



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

2000-82

2000-82

InSe İNCE FİMLERİN VE InSe
İNCE FİLM AYGITLARIN
ELDE EDİLMESİ VE İNCELENMESİ

PROJE NO: TBAG-1442

Temel Bilimler Araştırma Grubu
Basic Sciences Research Grant Committee

2000-82

**InSe İNCE FİMLERİN VE InSe
İNCE FİLM AYGITLARIN
ELDE EDİLMESİ VE İNCELENMESİ**

PROJE NO: TBAG-1442

Prof.Dr. Çiğdem Erçelebi

Prof.Dr. İbrahim Günal

Prof.Dr. Hüsnü Özkan

Prof.Dr. Nizami Gasanly

Prof.Dr. Kerim Allakhverdiev

Dr. Mehmet Parlak

2000-82

**InSe İNCE FİLMLEİN VE InSe
İNCE FİLM AYGITLARIN
ELDE EDİLMESİ VE İNCELENMESİ**

PROJE NO: TBAG-1442

Prof.Dr. Çiğdem Erçelebi

Prof.Dr. İbrahim Günal

Prof.Dr. Hüsni Özkan

Prof.Dr. Nizami Gasanly

Prof.Dr. Kerim Allahverdiev

Dr. Mehmet Parlak

İÇİNDEKİLER

- ÖNSÖZ	1
- ABSTRACT	2
- ÖZ	4
- GİRİŞ	5
- I. BÖLÜM	
1.1. YÖNTEM	7
1.2. YAPI VE OPTİK ÖZELLİKLER	7
1.3. ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER	8
- KAYNAKLAR	14
- ŞEKİL VE TABLOLAR	15

ABSTRACT

ÖNSÖZ :

The main objective of this project is to investigate the effects of growth parameters and post heat treatments on the material properties by examining the electrical, optical and structural properties of InSe thin films grown by the vacuum evaporation technique on glass substrates. In addition, some single crystal elements of A.B.C. group semiconductor compounds were characterized by using the system constructed in this project.

InSe thin films were grown at substrate temperatures of 100-300 °C and heat treated at 100-300 °C under 10⁻⁵ atmosphere. For the characterization, temperature dependent conductivity and Hall effect measurements, SEM, optical absorption spectroscopy techniques were used.

From the structural and optical measurements it was found that the films grown at lower substrate temperatures contain InSe, In₂Se₃ and In₂Se phases, while at higher substrate temperatures In₂Se phase was dominant. Direct forbidden band gap energy was found to vary from 2.1-2.4 eV depending on the substrate and post heat treatment temperatures.

Temperature dependent conductivity and Hall effect studies in the range 30-320 K have shown that the current transport is due to thermionic emission, tunneling and Mott's variable range hopping mechanisms in the temperature ranges of above 220K, 90-220K and below 90K respectively.

To produce Schottky contacts on InSe, Au, Pt, Ag, Bi and C were used. Among these contacts, Pt-InSe Schottky structures showed better properties.

In addition to the investigation on InSe films, Ag₂Se thin crystals were electrically characterized by using the system developed in this project. From

ABSTRACT

The temperature dependent conductivity measurements were found that for both crystals three different impurity ionization energies at different temperatures. The main objective of this project is to investigate the effects of growth parameters and post heat treatments on the material properties by examining the electrical, optical and structural properties of InSe thin films grown by the vacuum evaporation technique on glass substrates. In addition, some single crystals belonging to $A_3B_5C_9$ ternary semiconducting compounds were characterized by using the system constructed in this project.

n-InSe thin films were grown at substrate temperatures 150-250 C and heat treated at 100-200 C under N_2 atmosphere. For the characterization, temperature dependent conductivity and mobility, X-ray diffraction, SEM, optical absorption spectroscopy techniques were used.

From the structural and optical measurements, it was found that the films grown at lower substrate temperatures contain InSe, In_2Se_3 and In_6Se_7 phases, while at higher substrate temperatures In_2Se_3 is missing. Direct forbidden band gap energy was found to vary 1.21-1.38 eV depending on the substrate and post heat treatment temperatures.

Temperature dependent conductivity and mobility studies in the range 20-320 K have shown that the current transport is due to thermionic emission, tunneling and Mott's variable range hopping mechanisms in the temperature ranges of above 220K, 110-220K and below 100K, respectively.

To produce Schotky contacts on InSe grown on TO coated glasses, Au, Pt, Ag, Bi and C were used. Among these only TO/InSe/Pt and TO/InSe/C structures showed diode properties.

In addition to the investigation on InSe films, $Ag_3Ga_5Te_9$ crystals were electrically characterized by using the system developed in this project. From

the temperature dependent conductivity measurements it was found that for both crystals three different impurity ionization energies at different temperature ranges were observed and the electrical conduction was attributed to the impurity ionization.

optik ve yapı özelliklerinin inceleyerek depozyon parametrelerinin ve filmlere uygulanan suzu film büyüme sonrası süreçlerin material özelliklerine etkilerinin araştırılmasıdır.

Ayrıca A.P.C₁ tipi ternary yarıiletken bileşikler grubunda bazı tek kristallerin elektriksel karakterizasyonunu bu proje kapsamında oluşturulan sistemle gerçekleştirebiliriz.

Değişik sıcaklıklarda (150-250^oC) tutulan cam tabanlar üzerine vakumda büyütülen ve sonrasında azot gazı altında soğutulan (100-200^oC) n-InSe ince filmlerin karakterizasyonunda sıcaklık bağımlı mobilite ve iletkenlik, x-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskopu, opak soğurma spektrometresi gibi ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Yapı ve optik özellik çalışmalarını düşük tutucu taban sıcaklıklarında kaplanan filmlerde In₂Se₃, In₂Se₅ ve In₄Se₇ fazlarının oluştuğunu; yüksek sıcaklıklarda In₂Se₃ fazının bulunmadığını, direkt yasak enerji aralığı değerinin tutucu taban ve soğutma sıcaklığına bağlı olarak 1.21-1.38 eV arasında değiştiğini göstermiştir.

20-320 K arasında yapılan sıcaklık bağımlı iletkenlik ve Hallite ölçümlerinin sonuçları hazırlanan InSe ince filmlerdeki iyon-geçiş mekanizmasının genel olarak 220 K'in üzerinde termiyonik iyoniyon; 100-200 K sıcaklık aralığında iyoniyon; 100 K'in altında ise Vlasov değişken enerjili hoplama modeline uyduğunu göstermiştir.

Au, Pt, Ag, Bi, C kullanılarak kalay oksit (SnO₂) katmanlı camlar üzerinde hazırlanan InSe ince filmlere Schottky kontak oluşturulması çalışmaları sonucunda TO/InSe/Pt ve TO/InSe/C yapılarında diyal özelliği göstermiştir. Ayrıca, proje kapsamında oluşturulan sistem kullanılarak Ag₂Ga₂Te₂ ve

ÖZ

Bu projenin öncelikli amacı vakumda cam tabanlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin elektrik, optik ve yapı özelliklerinin incelenerek depozisyon parametrelerinin ve filmlere uygulanan bazı film büyütme sonrası işlemlerin materyal özelliklerine etkilerinin araştırılmasıdır.

Ayrıca $A_3B_5C_9$ tipi ternary yarıiletken bileşikler grubundan bazı tek kristallerin elektriksel karakterizasyonları bu proje çalışması sürecinde oluşturulan sistemle gerçekleştirilmiştir.

Değişik sıcaklıklarda ($150-250^\circ\text{C}$) tutulan cam tabanlar üzerine vakumda büyütülen ve sonrasında azot gazı altında tavlanan ($100-200^\circ\text{C}$) n-InSe ince filmlerin karakterizasyonunda sıcaklık bağımlı mobilite ve iletkenlik; x-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, optik soğurma spektrometresi gibi ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Yapı ve optik özellik çalışmaları, düşük tutucu taban sıcaklıklarında kaplanan filmlerde InSe, In_2Se_3 ve In_6Se_7 fazlarının oluştuğunu; yüksek sıcaklıklarda In_2Se_3 fazının bulunmadığını; direk yasak enerji aralığı değerinin tutucu taban ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak $1.21-1.38$ eV arasında değiştiğini göstermiştir.

