Er, GaSe, GaSe:Gd) ve Üçlü (TlGaSe₂, TlGaSe₂:Gd) Tek Kristallerinin Büyütülmesi Sođurma ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Harrell W R, Gopalakrishnan C, 2002. Implications of advanced modeling on the observation of Poole-Frenkel effect saturation. *Thin Solid Films*, 405: 205-217.

- Kambur H, 2005. Doğal Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Frekansa Bağlı Değişimi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Karabulut O, Parlak M, Turan R, Serincan U, Akınoğlu B G, 2006. Influence of ion implantation on structural and photoconductive properties of Bridgman grown GaSe single crystals. *Cryst. Res. Technol.*, 41: 243-249.
- Karabulut O, Parlak M, Turan R, Serincan U, Tasarkuyu E, Akinoglu B G, 2003. Electrical properties of nitrogen implanted GaSe single crystal. *Cryst. Res. Technol.*, 38: 811-816.
- Karatay A, Yuksek M, Ertap H, Mak A K, Karabulut M, Elmali A, 2016. Influence of boron concentration on nonlinear absorption and ultrafast dynamics in GaSe crystals. *Optical Materials*, 64: 74-80.
- Kim C, Jang K, Kim Y L, 2004. Optical properties of Tm-doped GaSe single crystals. *Solid State Communications*, 130: 701-704.
- Lui O K B, Migliorato P, 1997. A new generation-recombination model for device simulation including the poole-frenkel effect and phonon assisted tunnelling. *Solid State Electronics*, 41: 575-583.
- Mamedov G M, Karabulut M, Kodolbaş A O, Öktü Ö, 2005. Exciton photoconductivity in Ge doped GaSe crystals. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 242: 2885-2891.
- Manfredotti C, Mancini A M, Murri R, Rizzo A, Vasenelli L, 1977. Electrical properties of p-type GaSe. *II Nuovo Cimento*, 39: 257-268.
- Micocci G, Serra A, Tepore A, 1997. Impurity Levels in Sn-Doped GaSe Semiconductor. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 162: 649-659.
- Sanchez-Royo J F, Errandonea D, Segura A, 1998. Tin related double acceptors in gallium selenide single crystals. *J. Appl. Phys.*, 83: 4750-4755.
- Seyhan A, Karabulut O, Akınoğlu B G, Aslan B, Turan R, 2005. Optical Anisotropy in GaSe. *Cryst. Res. Technol.*, 40: 893-895.
- Shigetomi S, Ikari T, Nakashima H, 2004. Characterization of phosphorus in layered semiconductor GaSe. *Journal of Luminescence*, 79: 79-84.
- Shigetomi S, Ikari S, Nakashima H, 2000. Electrical properties of p- and n-GaSe doped with As and Ge. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39: 5083-5084.
- Shigetomi S, Ikari T, Nakashima H, 1993. Optical and Electrical Properties of p-GaSe doped with Sb. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32: 2731-2734.
- Shigetomi S, Ikari T, Nakashima H, 1997. Electrical and optical characteristics of the layer semiconductor p-GaSe doped with Ag. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 160: 159-164.
- Taylor R A, Ryan J F, 1987. Time resolved exciton photoluminescence in GaSe and GaTe. *J. Phys. C: Solid State Physics*, 20: 6175-6187.
- Yakuphanoglu F, Tugluoglu N, Karadeniz S, 2007. Space charge-limited conduction in Ag/p-Si Schottky diode. *Physica B*, 392: 188-191.
- Yukse M, Karatay A, Ertap H, Elmali A, Karabulut M, 2017. Frequency conversion, nonlinear absorption and carrier of GaSe:B/Er crystals. *Optical Materials*, 66: 137-141.
- Zeyrek S, 2005. Al/SiNx/p-Si (100) (MYY) Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerinin Düşük Sıcaklıklarda İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.