20-320 K arasında yapılan sıcaklık bağımlı iletkenlik ve mobilite ölçümlerinin sonuçları hazırlanan InSe ince filmlerdeki akım-geçiş mekanizmasının genel olarak 220 K'in üzerinde termiyonik emisyon; 100-200 K sıcaklık aralığında tünelleme; 100 K'in altında ise Mott'un değişken erimli hoplama modeline uyduğunu göstermiştir.

Au, Pt, Ag, Bi, C kullanarak kalay oksit (TO) kaplı cam tabanlar üzerine hazırlanan InSe ince filmlere Schottky kontak oluşturulması çalışmaları sonucunda TO/InSe/Pt ve TO/InSe/C yapılarında diyot özelliği gözlenmiştir. Ayrıca, proje kapsamında oluşturulan sistem kullanılarak $\text{Ag}_3\text{Ga}_5\text{Te}_9$ ve

$Ag_3In_5Se_9$ kristallerinin elektriksel karakterizasyonları da yapılmıştır. Sıcaklık bağımlı iletkenlik ölçümlerinden her iki kristal için de farklı sıcaklık aralıklarında üç farklı safsızlık iyonizasyon enerji değeri belirlenmiş, elektriksel iletkenliğin safsızlık iyonizasyonuna bağlı olduğu gözlenmiştir.

GİRİŞ

Optoelektronik uygulamada önemli bir yere sahip katmanlı yarıiletkenler grubundan InSe, gerek optik yasak enerji aralığı değerinin ($E_g \cong 1.3$ eV) fotovoltaik dönüşüm için uygunluğu, gerekse temiz arayüzeyle eklem oluşturulabilmesinin mümkün olduğundan ötürü elektrik, optik ve yapı özellikleri detaylı olarak araştırılan bir malzemedir. Bilgimiz dahilinde literatürdeki araştırma sonuçları tek kristal InSe üzerine yoğunlaşmıştır [1, 2]. Ancak ince film InSe'in özellikle aygıt uygulamasındaki önemi büyüktür [3, 4]. InSe ince film hazırlanmasındaki güçlük film depozisyonu sırasında In_4Se_3 , In_6Se_7 , In_2Se_3 gibi değişik fazlarında aynı filmde oluşabilmesi ve film özelliklerinin kullanılan tekniğe ve kaplama sonrasında uygulanan ısıl işlemlere kuvvetli bir şekilde bağlı olmasıdır. Literatürde, InSe ince filmlerin elde edilmesi ve karakterizasyonu konusunda rapor edilmiş çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen [5, 6] elektrik, optik ve yapı özelliklerine depozisyon parametrelerinin ve sonrası işlemlerin etkisi konusunda sistematik bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca InSe ince filmlerde transport özelliklerinin belirlenmesi aygıt uygulaması için gerekli ve önemlidir.

Yukarıda belirtilen amaçlarla InSe ince filmlerin vakumda depozisyonu ve incelenmesi konusunda başlatılan ve proje kabulüne kadar geçen süre içinde belirli bir tutucu taban sıcaklığında büyütülen InSe ince filmlerin elektriksel özelliklerinin incelenmesini kapsayan çalışmalar [7] proje desteği ile sağlanan cihazlarla gerek örnek hazırlama gerekse elektriksel ölçüm aşamalarının daha kontrollü ve sistematik hale getirilmesiyle geliştirilmiştir.

Prof.Dr. Çiğdem Erçelebi danışmanlığında “InSe ince filmlerin deposiyonu ve karakterizasyonu” konusunda doktora çalışmalarını [8] sürdüren ve tamamlayan Dr. Mehmet Parlak proje çalışmalarının her aşamasında aktif olarak görev almıştır.

InSe ince filmlerin optik özellikleri ölçümleri Prof.Dr. Kerim Allakhverdiev’in (TÜBİTAK Marmara araştırma Merkezi); yapı özellikleri ölçümleri ise Prof.Dr. Macit Özenbaş’ın (ODTU Metalurji Müh.) işbirlikleri ile gerçekleştirilmiştir.

$Ag_3Ga_5Te_9$ ve $Ag_3In_5Se_9$ tek kristallerinin yapı özellikleri çalışmalarında Prof.Dr. Nizami Gasanly ve Prof.Dr. Hüsnü Özkan elektriksel özelliklerinde ise Prof.Dr. Çiğdem Erçelebi ve Prof.Dr. İbrahim Günal yer almışlardır.

InSe ince filmlerin yapı ve optik özellikleri üzerindeki tutucu taban ve tavlama işlemlerinin etkisi çalışmalarının sonuçları Thin Solid Films [9]; $Ag_3Ga_5Te_9$ ve $Ag_3In_5Se_9$ tek kristallerinin yapısal ve elektriksel karakterizasyon sonuçları ise Crys. Res. Technol. [10] isimli dergilerde basılmıştır. Ayrıca InSe ince filmlerin elektriksel özelliklerini içeren çalışma sonuçları Jr. of Materials Science isimli dergiye bazı küçük düzeltmeler yapılarak gönderilmiştir [11].

filmler taban sıcaklıklarında (150 °C) elde edilen filmlerde gözlemlenmiştir. Bu

1. BÖLÜM : InSe ince filmlerin depozisyonu ve incelenmesi

filmlerdeki belirgin polikristal yapının tutucu taban sıcaklığına bağımlı olduğu belirlenmiştir.

1.1. Yöntem

XRD sonuçları her bir tutucu taban sıcaklığında çok büyüklüğünü InSe ince filmler vakumda termal buharlaştırma yöntemi ile %53.53 In ve %47.47 Se atomik kompozisyonundan oluşan toz haline getirilmiş InSe tek kristali kullanılarak değişik sıcaklıklarda (150, 200, 250 °C) tutulan cam tabanlar üzerine büyütülmüştür. Filmlerin bir kısmı olduğu gibi bırakılırken diğerleri azot gazı altında 100, 150 ve 200 °C sıcaklıklarda 1 saat süre ile tavlama yapılmıştır. Filmlerin kalınlıkları optik girişim yöntemi ile belirlenmiştir.

Yüksek büyüklüğünü tavlama sıcaklığıyla ilgili gözlemlenmiştir.

Filmler, elektriksel özelliklerini Hall etkisi ve Van der Pauw yöntemleri ile belirlenmeye uygun geometrilere büyütülmüş ve kontaklar buharlaştırılmış In ile oluşturulmuştur. Bu değerlerde tutucu taban ve tavlama sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Sıcaklık bağımlı iletkenlik ve Hall etkisi ölçümleri proje desteği ile geliştirilen kapalı-devre Helyum kriostatı, kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hall etkisi ölçümlerinde 6.5 kG sabit manyetik alan uygulanmıştır.

Tavlama sıcaklığına bağlı olarak E_g 1.35 eV arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Filmlerde morfoloji ve kompozisyon çalışmaları JSM-6400 taramalı elektron mikroskopu (EDXA ünitesi olan); geçirgenlik ölçümleri ise oda sıcaklığında, 0.5-2.5 μ m spektral bölgede JASCO-V570 spektrofotometresi ile gerçekleştirilmiştir.

Yapı ve optik özellikler uzaydaki çalışma sonuçlarını detaylı referans

1.2. Yapı ve Optik Özellikler

XRD çalışmaları tutucu taban ve tavlama sıcaklığından bağımsız olarak elde edilen tüm InSe ince filmlerin polikristal yapıda olduğunu göstermiştir. Sadece ısıtılmamış tabanlar üzerine yürütülen büyütülen filmler amorf yapı göstermiştir. InSe filmlerde InSe, In₆Se₇ fazları bütün filmlerde, In₂Se₃ fazı ise

düşük taban sıcaklıklarında (150 °C) elde edilen filmlerde gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta elde edilen filmlerde kristal yapıda iyileşme ve filmlerdeki belirgin yönelmenin tutucu taban sıcaklığına bağımlı olduğu belirlenmiştir.

XRD sonuçları herbir tutucu taban sıcaklığında pik yoğunluğunun tavlama sıcaklığıyla attığını ve temel pik'in belirgenleştiğini göstermiştir. Bu sonuç tavlama sıcaklığıyla kristal yapının iyileştiği yorumunu getirmiştir. EDAX sonuçları bütün tutucu taban ve tavlama sıcaklıklarında oluşturulan filmlerin In ve Se'dan oluştuğunu başka safsızlık bulunmadığını, kompozisyonun taban sıcaklığıyla önemli ölçüde değiştiğini, ancak tavlama sıcaklığıyla fazla değişmediğini göstermiştir. Filmlerdeki tanecik büyüklüğünün tavlama sıcaklığıyla arttığı gözlenmiştir.

InSe filmlerde optik soğurma ölçümlerinden (α -hv) yasak enerji aralığı değerleri belirlenmiş; bu değerlerde tutucu taban ve tavlama sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Şekil 1'de 150°C'de büyütülen filmler için verilen tipik $[(\alpha-\alpha_0)hv]^2$ -hv değişimlerinden bulunan direk yasak enerji aralığı değerlerinin taban ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak $E_g=1.21 - 1.38$ eV arasında değiştiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar InSe ince filmler ve tek kristaller için rapor edilen değerlerle uyum halindedir [3, 12]. Bulunan yasak enerji aralığı değerlerinin tutucu taban (T_s) ve tavlama (T_t) sıcaklıkları ile değişimi şekil 2'de verilmiştir.

Yapı ve optik özellikler üzerindeki çalışma sonuçlarının detayı referans [9]'da bulunmaktadır.

1.3. Elektriksel Özellikler

InSe ince filmlerin aygıt uygulamasında çok önemli olan elektriksel özellikleri film büyütme tekniğine, büyütme parametrelerine özellikle tutucu

taban sıcaklığına ve büyütme sonrası tavlama sıcaklığına oldukça kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Vakumda kaplama yöntemi ile elde edilen InSe ince filmlerde, elektriksel özelliklere depozisyon parametrelerinin, depozisyon sonrası tavlama işleminin etkileri ve geçerli olan transport mekanizmaları, sıcaklık bağımlı iletkenlik ve Hall-etkisi çalışmaları ile incelenmiştir.

InSe ince filmlerin oda sıcaklığındaki iletkenlikleri taban ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak $0.5-50 (\Omega\text{-cm})^{-1}$ arasında değişmektedir. Oda sıcaklığındaki iletkenlik değerlerinin tutucu taban ve tavlama sıcaklığı ile değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. İletkenlik değerleri tavlama sıcaklığı ile önemli ölçüde değişmektedir. İletkenlik değeri en büyük filmler $T_s=250^\circ\text{C}$ ve $T_a=200^\circ\text{C}$ de elde edilmiştir.

Bütün örnekler için elektriksel iletkenliğin sıcaklık bağımlılığı $50-320\text{ K}$ arasında incelenmiştir. Şekil 4'de çeşitli taban sıcaklıklarında büyütülen ve 150°C de tavlanan filmler için verilen $\sigma-T^{-1}$ değişimlerinden görüldüğü gibi iletkenlik sıcaklıkla birlikte exponansiyel bir şekilde azalmaktadır. İletkenlik-sıcaklık değişimleri

$$\sigma \propto T^{-1/2} \exp [- Ea/kT]$$

bağıntısına uygun olarak incelenmiş,

$\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$ değişimlerinden hesaplanan aktivasyon enerji, E_a değerlerinin çalışılan sıcaklık bölgesinde sabit olmadığı gözlenmiş, bu sonuç değişik sıcaklık bölgelerinde farklı transport mekanizmalarının geçerli olduğu yorumunu getirmiştir. Sözkonusu değişimin doğrusal olduğu üç farklı sıcaklık bölgesinde hesaplanan aktivasyon enerji değerleri (Tablo I) literatürle uyumlu olarak [13] tavlama sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Bu sonuç yüksek sıcaklıklardan oluşan filmlerde tanecik büyüklüğünün artışına bağlanabilir.

Yaklaşık 220 K'in üzerinde, $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$ değişimlerinin tipik bir örnek için Şekil 5'de görüldüğü gibi doğrusal ve eğimden hesaplanan aktivasyon enerji, E_a , değerlerinin kT değerinden büyük veya karşılaştırılabilir olması, bu bölgede elektriksel iletkenliğin termiyonik emisyon modeline uyduğunu göstermiştir.

İkinci sıcaklık bölgesi (100-200 K) farklı akım-geçiş mekanizmalarının geçerli olabileceği göz önüne alınarak yeniden incelenmiştir. Bu bölgede $\sigma-T^2$ değişimlerinin doğrusal (Şekil 6) ve aktivasyon enerji değerlerinin küçük olması transport mekanizmasının tünelleme modeliyle [14] belirlendiğini göstermiştir. 100 K'nin altında geçerli olan akım-geçiş mekanizmasını belirlemek için iletkenlik-sıcaklık değişimi; termiyonik emisyon, tünelleme veya değişken erimli hoplama (variable range hopping) modellerine uygun olarak sırasıyla $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$, $\sigma-T^2$ ve $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ bağıntılarına göre yeniden incelenmiştir. Bu sıcaklık bölgesinde $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$ değişimleri kabaca doğrusal olup hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri kT 'den çok küçüktür. Aynı bölgede $\sigma-T^2$ değişimleri doğrusal değildir. Bu bilgiler ışığında akım-geçiş mekanizmasının termiyonik ve tünelleme modeline uymadığı gözlenmiş, söz konusu sıcaklık bölgesindeki transport mekanizması Mott'un değişken erimli hoplama modeline [15] göre incelenmiştir.

Tipik bir örnek için Şekil 7'de görüldüğü gibi $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ değişimlerinin doğrusal oluşu bu bölgede baskın olan akım-geçiş mekanizmasının Mott'un modeline uyduğunu düşündürmektedir. Bu durumda iletkenlik

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sqrt{T}} \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right]$$

bağıntısı ile verilir. Eşitlikteki σ_0 ve düzensizlik ölçütü, T_0 ; yerleşmiş durum yoğunluğu $N(E_F)$ ve dalga fonksiyonu sönüm katsayısı α ile

$$\sigma_0 = \sqrt{A^2 N(E_F) / \alpha}; A = 3e^2 v \sqrt{8\pi k}; v = \text{fonon frekansı}$$

$$T_0 = \frac{16\alpha^3}{kN(E_F)}$$

ifadelerinde belirtildiği şekilde bağlantılıdır.

İncelenen InSe ince filmlerin 100 K'nin altındaki sıcaklık bağımlı iletkenlik-sıcaklık değişimlerinden elde edilen σ_0 ve T_0 değerleri kullanılarak ve $v = 10^3 \text{ s}^{-1}$ alınarak bulunan Mott parametrelerinin değerleri Tablo II'de verilmiştir. Bu tabloda R ve W parametreleri sırası ile hoplama mesafesi ve ortalama enerjisini ifade etmektedir. Tablo II'de verilen T_0 , α , ω ve $N(E_F)$ düşük sıcaklıklarda Mott modeline uymaktadır. Düzensizlik ölçütü T_0 değerinin tutucu taban ve tavlama sıcaklıklarındaki artışla azalması kristalleşmenin ve avaraj tanecik büyüklüğünün bu iki sıcaklıkla arttığını belirtmektedir. Yapı ve optik özellik çalışmalarının sonuçları bu yargıyı desteklemektedir. Elde edilen bu sonuçlar ışığında InSe ince filmlerde 100 K'nin altında geçerli olan akım-geçiş mekanizmasının Mott'un değişken erimli hoplama modeline uyduğu söylenebilir.

Sıcaklık bağımlı Hall mobilite değerleri Hall etkisi ölçüm tekniği kullanılarak 6.5 kG sabit manyetik alan altında belirlendi. Hall katsayısı

$$R_H = \frac{V_H t}{IB},$$

ifadesi kullanılarak bulundu. Bu ifadedeki V_H , Hall voltajı; I , akım; B , manyetik alan ve t , örnek kalınlığıdır. Oda sıcaklığındaki taşıyıcı yoğunluğu değerleri Hall katsayısı kullanılarak bulundu ve $7.6 \times 10^{16} - 8.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ arasında tutucu taban ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Oda sıcaklığı Hall mobilite değerleri $20-204 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ arasında değişmektedir.

Mobilitenin sıcaklık bağımlılığı Seto'nun termiyonik emisyon modeline [16] göre incelendi. Bu modele göre mobilite sıcaklıkla

$$\mu = \mu_0 \exp(-q\phi_b/kT)$$

bağıntısına uygun olarak değişmektedir. Bu ifadede ϕ_b tanecik sınırındaki engel yüksekliğidir.

Taban sıcaklığı 150°C'de kaplanan ve değişik sıcaklıklarda tavlanan InSe ince filmlerde mobilitenin sıcaklıkla değişimi Şekil 8'de verilmiştir. 200 K'in üzerindeki $\ln(\mu T^{1/2})-T^{-1}$ doğrusal değişimlerinden bulunan ϕ_b değerleri 19-105 meV arasında değişmektedir. 100 K'in altında ise ϕ_b değerlerinin 3-23 meV arasında değiştiği gözlenmiştir. Bu değerlerin çok küçük oluşu Mott modelinin düşük sıcaklık bölgesinde (<100K) geçerliliğini kuvvetlendirmektedir. InSe ince filmlerin elektriksel özelliklerinin taban ve tavlama sıcaklığına bağımlılığı çalışmalarının sonuçları [11] no'lu kaynakta sunulmuştur.

Schottky aygıt elde edilmesi ve incelenmesi ayrıca çalışılmıştır.

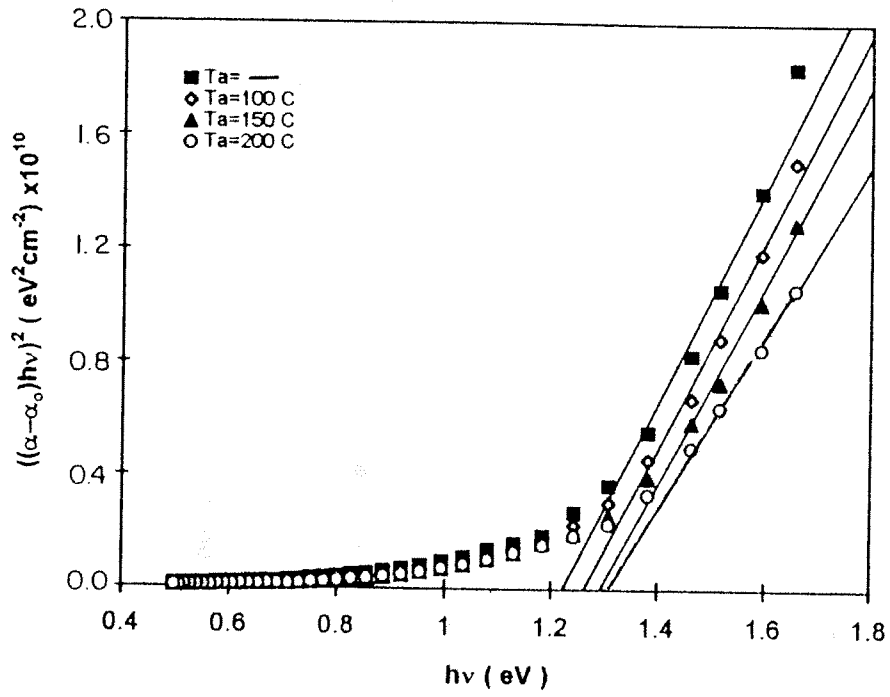
InSe ince filmlerin karakterizasyonları sonucunda aygıt yapımına uygun özelliklerdeki InSe ince filmler ($T_s=150^\circ\text{C}$ $T_a=150-200^\circ\text{C}$) kalay oksit kaplı cam tabanlar üzerine büyütülmüş ve Schottky kontak olarak Bi, Pt, Au, Ag ve C üst kontak olarak kullanılmış, sadece TO-InSe-Bi yapısında ters ve düz besleme altında akımda bir farklılık gözlenmiştir. InSe ince filmlerin iletkenlik değerlerinin oldukça yüksek olması Schottky kontak oluşumunu güçleştiren faktörlerden birisidir. Bu nedenle iletkenlik değerini azaltmak için InSe ince filmler soğuk tabanlar üzerine kaplandı. Oda sıcaklığı özdirenç değerleri 700 $\Omega\text{-cm}$ civarında olan bu filmlerle oluşturulan, TO/InSe/Pt ve TO/InSe/C yapılarında Şekil 9'da görüldüğü gibi ters ve düz besleme altındaki akım değerlerinde farklılık gözlenmektedir.

p-n eklem aygıtların elde edilmesi amacıyla p-InSe ince filmlerin depozisyonu ve karakterizasyonuna yönelik çalışmalar da başlatılmıştır. İlk aşamada Cd ile katkılandırılmış InSe ince filmler ısıtılmamış ve 250°C de ısıtılmış cam tabanlar üzerine büyütülmüştür. Değişik sıcaklıklarda aynı şartlarda tavlanan filmlerin oda sıcaklığındaki iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen tüm filmler p-tipi iletkenlik göstermişlerdir. Elde edilen ilk sonuçlar Tablo III'de verilmiştir. Bu sonuçlar, ısıtılmamış tabanlar üzerine büyütülen filmlerin yüksek dirençli olduğunu, iletkenliğin tutucu taban ve tavlama sıcaklığı ile arttığını belirtmiştir. Daha sonraki aşamalarda p-tipi InSe filmlerde sistematik araştırmalar sürdürülerek p-n eklem oluşturulması amaçlanmaktadır. InSe ince filmlerde Foto-Hall ve fotoiletkenlik ölçümleri yapılması planlanan çalışmalardır.

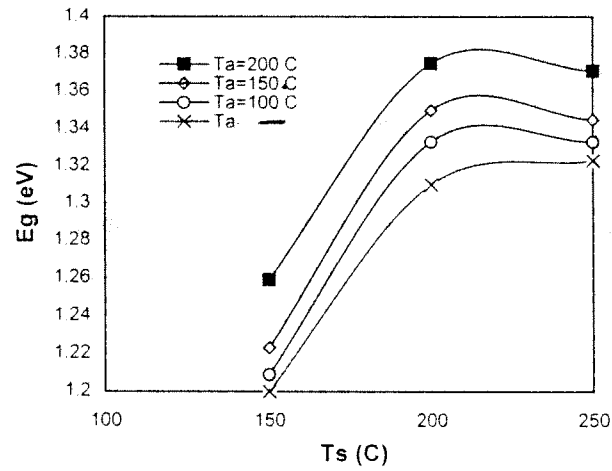
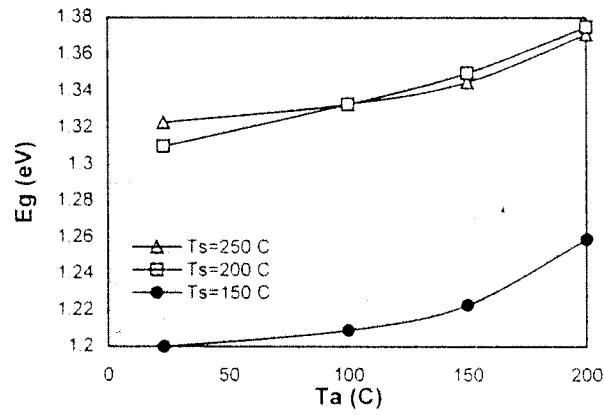
InSe ince filmler üzerine yürütülen çalışmaların yanısıra $Ag_3Ga_5Te_9$ ve $Ag_3In_5Se_9$ tek kristallerinde yapı özellikleri incelenmiş, sıcaklık bağımlı iletkenlik ve mobilite ölçümleri 60-480 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. $Ag_3In_5Se_9$ kristali n-tipi olarak belirlenmiş; oda sıcaklığında iletkenlik değeri $7.2 \times 10^{-5} (\Omega\text{-cm})^{-1}$ ve mobilite değeri ise $20 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulunmuştur. Oda sıcaklığındaki iletkenlik değeri $4.3 \times 10^{-4} (\Omega\text{-cm})^{-1}$ olarak bulunan p- $Ag_3Ga_5Te_9$ kristalinde mobilitenin $1 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den daha düşük olduğu gözlenmiştir. İletkenliğin sıcaklık bağımlılığından iki kristal için de üç değişik iyonizasyon enerjisi belirlenmiştir. $Ag_3In_5Se_9$ kristalinde mobilitenin sıcaklıkla değişiminde klasik yarıiletkenlerden farklı olarak gözlenen davranış mikroyapının değişik özelliklerine bağlanmıştır. Söz konusu bu çalışmanın sonuçları bir makale olarak hazırlanmış ve Crystal Research and Technology isimli dergide basılmıştır, [10].

KAYNAKLAR

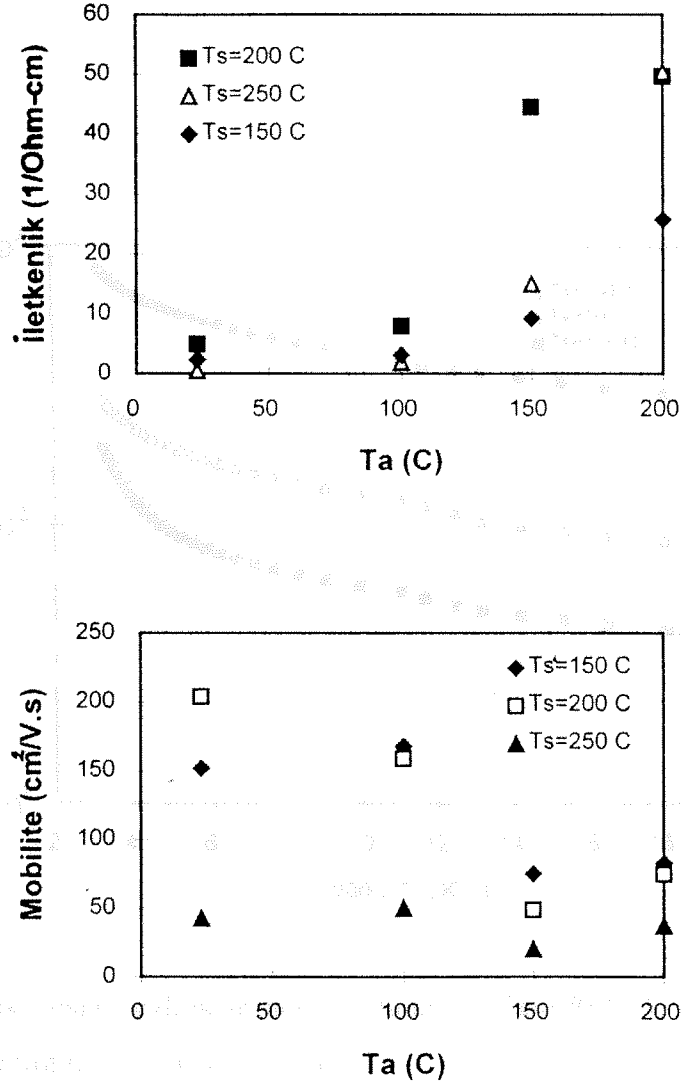
1. Segura A., Martinez – Thomas C., Casonovas A., Contarero A., Martinez-Pastor J., Chevy A., Appl. Phys. A 48, 445 (1989)
2. Shigetomi S., İkari T., Koga Y., Shigetomi S., Phys. Stat. Sol. (a), 327, (1987)
3. Segura A., Guesdon J.P., Besson J.M., Chevy A., J. Appl. Phys., 54, 876 (1983)
4. Ando K., Katsui A., Thin Solid Films, 76, 141 (1981)
5. Guesdon J.P., Kobbi B., Julien C., Balkansky M., Phys. Stat Sol. (a), 102, 327 (1987)
6. Thomas B., Kutty T.R.N., Phys. Stat. Sol. 119, 127 (1990)
7. Parlak M., Erçelebi Ç., Günal İ., Salaev Z., Allakhverdiev K., Thin Solid Film, 258, 86 (1995)
8. Parlak M., Preparation and Electrical, Optical, Structural Characterization of InSe Thin Films (Doktora tezi), ODTÜ, Fizik Bölümü, 1997
9. Parlak M., Erçelebi Ç., Thin Solid Films, 322, 334 (1998)
10. Parlak M., Erçelebi Ç., Günal İ., Özkan H., Gasanly N.M., Cryst. Res. Technol., 33, 6, 923 (1998)
11. Parlak M., Erçelebi Ç., Jr. Material Science Materials in Electronics (submitted for publication), 1998
12. Julien C., Benramdane N., Guesdon J.P., Semicond. Sci. Technol. 5, 905 (1990)
13. Benramdane N., Guesdon J.P., Julien C., Phys. Stat. Sol. (a), 146, 675 (1994)
14. Garcia-Cuence M.V., Marenzo J.L., Esteve J., J. Appl. Phys. 56, 1738 (1984)
15. Mott N.F., Davis E.A., Electronic Processes in Non-crystalline Materials, Clarendon Press, Oxford (1971)
16. Seto J.Y.W., J. Appl. Phys. 46, 5247 (1975)



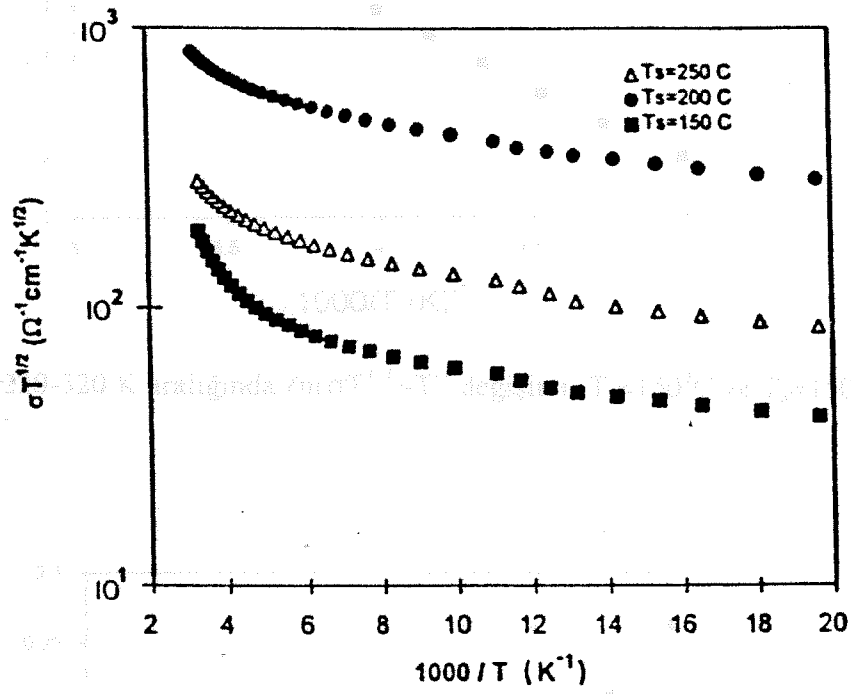
Şekil 1. $T_s=150^\circ\text{C}$ 'de kaplanan InSe ince filmlerde $[(\alpha-\alpha_0)/hv]^2$ -foton enerji değişimleri



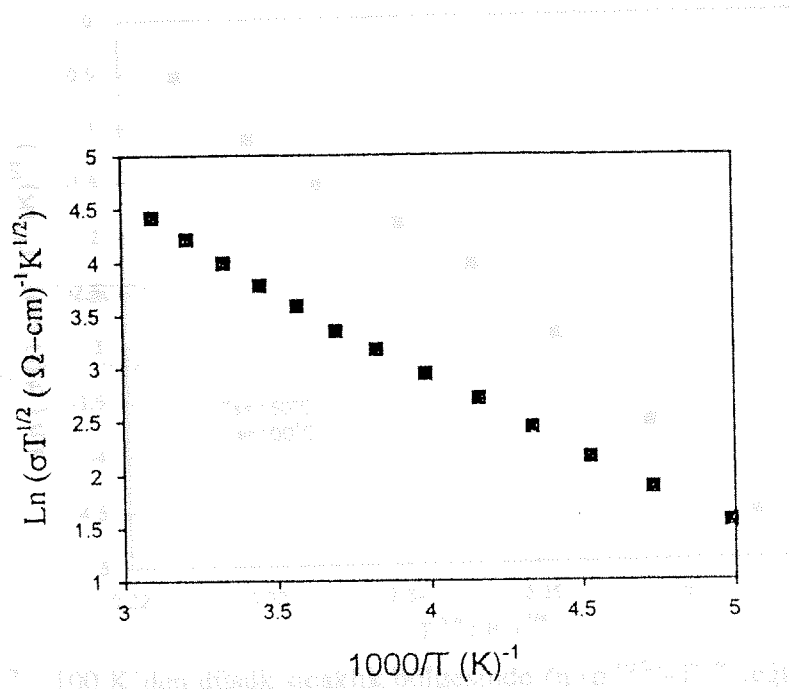
Şekil 2. InSe ince filmlerde optik band aralığının T_s ve T_a ile değişimi



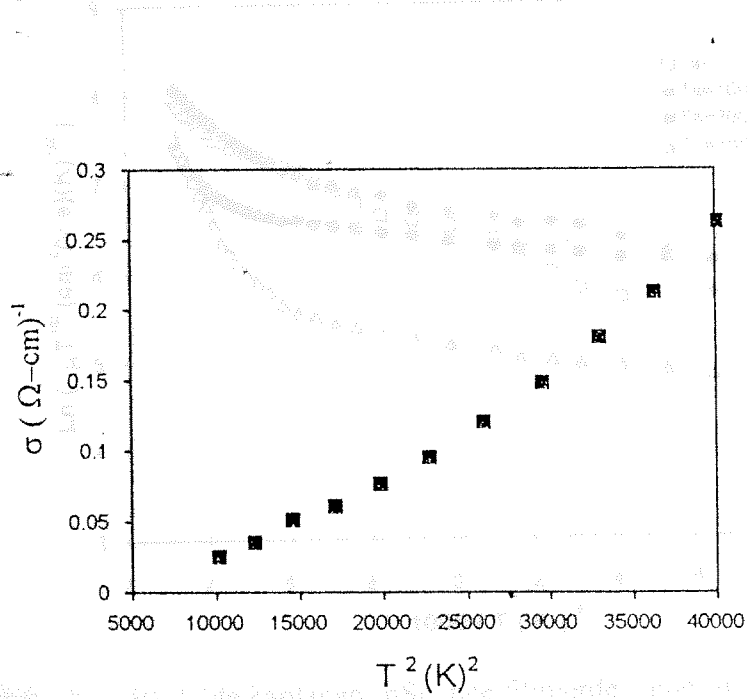
Şekil 3. InSe ince filmlerde a) iletkenliğin b) mobilitenin tavlama (Ta) ve tutucu taban sıcaklığı (Ts) ile değişimi.



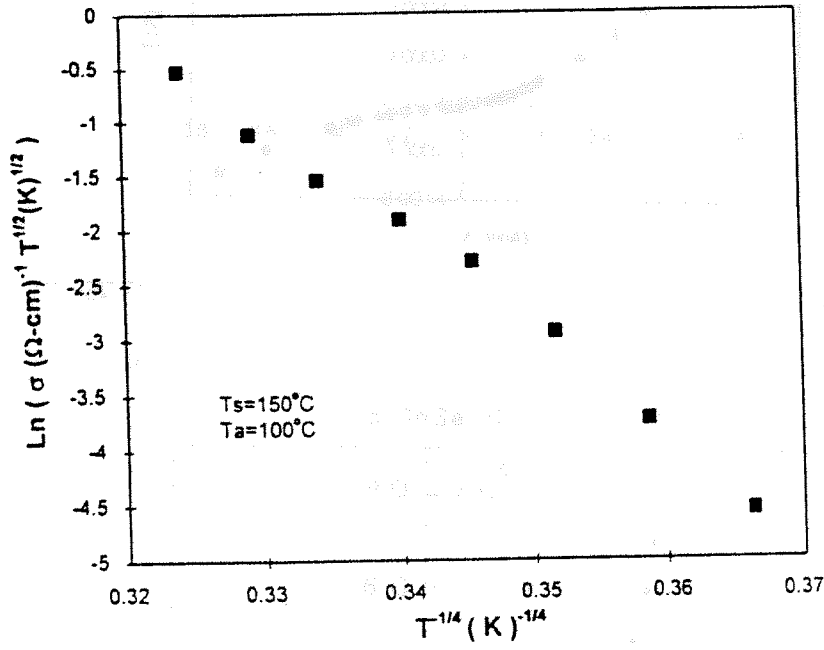
Şekil 4. Değişik taban sıcaklıklarında büyütülen ve $T_a=150^\circ\text{C}$ 'de tavlanan InSe ince filmlerde iletkenliğin sıcaklıkla değişimi



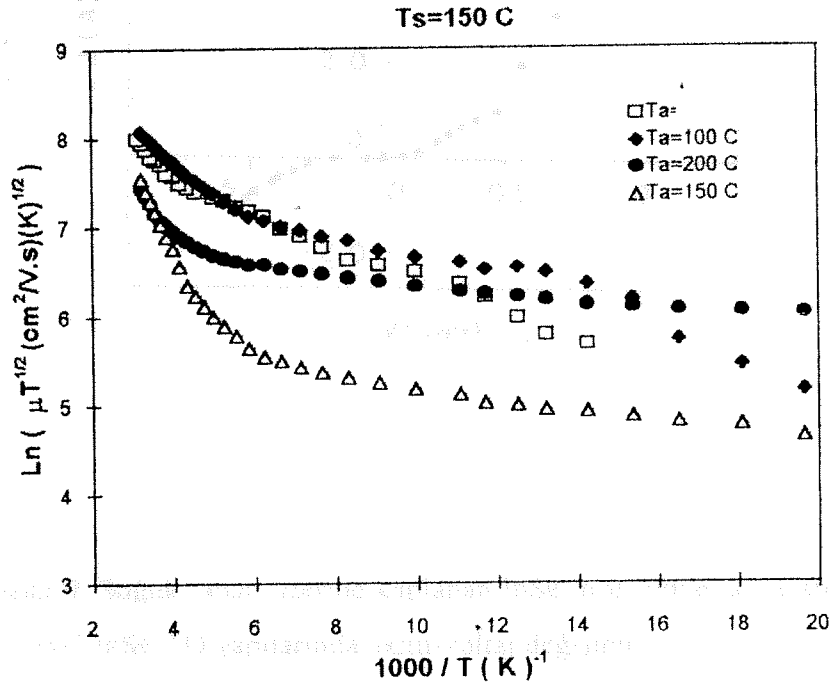
Şekil 5. 220-320 K aralığında $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$ değişimi ($T_s=150^\circ\text{C}$ ve $T_a=150^\circ\text{C}$)



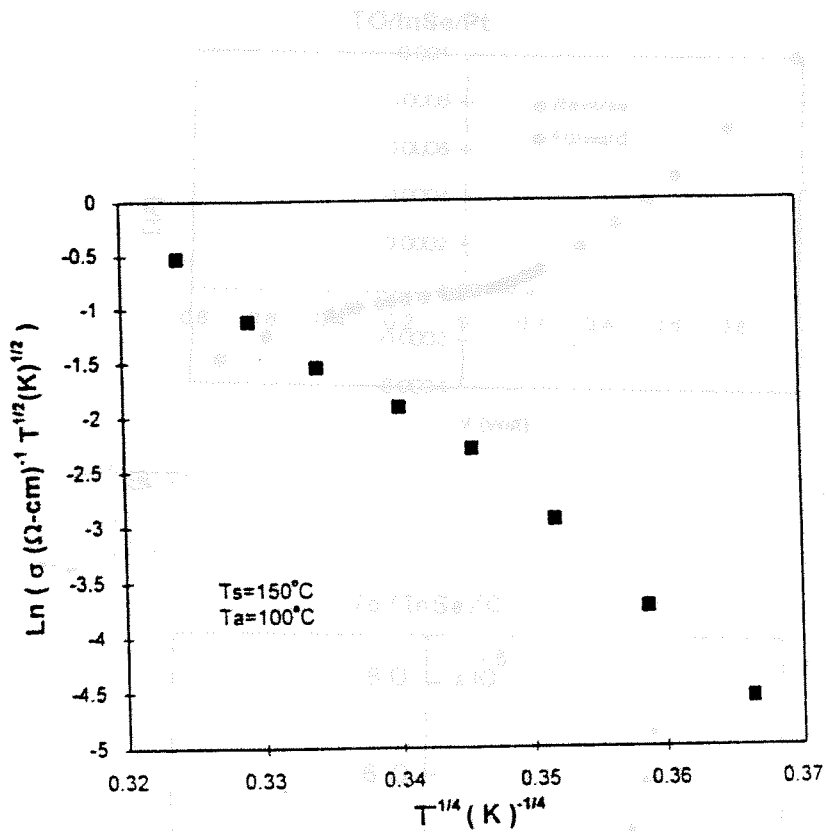
Şekil 6. 100-200 K aralığında $\sigma-T^2$ değişimi



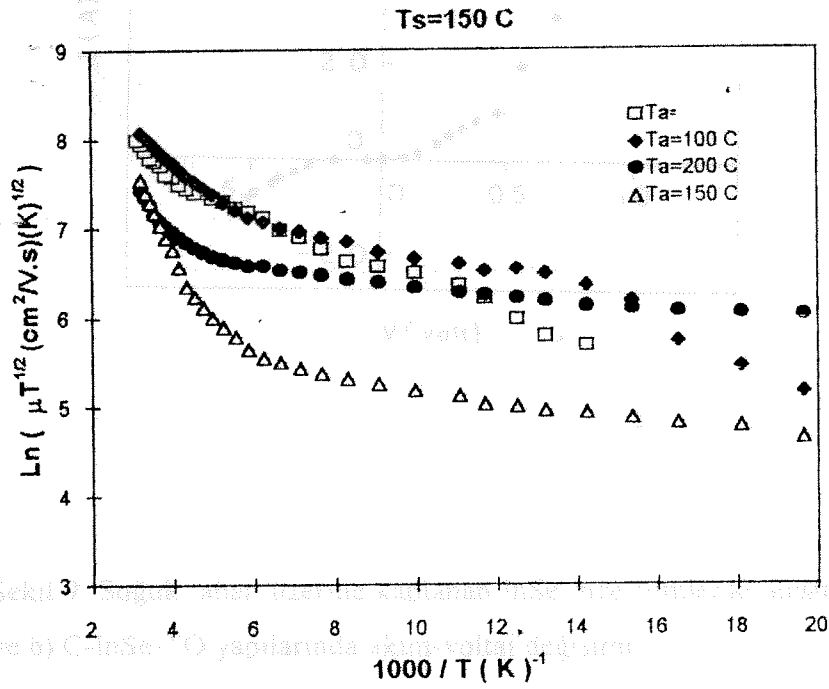
Şekil 7. 100 K'den düşük sıcaklık bölgesinde $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ değişimi



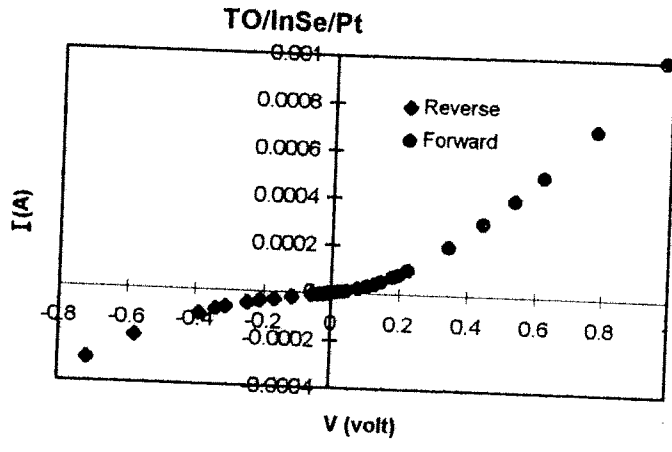
Şekil 8. $T_s=150^\circ\text{C}$ 'de kaplanan InSe ince filmlerde mobilite – sıcaklık değişimi



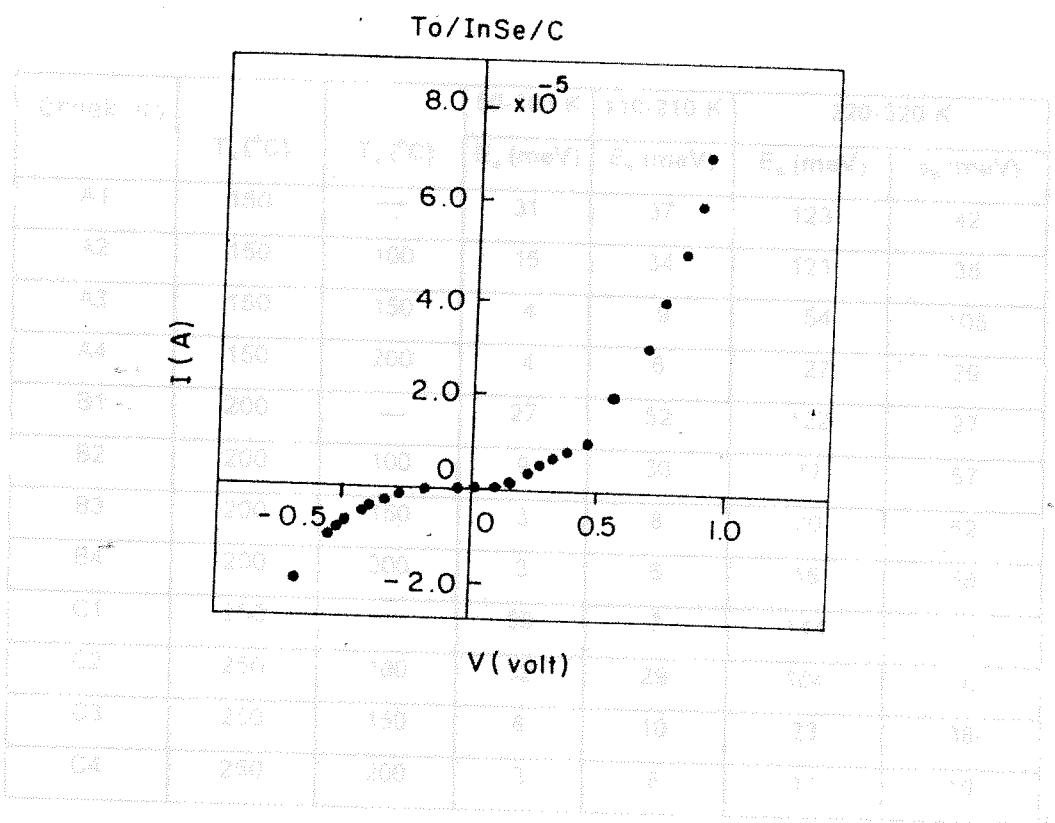
Şekil 7. 100 K'den düşük sıcaklık bölgesinde $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ değişimi



Şekil 8. $T_s=150^\circ\text{C}$ 'de kaplanan InSe ince filmlerde mobilite – sıcaklık değişimi



Şekil 9. Soğuk taban üzerine kaplanan InSe ince filmlerde oluşturulan a) Pt-InSe-TO ve b) C-InSe-TO yapılarında akım-voltaj değişimi



Şekil 9. Soğuk taban üzerine kaplanan InSe ince filmlerde oluşturulan a) Pt-InSe-TO ve b) C-InSe-TO yapılarında akım-voltaj değişimi

Tablo I. İletkenlik ve Mobilitenin sıcaklık bağımlılığında bulunan aktivasyon enerji ve engel yüksekliği değerleri

Örnek No	T_s (°C)	T_a (°C)	50-100 K	110-210 K	220-320 K	
			E_a (meV)	E_a (meV)	E_a (meV)	ϕ_b (meV)
A1	150	—	31	37	123	42
A2	150	100	15	34	121	35
A3	150	150	4	9	54	105
A4	150	200	4	6	27	29
B1	200	—	27	52	122	27
B2	200	100	9	30	77	57
B3	200	150	3	8	20	62
B4	200	200	3	6	16	58
C1	250	—	59	7	144	89
C2	250	100	32	29	104	38
C3	250	150	6	10	23	38
C4	250	200	3	6	11	19

KRANİK DİJİT FORMU

No: TBAG-1442

2. Rapor Tarihi:

Ölçme Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.02.1996 - 28.02.1996

Ölçme Adı:

İnce İnce Filmlerin ve InSe İnce Film Aygıtlarının Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Tablo II. Mott Parametreleri

Örnek No	T _s (°C)	T _a (°C)	T ₀ (K)	α (cm ⁻¹)	N(E _F) (cm ⁻³ eV ⁻¹)	R(cm) (75 K)	W(meV) (75 K)
A3	150	150	2.1x10 ³	1.4x10 ⁵	2.5x10 ²⁰	6.4x10 ⁻⁷	3.8
A4	150	200	1.4x10 ³	3.8x10 ⁵	8.4x10 ²¹	2.0x10 ⁻⁷	3.4
B3	200	150	1.4x10 ³	6.4x10 ⁵	3.9x10 ²²	1.2x10 ⁻⁷	3.4
B4	200	200	1.4x10 ³	7.7x10 ⁵	6.9x10 ²²	1.8x10 ⁻⁷	0.6
C3	250	150	1.9x10 ³	2.2x10 ⁶	1.8x10 ²¹	3.4x10 ⁻⁷	3.3
C4	250	200	1.2x10 ³	7.4x10 ⁵	7.1x10 ²²	1.0x10 ⁻⁷	3.3

bu yapıların yüzeyinde serbest bağlara olmamasından dolayı bu türdeki malzemelerin yüzey malzemeleridir. Bu yapıların yüzeyinde serbest bağlara olmamasından dolayı bu türdeki malzemelerin yüzey malzemeleridir. Bu yapıların yüzeyinde serbest bağlara olmamasından dolayı bu türdeki malzemelerin yüzey malzemeleridir.

Tablo III. p-InSe filmlerde oda sıcaklığı iletkenlik değerleri

Örnek No.	T _s (°C)	T _a (°C)	σ (Ω-cm) ⁻¹
A1	oda sıcaklığı	—	6.1X10 ⁻⁶
A2	oda sıcaklığı	150	4.6X10 ⁻³
A3	oda sıcaklığı	200	5.7X10 ⁻¹
B1	250	—	2.3X10 ⁻²
B2	250	150	3.2X10 ⁻²
B3	250	250	2.4

Ölçümün (°) Sıcak Soğuk

Sıcak Soğuk

Raporun Gözetim Durumu Gözetim Gözetim Değil

Gözetim Gözetim Değil

Gözetim Değil

Ölçümün (°) Sıcak Soğuk

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: TBAG-1442	2- Rapor Tarihi:
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.02.1996 – 28.02.1998	
4- Projenin Adı: InSe İnce Filmlerin ve InSe İnce Film Aygıtların Elde Edilmesi ve İncelenmesi	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. Çiğdem ERÇELEBİ, Prof.Dr. İbrahim GÜNAL, Dr. Mehmet PARLAK, Prof.Dr. Hüsnü ÖZKAN, Prof.Dr. Nizami GASANLY, Prof.Dr. Kerim ALLAKHVERDIEV	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, 06531 ANKARA	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:	
8- Öz (Abstract): <p>GaTe, GaSe, InSe gibi tabakalı yarıiletkenler optoelektronik uygulamada öneme sahip malzemelerdir. Tabakalı yarıiletkenlerin yüzeyinde serbest bağların olmamasından ötürü bu türdeki materyaller kullanılarak temiz arayüze sahip Schottky veya heteroeklem yapıların elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu özellikten ötürü maximum fotovoltaiik dönüşüm verimi eldesine karşılık gelen yasak enerji aralığına sahip olan tabakalı yarıiletkenler (InSe gibi) ince film ve tek kristal halinde güneş pili yapılarında aktif taban malzemesi olarak kullanılabilirler için elektrik optik ve yapı özelliklerinin araştırılması çalışmaları halen devam etmekte ancak büyük ölçekli uygulamalar ve seri üretim için yüksek verimli ince film aygıtların üretilmesi gerekmektedir.</p> <p>Bu projenin öncelikli amacı vakumda cam tabanlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin elektriksel, optik ve yapı özelliklerinin incelenerek, fotovoltaiik uygulamaya uygun hale getirilmesi için gerekli depozisyon ve materyal parametrelerinin belirlenmesi, filmlere uygulanacak olan bazı film büyütme sonrası işlemlerin materyal özelliklerine etkisinin incelenmesidir. Schottky türü ince film aygıtların elde edilmesi ve karakterizasyonu projenin ikinci aşaması olarak düşünülmektedir.</p> <p>Anahtar Kelimeler : InSe, ince film, fotovoltaiik</p>	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler * Parlak M., Erçelebi Ç., Thin Solid Films, 322, 334 (1998) * Parlak M., Erçelebi Ç., Günal İ., Özkan H., Gasanly N.M., Cryst. Res. Technol., 33, 6, 923 (1998) * Parlak M., Erçelebi Ç., Jr. Material Science:Materials in Electronics (Basılmak üzere kabul edildi)	
10- Bilim Dalı: Doçentlik B. Dalı Kodu: 404.05.00 ISIC Kodu: Uzmanlık Alanı Kodu: 404.05.01	
11- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input type="checkbox"/> Sınırsız	
12- Raporun Gizlilik Durumu: <input type="checkbox"/> Gizli <input type="checkbox"/> Gizli Değil	

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU

1- Proje No: TBAG-1442

2- Rapor Tarihi:

3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.02.1996 – 28.02.1998

4- Projenin Adı:

Growth and Characterization of InSe thin Films and Devices

5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. Çiğdem ERÇELEBİ,
Prof.Dr. İbrahim GÜNAL, Dr. Mehmet PARLAK, Prof.Dr. Hüsnü ÖZKAN, Prof.Dr. Nizami
GASANLY, Prof.Dr. Kerim ALLAKHVERDIEV

6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:

Middle East Technical University, Department of Physics, 06531 ANKARA

7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:

8- Öz (Abstract):

Layered semiconductors like GaTe, GaSe and InSe have technological importance due to their optoelectronic applicability. Heterojunction or Schottky devices without interface states can be fabricated with these materials as a result of the absence of dangling bonds at their surfaces. Due to this property, layered semiconductors with energy band gap values necessary for the maximum photovoltaic conversion, such as InSe, can be used as the active base material of the solar cell structure either in crystal or thin film form and for this reason optical, electrical and structural properties of these materials have been the subject of considerable research interest. For the production of commercially feasible devices and also for large scale applications the improvement of the efficiency of thin film devices is essential.

The purpose of this project is first to produce InSe thin films by the vacuum evaporation technique and then to investigate the electrical, optical and structural properties of these films. The information which will be obtained from these characterization studies will then be used to determine the growth and the post annealing conditions together with the material parameters to obtain films with optimal characteristics for photovoltaic applications. The final step would be the production of InSe thin film based Schottky devices and their characterization.

Keywords : InSe, thin film, photovoltaics.

9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler * Parlak M., Erçelebi Ç., Thin Solid Films, 322, 334 (1998)
* Parlak M., Erçelebi Ç., Günel İ., Özkan H., Gasanly N.M., Cryst. Res. Technol., 33, 6, 923 (1998) * Parlak M.,
Erçelebi Ç., Jr. Material Science:Materials in Electronics (Basılmak üzere kabul edildi)

10- Bilim Dalı:

Doçentlik B. Dalı Kodu: 404.05.00
Uzmanlık Alanı Kodu: 404.05.01

ISIC Kodu:

11- Dağıtım (*): Sınırlı Sınırsız

12- Raporun Gizlilik Durumu :

 Gizli Gizli Değil

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz