

T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**SCL AKIMLARI YÖNTEMİ İLE HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF
SİLİSYUM-GERMANYUM ALAŞIMI n^+ -i- n^+ SANDVIÇ YAPILARDA
ELEKTRONİK KUSUR DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEYNEP RUKİYE ÖZGE CAN

HAZİRAN 2011

MUĞLA

T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**SCL AKIMLARI YÖNTEMİ İLE HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF
SİLİSYUM-GERMANYUM ALAŞIMI n^+ -i- n^+ SANDVIÇ YAPILARDA
ELEKTRONİK KUSUR DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep Rukiye Özge CAN

HAZİRAN 2011

T.C.
MUGLA ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ danışmanlığında Zeynep Rukiye Özge CAN tarafından hazırlanan “SCL Akımları Yöntemi ile Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum-Germanyum Alaşımı $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapılarda Elektronik Kusur Dağılımlarının İncelenmesi” başlıklı tez, 14/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Bölümü Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

İmza : 

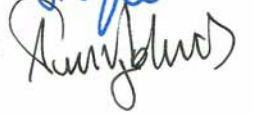
Üye : Prof. Dr. Arif NESRULLAZADE

İmza :



Üye : Doç. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

İmza :



ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince lisansüstü çalışmanın önemini bana kazandıran, hem deneysel anlamda hem de teorik olarak zorlandığım her noktada hiçbir zaman yardımını benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Tezin akademik bir formata kavuşmasında katkıları olan tez jürisi Sayın Prof. Dr. Arif NESRULLAZADE ve Sayın Doç. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR hocalarıma, lisans ve lisansüstü eğitimimde yardımlarını esirgemeyen Muğla Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü'ndeki değerli hocalarıma, tezde yapılan element analizi konusunda yardım eden hocam Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK'e, deney düzeneğinin kurulumunda yardımcı olan hocam Uz. Şadan ÖZDEN'e, yardımlarından dolayı hocam Uz. Ali ŞENTÜRK'e lisans eğitimimde hocam olarak ve daha sonra lisansüstü eğitimimde aynı laboratuvarı paylaşma şansına eriştiğim, gerek bilimsel gerek sosyal anlamda her türlü konuda desteğini gördüğüm çok değerli hocam Araş. Gör. Gökhan YILMAZ'a, tezdeki yardımları, destekleri ve moralleri için hocam Araş. Gör. Elif TURAN'a ve oda arkadaşımız Araş. Gör. Hamza CANSEVER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Uzakta olsalar bile manevi desteklerini her zaman hissettiğim gerçek dostlarım Gamze AKKAN'a, Gülay KORKMAZ'a, Özlem İŞLER'e, destekleri için canım arkadaşım Solmaz OTLUĞLU ERCAN'A, geçte olsa tanıma şansına eriştiğim canım arkadaşlarım H. Meltem CEYLAN'a ve Emine ER'e, verdiği destekler için ve eşsiz yorumlarıyla düşünmemi sağlayan Selman MİRİOĞLU'na, grafik ve şekil çizimlerinde ve sosyal anlamda yardımları için hocam Araş. Gör. Adem DÖNMEZ'e, destekleri için arkadaşım Araş. Gör. Ç. Elif DEMİRCİ'ye, Muğla Üniversitesi'nde geçirdiğim yedi yıl boyunca yanımda olan bütün arkadaşlarıma teşekkür etmek istiyorum.

Hayatımdaki en önemli insanlardan biri olan, güldüğüm, ağladığım, sinirlendiğim, saçmaladığım kısacası her anımda yanımda olan ağlarken bile yüzümde gülücük oluşturmayı başaran, en zor anlarımda yanımda, sinirlendiğimde arkamda destekçim olan, dostluğunu her zaman hissettiğim ve her zaman

hissedeceğim, hiçbir zaman da yakasını bırakmayacağım canım F.Gülsüm DURUKAN'A çok teşekkür ederim.

Hayatım da önemli bir dönem olan Muğla'da geçirdiğim yedi yıl boyunca maddi manevi verdiği destekler için canım amcam Yrd. Doç. DR. Süleyman CAN'a ve canım yengem Yrd. Doç. Dr. Şendil CAN'a, destekleri için bütün aileme çok teşekkür ederim.

Son olarak bana daima inanan, güvenen, lisansüstü eğitimim boyunca yaşadığım ve onlara yaşattığım bütün sıkıntılara sabır gösteren, benim için ellerinden gelenin fazlası yardımları için canım babam Remzi CAN'a, canım annem Dilek CAN'a ve canım ağabeyim İbrahim Burak CAN'a çok teşekkür ederim.

Zeynep Rukiye Özge CAN
MUĞLA, 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ONAY SAYFASI	I
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	8
2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER	9
2.1 $n^+ - i - n^+$ Sandviç Tipi Aygıtların Büyütülmesi.....	9
2.2 Karanlık Akım-Gerilim Ölçüm Sistemi	11
2.3 Karanlık Öziletkenlik Yöntemi	14
2.4 Uzay Yüğü Sınırlı Akımlar (SCL Akımları) Tekniğı ve W. den Boer Yaklaşımı.....	16
2.5 SEM ve EDX Yöntemleri ile Germanyum Elementi Analizi	26
3. DENEYSEL BULGULAR	29
3.1 $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapıların Element Analizi	29
3.2 Karanlık İletkenlik Bulguları.....	36
3.2.1 a-Si:H $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapının Karanlık İletkenlik Bulguları	36
3.2.2 a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapıların Karanlık İletkenlik Bulguları.	37
3.3 $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapılarda SCL Akım Bulguları.....	41
3.3.1 a-Si:H $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapının SCL Akımları	41
3.3.2 a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapıların SCL Akımları	46
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	78

**SCL AKIMLARI YÖNTEMİ İLE HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF
SİLİSYUM-GERMANYUM ALAŞIMI $n^+ - i - n^+$ SANDVIÇ YAPILARDA
ELEKTRONİK KUSUR DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Zeynep Rukiye Özge CAN

**MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

2011

ÖZET

İnce film olarak büyütülen hidrojenleştirilmiş amorf silisyum-germanyum (a-SiGe:H) alaşımlı malzemelerde amorf yapıdaki germanyum oranı arttırıldıkça yasak enerji aralığı azalmaktadır. Bununla beraber elektronik kusurların arttığı da bilinmektedir. Çok katmanlı güneş pillerinde, farklı germanyum oranlarına sahip hidrojenleştirilmiş amorf silisyum germanyum alaşımlı ince filmler ışığı soğurucu katman olarak kullanılarak daha geniş güneş spektrumunun soğurulmasıyla güneş pillerinin veriminin artması hedeflenmektedir. Hidrojenleştirilmiş amorf silisyum germanyum alaşımlı malzemelerin özellikleriyle ilgili önemli bilgiler yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusur dağılımından elde edilir. Bu tür elektronik kusurların incelenmesinde kullanılan yapılardan birisi de metal(Cr)/ n^+ -tipi a-Si:H/katkısız a-SiGe:H/ n^+ -tipi a-Si:H/metal(SS) çok katmanlı $n^+ - i - n^+$ tipi sandviç yapılardır. Bu çalışmada $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılarda sıcaklığa bağlı Uzay Yüğü Sınırlı Akımlar (space charge limited currents- SCL akımları) yöntemi kullanılarak Fermi enerjisi etrafında yerleşmiş elektronik kusurların dağılımı hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. SCL akımlar tekniği yüksek özdirençli katılarda elektronik tuzak dağılımını belirlemek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Hidrojenleştirilmiş amorf silisyum ve germanyum alaşımlarında karanlıkta, sıcaklığa bağlı akım yoğunluğu-gerilim (J-V) ölçümleri yapılarak W. den Boer yaklaşımı ile

durum yoğunluğu hesaplanmıştır (Den Boer, 1981). Değişik germanyum oranlarında bŸyŸtŸlmŸř katkısız a-SiGe:H tabakalardan oluşturulmuş n-i-n yapılarıdaki mevcut elektronik kusur dağılımları incelendiğinde artan Ge oranı ile elektronik kusur dağılımında artış belirlenmiştir. a-Si:H n⁺-i-n⁺ yapılarında 1x10¹⁶ cm⁻³ eV⁻¹ mertebelerindeki kusur dağılımı Ge oranının artması ile 4x10¹⁷ cm⁻³ eV⁻¹ mertebelerine kadar artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ve silisyum-germanyum alaşımı ince film malzemeler, n⁺-i-n⁺ sandviç yapılar, Karanlık iletkenlik yŸntemi, SCL akımları tekniği, W. den Boer Analizi, Tuzak Yoğunluğu.

Sayfa Adedi: 74

Tez YŸneticisi: Prof. Dr. Mehmet GŸNEŐ

**INVESTIGATION of ELECTRONIC DEFECT DISTRIBUTION on
AMORPHOUS SILICON-GERMANIUM ALLOY $n^+ - i - n^+$ SANDWICH
STRUCTURE by USING SCL CURRENT**

(M. Sc. Thesis)

Zeynep Rukiye Özge CAN

**MUĞLA UNIVERSITY
INSTITUTE of SCIENCE and TECHNOLOGY**

2011

ABSTRACT

Undoped hydrogenated amorphous silicon-germanium alloy (a-SiGe:H) thin film materials deposited with RF plasma enhanced chemical vapor deposition (RE-PECVD) method in $n^+ - i - n^+$ device structure with different germanium content have been investigated using space charge limited currents (SCLC) method to determine the density of density of states in the bandgap of the material. Test sample hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) $n^+ - i - n^+$ sample with 0at.%Ge have been also used to compare the results of a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ samples as a function of Ge content. Temperature and voltage dependent dark current measurements have been carried out in vacuum and space charge limited current dominated region have been determined from non-linear current density-voltage characteristics. No effects on non-linear currents have been found due to Pool-Frenkel effect. The density of states located around dark Fermi level have been derived using the Den BOER approximation. The germanium content of the undoped a-SiGe:H layers have been determined from the EDX spectrum of the scanning electron microscope. It was found that dark Fermi level of amorphous silicon and amorphous silicon-germanium alloys is close to the midgap and showing slightly n-type behaviour. Analysis of the SCLC's indicates that the density of states in a-Si:H $n^+ - i - n^+$ devices is $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$. It increases to higher defect densities as Ge content of a-SiGe:H alloy increases. It is $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ for 38 at.% Ge content a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ devices and

increases to $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ for 62 at.% Ge content device. The results of a-Si:H $n^+ \text{-i-} n^+$ devices are in agreement with those reported previously. The results for the density of states in a-SiGe:H $n^+ \text{-i-} n^+$ devices agree well that increasing Ge content in the amorphous network results in increase in density of states in the bandgap of the material.

Key Words: Hydrogenated amorphous silicon and silicon-germanium alloys thin film materials, $n^+ \text{-i-} n^+$ sandwich structures, Dark conductivity space charge limited currents, W. den Boer analysis, Density of States.

Page Number: 74

Adviser: Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Metal(SS)/n ⁺ - a-Si:H/katkısız a-SiGe:H/n ⁺ - a-Si:H /metal (Cr) (n ⁺ -i-n ⁺) sandviç yapının kesiti 10
Şekil 2.2	Metal(SS)/n ⁺ - a-Si:H/katkısız a-SiGe:H/n ⁺ - a-Si:H /metal (Cr) (n ⁺ -i-n ⁺) sandviç yapının üstten görünümü 11
Şekil 2.3	Sıcaklığa bağlı karanlık akım-gerilim ölçüm sistemi..... 12
Şekil 2.4	Bakırdan imal edilmiş malzeme tutucunun üstten görünümü..... 13
Şekil 2.5	Bakırdan imal edilmiş malzeme tutucunun yan kesiti 13
Şekil 2.6	%58 Ge oranına sahip katkısız a-SiGe:H alaşımı katman içeren n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının Arrhenius grafiği 15
Şekil 2.7	Paralel elektrod-“coplanar” kontaklara sahip a-SiGe:H foto direnç için G-V eğrisi..... 17
Şekil 2.8	%38 Ge içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapıya ait G-V grafiği 17
Şekil 2.9	Fermi enerjisindeki kaymanın belirlenen enerji üzerine eklenmesi 23
Şekil 2.10	%38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği 24
Şekil 2.11	%38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının J/L-V/L ² grafiği SCL akım bölgesi. 25
Şekil 2.12	%38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının J/E-E ^{1/2} grafiği..... 25
Şekil 2.13	%38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapı için hesaplanan durum yoğunluğu N _t ile enerji arasındaki ilişki 26
Şekil 2.14	Taramalı Elektron Mikroskobu-SEM sistemi 28
Şekil 3.1	%0 Ge içeren a-Si:H örneğinin SEM resmi 30
Şekil 3.2	%0 Ge içeren a-Si:H örneğinin EDX spektrumu 30
Şekil 3.3	%38 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin SEM resmi..... 31
Şekil 3.4	%38 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin EDX spektrumu 31
Şekil 3.5	%51 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin SEM resmi 32
Şekil 3.6	%58 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin SEM resmi 32
Şekil 3.7	%62 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin SEM resmi 33
Şekil 3.8	%51 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin EDX spektrumu 33
Şekil 3.9	%58 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin EDX spektrumu 34
Şekil 3.10	%62 Ge içeren a-SiGe:H örneğinin EDX spektrumu 34
Şekil 3.11	Germanyum içermeyen katkısız a-Si:H tabaka içeren n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi 37

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.12	%38 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13230 kod numaralı taban malzemenin F3 numaralı n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi 38
Şekil 3.13	%51 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L132309 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan dört farklı n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi 39
Şekil 3.14	%58 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13241 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan D9 ve C6 numaralı n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapıların karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi 40
Şekil 3.15	%62 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13233 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan D6 numaralı n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi 40
Şekil 3.16	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının J-V grafiği 42
Şekil 3.17	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında J/L-V/L ² grafiği 42
Şekil 3.18	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında J/E-E ^{1/2} grafiği 43
Şekil 3.19	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında elde edilen J-V ölçümlerinden hesaplanan N _t -E grafiği 44
Şekil 3.20	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının sıcaklığa bağlı J-V grafiği 45
Şekil 3.21	%0 Ge içeren a-Si:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının değişik sıcaklıklarda elde edilen N _t -E grafiği 45
Şekil 3.22	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J-V grafiği 46
Şekil 3.23	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J/L-V/L ² grafiği 47
Şekil 3.24	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J/E-E ^{1/2} grafiği 47
Şekil 3.25	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J-V ölçümünden elde edilen elektronik tuzak yoğunluğunun enerjiye göre değişimi 48
Şekil 3.26	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F3 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı J-V grafiği 49
Şekil 3.27	%38 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F3 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 49
Şekil 3.28	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği 50
Şekil 3.29	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J/L-V/L ² grafiği 50

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.30	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/E-E ^{1/2} grafiği..... 51
Şekil 3.31	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V eğrisinden SCL bölgesinde hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu..... 51
Şekil 3.32	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 52
Şekil 3.33	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının C5 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 53
Şekil 3.34	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C7 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 54
Şekil 3.35	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının C7 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 54
Şekil 3.36	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının F4 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 55
Şekil 3.37	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F4 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 55
Şekil 3.38	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının F6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 56
Şekil 3.39	%51 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının F6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 56
Şekil 3.40	%58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği 57
Şekil 3.41	%58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L-V/L ² grafiği 58
Şekil 3.42	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının C6 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 58
Şekil 3.43	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 59
Şekil 3.44	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının C6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 59
Şekil 3.45	%58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği 60
Şekil 3.46	%58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L-V/L ² grafiği 61

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.47	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının D9 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 61
Şekil 3.48	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 62
Şekil 3.49	%58 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının D9 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 62
Şekil 3.50	%62 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği 63
Şekil 3.51	%62 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L-V/L ² grafiği 63
Şekil 3.52	%62 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının D6 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu grafiği 64
Şekil 3.53	%62 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri..... 65
Şekil 3.54	%62 Ge içeren a-SiGe:H n ⁺ -i-n ⁺ yapının D6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik tuzak yoğunluğu 65
Şekil 4.1	İkili eklem ince film silisyum malzemenin kesiti 69
Şekil 4.2	Üçlü eklem ince film silisyum malzemenin kesiti 69
Şekil 4.3	Artan Ge yüzdesine karşı N _t tuzak yoğunluğu değişimi 74

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo No</u>		<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Bu tez çalışmasında incelenen $n^+ - i - n^+$ amorf silisyum germanyum sandviç yapıların özellikleri	10
Tablo 3.1	$n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-Si:H ve a-SiGe:H malzemelerin SEM ve EDX bulguları	35

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum
a-SiGe:H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum
a-SiC:H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-karbon
SWE	Steabler-Wronski Etkisi
ESR	Elektron Spin Rezonans
PDS	Isıl Işın Saptırma Spektroskopisi
CPM	Sabit Işıl İletkenlik Yöntemi
DBP	İki Demetli Işıl İletkenlik Yöntemi
MBC	Modulated Photoconductivity
SCLC	Uzay Yüğü Sınırlı Akımlar Tekniğı (space charge limited current)
DBR	W. den Boer Yaklaşımı
NSR	Nespurek ve Sworakowski Yaklaşımı
SR	Stöckmann Yaklaşımı
RF-PECVD	Radyo frekanslı plazma yardımcı kimyasal buhar fazdan büyütme tekniğı (RF-plasma enhanced chemical vapor deposition)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
V	Gerilim
I_D	Karanlık akım
R	Direnç
ρ	Özdirenç
l veya L	Direncin boyu ($n^+ - i - n^+$ yapıda katkısız a-SiGe:H tabakanın kalınlığı)
A	Direncin kesit alanı ($n^+ - i - n^+$ yapıda üst kontağın tanımladığı alan)
σ_D	Karanlık öziletkenlik

σ_0	Öziletkenlik ön çarpanı
E_C	İletkenlik bandı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_A	Aktivasyon enerjisi
k	Boltzman sabiti
T	Mutlak sıcaklık
G	Kondüktans
E	Elektrik alan
J	Akım yoğunluğu
J_Ω	Ohmik akım yoğunluğu
e	Elektronun yükü
K	Malzemenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Havanın dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
N_t	Tuzak yoğunluğu
T_t	Tuzak dağılımı
n	Serbest yük taşıyıcılarının yoğunluğu
$n_{t,0}$	Isıl dengede dolu elektron tuzaklarının yoğunluğu
ΔV	Gerilimdeki değişim
ΔE_F	Fermi seviyesindeki kayma
\bar{N}_t	E_{F1} ve E_{F2} arasında tuzak yoğunluğu ortalaması

1.GİRİŞ

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum germanyum alaşımı (a-SiGe:H) ince film malzemeler, amorf silisyum güneş pilleri teknolojisinde son zamanlarda öne çıkan çok katmanlı güneş panellerinin en önemli fotovoltaiik soğurucu katman malzemelerinden birisidir. Çok katmanlı ince film silisyum güneş panellerinde farklı yasak enerji aralığına sahip, ışığı soğuran amorf silisyum bazlı yarıiletken tabakalardan düşük yasak enerji aralıklı soğurucu katman olarak amorf silisyum germanyum alaşımı malzemeler tercih edilmektedir. Güneş ışığının kızılötesi görünmez bölgesindeki ışık fotonlarının soğurulmasında önemli fonksiyonu olan düşük yasak enerji aralığına sahip amorf silisyum-germanyum alaşımı soğurucu tabaka çok katmanlı ince film silisyum güneş panellerinin enerji dönüşüm verimini arttıran en önemli kısmıdır. Bu nedenle son on yıldır bu tür malzemeler üzerinde yapılan araştırmalarla hem amorf silisyum-germanyum alaşımı malzemelerin özellikleri hem de bu malzemelerin çok katmanlı ince film silisyum güneş panellerinin karakteristiklerine etkileri araştırılmaktadır.

Güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi elde edilmesi üzerine piyasada mevcut güneş panelleri tek kristal silisyum ve çok kristalli silisyum malzemelerden imal edilen pn-eklem tipi güneş pillerinden oluşmaktadır. Atmosfer koşullarında kristal silisyum güneş panellerinin enerji dönüşüm verimleri ortalama %16 seviyelerindedir. Bu tür güneş panelleri teknolojisi şu an fotovoltaiik endüstrisinin en yaygın panelleri olmasına rağmen üretimi aşırı pahalı bir teknolojidir. Buna karşılık, yeni teknoloji olarak öne çıkmaya başlayan amorf silisyum güneş panelleri teknolojisi daha ucuz olarak daha geniş yüzeyli taban malzemeleri üzerine güneş gözelerinin oluşumuna dayanır. Amorf silisyum ince film malzemelerin diğer önemli üstünlüğü de güneş ışığını görünür bölgede tek kristal silisyumdan daha iyi soğurmasıdır. Yaklaşık bir mikron kalınlığında amorf silisyum 200 mikron kalınlığında tek kristal silisyumdan daha etkin olarak güneş ışığını soğurabildiğinden çok az bir malzeme kullanımını gerektirmektedir.

Tek kristalli silisyum yarıiletkenlerde atomlar bütün malzeme boyunca aynı sırada periyodik bir dizilim gösterir. Tek kristalli silisyum, elmas yapısında en yakın dört komşusuyla düzgün dörtyüzlü oluşturacak şekilde kovalent bağ yapar. Bu

düzenleniş sonucunda 0 K’ de değerlik bandı tamamen dolu iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Amorf yarıiletkenler de ise atomlar arası düzen bir iki atom mesafesini geçmez yani belirli bir periyodik dizilimleri yoktur. Atomlar rastgele bağlanmışlardır. Yapısında çok sayıda kırık bağ bulundurur. Aynı zamanda bağ uzunlukları ve açıları da farklıdır. Bu özellikten dolayı mikro yapıda elektronik kusurları oluşturur (Adler,1985). Amorf yapıdaki elektronik kusurlar serbest elektron ve boşlukların hareket etmesini engeller. Bu elektronik kusurların yoğunlukları 10^{19} cm^{-3} mertebesindedir (Bube, 1998). Fermi seviyesi bu kusurlar içinde sabitlenmiştir. Fermi seviyesini katkılama ile değiştirmek mümkün olmadığından amorf silisyum ince film malzemeler mükemmel yalıtkanlardır ve sadece elektronik uygulamalarda yalıtkan tabaka olarak kullanılırlar.

İlk olarak Chittick ve çalışma arkadaşları (1969) tarafından “DC Glow Discharge” yöntemi ile plazma içinde silan (SiH_4) gazının hidrojen (H_2) gazı içinde seyreltilerek ayrışması sonucu amorf silisyumun ince film olarak büyütülerek kusur yoğunluklarının 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} mertebelerine kadar azaldığı keşfedildi (Chittick vd., 1969). Burada hidrojen atomlarının silisyumun sallanan bağlarını ve kırık bağları pasif hale getirdiğini gözlemlədiler. Ortaya çıkan bu yeni malzeme “*Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum (a-Si:H)*” diye adlandırılmıştır. Çünkü mikro yapısında %10 mertebelerinde hidrojen içermektedir. Bu çalışmadan kısa süre sonra Spear ve Le Comper (1975) a-Si:H malzemenin üçüncü ve beşinci grup elementleri olan fosfor ve bor atomlarıyla katkılanarak n-tipi ve p-tipi ince filmlerin elde edilebileceğini gösterdiler (Spear ve LeComber, 1975). Bundan hemen bir yıl sonra Carlson ve Wronski (1976) ilk a-Si:H malzemedan elde edilen güneş pilinin sonuçlarını yayınladılar (Carlson ve Wronski, 1976). Bu gelişmeler olurken enerji krizi yaşanmaktaydı ve fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı arayışına girilmişti. İşte burada tek kristalli silisyum güneş piline göre görünür bölgede daha yüksek optik soğurma katsayısına sahip olan a-Si:H ince film güneş pilleri ucuz elektrik üretiminde öne çıkmaya başlamıştır. Bu özelliğinin yanı sıra geniş yüzeyli ucuz taban malzeme üzerine büyütülmesi de önemini artırmıştır.

Amorf silisyum üzerindeki büyük umutlar 1977 yılında keşfedilen bir olay ile daha ilginç bir araştırma alanı oluşturdu. D.L. Steabler ve C.R. Wronski tarafından yapılan çalışmada bu malzemelerin beyaz ışığa uzun süre maruz kaldıklarında mikro

yapıda bulunan elektronik kusurlara ek olarak yeni elektronik kusurlar oluştuğu ve ışık ile oluşturulan yeni kusurların malzemenin karanlık ve foto iletkenliklerinde zamanla azalmaya sebep olduğu gözlenmiştir (Steabler ve Wronski, 1977). Azalan iletkenlik değerleri örnek malzemeler karanlıkta yüksek sıcaklıklarda (150 – 200 C) tavlандıkları zaman tamamıyla tersinir bir özellik gösterildiği ve eski değerlerine geri döndüğü bulunmuştur. Bu olaya Steabler-Wronski Etkisi (SWE) adı verilmiştir (Steabler ve Wronski, 1977). a-Si:H ince film malzemelerde görülen bu olay geri dönüşümlü bir olay olmasına rağmen amorf silisyum teknolojisinin gelişimini yavaşlatmıştır.

Gelişen teknolojiyle birlikte a-Si:H ince filmler ve bu tür malzemeler, gaz fazından DC veya RF Plazma Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme Teknikleri (DC-PECVD, RF-PECVD) (Bullot ve Schmidt, 1987) ve Kızgın Tel Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme Tekniği (HWCVD) (Matsumura ve Ihara, 1988) gibi yöntemlerle büyütülmüştür. Bu sistemler yüksek vakumlu sistemlerdir. Yüksek vakum içinde iki elektrot arasına silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gazı karışımı gönderilir. Anot ve katot arasındaki yüksek elektrik alan etkisiyle plazma oluşur. Bu elektrik alan iyonlarla yüksüz atomları birbirinden ayırır. Yüklü olan atomlar üst elektroda yüksüz olanlar ise taban malzeme üzerinde düzensiz şekilde depolanarak ince film malzemeyi oluştururlar. Bu düzensizlik amorf yapının karakteristik özelliğidir. Hidrojen atomları ise amorf yapıdaki sallanan bağlara bağlanarak kusurları pasif hale getirir. Başlangıçta tek odalı vakum sistemleri olarak tasarlanan ince film büyütme sistemleri daha sonra çok odalı RF Plazma Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme (RF PECVD) sistemleri olarak geliştirilmiştir. Buradaki amaç vakum ortamını kırmadan ince film olarak büyütülen a-Si:H 'un hem n-tipi ve p-tipi katkılamayı gerçekleştirmek hem de a-Si:H malzemeye gaz fazından farklı elementler katarak yeni özellikte malzemeler elde etmektir. Çok odalı RF PECVD tekniğinde ayrı bir vakum odasına silan (SiH_4), german (GeH_4) ve hidrojen (H_2) karışımları göndererek hidrojenleştirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı ince film (a-SiGe:H) diye adlandırılan yeni malzemeler üretilmiştir (Matsuda vd., 1985). Gaz karışımında german (GeH_4) gazının akış hızı değiştirilerek farklı germanyum oranlarında silisyum zengini a-SiGe:H ince film malzemeler elde edilmektedir. Aynı şekilde başka bir vakum odasına bu sefer german (GeH_4) yerine metan gazı

eklenerek hidrojenleştirilmiş amorf silisyum-carbon alaşımı ince filmler büyütülmüştür (Matsuda vd., 1985).

Üretilen bu malzemelerin yasak enerji aralıkları, mikro yapılarındaki elektronik kusurlar ve buna bağlı olarak optik soğurma katsayıları birbirlerinden farklıdır. Çünkü a-Si:H içinde Ge oranının artmasıyla yasak enerji aralığı azalmaktadır (Kolodzey vd., 1986). Aynı zamanda elektronik kusurların yoğunluğu artmaktadır (Fuhs ve Finger,1989; Stutzman vd., 1989). Böylece daha düşük enerji aralığına sahip a-SiGe:H filmlerin kullanıldığı güneş pillerinde güneş ışığını a-Si:H malzemeye göre daha iyi soğuran a-SiGe:H ince film malzemeler öne çıkmıştır. Amorf silisyum ince film malzemelerin uzun süre ışık altında kaldıklarında ortaya çıkan elektronik bozunum, yani Staebler-Wronski etkisi hidrojenlendirilmiş amorf silisyum germanyum (a-SiGe:H) alaşımı ince film malzemelerde de önemli bir problem olarak kendini göstermiştir (Taylor, 2005). Çok katmanlı ince film silisyum güneş panellerinin gelişmesinde en önemli etken güneş ışığını soğuran katmanların elektriksel ve optoelektronik özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması ve bunların etkilerinin güneş panellerinin karakteristikleri ile ilişkilendirilmesi gereklidir. Işığı soğuran tabakaların mikro yapısında mevcut olan, ince film büyütme işlemleri sonucunda oluşan amorf yapının doğası gereği bulunan elektronik kusurların ve ışık ile oluşturulan Staebler-Wronski kusurlarının anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır.

Amorf silisyum-germanyum alaşımı ince film malzemelerin büyütüldüğü vakum sistemleri amorf silisyum ince film malzemeleri büyütme için kullanılan sistemlerdir. Silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gazlarının karışımından elde edilen plazma yardımı ile hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmler büyütülür. Aynı büyütme sistemine german (GeH_4) gazı eklenerek değişik akış hızlarında silisyum zengin hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı ince film malzemeler üretilmektedir. Amorf silisyum mikro yapı içine giren düşük atom yüzdelerindeki germanyum yasak enerji aralığını azaltmakta (Kolodzey vd., 1986) bunun yanında amorf mikro yapıda yeni germanyum orijinli elektronik kusurların oluşturulmasına neden olmaktadır (Fuhs ve Finger,1989; Stutzman vd., 1989). Bu tür yeni elektronik kusurlar elektron spin rezonans (ESR) tekniği ile açıkça ortaya çıkarılmıştır (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd., 1989). Amorf yapının doğası gereği birden fazla ve

değişik özellikte ve yoğunluklardaki elektronik kusurlar amorf silisyum germanyumun yasak enerji aralığına yayılmışlardır. Sürekli enerji dağılımına sahip elektronik kusurlar karanlık Fermi seviyesi tarafından kontrol edilen doluluk-boşluk seviyelerine göre elektriksel olarak yüksüz, pozitif yüklü veya negatif yüklü özelliklere sahip olabilirler. Bu elektronik kusurlar ince film malzemelerin elektriksel ve optoelektronik özelliklerini kontrol eden en önemli etmenlerdir. Aynı zamanda amorf silisyum-germanyum ince film malzeme soğurucu katman ile üretilen güneş panellerinde enerji dönüşüm verimlerini belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Dolayısıyla mikro yapıda mevcut elektronik kusurların değişik yöntemler kullanılarak incelenmesi ve özelliklerinin anlaşılması en önemli araştırma alanını oluşturmuştur.

Yasak enerji aralığı hazırlık koşullarıyla değiştirilen germanyum oranları ile belirlenmektedir. Yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların incelenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. En temel yöntemler karanlık ve ışıl iletkenlik yöntemleridir (Aljishi vd., 1989; Guha vd., 1987; Nebel vd., 1988; Stutzman vd., 1989). Bu temel yöntemlerden daha özel olan yöntemler de vardır. Elektron spin rezonans (ESR) (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd., 1989), düşük enerjili ışık soğurma spektroskopileri (ısıl ışın saptırma spektroskopisi (PDS), sabit ışıl iletkenlik yöntemi (CPM), iki demetli ışıl iletkenlik yöntemidir (DBP) (Carius vd., 1998) kullanılmıştır. ESR yöntemi ile sadece tek elektrona sahip silisyum ve germanyum orijinli yüksüz sallanan bağlar algılanabilir. Amorf yapıdaki germanyum oranı arttıkça germanyum orijinli D_{Ge}^0 tipi yüksüz kusurların silisyum orijinli D_{Si}^0 tipi yüksüz kusurlara baskın olduğu görülmektedir (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd., 1989). Ancak ESR yöntemi silisyum ve germanyum orijinli diğer yüklü kusurları (D_{Ge}^- , D_{Ge}^+ , D_{Si}^- , D_{Si}^+ tipi kusurlar) algılayamamaktadır (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd., 1989). Düşük enerjili ışık soğurma spektroskopisi olarak adlandırılan üç deneysel yöntem vardır. Bunlardan ikisi olan “sabit ışıl iletkenlik yöntemi (CPM)” ve ısıl ışın saptırma spektroskopisi (PDS) ile ölçülen düşük enerjili ışık soğurma katsayısı spektrumunun incelenmesi sonucunda hem yüklü (D_{Ge}^- , D_{Ge}^+ , D_{Si}^- , D_{Si}^+ tipi kusurlar) hem de yüksüz (D_{Ge}^0 ve D_{Si}^0 tipi kusurlar) kusurların malzeme içinde birlikte buldukları belirtilmiştir (Carius vd., 1998). Yapılan son çalışmalarda germanyum oranının yüksek olduğu a-SiGe:H alaşımlarında ise yüklü

elektronik kusurların daha fazla olduğu belirlenmiştir (Cohen, 1998). Bu yöntemlere ek olarak germanyum oranı arttıkça yüklü elektronik kusurların artışının gözlemlendiği başka yöntemler de vardır. “*Drive level capacitance*” yöntemi (Cohen, 1998) ve “*modulated photoconductivity (MPC)*” yöntemi (Palinginis ve Cohen, 2000) kullanılarak incelenen a-Si:H ve a-SiGe:H alaşımı ince filmlerin sonuçlarından artan germanyum oranı ile yeni kusurların oluşturduğu belirtilmektedir. Elektronik kusur mekanizmalarını anlamak için kullanılan bu yöntemler içinde mutlak bir sonuç sadece ESR yöntemiyle elde edilir. ESR yöntemi elektronik kusurları incelemek için en önemli tekniktir. Ancak ESR yöntemi elektronik kusurlardan sadece yüksüz sallanan bağlar için mutlak sonuç verir. Elektronik kusur yoğunluğunun mutlak sonucunu veren tek yöntem “*Uzay Yükü Sınırlı Akımlar Tekniğidir (space charge limited current-SCLC)*”. SCL akımlar tekniği a-Si:H ve a-SiGe:H alaşımli malzemeler gibi yüksek özdirençli amorf yarıiletkenlerde katılarda bant arasında yerleşmiş kusur dağılımını belirlemede kullanılmıştır (Rose, 1955). Yasak enerji aralığı içinde Fermi enerjisi civarındaki elektronik kusur yoğunluğunun (DOS) mutlak olarak hesaplaması bu tekniği diğer tekniklerden ayıran en önemli özelliğidir.

Katılarda SCL akımından ilk olarak Mott ve Gurney (1940) bahsetmiştir. Yalıtkanlarda iletkenlik bandına elektronların direk enjekte edilmesiyle yeterli büyüklükte akım oluştuğunu gözlemlemişler ve bunu gösteren basit bir hesaplama yapmışlardır (Mott ve Gurney, 1940). Ama büyük SCL akımlarını gözlemleyebilmek için gerekli olan önemli iki koşulu bulamamışlar ve 1955’e kadar da bu akımı gözlemleyememişler (Rose, 1955).

SCL akımları için gerekli koşullardan ilki, katot metalin iş fonksiyonu kristalin elektron afinitesinden daha büyük olmamalıdır. Bu durum oda sıcaklığında metaldeki yüksek oranda dolu enerji seviyesindeki elektronların yalıtılmış kristalin iletkenlik bandına doğrudan geçişine izin verir. İlk koşul Smith ve Rose tarafından (1955) indium metali ile CdS kristalin enjekte kontak yapılmasıyla gerçekleştirildi ve SCL akımlarını yeterli büyüklükte gözlemlediler (Smith ve Rose, 1955). İkinci koşul ise, kristallerde iletim bandından daha düşük enerji seviyelerindeki kusurlarla ilgilidir. Bunların yoğunlukları kısmi olarak azdır. Eğer elektronlar bu düşük enerji seviyelerine düşerlerse burada tutulur ve hareketsiz hale gelirler yani kusurlanırlar.

SCL akım tekniği kullanılarak CdS kristalden başka malzemeler örneğin InSe, amorf silisyum, mikrokristal silisyum gibi ince film malzemeler incelenmiş ve makaleler yayınlanmıştır. İlk olarak SCL akım yöntemini kullanarak $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-Si:H malzeme durum yoğunluğu hesabını Den Boer (1981) yapmış ve 1,1 μm kalınlığındaki a-Si:H malzeme için durum yoğunluğu $2,5 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplamıştır (Den Boer, 1981). Daha sonra I. Solomon, R. Benferhat ve H. Tran-Quoc (1984) tarafından 1 μm kalınlığındaki $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-Si:H malzeme durum yoğunluğu $1 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplamıştır (Solomon vd., 1984). R.M. Dawson, C.R. Wronski ve M. Bennett (1990) tarafından ise $p^+ - i - p^+$ yapılı 1 μm kalınlıklı a-Si:H malzeme için durum yoğunluğunu $2 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulmuştur (Dawson vd., 1991). a-SiGe:H ince film malzemelerde ise şimdiye kadar sadece Yang-Fang Chen (1989) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada 3 μm kalınlığındaki farklı germanyum oranlarına sahip $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-SiGe:H malzemelerde durum yoğunluğu $1 \times 10^{17} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ den büyük olarak hesaplanmıştır (Chen, 1989). Bu çalışmanın dışında a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ yapılarda herhangi bir araştırma yayınlanmamıştır.

SCL akımlar yönteminde yasak enerji aralığında yerleşmiş kusur dağılımını hesaplarken üç farklı yaklaşım kullanılır. Bunlar W. den Boer Yaklaşımı (DBR) (Den Boer, 1981), Nespurek ve Sworakowski Yaklaşımı (NSR) (Nespurek ve Sworakowski, 1977) ve Stöckmann Yaklaşımıdır (SR) (Stöckmann, 1981). Bu tez çalışmasında farklı germanyum oranları ile büyütülmüş $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının i-tabakası katkısız a-SiGe:H ince film malzemelerden oluşmaktadır. Oda sıcaklığı ile 400K arası sıcaklıklarda SCL akımlarının ölçülmesi ve W. den Boer yaklaşımı kullanılarak Fermi enerji seviyesi civarında yerleşmiş elektronik kusurların miktarı hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı malzemelerde Uzay Yüku Sınırlı Akımlar Tekniği (space charge limited currents-SCLC) kullanılarak germanyum yüzdesindeki değişim ile oluşan öz kusurların yoğunlukları ve enerji dağılımları hakkında bilgi edinmektir. Bu amacı

gerçekleştirmek için katkısız a-SiGe:H (i-tabaka) alaşımı malzemeler $n^+ - i - n^+$ tipi sandviç yapı olarak hazırlanmıştır. Vakumda ısıl işleme tabi tutulduktan sonra değişik sıcaklıklarda karanlık öziletkenlik ölçümlerinde SCL akımları tespit edilip analiz edilerek malzeme içinde yerelleşmiş elektronik kusur yoğunlukları mutlak olarak elde edilmiş ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

2.1 n⁺-i-n⁺ Sandviç Tipi Aygıtların Büyütülmesi

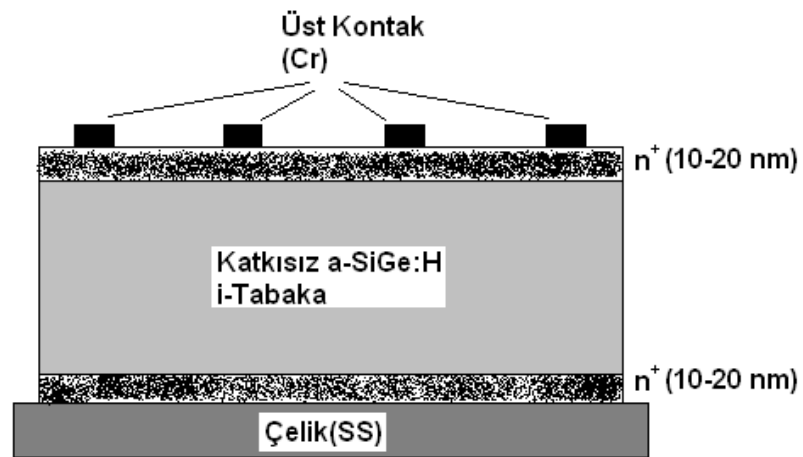
Bu tez çalışmasında katkısız amorf silisyum-germanyum alaşımı ince film (i-tabaka) n⁺-i-n⁺ sandviç tipi aygıtlar incelenmiştir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı ince film malzemeler, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) içine değişik oranlarda germanyum katılarak elde edilen ince film malzemelerdir. Bu malzeme amorf mikro yapısının doğasından kaynaklanan değişik yoğunluk ve özellikte elektronik kusurlara sahiptir. Bu çeşit kusurlar amorf yarıiletkenin yasak enerji aralığında yerleşmiş sürekli enerji dağılımına sahiptir. İnce film büyütme koşullarının yarattığı doğal elektronik kusurların incelenmesi için değişik aygıt yapıları kullanılmaktadır. Bunlardan birisi n-i-n tipi sandviç yapılarıdır. Bu tez çalışmasında incelenen n⁺-i-n⁺ tipi sandviç yapılar Amerika Birleşik Devletleri Michigan eyaletinde bulunan “United Solar System Comparison (USSC)” adlı fotovoltaik güneş panelleri üreten firmanın araştırma-geliştirme laboratuvarlarında hazırlanmıştır. Çok katmanlı n⁺-i-n⁺ tipi sandviç yapıların büyütülmesi sırası ile şu şekilde özetlenebilir:

Taban malzemesi olarak paslanmaz çelik metal üzerine radyo frekanslı (RF) plazma yardımcı kimyasal buhar fazdan büyütme sisteminde (RF plasma enhanced chemical vapor deposition-RF PECVD) aşırı katkılı n⁺-tipi amorf silisyum katman silan (SiH₄), fosfin (PH₃) ve hidrojen (H₂) gaz karışımından oluşan plazma yardımı ile büyütülmüştür. n⁺-katmanı metal ile Ohmik kontak oluşturmak için büyütülmüştür. Kalınlığı 10 nm- 20 nm mertebesinde dir. Metal-n⁺ tabakası üzerine katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum tabakanın büyütülmesi için malzeme ayrı bir RF-PECVD vakum odasına taşınarak silan (SiH₄), german (GeH₄) ve hidrojen (H₂) gazlarının karışımından oluşan plazma içinde german gazının akış hızını değiştirerek katkısız amorf silisyum-germanyum (a-SiGe:H) alaşımı ince film tabaka büyütülmüştür. Katkısız a-SiGe:H tabakadan sonra, malzeme tekrar aşırı katkılı n⁺-tipi amorf silisyum tabakanın büyütüldüğü RF-PECVD vakum odasına transfer edilmiştir. Bir önceki aşamanın aynısı olacak şekilde 10 nm-20 nm kalınlığındaki n⁺ a-Si:H tabaka silan, fosfin ve hidrojen gaz karışımından oluşan plazma yardımı ile büyütülmüştür. Son aşama olarak üst metal kontak oluşumu ile

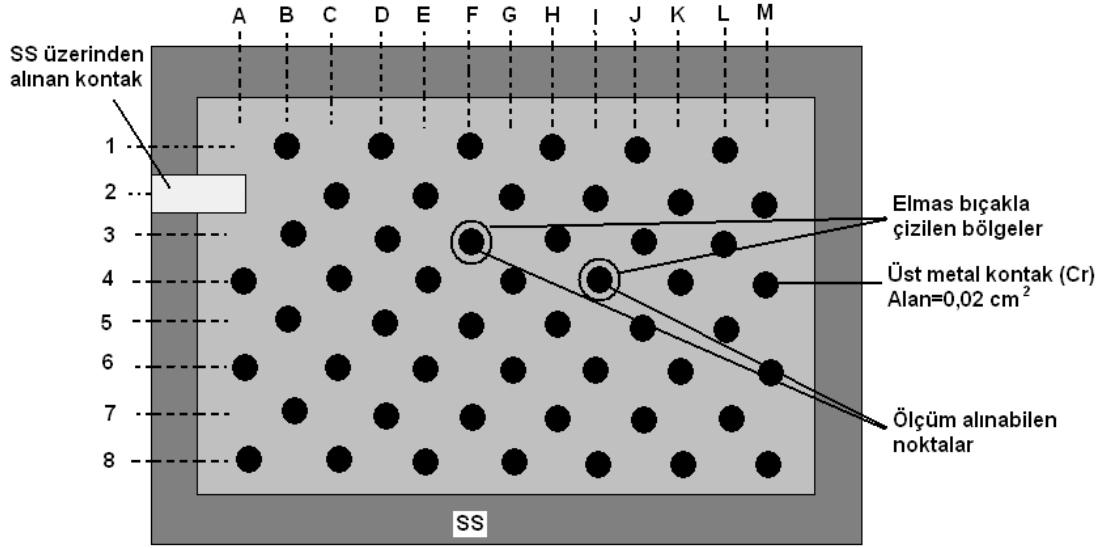
n^+ - i - n^+ sandviç yapının tamamlanması için taban malzemesi RF-PECVD sisteminden çıkarılıp metal buharlaştırma ünitesine (Evaporator) yerleştirilmiştir. Dairesel metal kontak bölgelerinin tanımlandığı maske malzeme üzerine yerleştirilmiş, vakum koşulları oluştuktan sonra ısı yolla krom metali buharlaştırılıp dairesel üst metal kontaklar Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Bu tezde incelenen malzeme adları ve özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Bu tez çalışmasında incelenen n^+ - i - n^+ amorf silisyum-germanyum sandviç yapıların özellikleri

Malzeme	Kalınlık (μm)	Alan (cm^2)	Yarıçap (mm)
L13227 a-Si:H	1,00	0,02	1,6
L13230 a-SiGe:H	1,55	0,02	1,6
L13239 a-SiGe:H	1,37	0,02	1,6
L13241 a-SiGe:H	1,70	0,02	1,6
L13233 a-SiGe:H	1,59	0,02	1,6



Şekil 2.1 Metal(SS)/ n^+ - a-Si:H/katkısız a-SiGe:H/ n^+ - a-Si:H /metal(Cr)(n^+ - i - n^+) sandviç yapının kesiti



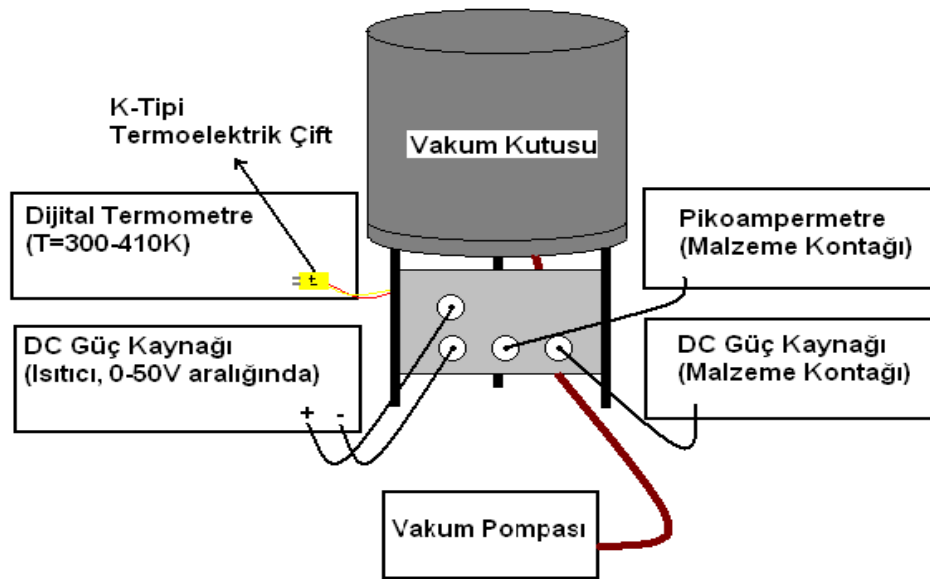
Şekil 2.2 Metal(SS)/n⁺- a-Si:H/katkısız a-SiGe:H/n⁺- a-Si:H /metal(Cr)(n⁺-i-n⁺) sandviç yapının üstten görünümü

Ölçümler sırasında akım-gerilim ölçümleri yapılan bir aygıtın komşu aygıtlardan gelen akımlardan etkilenmemesi için incelenen aygıtların etrafı kalem tipi elmas kesicilerle çizilerek aygıtlar birbirlerinden ayrılmışlardır. Her bir taban üzerinde çok sayıdaki n⁺-i-n⁺ tipi aygıtlar metal (paslanmaz çelik)/n⁺ a-Si:H/katkısız a-SiGe:H (i-tabaka)/ n⁺ a-Si:H/metal (Cr) katmanlardan oluşmuştur. Buradaki n⁺ a-Si:H tabakalar metal kontaklarla katkısız a-SiGe:H tabakalar arasında Ohmik kontak oluşturmak içindir. n⁺-i-n⁺ tipi sandviç yapılarda katkısız tabaka ince olduğundan kuvvetli elektrik alan altında Ohm yasasına uymayan akım mekanizmaları oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında ölçülen akım-gerilim eğrilerinden Ohm yasasına uyan ve uymayan akım mekanizmalar belirlenip, Ohm yasasına uymayanlar analiz edilip katkısız a-SiGe:H tabaka içindeki elektronik kusurlar hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

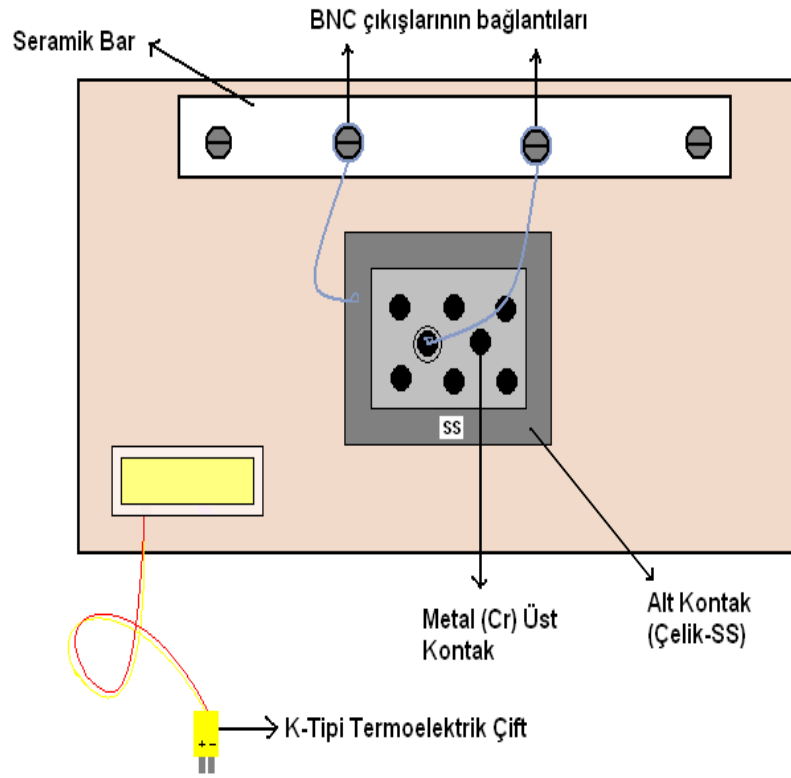
2.2 Karanlık Akım-Gerilim Ölçüm Sistemi

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum yarıiletken tabakalar içeren n⁺-i-n⁺ tipi sandviç yapıların en temel ölçümleri karanlıkta akım-gerilim ölçümleridir. Bu amaç için laboratuvarımızda geliştirilen ev yapımı vakum odası kullanılmıştır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de tasarımı gösterilen vakum sisteminin kısımlarını şu şekilde

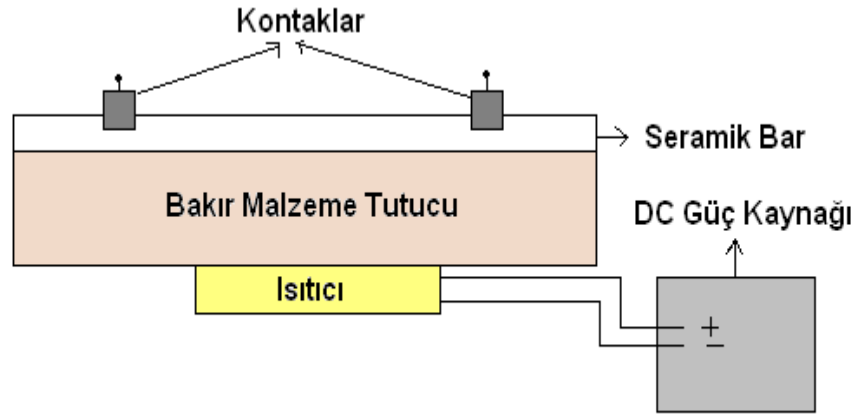
özetleyebiliriz. Vakum odası kaba vakum pompası ile 10^{-3} mbar seviyesinde vakum ortamı elde edilmektedir. Vakum odası içinde bakırdan imal edilmiş malzeme tutucu altına elektriksel direnç yardımı ile malzemeyi ısıtan bir ısıtıcı dışarıdan sabit gerilim ve sabit akım ile beslenmektedir. Bakır malzeme tutucu üzerine yapıştırılmış K-tipi termoelektrik çift malzemenin sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Vakum odasının elektrik besleme uçlarından yararlanarak K-tipi termometrenin bağlandığı sıcaklık ölçer vakum odasındaki malzemenin ölçüm sıcaklığını ölçmemizi sağlar. Bakır malzeme tutucu üzerine yerleştirilen seramik çubuklar üzerine monte edilen metal uçlar ile $n^+ - i - n^+$ tipi yapının alt kontak (çelik) ve üst kontak (Cr) elektriksel bağlantıları yapılmıştır. Seramik çubuk üzerine bağlanan metal problemlerin diğer uçları vakum odası dışına elektrik besleme ucundan BNC tipi uçlara bağlanmıştır. İki adet BNC uçların birisi DC gerilim kaynağına, diğer uç ise Keithley Pikoampermetreye bağlanmıştır. Malzeme vakum odasına yerleştirilip elektriksel kontaklar bağlandıktan sonra vakum başlığı kapatılıp sistem vakum altına alınır. Malzemeler vakum ortamında 170 C° 'ye kadar ısıtılıp 1-2 saat ısıtım uygulanır. Daha sonra malzeme yavaş bir şekilde soğutulurken akım-gerilim ölçümleri kaydedilir. Belirli sıcaklıklarda değişik DC gerilimlerine karşılık akım değerleri ölçülür. Bu eğriler kullanılarak $n^+ - i - n^+$ yapının akım mekanizmaları hakkında aşağıda açıklanan bilgiler elde edilir.



Şekil 2.3 Sıcaklığa bağlı karanlık akım-gerilim ölçüm sistemi



Şekil 2.4 Bakırdan imal edilmiş malzeme tutucunun üstten görünümü



Şekil 2.5 Bakırdan imal edilmiş malzeme tutucunun yan kesiti

2.3 Karanlık Öziletkenlik Yöntemi

Amorf yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı içinde yerleşmiş değişik özelliklere sahip elektronik kusurlar yüklü veya yüksüz olabilmektedir. Doğadaki yük dengesi amorf yarıiletkenlerde karanlık Fermi enerji seviyesi tarafından kontrol edilmektedir. Fermi enerji seviyesinin altında ve üstündeki enerjilerde yerleşmiş yüklü elektronik kusurlar birbirini dengelemek durumundadır. Katkısız yarıiletkenlerde karanlık Fermi enerji seviyesi genellikle yasak enerji aralığı ortalarındadır. Fakat amorf yarıiletkenlerde genellikle Fermi seviyesi yasak enerji aralığı içinde ve kısmen iletkenlik bandına yakın enerjilerde oluşmaktadır. Katkısız olduğu halde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ve silisyum-germanyum alaşımı yarıiletkenler genellikle n-tipi bir iletkenlik göstermektedirler.

Ohm yasasına göre direnç;

$$V = I \times R \quad (2.1)$$

$$R = \frac{\rho_D l}{A} = \frac{l}{\sigma_D A} \quad (2.2)$$

$$\sigma_D = \frac{I \times l}{V \times A} \quad (2.3)$$

Burada l direncin boyu, A direncin kesiti, σ_D karanlık öziletkenliktir. $n^+ - i - n^+$ yapıda A kesit alanı dairesel üst kontağın tanımladığı alan ve direncin boyu ise katkısız a-SiGe:H tabakanın kalınlığıdır.

Eğer sıcaklık değiştirilirse, karanlık öziletkenlik $\sigma_D(T)$:

$$\sigma_D(T) = \frac{I_D(T) \times l}{V \times A} \quad (2.4)$$

olur. Sabit dc gerilimi V altında değişen sıcaklık ile $I_D(T)$ kayıt edilirse sıcaklığa bağlı karanlık öziletkenlik hesaplanır.

Literatürde amorf yarıiletken ince film malzemelerin sıcaklığa bağlı karanlık öziletkenlik değeri Fermi seviyesine bağlıdır.

$$\sigma_D = \sigma_0 e^{-(E_C - E_F)/kT} = \sigma_0 e^{-E_A/kT} \quad (2.5)$$

Burada σ_0 iletkenlik ön çarpanı, E_C iletkenlik bant enerjisi, E_F karanlık Fermi seviyesi, k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık ve $E_A = E_C - E_F$ aktivasyon enerjisi olarak tanımlanır.

Son denklemin doğal logaritmasını alırsak,

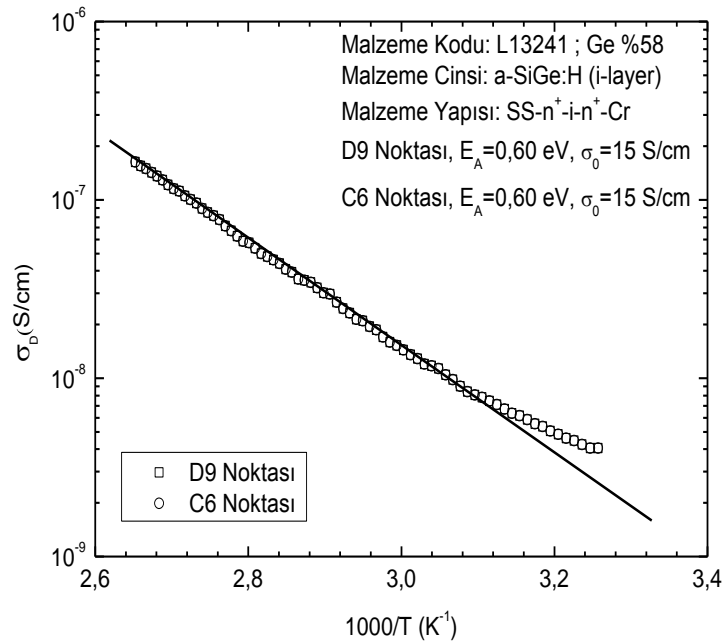
$$\ln \sigma_D(T) = \ln \sigma_0 - \frac{E_A}{kT} \quad (2.6)$$

$Y(x)=B-Ax$ tipi bir denklem elde edilir.

Genellikle $\ln\sigma_D(T) = \ln\sigma_0 - \frac{E_A}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) = \ln\sigma_0 - A \left(\frac{1000}{T}\right)$ gibi bir denklem elde edilir.

$\ln\sigma(T)$ ile $1000/T$ arasında çizilen doğrusal grafik Arrhenius grafiği olarak adlandırılır. Bu grafiğin eğimi $E_A=E_C-E_F$ aktivasyon enerjisini, yani karanlık Fermi enerjisinin yasak enerji aralığı içindeki yerini belirler.

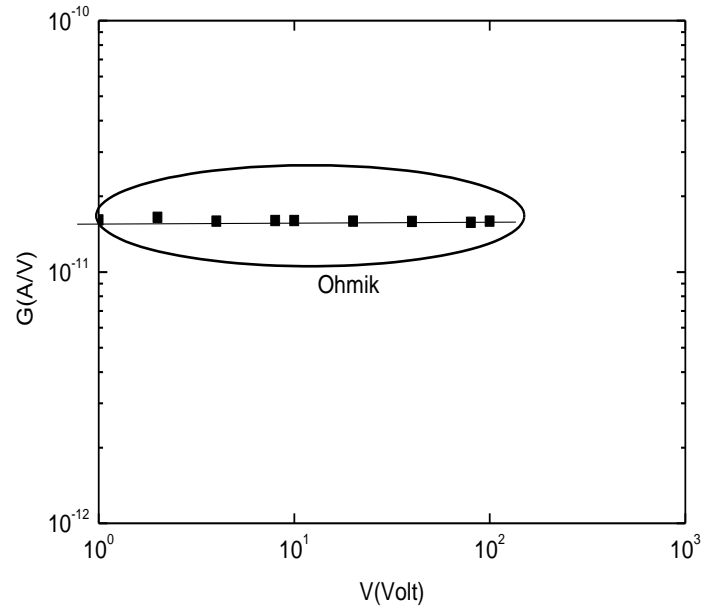
Bu tez içinde incelenen n^+i-n^+ tipi yapıların değişik Ge oranına sahip tabakalarında Fermi enerji seviyeleri bu yöntem ile belirlenmiştir. Şekil 2.6'te %58 Ge oranına sahip n^+i-n^+ sandviç yapının karanlık öziletkenlik ile $1000/T$ arasındaki deneysel ilişki gösterilmiştir. Arrhenius grafiğinin doğrusal ilişkisi Fermi seviyesinin iletkenlik bandından 0,60 eV aşağıda olduğunu belirtmektedir. Yasak enerji aralığı literatürde 1,4 eV ile 1,7 eV arasında değişen a-SiGe:H ince filmlerde 0,60 eV Fermi seviyesi bant ortasından iletkenlik bandına doğru kaymış olduğunu gösteriyor.



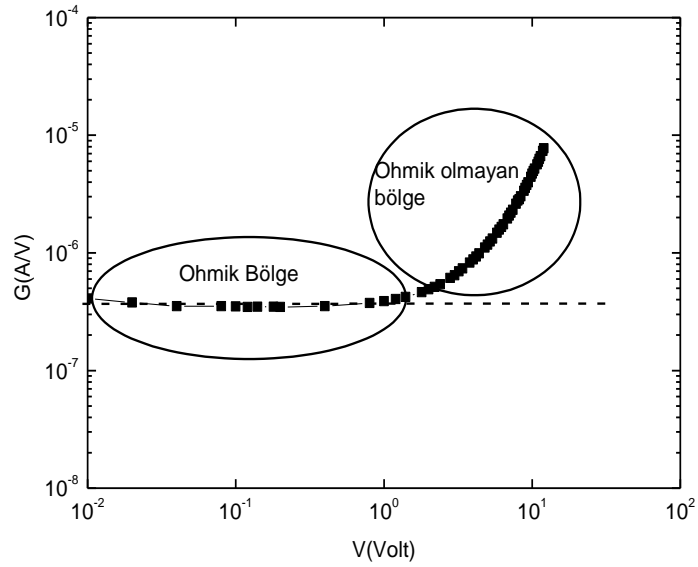
Şekil 2.6 %58 Ge oranına sahip katkısız a-SiGe:H alaşımı katman içeren n^+i-n^+ sandviç yapının Arrhenius grafiği

2.4. Uzay Yüğü Sınırlı Akımlar (SCL Akımları) Tekniğı ve W. den Boer Analizi

Amorf yarıiletkenlerde yüksek elektrik alan altında elde edilen akım-gerilim eğrileri Ohm yasasına uymayan akım mekanizmaları tarafından kontrol edilmektedir. Bunlara örnek olarak literatürde de sıkça rastlanan “space charge limited currents-SCLC” uzay yüğü sınırlı akımlar mekanizması verilebilir. Yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusur yoğunluğu yüksek olan amorf yarıiletkenlerde düşük elektrik alanlarda Ohm yasasına uygun akım-gerilim elde edilirken, yüksek elektrik alanlarda SCL akımları veya Pool-Frenkel tipi akım mekanizmaları baskın olabilmektedir. Bu mekanizmaların hangisinin hangi elektrik alanlarda baskın olduğu deneysel akım-gerilim eğrilerinin değişik gösterimlerinden ortaya çıkmaktadır. Ohm yasasına uyan akım mekanizması mevcut iken $\ln I-\ln V$ veya $\ln J-\ln V$ grafiklerinin eğimi 1 olur. Bir başka gösterimle $\ln G-\ln V$ grafiğı eğimi sıfırdır, yani her gerilime karşılık sabit kondüktans elde edilir. Şekil 2.7’da paralel metal elektrotlara sahip bir amorf silisyum-germanyum foto direnç için düşük elektrik alanlarda ölçülen $\ln G-\ln V$ grafiğı gösterilmiştir. Foto direncin Ohm yasasına uyan akım-gerilim mekanizması beklenen sabit bir kondüktans değerini vermektedir. Bu foto direncin kontakları arasındaki mesafe, direncin uzunluğu, 1000 μm , kesiti ise 10^{-4} cm^2 dir. Şekil 2.8’de ise n^+-i-n^+ tipi bir örnek malzeme için $\ln G-\ln V$ grafiğı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük gerilimlerde Ohm yasasına uyan sabit kondüktans elde edilirken yüksek gerilimlerde sabit G değerlerinin gerilimle veya elektrik alana bağılı hale gelmesi Ohm yasasına uymayan akım mekanizmalarını işaret eder.



Şekil 2.7 Paralel elektrod-“coplanar” kontaklara sahip a-SiGe:H foto direnç için G-V eğrisi



Şekil 2.8 %38 Ge içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip n⁺-i-n⁺ sandviç yapıya ait G-V grafiği

Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de görüldüğü gibi düşük elektrik alan altındaki paralel elektrot kontaklara sahip a-SiGe:H foto dirençte ve $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-SiGe:H malzemede Ohmik bölge görülmektedir. Ancak $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-SiGe:H malzemede Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi 1×10^4 V/cm elektrik alan uygulandığında Ohmik bölgeden bir sapma olmaktadır. Bu bölgede farklı akım mekanizmaları görülmektedir. Bunlar SCL akım mekanizması ya da Pool-Frenkel tipi akım mekanizmaları olabilir. Ohm yasasına uymayan mekanizmaların SCL akımları ya da Pool-Frenkel tipi akım mekanizması olduğu aşağıdaki gibi açıklanır.

SCL akımlarının incelenmesinde değişik teoriler yapılmıştır (Lampert, 1964). Yasak enerji aralığında sürekli elektronik kusur yoğunluklarına sahip amorf yarıiletkenlerde SCL akım mekanizmaları ilk defa Lampert tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir (Lampert, 1964; Lampert, 1970). Kalınlığı L olan bir amorf yarıiletkende akım mekanizması sadece SCL akımlarının baskın olduğu, difüzyon akımının ihmal edilebilir olduğu ve akımı oluşturan tek tip yüklerin olduğu bir yarıiletkende akım yoğunluğu J ile uygulanan gerilim V arasındaki ilişki Lampert tarafından şu şekilde elde edilmiştir (Lampert, 1964; Lampert, 1970).

$$\frac{J}{L} = C \left(\frac{V}{L^2} \right)^2 \quad (2.7)$$

Burada C sabit bir parametre, L direncin boyudur. $\ln(J/L) - \ln(V/L^2)$ grafiği eğimi 2 olan bir doğrudur. Aynı direnç için düşük elektrik alanlarda (J/L) ifadesi elde edildiğinde;

$$V = I \times R \quad (2.8)$$

$$\frac{I}{A} = \frac{V}{RA} \quad (2.9)$$

$$J = \frac{V}{A \left(\frac{\rho L}{A} \right)} = \sigma \frac{V}{L} = \sigma \cdot E \quad (2.10)$$

$$\frac{J}{L} = \sigma \frac{V}{L^2} = \sigma \left(\frac{V}{L^2} \right)^1 \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. Dolayısıyla, $\ln(J/L) - \ln(V/L^2)$ grafiği eğimi 1 olan bir doğrudur. Sonuç olarak, $\ln(J/L)$ ile $\ln(V/L^2)$ grafiği Ohm yasasına uyan ve uymayan akım mekanizmalarını ayırt etmek için kullanılan en belirgin yöntemdir. Yasak enerji aralığında sürekli elektronik kusur yoğunluklarına sahip amorf yarıiletkenlerde SCL

akımlarının baskın olduğu elektrik alan bölgesi $\ln(J/L)$ ile $\ln(V/L^2)$ grafiği çizilerek belirlenir. Bu grafikte eğimi 1 olan kısım Ohm yasasına uyar, eğimi 2 olan kısım SCL akımlarını belirtir. Eğer aynı malzemedan yapılmış değişik kalınlıklara sahip dirençlerin SCL akımları için $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiği çizildiğinde eğriler üst üste örtüşmektedir. Bu kurala “Kalınlıkla Orantılama Yasası-(Scaling Law)” adı verilmektedir. Eğer bu örtüşme oluşmaz ise SCL akımlarının dışında başka akım mekanizmalarının da katkısı olduğu ortaya çıkar.

Ohm yasasına uymayan SCL akımlarına ek olarak Pool-Frenkel etkisinden kaynaklanan bir akım mekanizması da görülmektedir. Çoğunlukla SCL akımları ve Pool-Frenkel etkisi birbirine karıştırılabilir. Frenkel (1938) tarafından keşfedilen bu etki yüksek elektronik kusurlu yarıiletkenlerde görülmektedir. Derin kusurlardaki yüklerden dolayı oluşan potansiyel engellerinin uygulanan elektrik alan ile azaltılması sonucu kusurlardaki yüklerin ısı yolla iletkenlik bandına uyarılmalarından oluşan elektrik akım yoğunluğu ifadesi Frenkel tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Frenkel, 1938).

$$J = J_{\Omega} e^{\sqrt{e^3 E / \pi K \epsilon_0 k T}} \quad (2.12)$$

Burada J_{Ω} Ohmik akım yoğunluğunu, e elektronun yükü, E elektrik alan, K malzemenin dielektrik sabiti, ϵ_0 havanın dielektrik geçirgenliği, k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

$$J_{\Omega} = \frac{V}{A \cdot R} = \frac{V}{A \rho \frac{L}{A}} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{V}{L} = \sigma \cdot E \quad (2.13)$$

Ohmik akım yoğunluğu ifadesinde A direncin kesiti, R direncin değeri, ρ öz direnç, L direncin boyu ve σ iletkenliktir.

Son denklem yeniden düzenlenirse;

$$J = \sigma E e^{\left(\sqrt{e^3 / \pi K \epsilon_0 k T}\right) E^{1/2}} \quad (2.14)$$

$$\frac{J}{E} = \sigma e^{\left(\sqrt{e^3 / \pi K \epsilon_0 k T}\right) E^{1/2}} \quad (2.15)$$

$$\ln\left(\frac{J}{E}\right) = \ln(\sigma) + \left(\sqrt{\frac{e^3}{\pi K \epsilon_0 k T}}\right) \times E^{1/2} \quad (2.16)$$

$$\ln\left(\frac{J}{E}\right) = C + B \times E^{1/2} \quad (2.17)$$

Burada;

$$B = \sqrt{\frac{e^3}{\pi K \epsilon_0 k T}} = \text{sabit}$$

$$C = \ln \sigma = \text{sabit}$$

denklemleri elde edilir. Sabit sıcaklıkta ölçülen akım–gerilim değerlerini kullanarak çizilen $\ln(J/E)$ ile $E^{1/2}$ grafiğinin eğimi sabit olan bir doğru vermektedir. Bu doğrunun eğiminden yarıiletken malzemenin K dielektrik sabiti literatürde yayınlanmış değere eşit veya yakın ise akım mekanizmasının Pool-Frenkel etkisi ile yani elektrik alan yardımcı bir akım mekanizması olduğu anlaşılır (Frenkel, 1938).

Eğer $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiği doğrusal değilse SCL akımlarının baskın olduğu ortaya çıkar. J-V eğrisinde Ohm yasasına uymayan kısımlar dikkatlice hem SCL hem de Pool-Frenkel etkisi için kontrol edilebilir.

DeneySEL olarak elde edilen SCL akımlar tekniğinde yasak enerji aralığındaki yerleşmiş kusur dağılımlarının hesabı üç farklı analiz kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bunlar W. den Boer Yaklaşımı (DBR) (Den Boer,1981), Nespurek ve Sworakowski Yaklaşımı (NSR)(Nespurek ve Sworakowski 1077), Stöckmann Yaklaşımıdır (SR)(Stöckmann, 1981). Bu tez çalışmasında incelenen $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılarında SCL akımları aşağıda açıklanan W. den Boer analizi kullanılarak analiz edilmiş ve elektronik kusur dağılımları hesaplanmıştır.

Den Boer (1981) “Glow Discharge” sistemi ile büyütülmüş $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıları a-Si:H malzemedeki SCL akımlar tekniğini uygulamış ve burada durum yoğunluğu hesabını yapmak içinde bir yaklaşım öne sürmüştür (Den Boer,1981). Katkısız a-Si:H’un biraz n-tipi olmasından dolayı $n^+ - i - n^+$ yapıda kontaklar boşluklara engel olur ve SCL akımı ağırlıklı olarak elektronlar tarafından iletilir. Bu varsayıma ek olarak $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıda sonsuz bir elektron deposu olan Ohmik kontak vardır. Bu bilgiler ışığında geliştirilen SCL akım teorisi a-Si:H malzemelere uygulanmıştır (Den Boer,1981).

Yaklaşımında ilk olarak durum yoğunluğunun quasi-exponansiyel dağılımları değerlendirilmiştir.

$$N_t(E) = \frac{N_t}{kT_t} \exp\left(\frac{E-E_C}{kT}\right) \quad (2.18)$$

Burada N_t ve T_t elektronik kusur dağılımını simgeleyen parametrelerdir. E_C iletkenlik bandı enerjisidir. Bu dağılım için akım yoğunluğu (J)-gerilim (V) karakteristiği için log-log skalada doğrusaldır.

N_t ve T_t , J - V karakteristiğinden elde edilir.

$$J = N_C e \mu_n \left(\frac{\varepsilon_s}{N_t(\Lambda+1)} \right) \left(\frac{2\Lambda+1}{\Lambda+1} \right)^{\Lambda+1} \frac{V^{\Lambda+1}}{L^{2\Lambda+1}} \quad (2.19)$$

N_C iletkenlik bandı kenarında etkin durum yoğunluğu, μ_n serbest elektron mobilitesi, L malzemenin kalınlığı, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Ayrıca Λ parametresi,

$$\Lambda = \frac{T_t}{T}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Durum yoğunluğunu $\log J$ - $\log V$ karakteristiğinde dümdüz çizgide fit etmek mümkün değildir. Bu yüzden durum yoğunluğu analiz yapılarak tahmin edilebilir. Isıl dengede dolu elektron kusurlarının yoğunluğu $n_{t,0}$ 'dır. Bir gerilim uygulandığında Ohmik kontakten enjekte edilen uzay yüklerinden dolayı E_{F0} ile E_{Fn} denge değerlerinden yükselir. Dolu elektron kusurları yoğunluğu böylece n_t haline gelir. $N_t(E)$ kusur dağılımının sürekli farz edilmesi ve yavaş yavaş değiştiği varsayılarak, $n_t - n_{t,0}$ yaklaşımı;

$$n_t - n_{t,0} \cong \int_{E_{F0}}^{E_{Fn}} N_t(E) dE \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir.

Analizi basitleştirmek için; enjekte edilen yüklerin filmde boyu boyunca düzgün dağıtılmış olduğu ve elektrik alanın sabit ve film boyunca

$$E = \frac{V}{L}$$

olduğu varsayılmıştır. Bu iki varsayım birbirine zıttır.

Birim alanda enjekte edilen yük,

$$Q = \frac{2\varepsilon_s N}{L}$$

olarak verilir.

Kusur yoğunluğu serbest elektron yoğunluğunda çok büyük olduğu için enjekte edilen yükler kusurlanır.

$$eL(n_t - n_{t,0}) = \frac{2\varepsilon_s V}{L} \quad (2.21)$$

Ölçülen J - V değerlerinden oluşturulan J - V eğrisi üzerinde iki nokta alarak (J_1 - V_1 ve J_2 - V_2) bir gerilim değişimi ($\Delta V = V_2 - V_1$) ile ilgili Fermi seviyesindeki kaymayı ($\Delta E_F = E_{F_2} - E_{F_1}$) hesaplarız.

$$J_1 = n_1 e \mu_n \frac{V_1}{L} \quad (2.22)$$

$$J_2 = n_2 e \mu_n \frac{V_2}{L}$$

Burada n_1 ve n_2 serbest yük taşıyıcıların yoğunlukları, V_1 ve V_2 uygulanan gerilimlerdir.

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{F_1}}{kT}\right) \quad (2.23)$$

$$n_2 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{F_2}}{kT}\right)$$

2.22 ve 2.23 denklemlerinden;

$$\Delta E_F = E_{F_2} - E_{F_1} = kT \ln \frac{n_2}{n_1} = kT \ln \left(\frac{J_2 V_1}{J_1 V_2}\right) \quad (2.24)$$

2.20 ve 2.21 denklemleri kullanılarak;

$$\frac{2\varepsilon_s \Delta V}{L} \cong eL \int_{E_{F_1}}^{E_{F_2}} N_t(E) dE \quad (2.25)$$

2.25 denkleminde integral yaklaşımı yapılırsa;

$$\int_{E_{F_1}}^{E_{F_2}} N_t(E) dE \cong \widetilde{N}_t \Delta E_F \quad (2.26)$$

Burada \widetilde{N}_t , E_{F_1} ve E_{F_2} arasında kusur yoğunluğu ortalamasıdır. En son olarak, 2.25 ve 2.26 denklemlerinden;

$$\widetilde{N}_t \cong \frac{2\varepsilon_s \Delta V}{EL^2 \Delta E_F} \quad (2.27)$$

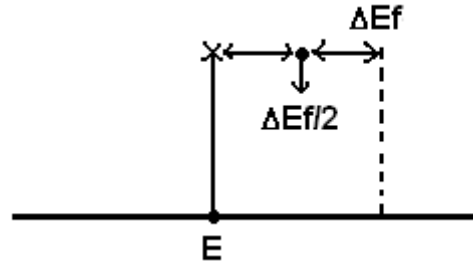
elde edilir.

Elde ettiğimiz bu denklemde Fermi enerjisindeki kayma olan ΔE_F 'yi hesaplanmasını göstermek için Şekil 2.10'da işaretlendiği gibi iki akım değerine karşılık gelen gerilim değerleri kullanılarak denklem 2.28 ve 2.29'dan E_{F1} ve E_{F2} değerleri hesaplanır.

$$J_1 = \sigma \cdot E = \sigma \left(\frac{V_1}{T} \right) = \sigma_0 e^{-(E_C - E_{F1})/kT} \left(\frac{V_1}{T} \right) \quad (2.28)$$

$$J_2 = \sigma \cdot E = \sigma \left(\frac{V_2}{T} \right) = \sigma_0 e^{-(E_C - E_{F2})/kT} \left(\frac{V_2}{T} \right) \quad (2.29)$$

Hesaplanan E_{F1} ve E_{F2} değerlerinden ΔE_F 'yi buluruz ($\Delta E_F = E_{F2} - E_{F1}$). Daha sonra bulunan bu değer yarısı alınarak Şekil 2.9'deki gibi belirlenen E enerjisi üzerine eklenir.



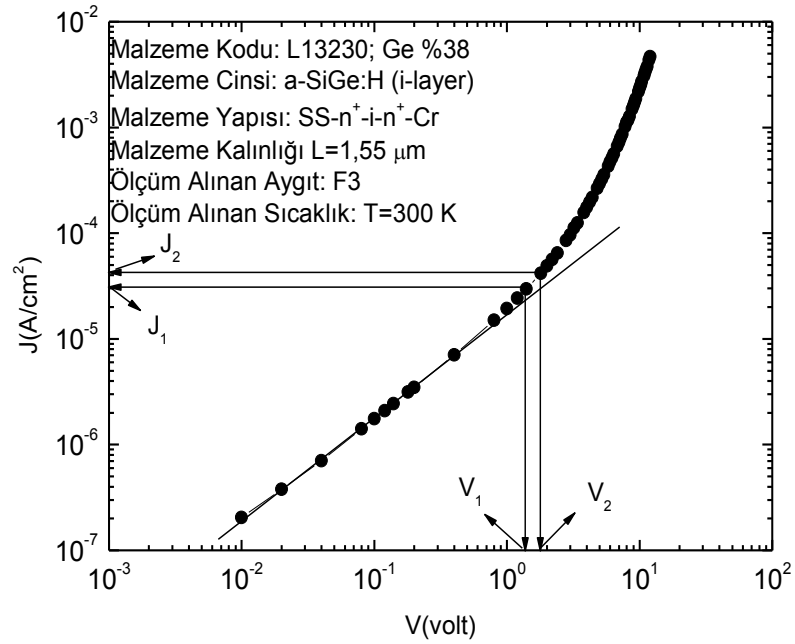
Şekil 2.9 Fermi enerjisindeki kaymanın belirlenen enerji üzerine eklenmesi

Denklem 2.30'daki gibi her hesaplanan ΔE_F değerinin yarısı bir önceki enerji değerine eklenerek N_T değerleri hesaplanır.

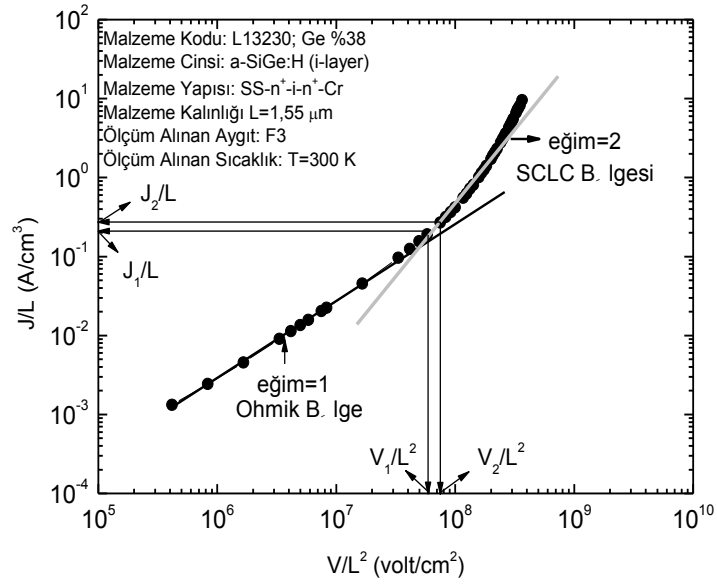
$$E = E_1 + \frac{\Delta E_F}{2} \quad (2.30)$$

Bu hesaplamalara örnek olarak; $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı %38 Ge içeren a-SiGe:H malzemeye ait grafikleri işlem sırasına göre çizerek gösterelim. Şekil 2.10'da ilk olarak malzemenin $\ln J - \ln V$ grafiği çizilerek Ohm yasasına uymayan akımlar belirlenir. Daha sonra Şekil 2.11'de log-log skalada $J/L - V/L^2$ eğrisinden Ohmik bölgeyi ve SCL akım bölgesinin hangi değerleri kapsadığını belirlenir. Bu işlemde Ohmik bölge eğimi 1 olan bölge, SCL akım bölgesi ise eğimi 2 olan bölge olarak belirlenir. Daha sonra belirlenen SCL akım bölgesi mi yoksa başka bir akım mekanizması mı olduğunu belirlemek için Şekil 2.12'de yarı logaritmik skalada $\ln(J/E) - E^{1/2}$ eğrisinde Şekil 2.11'de belirlenen eğimi 2 olan noktaların başlangıç ve

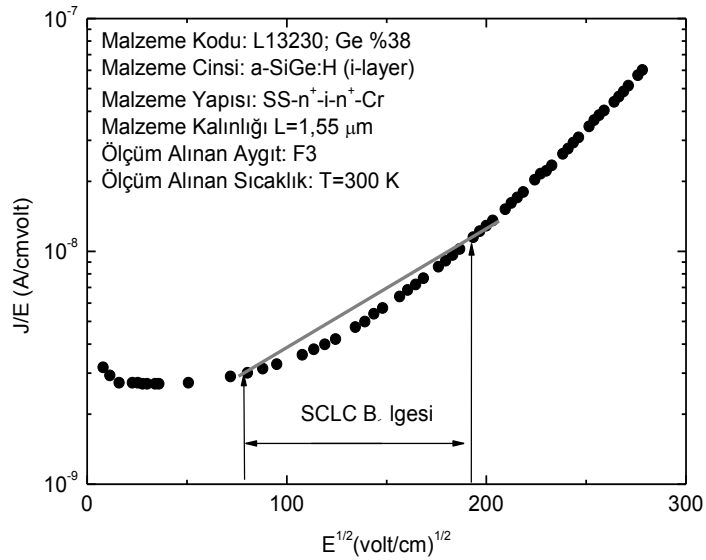
bitiş değerlerini işaretleyerek bu bölgenin doğrusal olup olmadığı incelenir. Eğer doğrusal olmayan bir grafik bulunursa belirlenen bölgede SCL akım mekanizması etkilidir. Daha sonra SCL akım bölgesinde Den Boer analizi uygulanarak elektronik kusur yoğunlukları hesaplanır. Şekil 2.13’de SCL akım bölgesinde hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu değerleri iletkenlik bant enerjisi E_C ’ye göre gösterilmiştir.



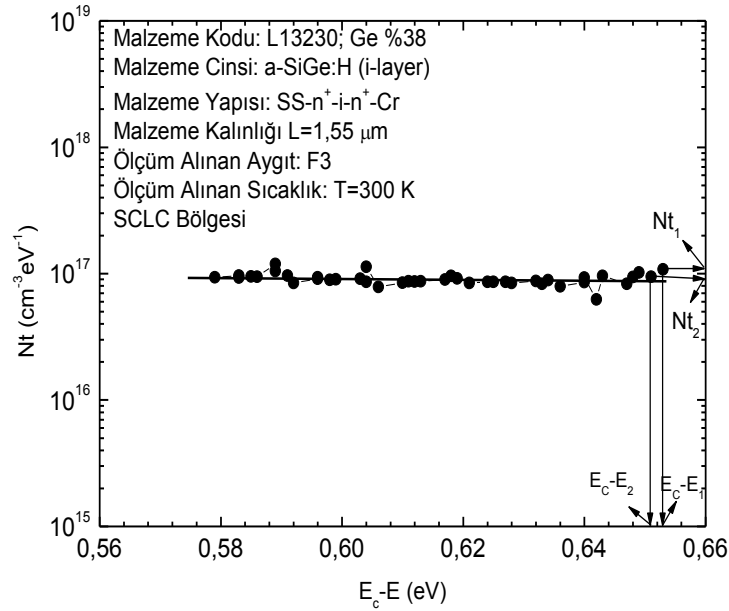
Şekil 2.10 %38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n⁺-i-n⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği



Şekil 2.11 %38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n⁺-i-n⁺ sandviç yapının J/L-V/L² grafiği SCL akım bölgesini belirtmektedir



Şekil 2.12 %38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n⁺-i-n⁺ sandviç yapının J/E-E^{1/2} grafiği



Şekil 2.13 %38 Ge oranına sahip katkısız tabaka içeren a-SiGe:H malzemenin n⁺-i-n⁺ sandviç yapı için hesaplanan durum yoğunluğu N_t ile enerji arasındaki ilişki

2.5 SEM ve EDX Yöntemleri ile Germanyum Element Analizi

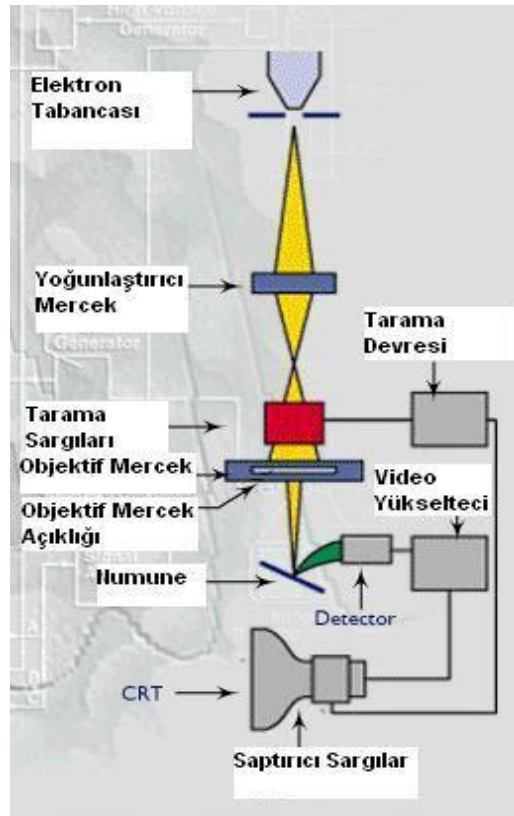
Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı malzemelerde Ge elementi oranı arttıkça yasak enerji aralığı azalmaktadır. Bunun yanında elektronik kusur yoğunluğu artmaktadır. Böylece germanyum yüzdesi soğurma katsayısını değiştirmekte ve güneş pilleri için soğurucu katman olarak kullanılan a-SiGe:H malzemenin önemini artırmaktadır. Bu yüzden malzeme içinde germanyum yüzdesi önemli bir parametredir. Büyütme işlemi sırasında vakum odasına gönderilen german gazının akış hızına göre malzeme içindeki germanyum yüzdesi belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerin germanyum oranlarını ve malzemenin kalınlığını belirlemek için İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Araştırma Laboratuvarı Merkezinde SEM ve EDX analizi yapılmıştır. Bu analizde malzeme bir makas yardımıyla kesilip mikroskop içine yerleştirildi.

Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope-SEM), çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. İlk olarak Max Knoll (1935) tarafından daha sonrada Manfred von Ardenne (1937) tarafından geliştirilmiştir (Knoll, 1935; Von Ardenne, 1937). Yüzeyden yayılan ikincil (secondary) elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin topografik yapısıyla ilişkili bir görüntü oluşturur.

SEM optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. SEM'in kabaca çizimi Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Optik kolon kısmında elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcılar ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

Malzeme içindeki elementlerin atomik yüzdelerini ve ağılıklarını belirlemek için EDX analizi yapılır. Her elementin K_{α} , K_{β} , K_{γ} gibi adlandırılan karakteristik X-ışınları enerjileri vardır. X-ışınları enerjisine karşılık çizilen elementin atomik yüzdelerinin veya ağırlık yüzdelerinin yoğunluğu grafiğinde, elementlerin karakteristik enerji değerlerinde elde edilen piklerin verdiği yoğunluk değerleri malzemedeki elementler hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Hızlandırılan elektronlar numune üzerine çarparak elementten elektron koparır ve elementi kararsız hale getirir. Kararsız hale gelen element kararlı hale geçmek ister ve dış yörüngelerden iç yörüngelere elektron geçişi olur. Bu geçiş sonucunda fazla olan enerji λ dalga boylu X-ışınları olarak yayımlanır. Yayımlanan bu X-ışınlarını kontrol eden analiz EDX analizi olarak adlandırılır.



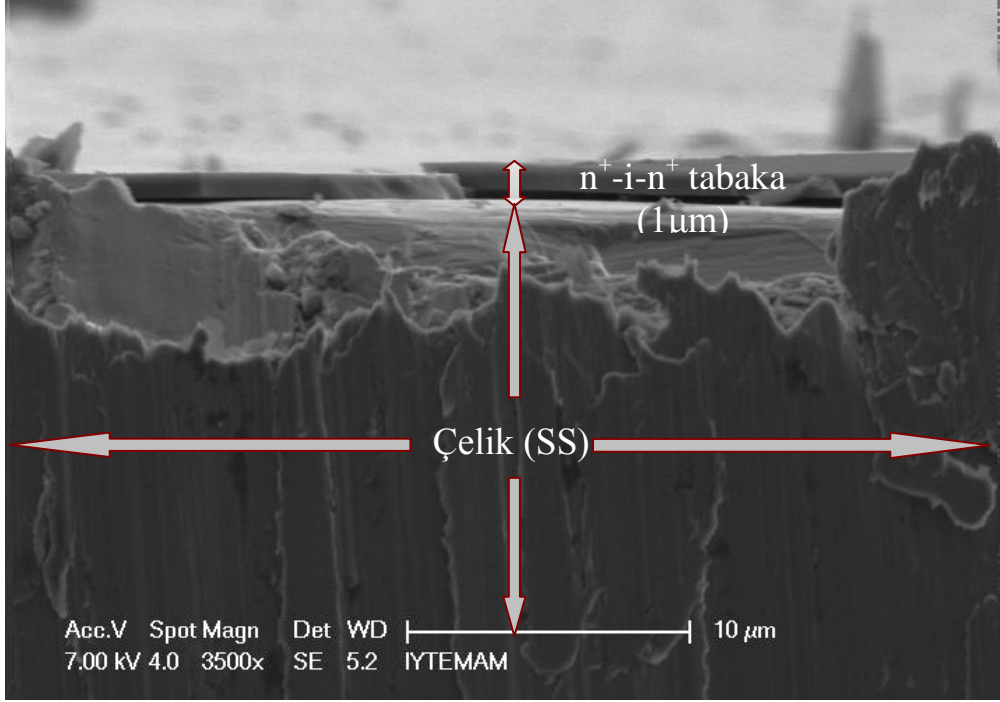
Şekil 2.14 Taramalı Elektron Mikroskobu-SEM sistemi

3. DENEYSEL BULGULAR

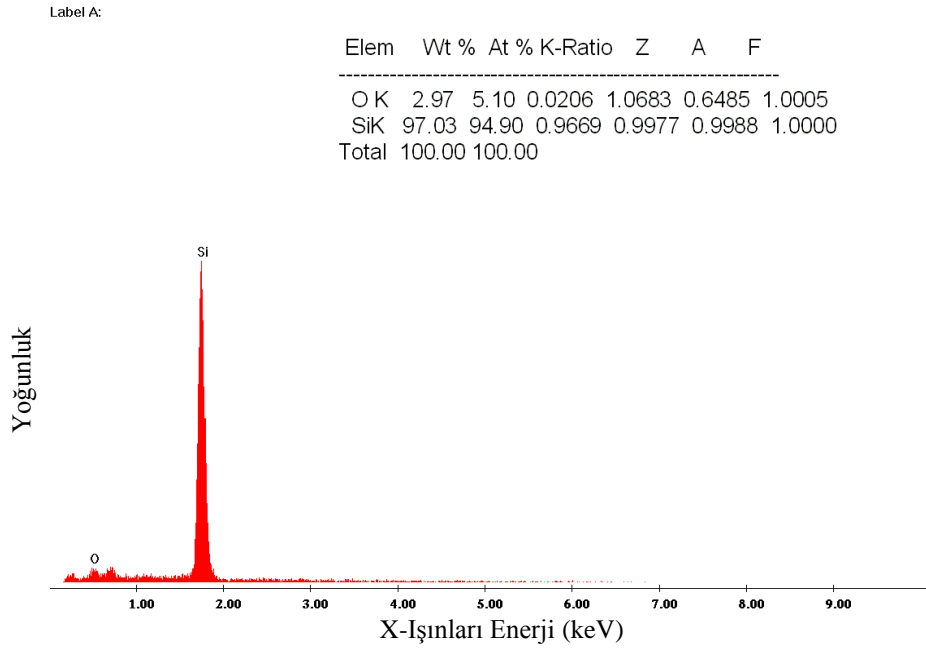
3.1 $n^+ - i - n^+$ Sandviç Yapıların Element Analizi

Amorf silisyum-germanyum $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıların katkısız a-SiGe:H tabakadaki silisyum ve germanyum elementlerinin miktarını belirlemek için taramalı elektron mikroskopunda (SEM) EDX ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde bulunan SEM cihazı hizmet alımı yapılarak kullanılmıştır. Önce $n^+ - i - n^+$ yapının kesitinin SEM fotoğrafı çekilerek katkısız a-SiGe:H tabaka kısmından EDX analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de amorf silisyum (0% Ge içerikli) $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının SEM kesiti gösterilmiştir. n^+ - tabakaların kalınlığı 10-20 nm arasında olduğundan i-tabakanın kalınlığından ayırt edilememektedir. Çelik üzerindeki $n^+ - i - n^+$ tabakanın kalınlığı SEM resminde ölçülmüştür. Şekil 3.2'de ise a-Si:H $n^+ - i - n^+$ yapının EDX spektrumu gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi sadece Si elementine ait karakteristik pik 1.8 keV enerjisinde kendini göstermektedir.

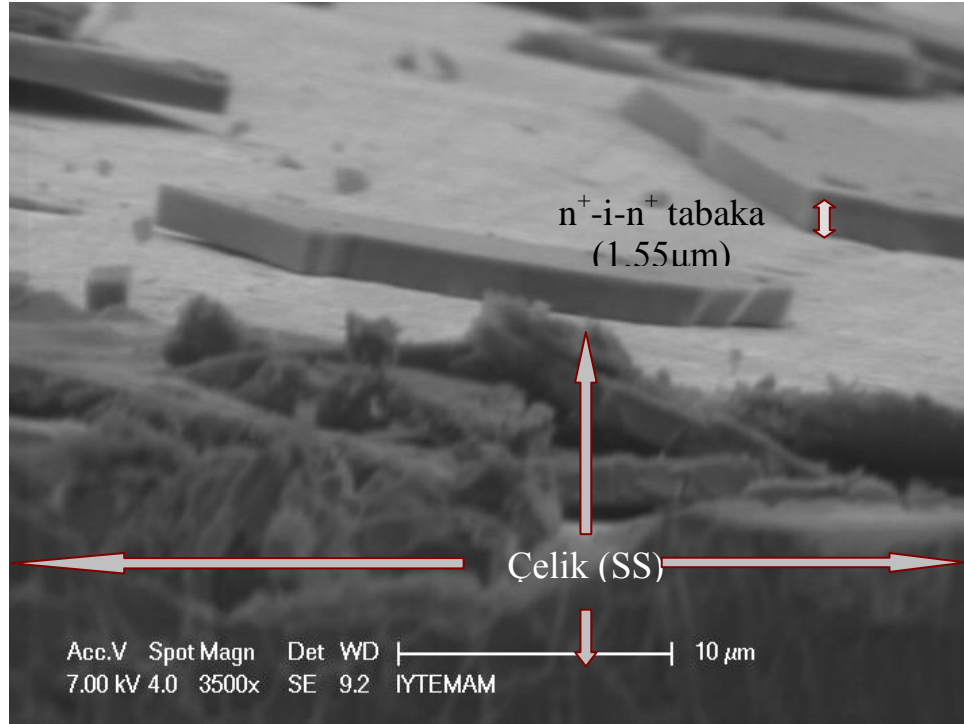
Hidrojenleştirilmiş amorf silisyum içine germanyum elementinin katılması ile oluşturulan ilk a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının SEM resmi ve EDX spektrumu sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Çelik üzerine büyütülen $n^+ - i - n^+$ yapının kalınlığı 1,55 μm olarak ölçülmüştür. Katkısız a-SiGe:H tabakanın element analizi spektrumunda Ge ve Si piklerinin karakteristik enerji değerlerinde oluştuğu ve malzeme içinde %38 atomik yüzdeye sahip Ge elementi belirlenmiştir. Aynı şekilde diğer üç a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıların SEM resimleri Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu üç malzemenin EDX spektrumları ise Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da sırası ile gösterilmiştir. Elde edilen Ge elementi miktarı sırası ile %51 atomik yüzde, %58 atomik yüzde ve %62 atomik yüzde olarak hesaplanmıştır. Son üç $n^+ - i - n^+$ yapıda Ge yüzdesinin Si element yüzdesinden fazla olduğu görülmektedir. Bunlar Ge zengin a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıyı tanımlamaktadır. SEM ve EDX bulguları Tablo 3.1'de özetlenmiştir.



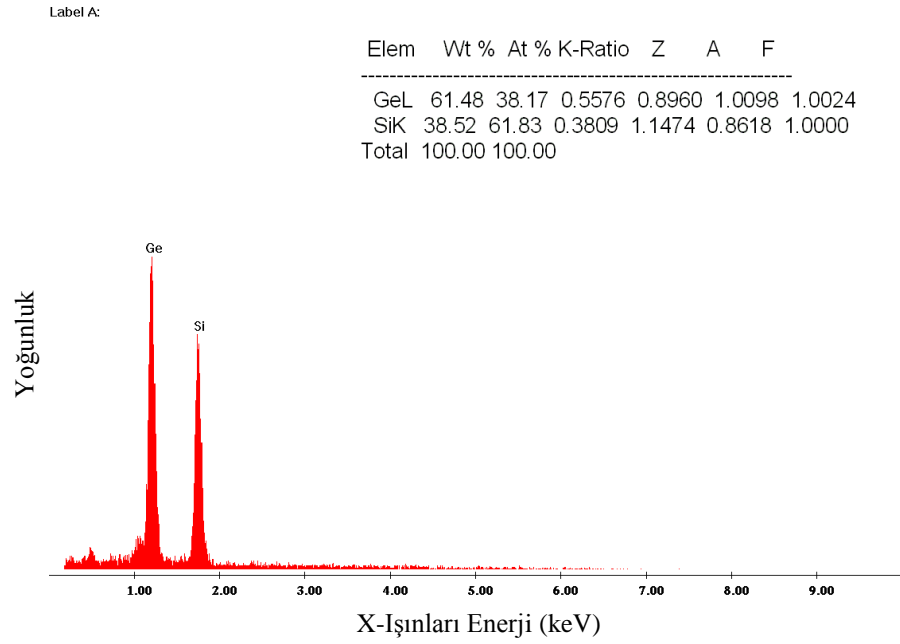
Şekil 3.1 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ yapının SEM resmi



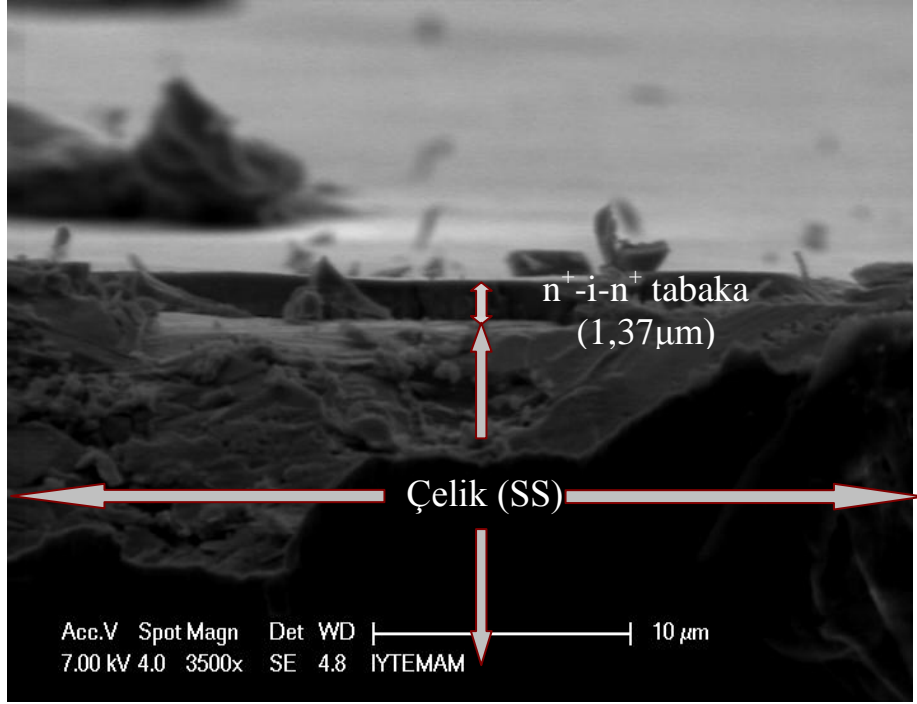
Şekil 3.2 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ yapının EDX spektrumu



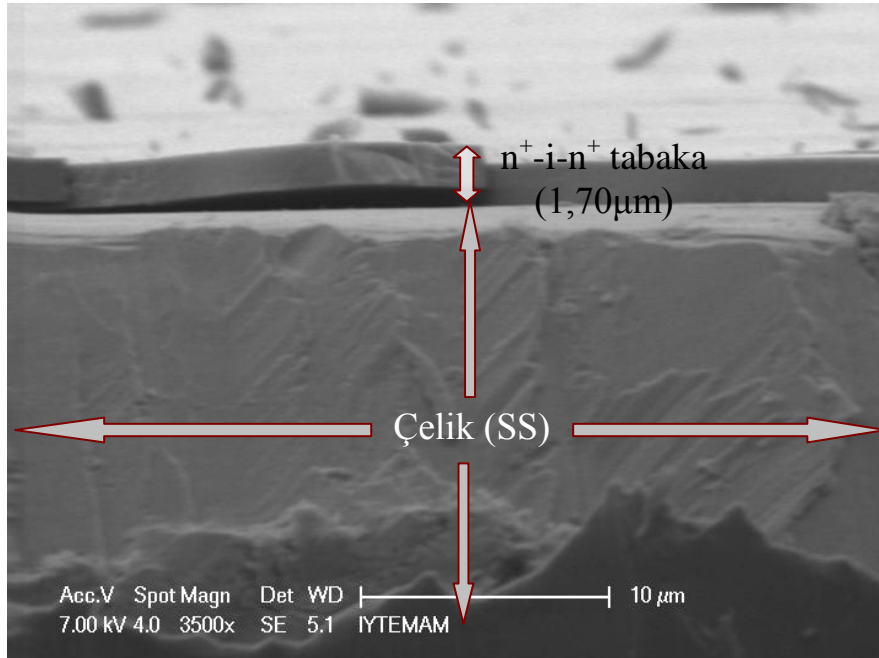
Şekil 3.3 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının SEM resmi



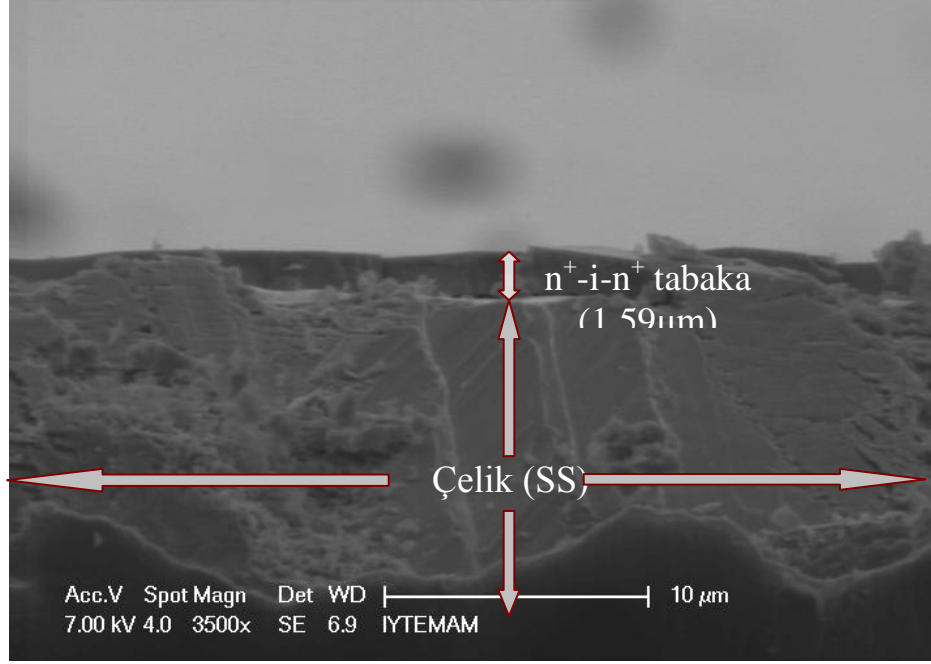
Şekil 3.4 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının EDX spektrumu



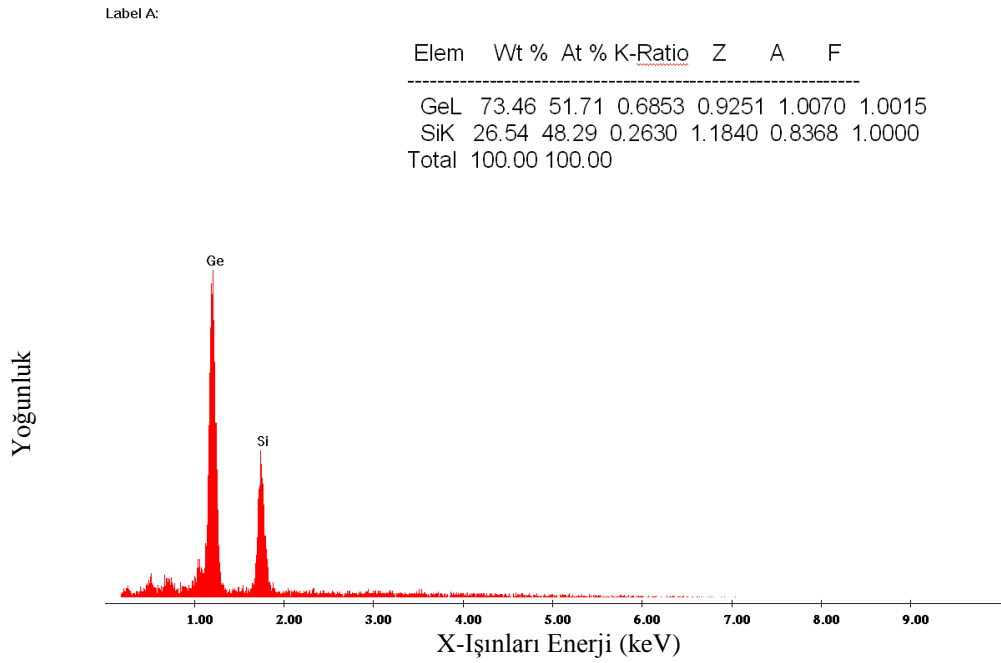
Şekil 3.5 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının SEM resmi



Şekil 3.6 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının SEM resmi



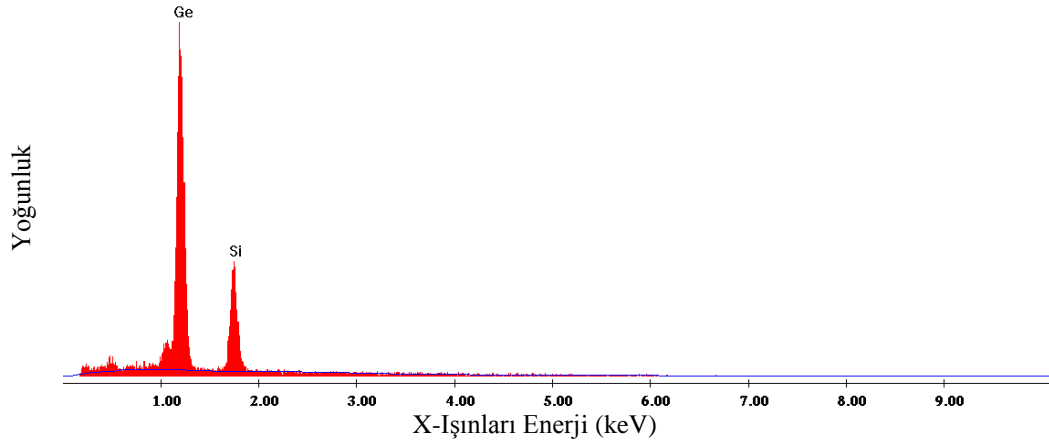
Şekil 3.7 %62 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının SEM resmi



Şekil 3.8 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının EDX spektrumu

Label A:

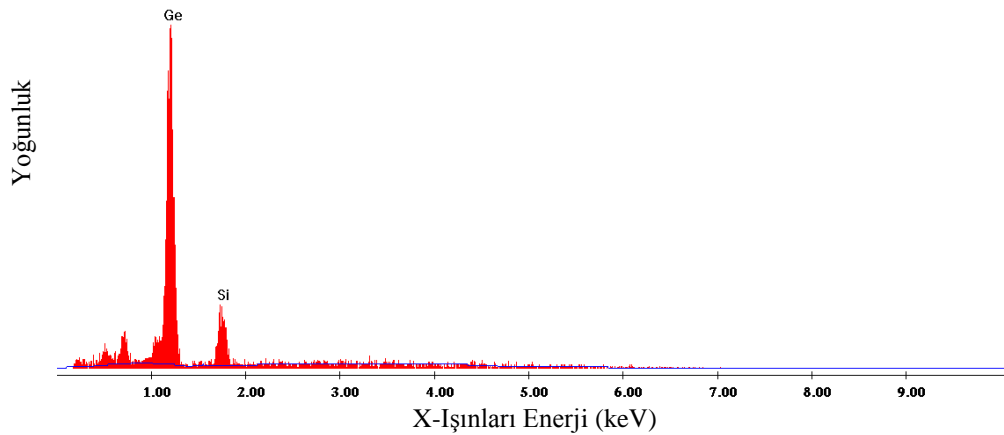
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
GeL	78.63	58.74	0.7430	0.9385	1.0058	1.0011
SiK	21.37	41.26	0.2111	1.2009	0.8225	1.0000
Total	100.00	100.00				



Şekil 3.9 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının EDX spektrumu

Label A:

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
GeL	80.72	61.83	0.7667	0.9440	1.0051	1.0010
SiK	19.28	38.17	0.1914	1.2079	0.8218	1.0000
Total	100.00	100.00				



Şekil 3.10 %62 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının EDX spektrumu

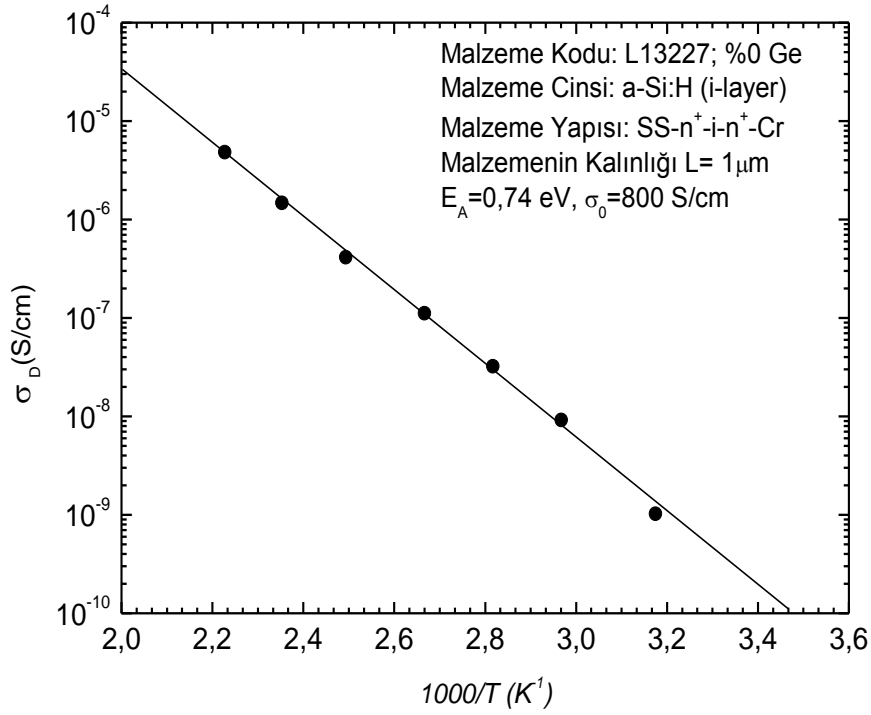
Tablo 3.1 $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılı a-Si:H ve a-SiGe:H malzemelerin SEM ve EDX bulguları

Malzeme Kod Numaraları	i-Tabaka	SEM'de ölçülen Kalınlık (μm)	Ge (% At)	Si (% At)
L13227	a-Si:H	1,00	0	100
L13230	a-SiGe:H	1,55	38	62
L13239	a-SiGe:H	1,37	51	49
L13241	a-SiGe:H	1,70	58	42
L13233	a-SiGe:H	1,59	62	38

3.2 Karanlık Öziletkenlik Bulguları

3.2.1 a-Si:H n⁺-i-n⁺ Sandviç Yapının Karanlık Öziletkenlik Bulguları

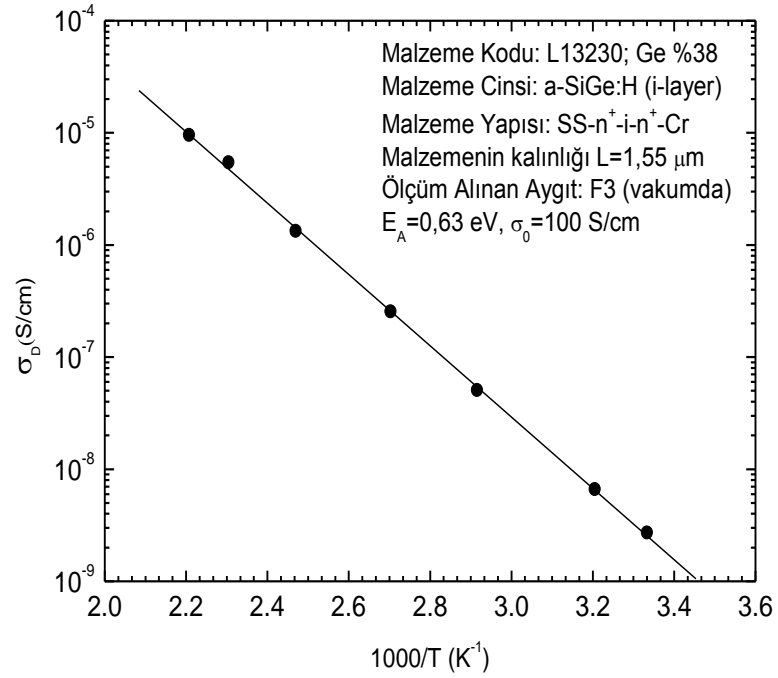
Katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) katman içeren n⁺-i-n⁺ sandviç yapı hiç germanyum içermeyen (0%Ge) bir aygıttır. Bu tez çalışmasında referans aygıt olarak kullanılmıştır. Amorf silisyum mikro yapıya germanyum katıldığında oluşan sandviç yapının Ohmik bölgede uygulanan sabit bir dc gerilimi altında sıcaklığın değişimi ile ölçülen karanlık öziletkenlik, σ_D , değerlerinin $1000/T$ 'ye karşılık grafiği Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Arrhenius grafiği doğrusaldır. Doğrunun eğiminden Denklem 2.6'ya göre E_A aktivasyon enerjisi veya karanlık Fermi seviyesi E_F 'nin iletkenlik bant ucundan 0,74 eV aşağıda olduğu hesaplanmıştır. Doğrunun düşey eksenini $1000/T$ 'nin sıfır olduğu noktada kestiği değerden σ_0 iletkenlik ön çarpanı 800 (1/Ohm-cm) olarak bulunmuştur. Bu değerler standart a-Si:H ince film malzemeler için literatürde yayınlanmış değerlerle uyumludur. Yasak enerji aralığı 1,9 eV mertebesinde olan a-Si:H için 0,74 eV Fermi seviyesi malzemenin katkısız olduğu halde kısmen n-tipi iletkenliğe sahip olduğunu belirtmektedir. Bundan dolayı elektronik taşınım sadece elektronlar tarafından oluşturulmaktadır.



Şekil 3.11 Germanyum içermeyen katkısız a-Si:H tabaka içeren n⁺-i-n⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

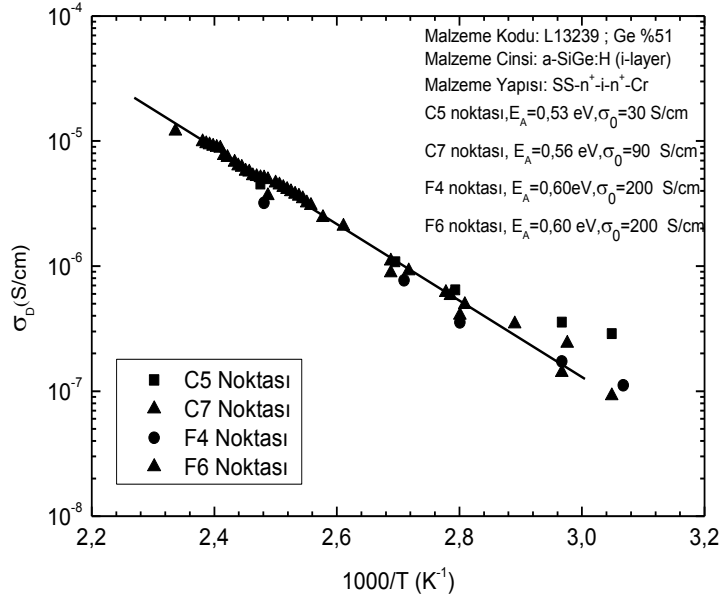
3.2.2 a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ Sandviç Yapıların Karanlık Öziletkenlik Bulguları

Katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum içine germanyum katılması ile malzemenin yasak enerji aralığının azaldığı ve yasak enerji aralığı içindeki elektronik kusurların arttığı literatürde çok kapsamlı olarak incelenmiştir (Fuhs ve Finger,1989; Stutzman vd., 1989). L13230 kod numaralı a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının Ge içeriği SEM EDX analizinden %38 atomik yüzde olarak hesaplanmıştır. Bu malzemenin karanlık öziletkenlik ölçümleri aynı şekilde Ohmik bölgede uygulanan sabit dc gerilimi altında sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Şekil 3.12'de F3 kod numarası ile belirtilen aygıtın Arrhenius grafiği gösterilmiştir. Doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 0,63 eV ve iletkenlik ön çarpanı σ₀ 100 (1/Ohm.cm) olarak bulunmuştur. Germanyum katılması ile Fermi enerjisi iletkenlik bandına daha da yaklaşmıştır.



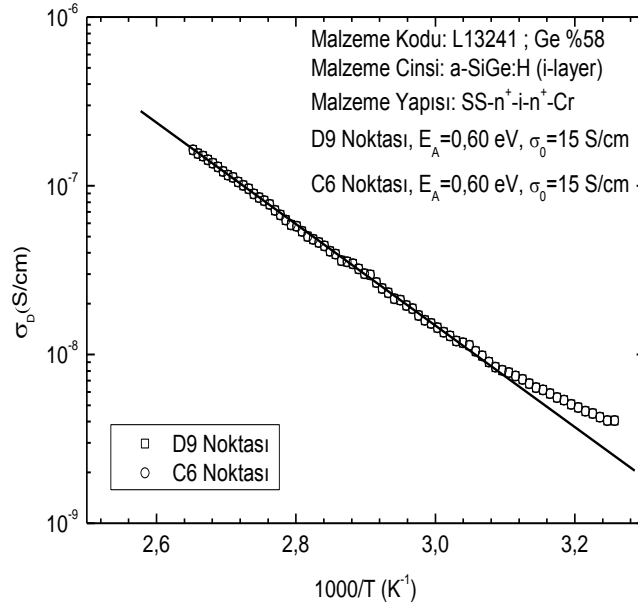
Şekil 3.12 %38 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13230 kod numaralı taban malzemenin F3 numaralı n⁺-i-n⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Germanyum yüzdesi 51 atomik yüzde olarak hesaplanan L13239 kod numaralı a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının aynı taban üzerinde bulunan dört farklı aygıt için ölçülen karanlık öziletkenlik değerleri Şekil 3.13’de verilmiştir. Karanlık öziletkenlik değerlerinin büyüklük olarak bir birine çok yakın olduğu ve aktivasyon enerjilerinin 0,55 eV ±0,05 eV olduğu görülmektedir. Her bir malzeme için birden fazla aygıt test edilmiş ve ölçümler ayrıntılı yapılmıştır. Ayrı ayrı hesaplanan iletkenlik ön çarpanı değerleri ise 120 ± 10 (1/Ohm.cm) civarındadır.

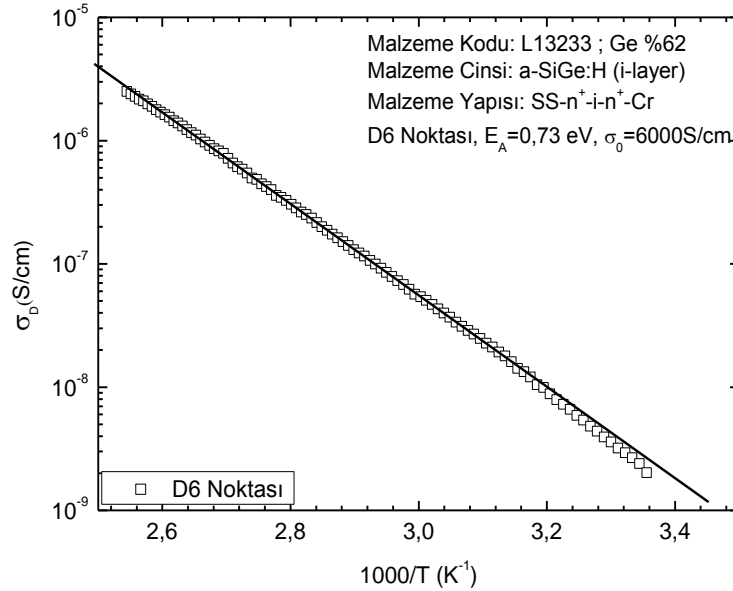


Şekil 3.13. %51 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13239 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan dört farklı n⁺-i-n⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Germanyum yüzdesi daha fazla arttırıldığında germanyum zengin katkısız a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapılar büyütülmüştür. L13241 ve L13233 kod numaraları ile belirtilen n⁺-i-n⁺ sandviç yapıların germanyum oranları SEM EDX analizinden sırası ile %58 ve %62 atomik yüzde olarak belirlenmiştir. Bu iki malzemenin karanlık öziletkenlik bulguları sırası ile Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gösterilmiştir. %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının iki farklı aygıtı için ölçülen karanlık öziletkenlik değerleri ve aktivasyon enerjileri birbirinin aynısıdır. Bu iki aygıtın özdeş olduğu görülmektedir. Aktivasyon enerjisi 0,60 eV ve iletkenlik ön çarpanı 15 (1/Ohm.cm) olarak bulunmuştur. En yüksek Ge yüzdesine sahip L13233 numaralı n⁺-i-n⁺ yapının karanlık öziletkenlik bulgularından 0,73 eV aktivasyon enerjisi ve 6000(1/Ohm.cm) iletkenlik ön çarpanı hesaplanmıştır. Hem aktivasyon enerjisi hem de iletkenlik ön çarpanı önceki a-SiGe:H aygıtlardan farklı bulunmuştur. Ge oranının artması ile yasak enerji aralığında oluşan elektronik kusurların ciddi bir değişime uğradıkları anlaşılabilir.



Şekil 3.14 %58 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13241 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan D9 ve C6 numaralı n⁺-i-n⁺ sandviç yapıların karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



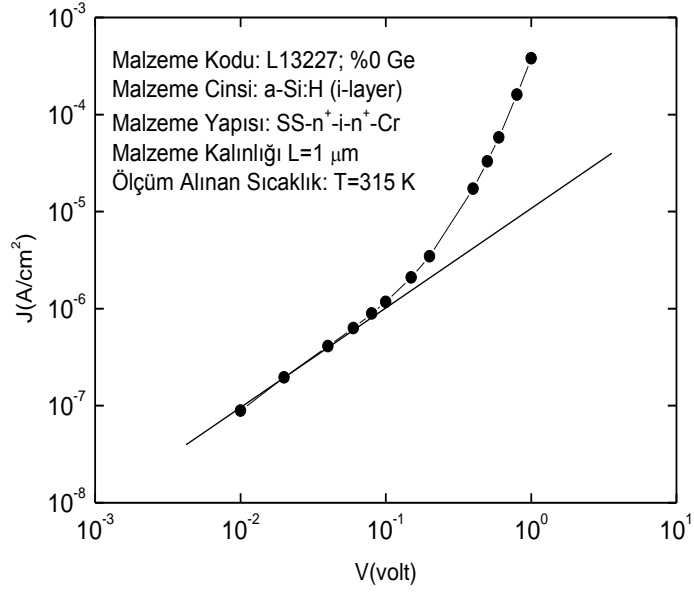
Şekil 3.15 %62 germanyum içeren katkısız a-SiGe:H tabakaya sahip L13233 kod numaralı taban malzemenin üzerinde bulunan D6 numaralı n⁺-i-n⁺ sandviç yapının karanlık öziletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Sonuç olarak, germanyum yüzdesinin artması ile aktivasyon enerjileri 0,50 eV ile 0,72 eV arasında değerler vermektedir. Hatta aynı taban üzerine büyütülmüş farklı aygıtlarda gerçekleştirilen ölçümlerde bile farklı aktivasyon enerjileri elde edilebildiği Şekil 3.13'den görülmektedir. Buna rağmen elde edilen aktivasyon enerji değerleri bütün malzemeler için yasak enerji aralığı ortasından yukarıda ve iletkenlik bandına daha yakındır. Dolayısı ile katkısız olmalarına rağmen n-tipi bir iletkenliğe sahiptir.

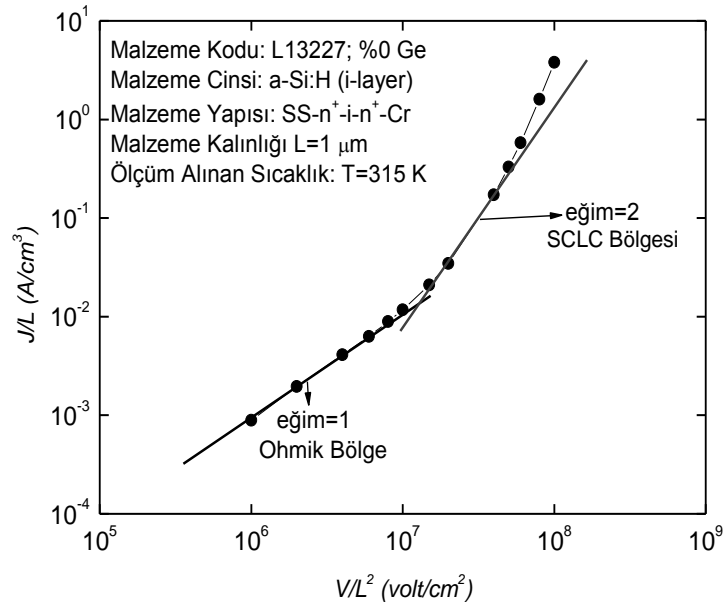
3.3 n⁺-i-n⁺ Sandviç Yapılarda SCL Akım Bulguları

3.3.1 a-Si:H n⁺-i-n⁺ Sandviç Yapının SCL Akımları

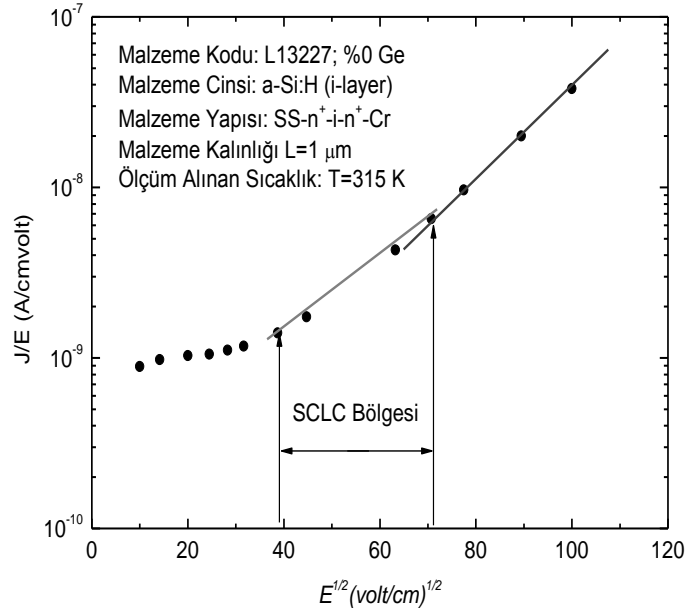
Hydrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) n⁺-i-n⁺ sandviç yapının özellikleri amorf silisyum germanyum alaşımı malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılmasında önemli bir referans malzemedir. Silisyum zengin a-Si:H yapı içine değişik yüzde oranlarında katılan Ge elementi amorf silisyum malzeme içinde bir alaşım oluşturmaktadır. Bunun sonucunda yasak enerji aralığı daralırken yasak enerji aralığı içine yeni elektronik kusurların yaratıldığı bilinmektedir. Bundan dolayı a-Si:H n⁺-i-n⁺ aygıtın karanlık J-V ölçümleri dikkatlice analiz edilerek Ohm yasasına uymayan SCL akımlarından Fermi enerjisi yakınlarındaki elektronik kusur yoğunluğu belirlenecektir. Şekil 3.16'da 315K'de ölçülen J-V eğrisi verilmiştir. Koyu çizgi ile belirtilen kısım Ohm yasasına uyan kısımdır. 0,1V gerilimden büyük gerilimlerde Ohm yasasından sapmalar açıktır. Bu eğrideki sonuçları kullanarak akım mekanizmalarının ayırt edildiği $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiği Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Bu grafikte Ohm yasasına uyan kısım eğimi 1 olan doğru ile SCL akımlarına uyan kısım eğimi 2 olan doğru ile işaretlenmiştir. Ayrıca Ohm yasasına uymayan kısmın SCL akımları veya Pool-Frenkel tipi akım mekanizması olup olmadığını anlamak için $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiği çizilerek Şekil 3.16'de gösterilmiştir. SCL bölgesi olarak işaretlenen kısımda doğrusal olmayan bir eğri Pool-Frenkel tipi akım mekanizmasının olmadığını belirtiyor.



Şekil 3.16 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının J-V grafiği

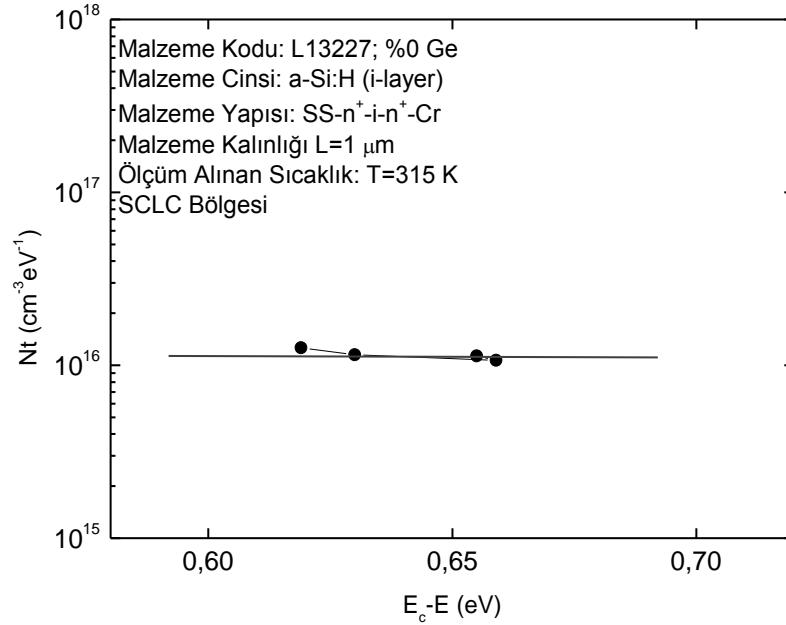


Şekil 3.17 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında J/L-V/L² grafiği



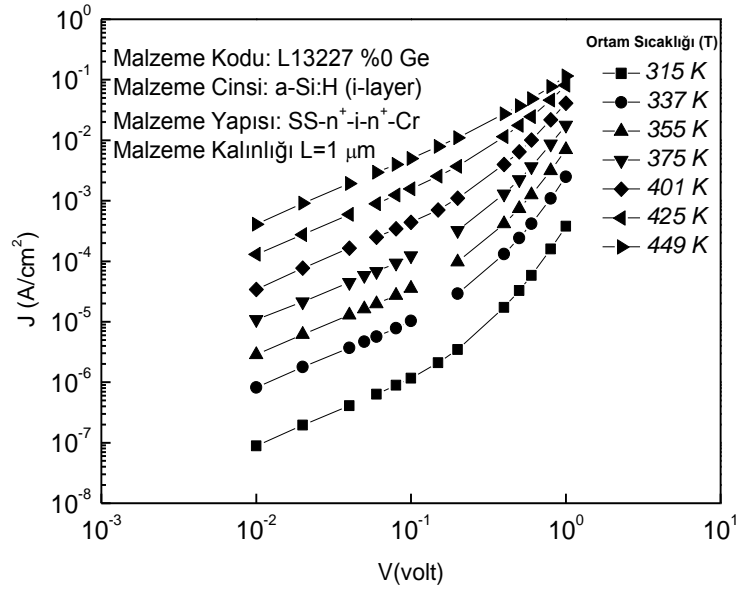
Şekil 3.18 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında J/E-E^{1/2} grafiği

SCL bölgesinde Den Boer analizi uygulanarak yasak enerji aralığındaki kusur yoğunluğu hesaplanmıştır. Şekil 3.19'da iletkenlik bandından 0,65 eV civarındaki kusur yoğunluğu $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer literatürde elektronik kalitede bir a-SiH için yayınlanmış değerler mertebesindedir. Amorf silisyum malzemenin karanlıkta çok dirençli olmasından dolayı daha düşük sıcaklıklarda ölçüm yapmak olanaksızdır. Dolayısı ile çok sınırlı bir gerilim bölgesinde olmasına rağmen elektronik kusurlar hakkında bir bilgi edinilebilmiştir.

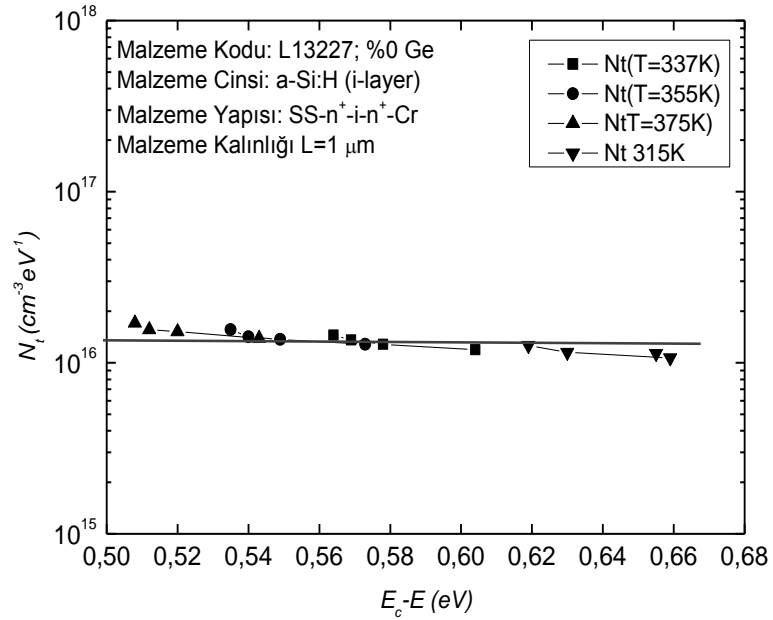


Şekil 3.19 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının oda sıcaklığında elde edilen J-V ölçümlerinden hesaplanan N_t -E grafiği

Aynı malzemeyi daha yüksek sıcaklıklara ısıttığımızda elde edilen karanlık J-V değerleri Şekil 3.20’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda SCL bölgesi tamamen ortadan kalkmakta ve Ohm yasasına uyan akım mekanizması tamamen baskın hale gelmektedir. Her bir eğrinin SCL akımları kısmından hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu Şekil 3.21’de özetlenmiştir. İletkenlik bandından 0.5 eV ile 0.6 eV arasındaki enerji aralığında elektronik kusur yoğunluğunun sabit olduğu ve $(1,2 \pm 0,2) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ mertebesinde olduğu bulunmuştur. Bulunan bu değer a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ aygıtların elektronik kusur yoğunluğunu karşılaştırmada bir referans teşkil edecektir.



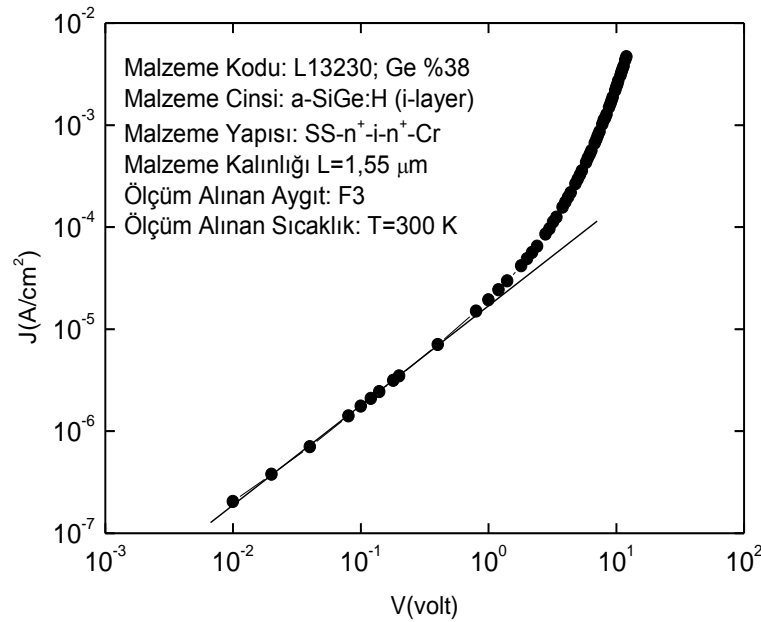
Şekil 3.20 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının sıcaklığa bağlı J-V grafiği



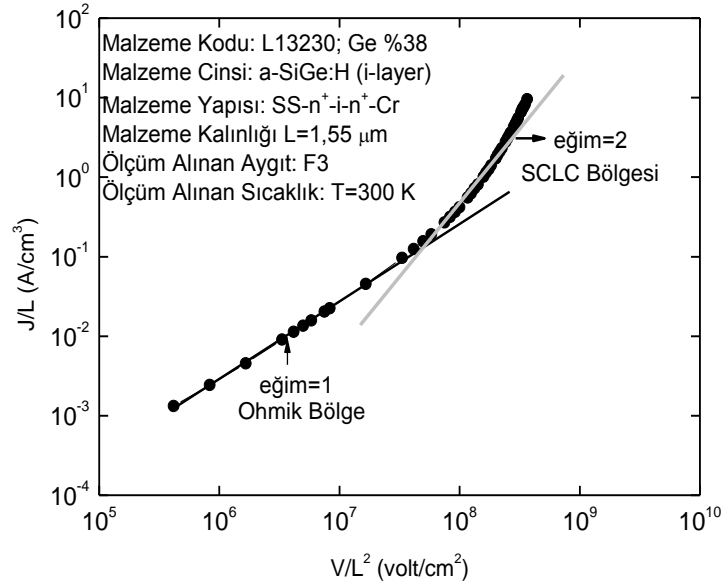
Şekil 3.21 %0 Ge içeren a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının değişik sıcaklıklarda elde edilen N_t-E grafiği

3.3.2 a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ Sandviç Yapıların SCL Akımları

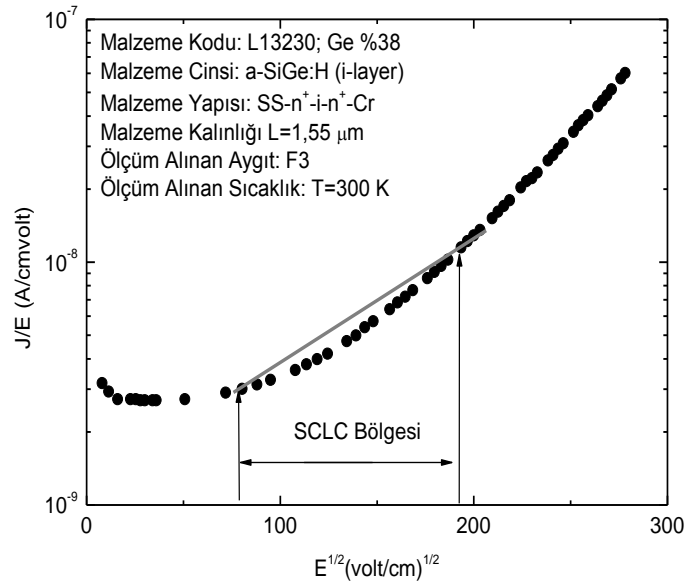
Önceki kısımda incelenen a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının sahip olduğu yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların yoğunluğunun germanyum yüzdesi ile arttığı literatürden bilinmektedir. %38 Ge atomik yüzdesine sahip a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının F3 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V eğrisi Şekil 3.22’de sunulmuştur. 2V gerilimden yüksek gerilimlerde Ohm yasasından sapmalar olmaktadır. Bu kısım Şekil 3.23’de verilen $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiği ve Şekil 3.23’de çizilen $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiği ile SCL akımları olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.23’de SCL bölgesinde çizilen doğrusal olmayan eğri Pool-Frenkel etkisinin olmadığını ve SCL akımlarını belirtmektedir. Yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusur yoğunluğu hesaplandığında $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olduğu bulunmuştur. Bu yukarıda incelenen a-Si:H n⁺-i-n⁺ yapının kusur seviyesinden 10 kat daha fazladır. Germanyum yüzdesinin artması ile yeni Ge orijinli elektronik kusurların yaratıldığını göstermektedir.



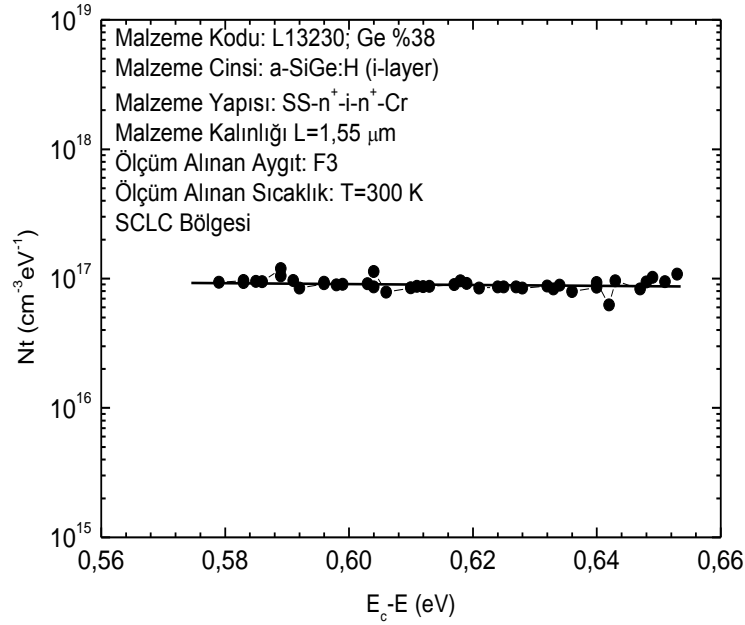
Şekil 3.22 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J-V grafiği



Şekil 3.23 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J/L-V/L² grafiği



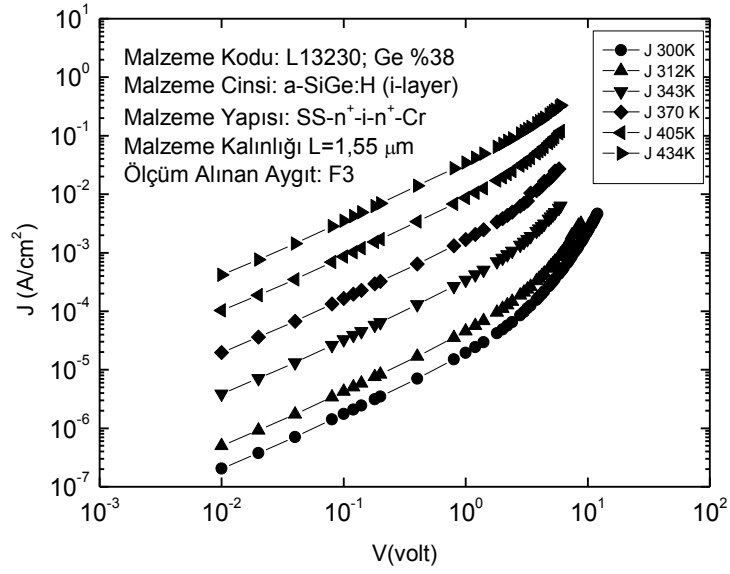
Şekil 3.24 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J/E-E^{1/2} grafiği



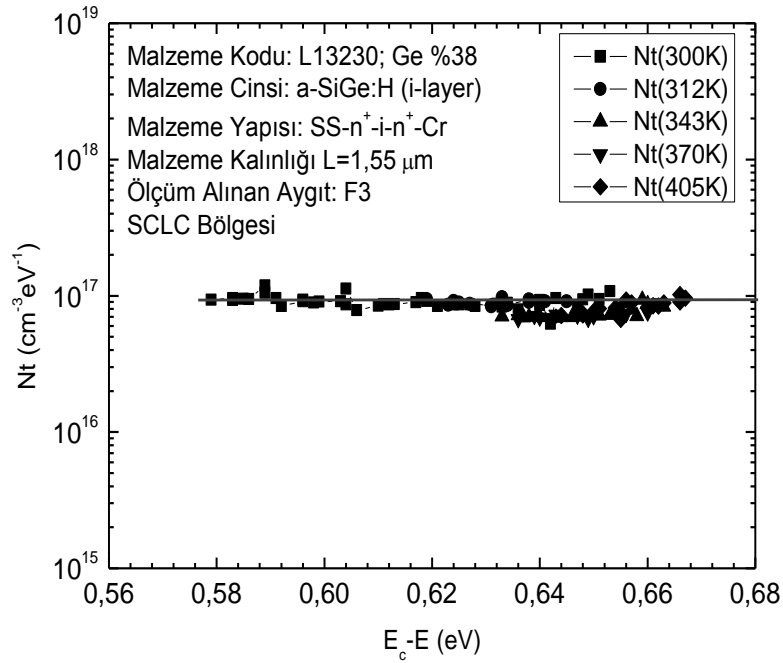
Şekil 3.25 %38 Ge içeren a-SiGe:H n^+ -i- n^+ yapının F3 numaralı aygıtının oda sıcaklığında J-V ölçümünden elde edilen elektronik kusur yoğunluğunun enerjiye göre değişimi

Daha geniş enerji aralığındaki elektronik kusurları algılayabilmek için sıcaklığa bağlı ölçülen karanlık J-V eğrileri Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Bu malzeme için de yüksek sıcaklıklarda Ohm yasasına uyan akım mekanizmasının baskın hale geldiği SCL bölgesinin ortadan kalktığı açıktır. Her bir eğrinin SCL bölgesinde hesaplanan elektronik kusur yoğunlukları aynı grafikte gösterildiğinde bir birleri ile deneysel hata sınırları içinde örtüştüğü Şekil 3.27'den görülebilir. İletkenlik bandından 0,58 eV ile 0,66 eV arasındaki enerjilerde elektronik kusur yoğunluğu $(9\pm 1)\times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Aynı n^+ -i- n^+ yapının diğer aygıtları aynı şekilde incelenmiş ve aynı mertebelerde elektronik kusur yoğunlukları hesaplanmıştır.

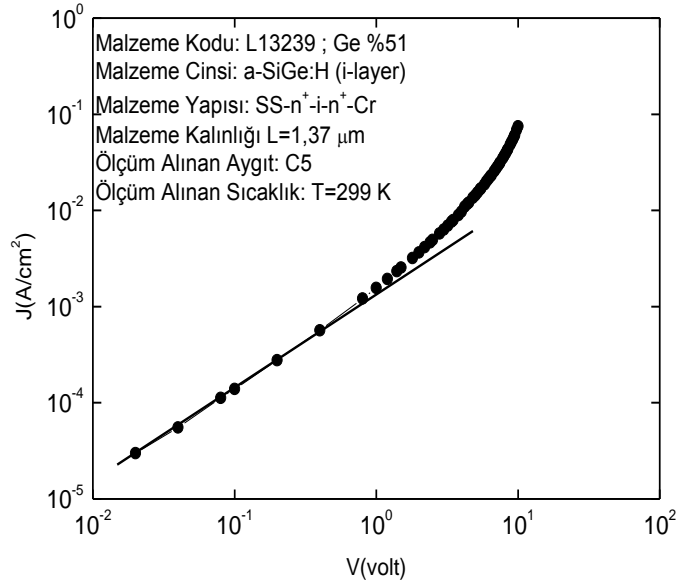
Germanyum oranı %51 olarak bulunan L13239 kod numaralı a-SiGe:H n^+ -i- n^+ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen karanlık J-V eğrisi Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Silisyum ve germanyum oranlarının eşit olduğu bu malzemede de Ohm yasasına uymayan akımlar yüksek gerilim kısmında görülmektedir. Bu kısımdaki akım mekanizmasının SCL akımı olduğu Şekil 3.29 ve



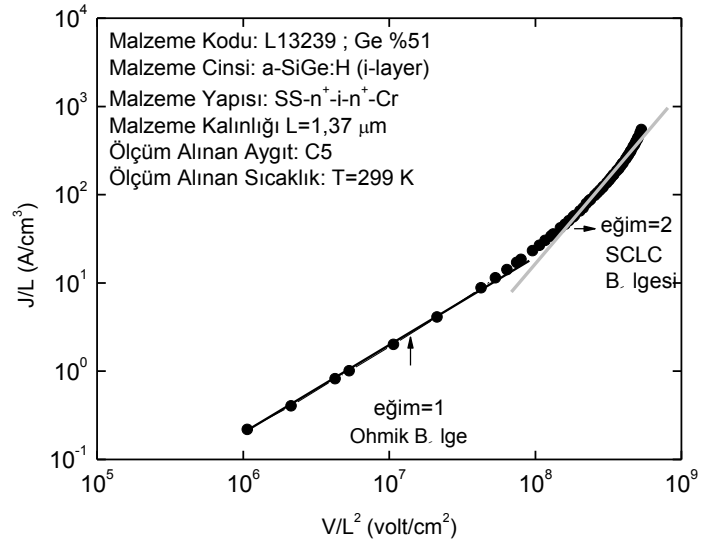
Şekil 3.26 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F3 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı J-V grafiği



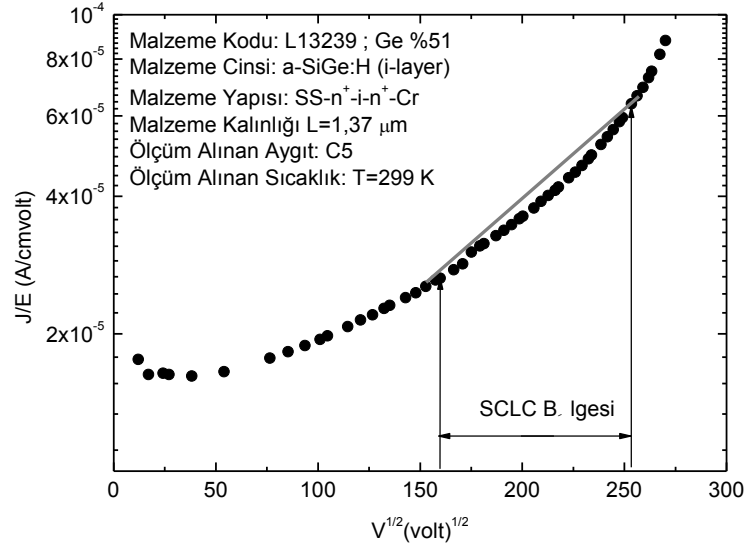
Şekil 3.27 %38 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F3 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



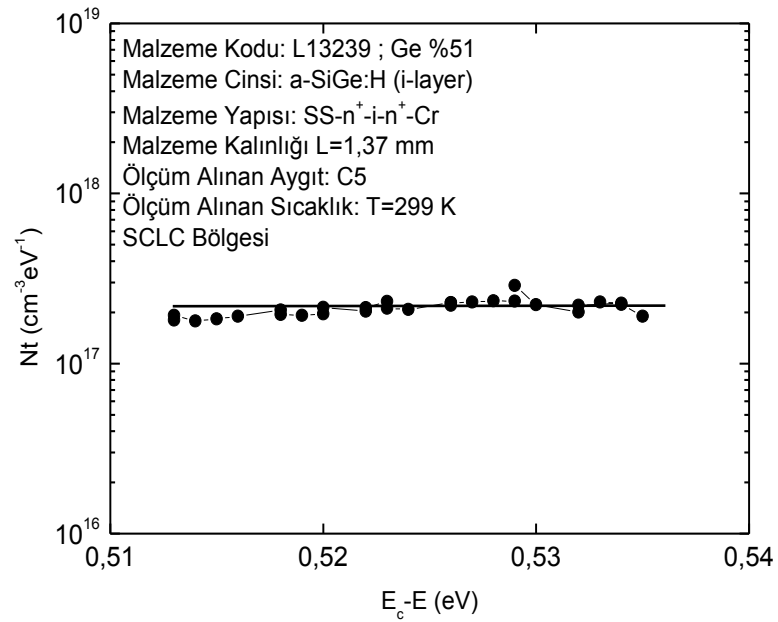
Şekil 3.28 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği



Şekil 3.29 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J/L-V/L² grafiği



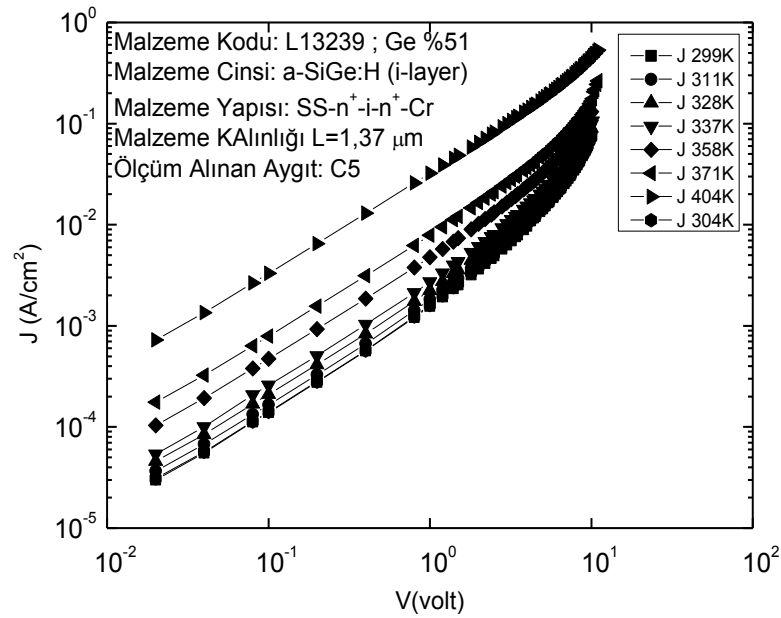
Şekil 3.30 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında $J/E-E^{1/2}$ grafiği



Şekil 3.31 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V eğrisinden SCL bölgesinde hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu

Şekil 3.30'dan açıkça görülmektedir. SCL bölgesindeki verileri kullanarak hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu Şekil 3.31'de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Ge oranı arttıkça yeni kusurlar yaratılmaktadır.

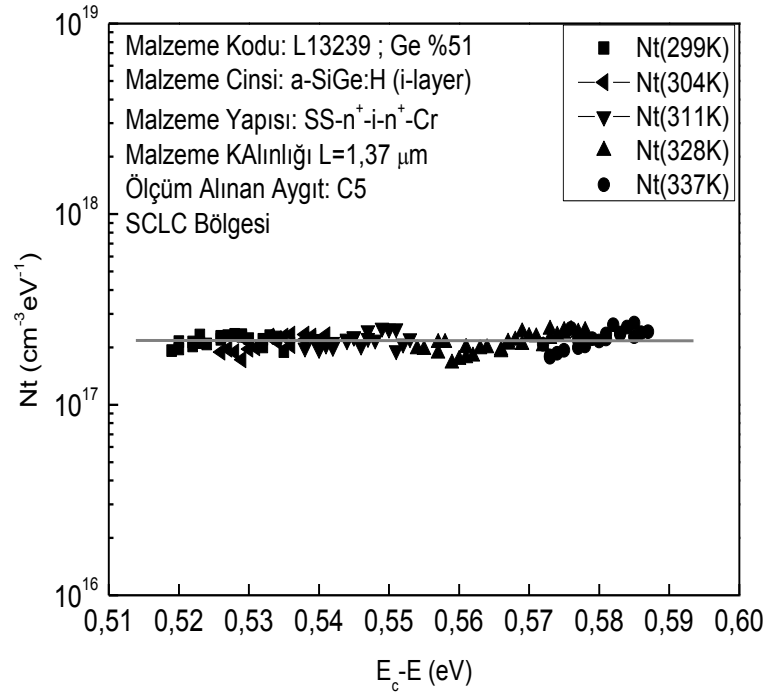
Aynı malzemenin sıcaklığa bağlı elde edilen Şekil 3.32'deki karanlık J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu Şekil 3.33'de özetlenmiştir. Her bir sıcaklıkta elde edilen kusur yoğunlukları üst üste gelmekte ve $(2 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine sahiptir. Elde edilen değerler germanyum oranının artması ile elektronik kusurların yoğunluğunun arttığını işaret etmektedir.



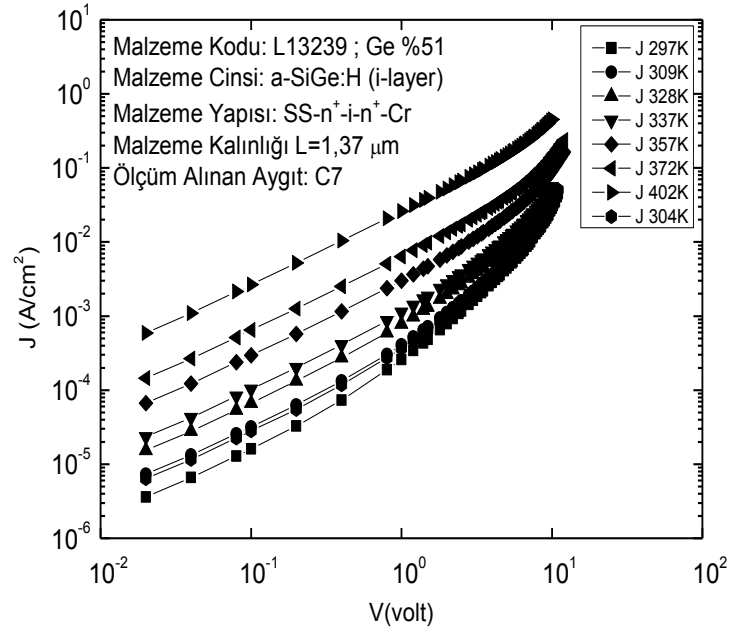
Şekil 3.32 %51 Ge içeren a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının C5 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri

Aynı taban malzemesi üzerinde büyütülmüş diğer $n^+ - i - n^+$ aygıtlardan elde edilen J-V eğrileri ve bunların analizi sonucu hesaplanan elektronik kusur yoğunlukları da karşılaştırılmıştır. %51 germanyum içerikli a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının diğer kardeş aygıtlardan ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri ve SCL bölgesinde hesaplanan elektronik kusur yoğunluklarının enerjiye göre değişimleri Şekil 3.34'den Şekil 3.39'a kadar sırası ile C7, F4 ve F6 numaralı aygıtlar için sunulmuştur. Aygıtların J-V ölçümleri birbirine benzerdir. Hesaplanan elektronik kusur yoğunlukları yine bir

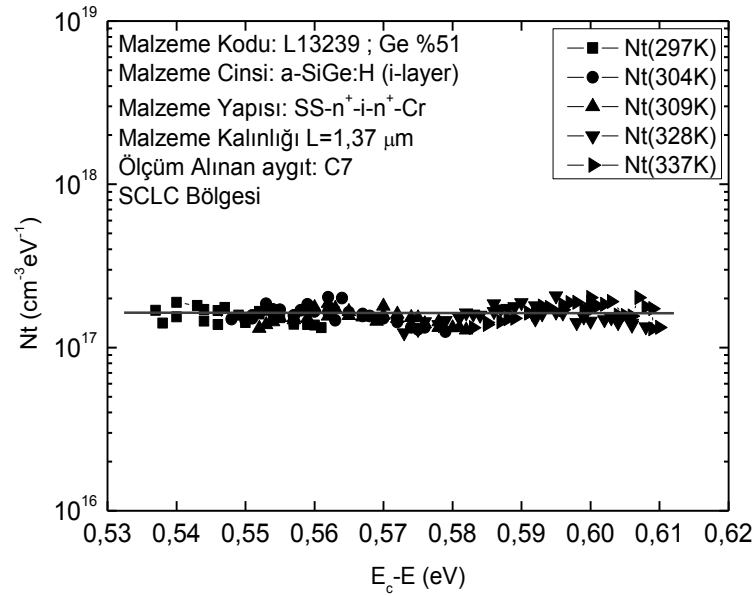
önceki C5 numaralı aygıtta bulunduğu gibi deneysel hata sınırları içinde $(2 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine eşittir. Aygıtların yasak enerji aralıklarındaki elektronik kusur yoğunluklarının birbirine yakın olması aygıtların birbirine özdeş olduğunu göstermektedir.



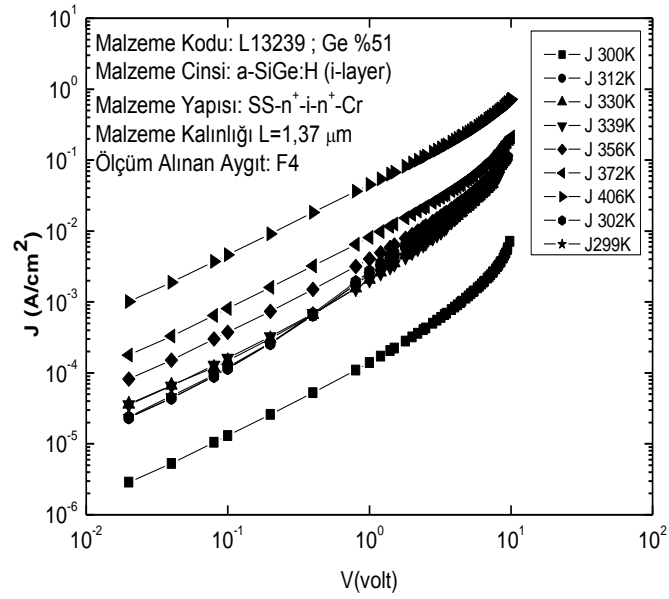
Şekil 3.33 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının C5 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



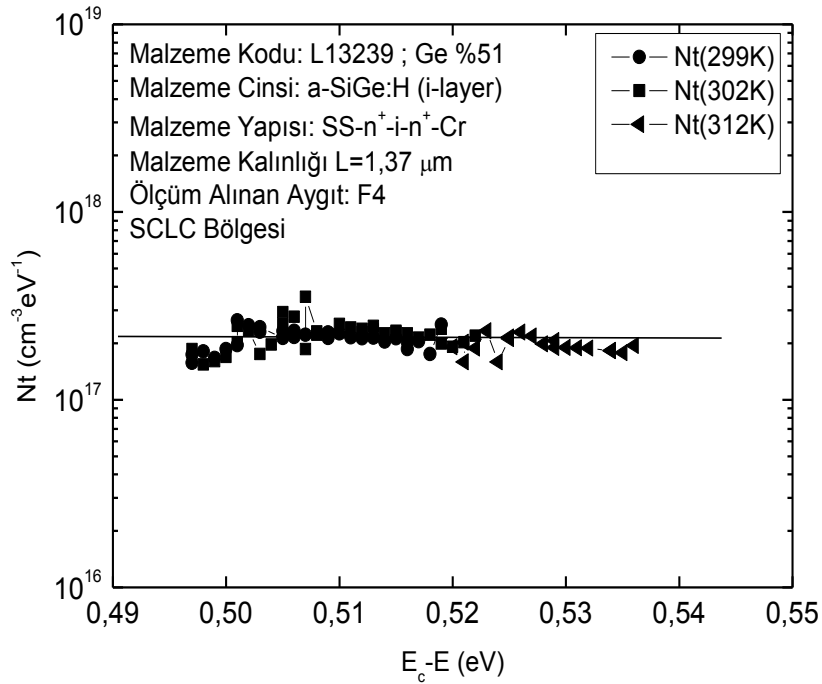
Şekil 3.34 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C7 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri



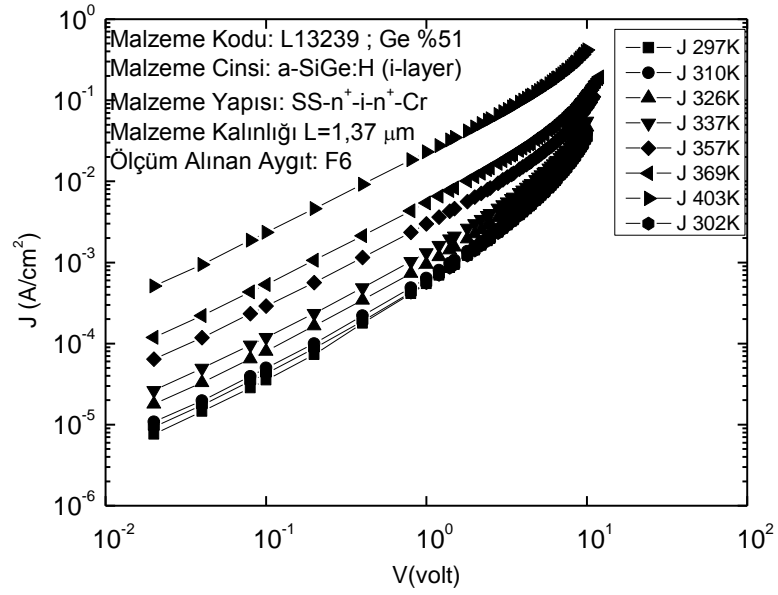
Şekil 3.35 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının C7 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



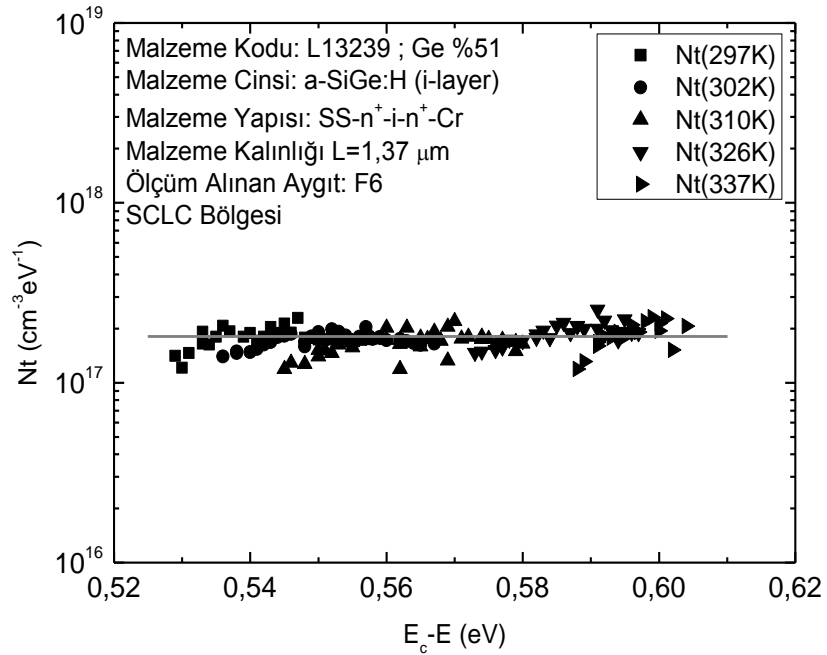
Şekil 3.36 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının F4 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri



Şekil 3.37 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F4 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği

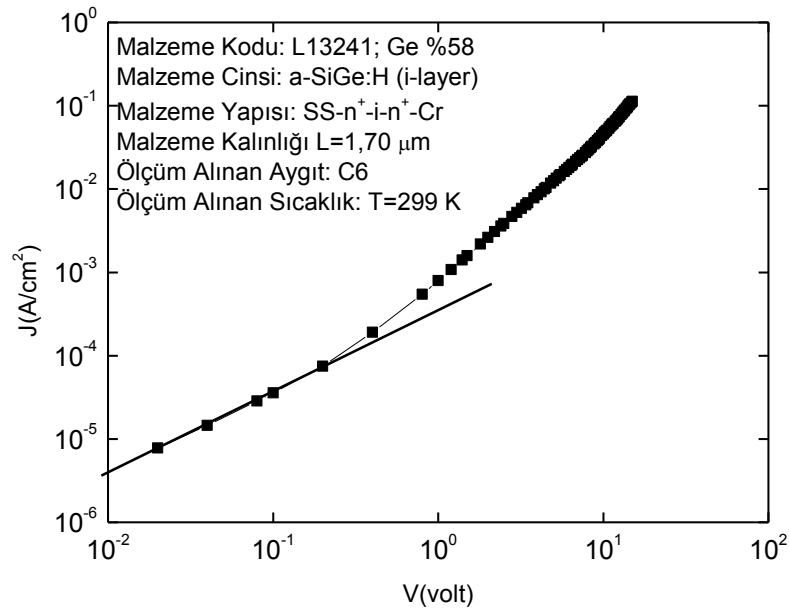


Şekil 3.38 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının F6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri

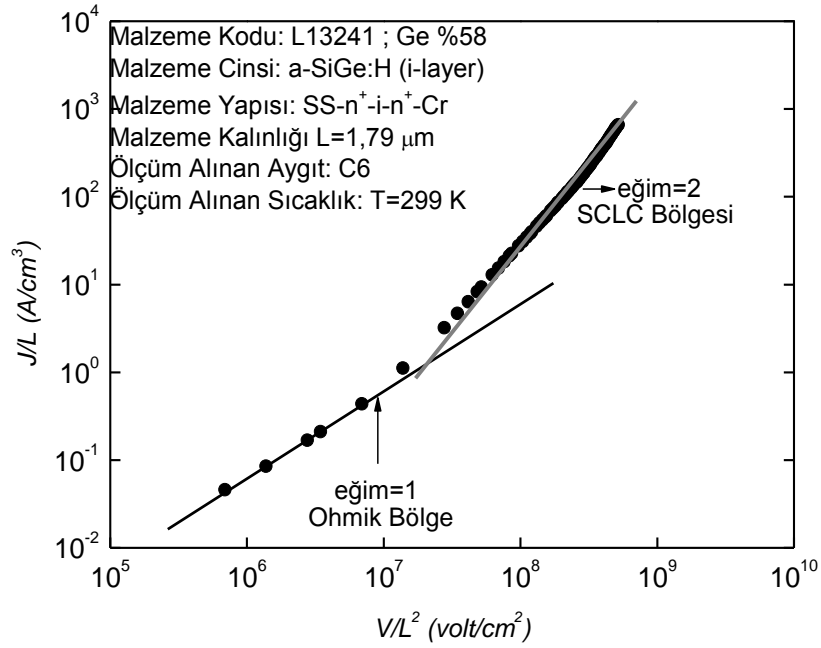


Şekil 3.39 %51 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının F6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği

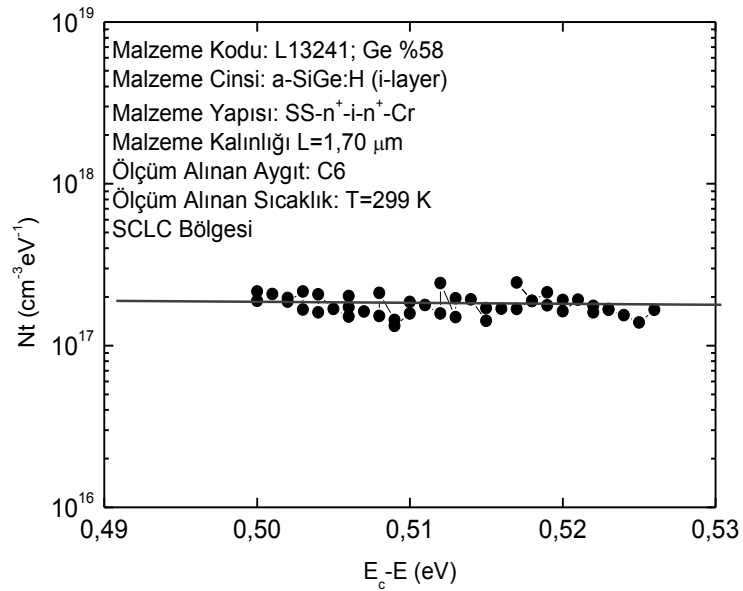
Germanyum oranı daha fazla arttırıldığı zaman germanyum zengin a-SiGe:H alaşımı malzemeler elde edilmektedir. Germanyum yüzdesi 58 atomik yüzde olarak hesaplanan L13241 kod numaralı a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V eğrisi Şekil 3.40'da sunulmuştur. Ohm yasasına uymayan SCL akımları ise Şekil 3.41'dek $\ln(J/L) - \ln(V/L^2)$ grafiğinin eğimi 2 olan doğrusal kısımdan görülmektedir. SCL bölgesinde hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu Şekil 3.42'den de görüldüğü gibi $(2 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine sahiptir. Germanyum oranının 58 atomik yüzdesine çıkması ile elektronik kusur yoğunluğunda da çok az bir artış olmuştur. Sıcaklığa bağlı yapılan J-V ölçümlerin analizi elektronik kusur yoğunluğunu $(3 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değeri civarında bir ortalama değer vermektedir. Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'de C6 numaralı aygıtın sıcaklığa bağlı ölçümleri ve hesapları belirtilmiştir.



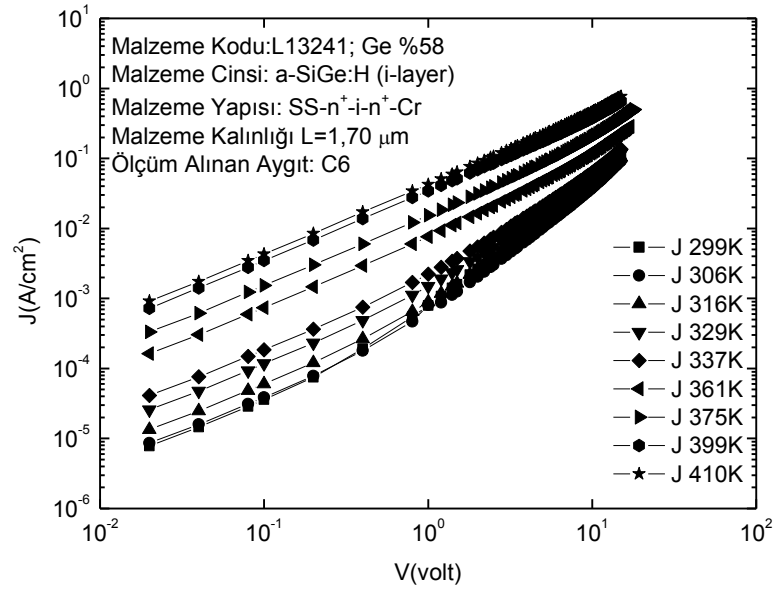
Şekil 3.40 %58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği



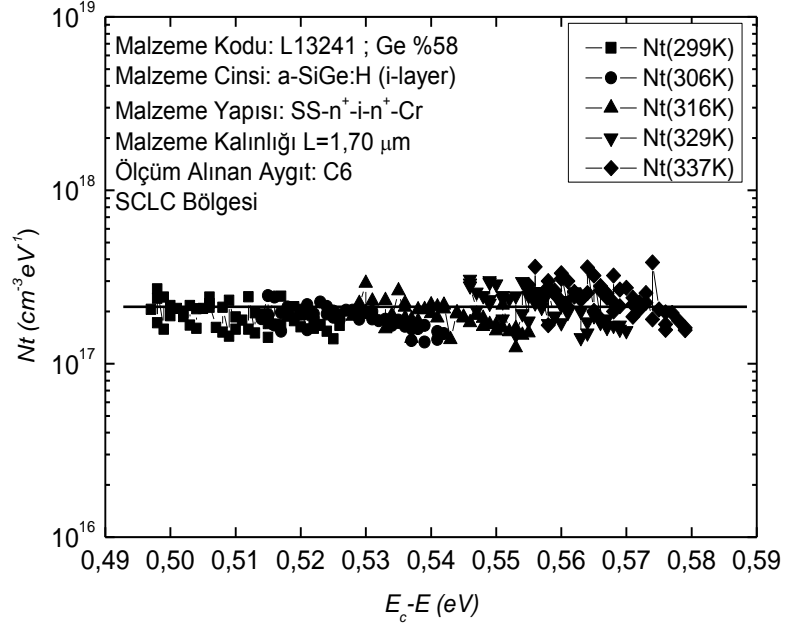
Şekil 3.41 %58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L - V/L^2 grafiği



Şekil 3.42 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının C6 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



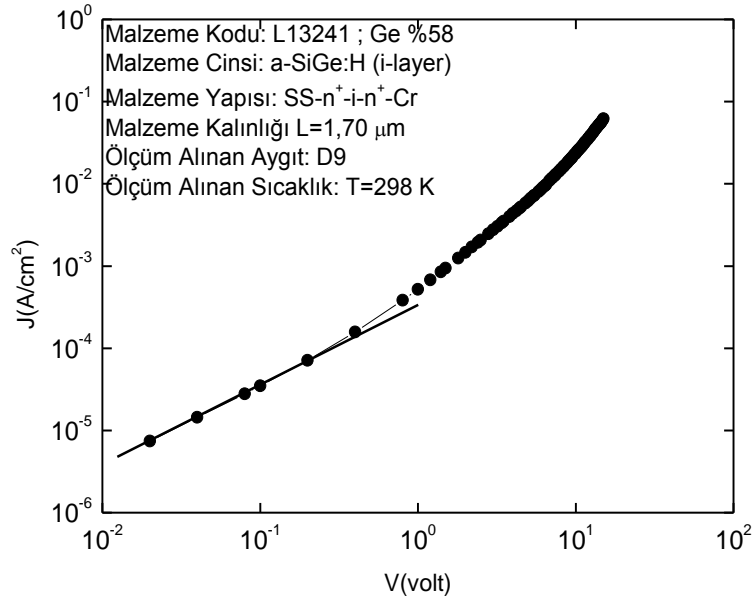
Şekil 3.43 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının C6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri



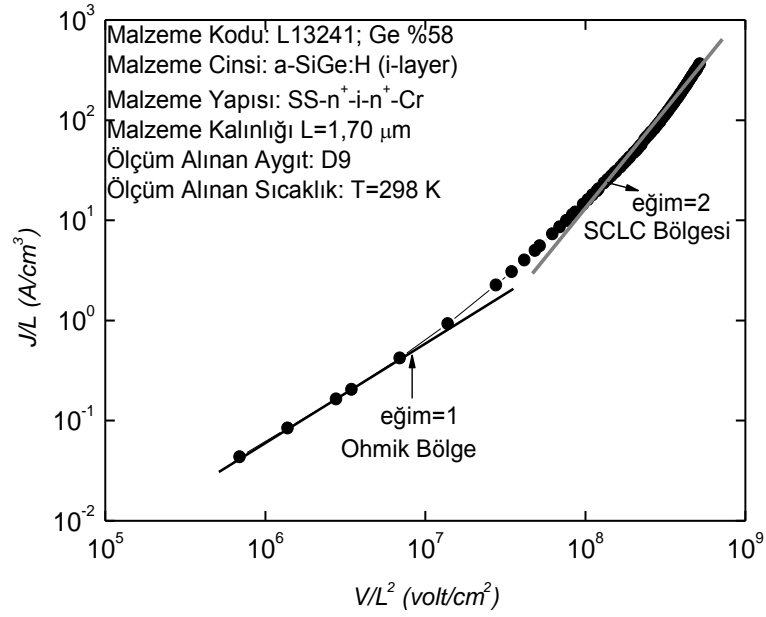
Şekil 3.44 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının C6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği

Germanyum içeriği %58 atomik yüzdeye sahip a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının diğer kardeş aygıtlar üzerinde de ayrıntılı ölçümler ve hesaplar yapılmıştır. D9 numaralı aygıtın oda sıcaklığında elde edilen J-V eğrisi Şekil 3.45’de verilmiştir. Ohm yasasına uymayan SCL akım mekanizmasının baskın olduğu yüksek gerilim bölgesi Şekil 3.46’da belirtilmiştir. Bu bölgede hesaplanan elektronik kusur yoğunluğunun miktarı yine önceki C6 numaralı aygıtın sahip olduğu değerdedir. Buradan aygıtların özdeş olduğunu ve germanyum yüzdesi arttıkça elektronik kusur miktarının arttığı ortadadır. Sıcaklığa bağlı yapılan ölçümler ve hesaplarda aynı mertebede elektronik kusur yoğunluklarını vermektedir.

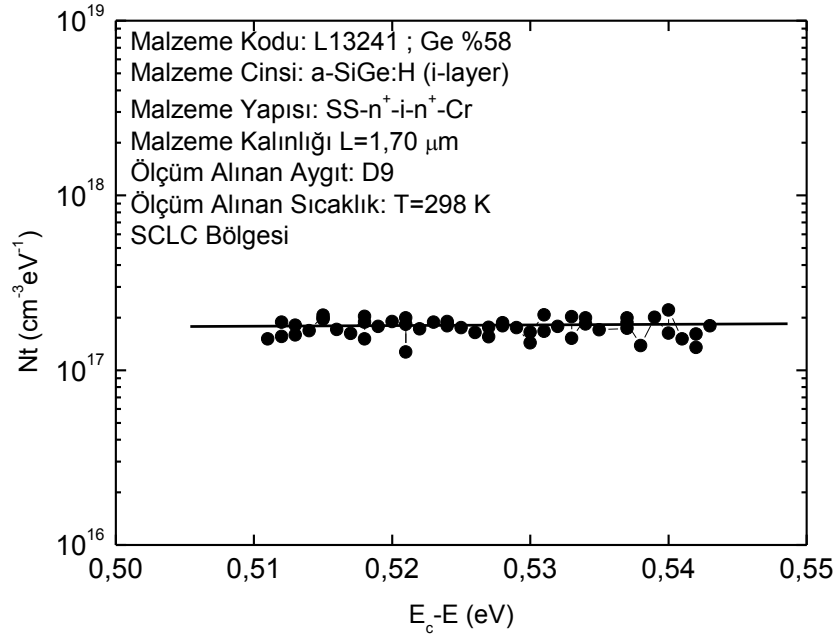
Germanyum oranının daha fazla artırılmasıyla elde edilen n⁺-i-n⁺ sandviç yapı L13233 kod numarası ile belirtilmiş ve germanyum yüzdesi 62 atomik yüzde olarak SEM-EDX analizinden hesaplanmıştır. Bu malzemenin D6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V eğrisi Şekil 3.49’da gösterilmiştir. Ohm yasasına uymayan akımlar yüksek dc gerilimi bölgesinde hala kendini göstermektedir. Şekil 3.50’de SCL akımlarının baskın olduğu bölgenin verileri kullanılarak elektronik kusur yoğunluğu hesaplanmıştır. Şekil 3.52den de belirtildiği gibi elektronik kusur yoğunluğu $(4\pm 1)\times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine artmıştır.



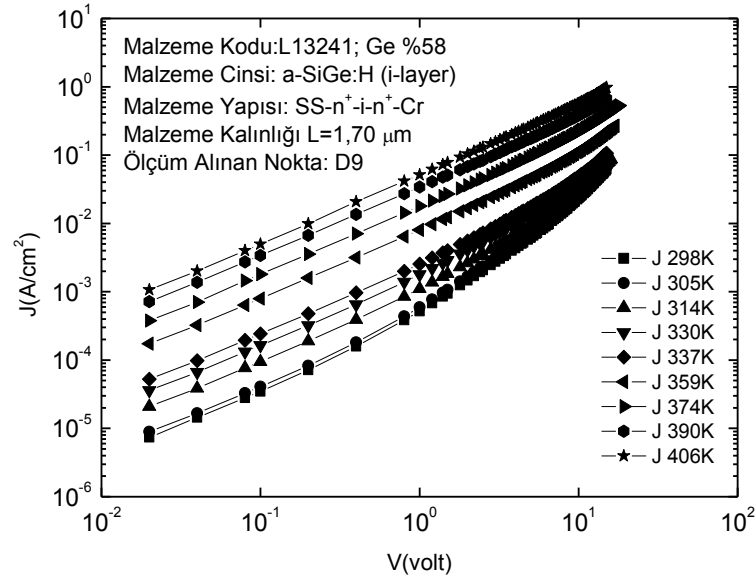
Şekil 3.45 %58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği



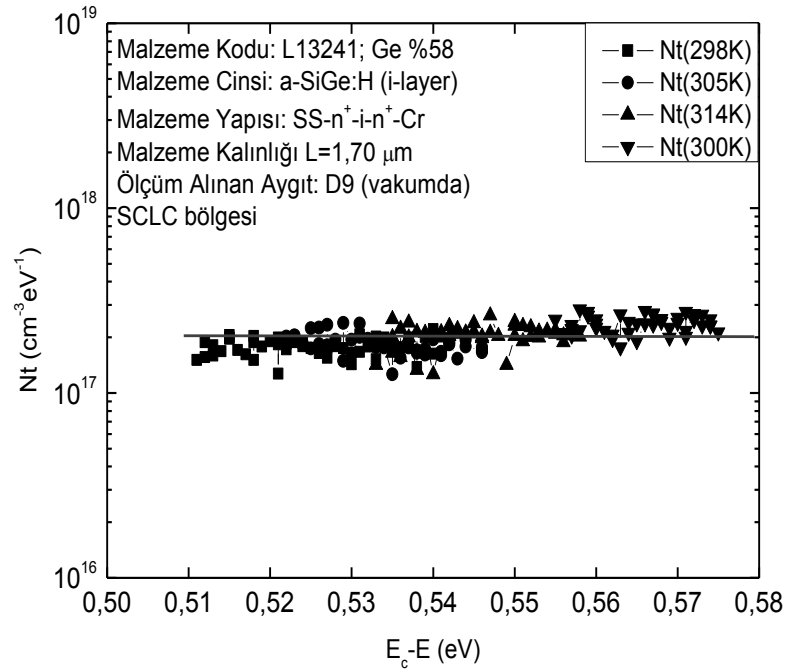
Şekil 3.46 %58 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L - V/L^2 grafiği



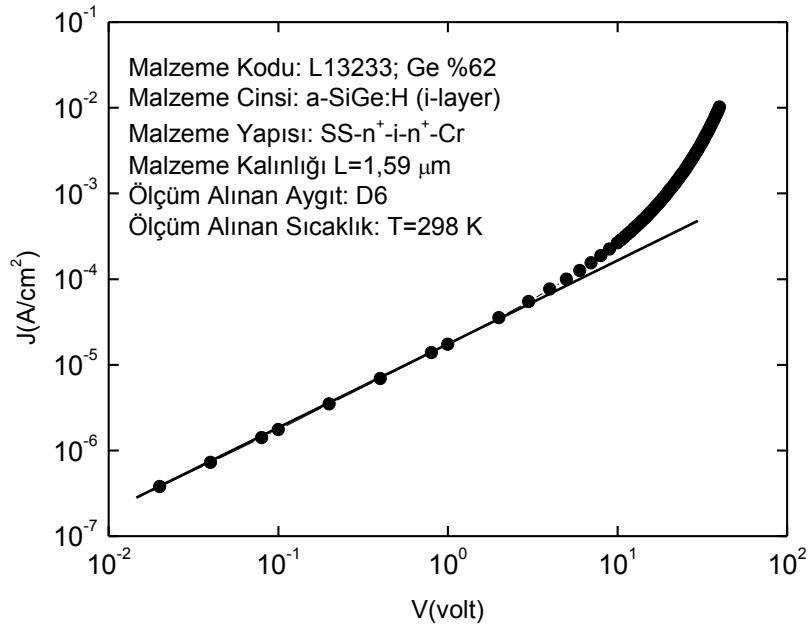
Şekil 3.47 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının D9 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



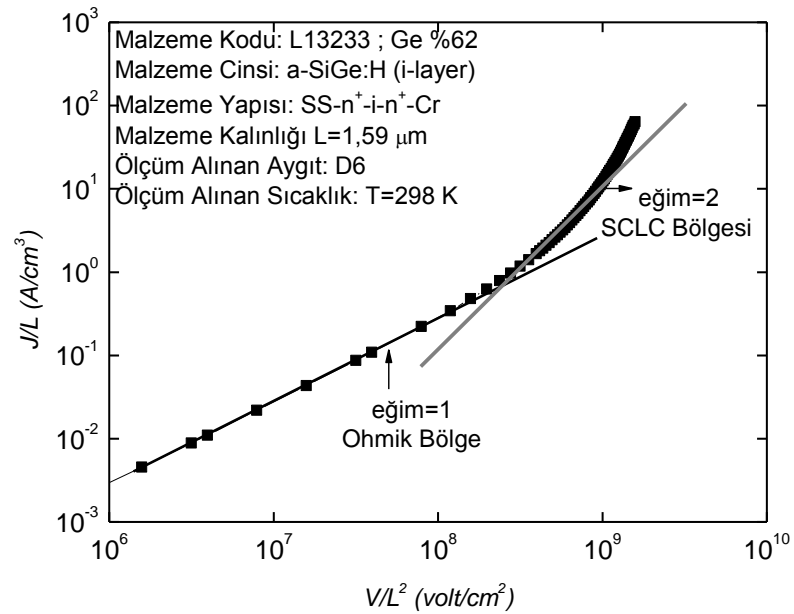
Şekil 3.48 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D9 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri



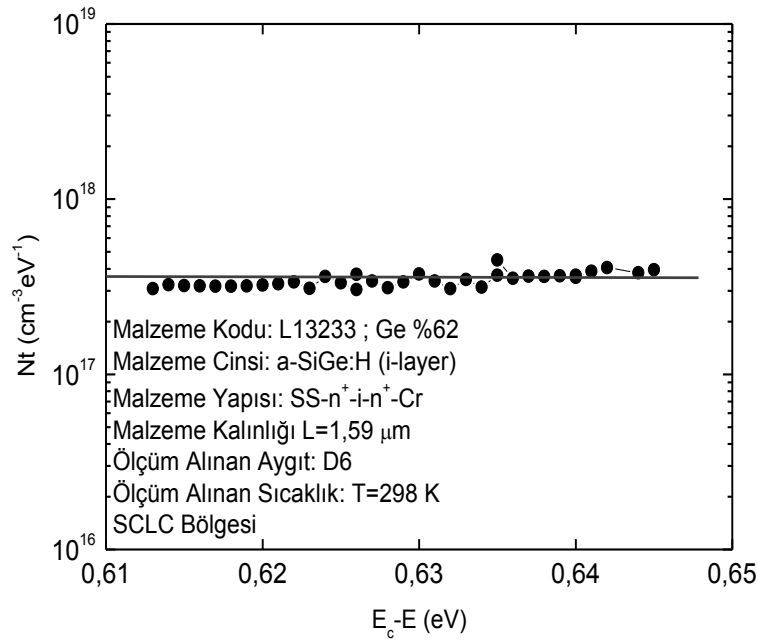
Şekil 3.49 %58 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının D9 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği



Şekil 3.50 %62 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında ölçülen J-V grafiği

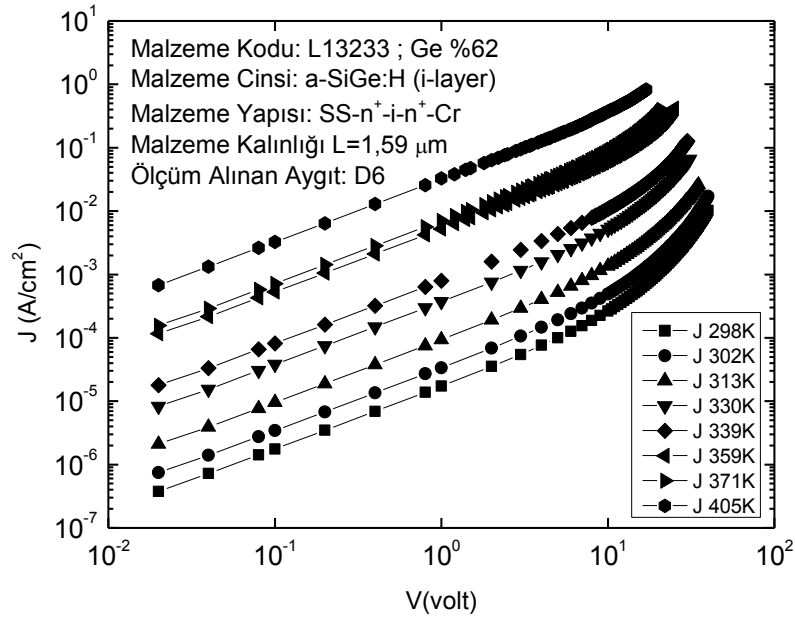


Şekil 3.51 %62 Ge içeren germanyum zengin a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından oda sıcaklığında J/L-V/L² grafiği

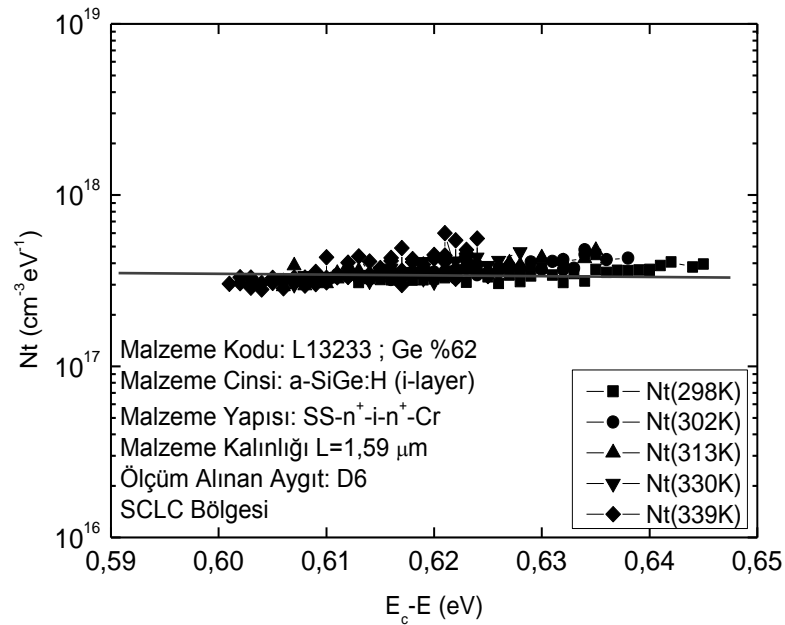


Şekil 3.52 %62 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının D6 numaralı aygıtının oda sıcaklığında bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu grafiği

Sıcaklığa bağlı yapılan J-V ölçümleri daha geniş enerji aralığındaki kusur dağılımının algılanmasına olanak sağlamaktadır. D6 numaralı aygıtın yüksek sıcaklıklardaki J-V eğrileri Şekil 3.53 sunulmuştur. Bu eğrilerin SCL bölgelerinde hesaplanan elektronik kusur yoğunlukları aynı grafik üzerinde gösterildiğinde Şekil 3.54’de görüldüğü gibi $(4 \pm 1) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine örtüşmektedirler. Sonuç olarak, a-Si:H n⁺-i-n⁺ sandviç aygıtın elektronik kusur yoğunluğu en düşük, fakat germanyum yüzdesi amorf silisyum mikro yapı içinde arttığında yasak enerji aralığında yeni elektronik kusurların oluştuğu yukarıda ayrıntısı ile verilen bulgulardan ortaya çıkmaktadır. Çok katmanlı ince film silisyum güneş pillerinde en alt güneş pili tasarımında küçük yasak enerji aralığına sahip a-SiGe:H katkısız tabakaların tercih edilmesi olumlu yönde bir gelişme olurken küçük yasak enerji aralıklı a-SiGe:H alaşımı malzemeler Ge atomik yüzdesi yüksek olan yani bu çalışmadan bulunduğu gibi elektronik kusur yoğunlukları en fazla olan malzemelerdir. Elektronik kusur yoğunluklarının artması güneş pillerinde ışık ile yaratılan elektrik yüklerinin yaşam sürelerini azaltan en önemli etkenlerden birisidir.



Şekil 3.53 %62 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ sandviç yapının D6 numaralı aygıtından ölçülen sıcaklığa bağlı J-V eğrileri



Şekil 3.54 %62 Ge içeren a-SiGe:H n⁺-i-n⁺ yapının D6 numaralı aygıtının sıcaklığa bağlı ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan elektronik kusur yoğunluğu

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında incelenen hidrojenlendirilmiş amorf silisyum–germanyum (a-SiGe:H) alaşımı ince film malzemeler metal- n^+ -i- n^+ -metal katmanlarından oluşan n^+ -i- n^+ sandviç yapı olarak RF-PECVD büyütme sisteminde hazırlanmıştır. Çok katmanlı bu tip aygıt yapının amacı tek tip yük taşıyıcıların hakim olduğu bir iletkenlik mekanizması sağlamaktır. Bu aygıt yapısında i-tabaka olarak tanımlanan katman katkısız a-SiGe:H ince film malzemedendir. İlk metal katman ile i-tabaka arasında oluşturulan çok ince (10-20nm) n^+ -tabakası aşırı katkılı n-tipi katkılı a-Si:H tabakadır. Metal ile i-tabaka arasında Ohmik kontak oluşturmak için kullanılmıştır. Katkısız a-SiGe:H tabakanın germanyum oranı %0'dan %62'ye kadar değiştirilerek beş farklı a-SiGe:H n^+ -i- n^+ sandviç yapılar büyütülmüştür. Üst metal kontak ile i-tabaka arasındaki n^+ -katmanı pozitif yüklü boşlukları engellemek için oluşturulmuştur. Alt metal katman üzerine büyütülen n^+ -tabaka sonsuz elektron deposu görevini görürken, üst metal kontak altına büyütülen n^+ -tabaka boşlukların akışını engelleyerek tek tip, sadece elektronların hakim olduğu bir akım mekanizmasını oluşturur. Alternatif olarak, sadece boşlukların hakim olduğu akım mekanizması oluşturmak için metal- p^+ -i-tabaka- p^+ -metal çok katmanlı yapıdan oluşan p^+ -i- p^+ sandviç yapılarda literatürde çalışılmıştır. Elektronların hakim olduğu akım mekanizmalarının incelenmesinde genellikle n^+ -i- n^+ sandviç yapılar yüksek dirençli ve yüksek elektronik kusur yoğunluklarına sahip amorf yarıiletkenlerin incelenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında da hidrojenlendirilmiş amorf silisyum-germanyum alaşımı (a-SiGe:H) ince film malzemeler n^+ -i- n^+ sandviç yapısında incelenmiştir. Tamamen amorf silisyum mikro yapıdan yüksek germanyum yüzdesine sahip germanyum zengin a-SiGe:H n^+ -i- n^+ yapıların karanlık akım-gerilim mekanizmalarını belirleyen elektronik kusurların gerçek değerleri SCL akımları yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır. Karanlık Fermi enerji seviyesi civarındaki elektronik kusurların mutlak yoğunlukları katkısız a-SiGe:H tabakada mevcut germanyum yüzdesindeki değişimin fonksiyonu olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılıp değerlendirilmesi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

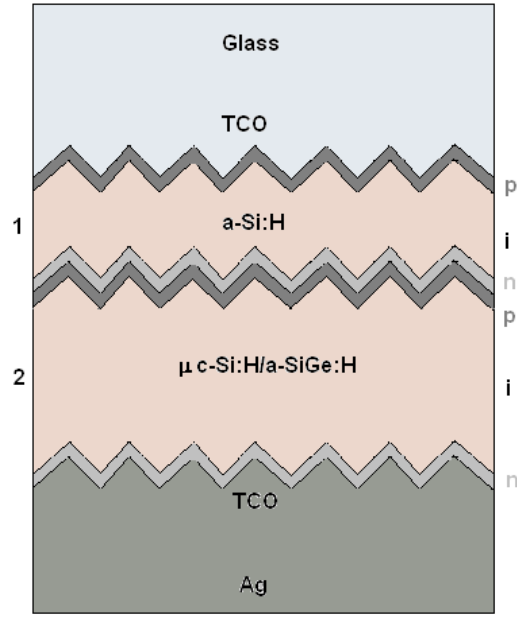
Amerika Birleşik Devletlerinde Michigan eyaletinde bulunan “United Solar System Corporation-USSC” fotovoltaik panel üreten firmanın araştırma-geliştirme laboratuvarında Dr. J. Yang tarafından üretilen a-Si:H ve a-SiGe:H n^+ - n^+ sandviç yapıların germanyum element analizi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. SEM’de aygıtın kesitinin resimleri çekilmiş ve element analizi EDX yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda aygıtın kalınlığı SEM skalasından yararlanarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, a-Si:H n^+ - n^+ sandviç yapıda Ge oranının sıfır olduğu ve diğer a-SiGe:H n^+ - n^+ aygıtlarda hem Si hem de Ge karakteristik X-ışınları pikleri EDX spektrumunda görülmüştür. Bu karakteristik pik şiddetlerinden Si ve Ge element miktarı atomik yüzde olarak belirlenmiştir. %0 Ge içeren a-Si:H n^+ - n^+ referans aygıtına ek olarak %38, %51, %58 ve %62 Ge yüzdelere sahip a-SiGe:H n^+ - n^+ sandviç yapılar olduğu anlaşılmıştır.

Mikro yapıdaki element analizinden sonra her aygıtın sıcaklığa bağlı karanlık öziletkenlik ölçümleri, malzeme ısıl işleme tabi tutulduktan sonra yavaş yavaş oda sıcaklığına kadar soğutularak ölçülür. Karanlık öziletkenlik ölçümlerinden çizilen Arrhenius grafikleri karanlık Fermi enerjisinin kontrol ettiği bir mekanizmadır. Arrhenius grafiğinin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjileri a-Si:H için 0,74 eV iken a-SiGe:H n^+ - n^+ sandviç yapılarda 0,50 eV ile 0,70 eV arasında değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Bulunan aktivasyon enerjileri karanlık Fermi seviyesinin yasak enerji aralığının ortasından iletkenlik bandına doğru kaymış olduğunu ve n-tipi bir iletkenlik mekanizmasına sahip olduğunu belirtir. Hem katkısız a-Si:H ince film malzemeler hem de katkısız a-SiGe:H ince film malzemeler için literatürde bulunan aktivasyon enerjileri ile uyumludur. a-Si:H için tanımlanan mobilite yasak enerji aralığı 1,90 eV civarında olduğu bulunmuştur (Wronski vd., 1989; Wronski, 1990). Aynı şekilde katkısız a-SiGe:H alaşımı ince film malzemelerde Ge oranı arttıkça optik yasak enerji aralığı 1,70 eV’den 1,40 eV’ye kadar azaldığı literatürde yayımlanmıştır.

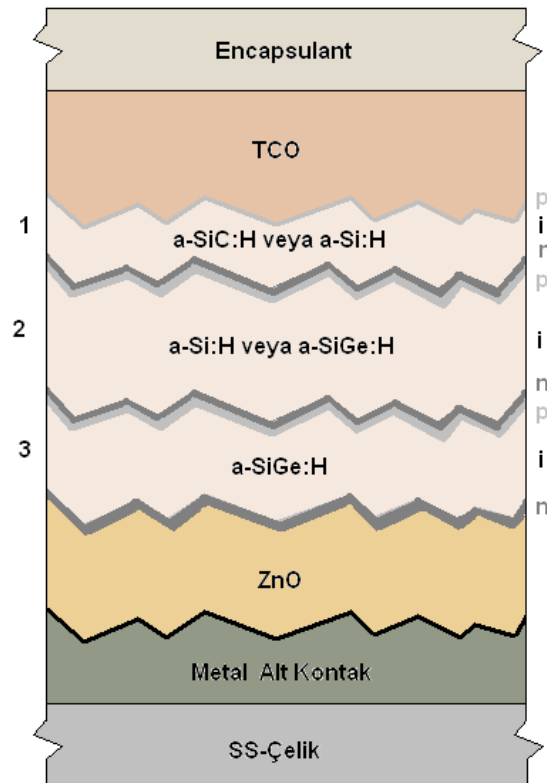
Aynı şekilde a-SiGe:H ince film malzemelerin mobilite yasak enerji aralıkları da optik yasak enerji aralığından daha büyüktür ve 1,8 eV’den 1,60 eV’ye kadar Ge yüzdesi ile azaldığını düşünürsek, hesaplanan aktivasyon enerji değerleri

mobilité yasak enerji aralığı, E_C 'nin yarısından daha düşüktür. Bir başka değişle E_C iletkenlik bant ucuna doğru kaymıştır. Aynen tek kristal yarıiletkenlerde n-tipi katkılama ile Fermi seviyesinin E_C iletkenlik bant ucuna doğru kayması gibidir. Buradaki tek fark amorf yarıiletken malzemeler büyütülürken herhangi bir katkılama elementi kullanılmadan a-SiGe:H ince film malzemelerin büyütüldüğü halde kısmen n-tipi katkılanmış gibi davranmasıdır. Bu kaymanın nedeni, yasak enerji aralığında yerleşmiş amorf yapının doğasından kaynaklanan elektronik kusurlardaki yük durumuna göre Fermi seviyesinin yerinin belirlenmiş olmasıdır. n^+ -i- n^+ sandviç yapılarında bulunan aktivasyon enerji değerleri cam üzerine büyütülen aynı malzemelerin paralel elektrotlar kullanılarak ölçülen paralel iletkenlik ölçümünden bulunan değerlerle aynı mertebelerde olduğudur. n^+ -kontakların çok ince olmasından dolayı katkısız a-SiGe:H tabakanın özelliklerine bir etkisi yoktur. Sonuç olarak, incelenen n^+ -i- n^+ sandviç yapılarında elde edilen deneysel bulgular katkısız amorf yarıiletkenin yapısında mevcut elektronik özelliklerin bir sonucudur.

Katkısız a-Si:H ve a-SiGe:H ince film malzemeler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterildiği gibi ikili eklem veya üçlü eklem tandem tipi çok katmalı ince film silisyum güneş pillerinin önemli fotovoltaiik soğurucu malzemesidir. a-SiGe:H tabakalar alt güneş pilinin soğurucu katmanını oluşturur. Bu tip güneş pili tasarımında amaç güneş spektrumunun bütün dalga boylarında etkin bir şekilde soğurulmasını sağlayarak yüksek enerji-dönüşüm verimi elde etmektir. Bu verimi belirleyen en önemli etken fotovoltaiik soğurucu amorf yarıiletkenin yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların yoğunluğu, çeşitleri ve dağılımlarıdır. Yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların hepsini algılayıp ölçebilen tek bir yöntem mevcut değildir. Hem optik hem elektronik hem de magnetik yöntemler uygulanarak belirli özellikte ve belirli enerji aralıklarında yerleşmiş elektronik kusurlar algılanarak malzemenin kalitesi belirlenmektedir.



Şekil 4.1 İkili eklem ince film silisyum güneş pilinin kesiti



Şekil 4.2.Üçlü eklem ince film silisyum güneş pilinin kesiti

Bu yöntemlerden en sık kullanılanlardan birisi elektron spin rezonans (ESR) yöntemidir. Fakat ESR yöntemi sadece tek elektronlu elektronik kusurları algılayabilmektedir. Yani tek spinli elektrona sahip sallanan Si veya Ge bağları bu tür kusurları oluşturuyor. a-Si:H içindeki ESR kusur yoğunluğu 10^{16} cm^{-3} mertebesindeyken a-SiGe:H ince film malzemelerde hem Si orijinli elektronik kusurlar hem de Ge orijinli elektronik kusur yoğunlukları Ge yüzdesi arttıkça artmaktadır (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd.,1989). Ek olarak, yüksüz Ge sallanan bağların oluşturduğu (tek elektronlu kusurlar) elektronik kusurların yanında pozitif ve negatif yüklü elektronik kusurların yoğunluklarının Ge yüzdesi ile arttığı bulunmuştur (Fuhs ve Finger, 1989; Stutzman vd.,1989).

ESR yöntemi dışında kullanılan yöntemler hep sınırlı bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemlerden birisi SCL akımları yöntemidir. SCL akımları yönteminde akım mekanizması metal üzerindeki n^+ -tabakanın sonsuz elektron deposu olarak elektronları katkısız i-tabaka içine enjekte etmesi ile malzemenin yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurlar enjekte edilen elektronlarla doldurularak bir uzay yükü oluşturmaktadır. Üst metal kontak altındaki n^+ -tabak ise pozitif yüklü boşlukların metal'den i-tabakaya geçişine bir potansiyel engeli oluşturduğundan dolayı sadece elektronların hakim olduğu akım alt metal kontak tarafında n^+ -tabakadan katkısız a-SiGe:H tabakaya enjekte edilmiş uzay yükünün sınırladığı bir akım mekanizmasıdır. Yüksek elektrik alan altında Ohm yasasına uymayan süper-doğrusal (eğimi 1'den büyük) akım-gerilim eğrileri elde edilir. Dolu elektronik kusurlardan iletkenlik bandına uyarılan elektronlar da akıma katkı yaptığından ölçülen J-V eğrilerinin süper-doğrusal kısmından yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların gerçek sayıları elde edilmektedir.

Amorf yarıiletkenlerde görülen SCL akımlarının teorisi ve deneysel J-V eğrilerinin analizi değişik araştırmacılar tarafından 1950'li yıllardan beri yapılmaktadır. Rose (1955) SCL akımlarını değişik kusur yoğunlukları kabul ederek analiz etmiştir (Rose,1955). Ohm yasasına uyan ve uymayan akımların ifadelerini elde etmiştir. Fakat Lampert (1956) yasak enerji aralığında yerleşmiş yüksek yoğunluklu amorf yarıiletken ve yalıtkanlarda gözlenen SCL akımlarının teorik incelenmesini ayrıntılı bir şekilde yapmıştır (Lampert, 1956). Değişik

karanlıklara sahip dirençlerin SCL akımlarının $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiği ile nasıl üst üste örtüştüğünü ortaya koyan “Kalınlıkla Orantılama Yasası-(Scaling Low)”nı ortaya çıkarmış ve SCL akımlarında $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiğinin eğiminin 2 olduğunu bulmuştur. Ohm yasasına uyan akım mekanizmasında ise $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiğinin eğimi 1’dir. Daha sonraki araştırmalar SCL akımlarının incelenmesinde $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. SCL akımlarına ek olarak, yüksek elektrik alan altında farklı bir akım mekanizması daha gözlenmektedir. Bu etki ilk olarak Frenkel (1938) tarafından bulunan ve daha sonra Pool-Frenkel etkisi olarak anılan bir akım mekanizmasıdır. Pool-Frenkel akım mekanizması yasak enerji aralığı içinde yerleşmiş derin kusurlardaki (bant ortasına yakın enerjilerdeki) yükler nedeniyle oluşan potansiyel engellerinin yüksek elektrik alan altında azalması ve dolayısıyla kusurlardan iletkenlik bandına elektronların geçişi ile elektrik alan yardımcı bir akım oluşmaktadır. Bu akım mekanizması da Ohm yasasına uymayan süper-doğrusal bir J-V eğrisine neden olmaktadır. Pool-Frenkel etkisini kesin olarak belirlemek için $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiği çizilir. Frenkel tarafından oluşturulan teori kullanıldığında bu grafik doğrusal bir değişim belirtir. Hesaplanan grafiğin eğimi malzemenin dielektrik sabitinin hesaplanmasında kullanılır. Grafik eğiminden hesaplanan dielektrik sabiti malzemenin dielektrik sabitine eşit veya yakınsa akım mekanizması Pool-Frenkel etkisi ile oluşan elektrik alan yardımcı bir akım mekanizmasıdır. Eğer $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiği yüksek elektrik alan bölgesinde doğrusal değilse akım mekanizması SCL akım mekanizmasıdır (Frenkel,1938). Bu tez çalışmasında incelenen n^+-i-n^+ sandviç yapıların J-V eğrilerinin Ohm yasasına uymayan kısmında hem SCL hem de Pool-Frenkel etkisi ayrıntılı olarak her bir aygıt için çizilen $\ln(J/L)-\ln(V/L^2)$ grafiği ve $\ln(J/E)-E^{1/2}$ grafiklerinden belirlenmiştir. Hem a-Si:H n^+-i-n^+ sandviç yapının (referans malzeme) hem de a-SiGe:H n^+-i-n^+ sandviç yapılarda Ohm yasasına uymayan akımların SCL akımlarından olduğu bir önceki bölümdeki deneysel bulgular kısmında gösterilmiştir.

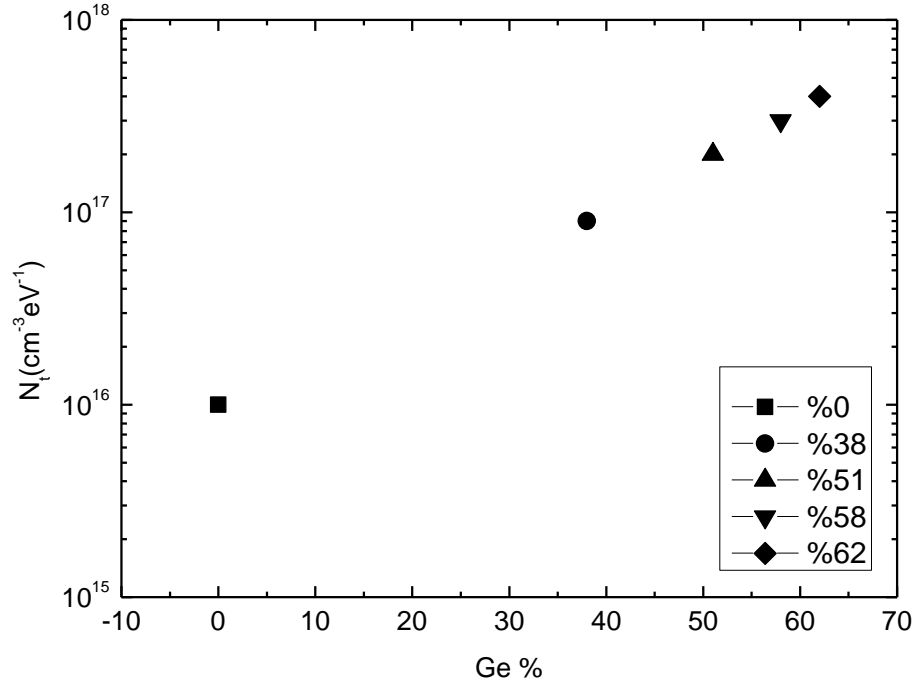
SCL akımlarının baskın olduğu J-V bölgesi belirlendikten sonra, teorik analiz W. den Boer tarafından geliştirilen teorik yöntemle analiz edildi. Den Boer (1981) tarafından a-Si:H n^+-i-n^+ yapıların SCL akımlarından yasak enerji aralığında

Fermi enerjisi civarındaki elektronik kusurların gerçek değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında belirtilen makaledeki teorik yaklaşım kullanılarak SCL akımları analiz edildi ve N_t kusur yoğunluğu hesaplandı. Ölçümler hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda elde edildi. Sıcaklık arttıkça Ohm yasasına uyan akım mekanizmasının bütün J-V eğrisini kontrol ettiği bir önceki kısımdaki bulgulardan görülmektedir. Sınırlı da olsa, her malzemenin SCL akımlarından N_t kusur yoğunlukları hem a-Si:H $n^+ - i - n^+$ referans aygıt hem de a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ aygıtlar için bulundu. Hiç Ge içermeyen a-Si:H malzemenin N_t kusur yoğunluğu $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ mertebesinde bulunmuştur. Bu sonuç daha önce W. den Boer tarafından hesaplanan $(2 \pm 1) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değeri mertebesinde-dir. Hesaplanan enerji aralığı W. den Boer tarafından 0,55 eV ile 0,75 eV arasındadır. Bu tez çalışmasında aynı enerji aralığındaki elektronik kusurların gerçek değeri hiçbir kusur dağılımı kabul edilmeden bulunmuştur.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum içine Ge eklenerek oluşturulan $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılarda ise sırası ile %38, %51, %58 ve %62 atomik yüzdeye sahip Ge içeren $n^+ - i - n^+$ aygıtlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. %38 Ge içeren $n^+ - i - n^+$ aygıtın N_t kusur yoğunluğu $(9 \pm 1) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olarak hesaplandı. Ge yüzdesinin artması ile N_t kusur yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Yani Ge orijinli elektronik kusurlar yasak enerji aralığında artmaktadır. Ge oranı %51 olan $n^+ - i - n^+$ malzemenin N_t kusur yoğunluğu $(2 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ değerine artmıştır. Ge oranı arttıkça N_t kusur yoğunluğu artmaya devam etmektedir. Ge oranı %58 olan $n^+ - i - n^+$ aygıt için N_t değeri $(3 \pm 0,5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ ve %62 Ge oranına sahip $n^+ - i - n^+$ aygıt için ise $(4 \pm 1) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen N_t değerleri aynı aygıtın değişik sıcaklıklarda ölçülen J-V eğrilerinden hesaplanan değerleri ile örtüşmekte, ayrıca birbirine komşu $n^+ - i - n^+$ aygıtlar için hesaplanan N_t değerleri de birbirleriyle örtüşmektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular aynı Ge oranına sahip birden fazla aygıtlardan hesaplanan N_t bulguları ile doğrulanmıştır. Ge yüzdelерinin artması ile N_t kusur yoğunluğunun arttığı bulunmuştur ve Şekil 4.3'te bu artış gösterilmektedir. a-SiGe:H alaşımı $n^+ - i - n^+$ aygıtlarda Fermi enerjisi etrafındaki elektronik kusur yoğunluğu a-Si:H $n^+ - i - n^+$ kusur yoğunluğundan daha yüksektir. Amorf silisyum mikro yapıya Ge eklenmesi ile Ge orijinli ilave elektronik kusurların oluşması ile kusur yoğunluğu daha yüksek a-SiGe:H alaşımı

malzemeler oluşmaktadır. SCL akımları yöntemi çok sınırlı enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların gerçek değeri hakkında bilgi vermesine rağmen artan Ge etkisini açık bir şekilde belirtmektedir. Bu tez çalışmasındaki a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılarıdaki bulguları literatürde mevcut önceki çalışmalarla karşılaştırmak istediğimizde bu malzemelerde fazla bir araştırma bulunamamıştır. İlk olarak Yang Fang Chen (1989) tarafından yapılan SCL akımları yöntemi ile a-SiGe:H alaşımları incelenmiştir. Hem paralel kontaklar kullanılarak hem de $n^+ - i - n^+$ sandviç yapı kullanılarak ölçülen akım-gerilim bulgularından SCL akımları ve Pool-Frenkel akım mekanizmaları incelenmiştir. Kalınlığı $3\mu\text{m}$ 'ye kadar olan katkısız a-SiGe:H içeren $n^+ - i - n^+$ sandviç yapılarda N_t kusur yoğunlukları SCL akımlarının analizinden $10^{17}\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$ mertebelerinde olduğu bulunmuştur. Metal elektrotlar arası uzunluk $45\mu\text{m}$ olan paralel elektrotlu malzemelerde akım-gerilim mekanizmalarının ise Pool-Frenkel etkisinin hakim olduğunu yayımlamışlardır. Bu tez çalışmasında incelenen a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç yapıların N_t kusur yoğunlukları $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$ 'den $4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$ 'e kadar artan Ge yüzdesi ile artmaktadır. Önceki yayınlanmış N_t değerleri ile aynı mertebededir. İncelenen bütün aygıtlarda Pool-Frenkel etkisinin hakim olmadığı $\ln(J/E) - E^{1/2}$ grafikleri çizilerek gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında incelenen değişik Ge yüzdelere sahip a-SiGe:H $n^+ - i - n^+$ sandviç aygıtlarda ölçülen karanlık J-V eğrilerinin Ohm yasasına uymayan süper-doğrusal kısımlarının SCL akım mekanizmaları olduğu ve bu akım mekanizmalarının W. den Boer analizi kullanılarak hesaplanan elektronik kusur yoğunluklarının hem a-Si:H hem de a-SiGe:H katkısız tabakanın literatürde yayınlanmış sonuçları ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca artan Ge yüzdesi ile N_t kusur yoğunluğunun arttığı, bu tez çalışması ile literatüre yeni bir bilgi olarak aktarılacaktır.



Şekil 4.3 Artan Ge yüzdesine karşı N_t kusur yoğunluğu değişimi

KAYNAKLAR

Adler, D., Schwartz, B.B., Steele, M.C., 1985. *Physical Properties of Amorphous Materials*.

Aljishi, S., Smith, Z.E. and Wagner, S., 1989. *Amorphous Silicon and Related Materials*. p. 887.

Bube, R.H., 1998. *Photovoltaic Materials*, London.

Bullot, J., Schmidt, M.P., 1987. *Phys. Stat. Sol. (b)* 143, 345

Carius R., Stiebig, H., Siebke, F., Fölsch, J., 1998. Defect Distribution in a-Si_xGe_{1-x}:H. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230, part 1,432-436.

Carlson, D.E., Wronski, C.R., Amorphous Silicon Solar Cells. *Appl. Phys. Lett.*, 28,671.

Chen, Y.F., 1989. Comment on The Determination of The Midgap Density of States in Amorphous Semiconductors Using The Space Charge Limited Current Method. *Physics Status Solid, (b)*, 153, 695.

Chittick, R.C., Alexander, J.H. and Sterling, H.F., 1969. The Preparation and Properties of Amorphous Silicon. *J. Electrochem. Soc.*, vol. 116,(1), pp. 77-81.

Cohen, J.D., 1998. Identifying Electronic Properties Relevant to Improving Stability in a-Si:H-Based Cells and Overall Performance in a-Si,Ge:H-Based Cells. *NREL*, SR-520-25802

Dawson, R.M., Wronski, C.R., Bennett, M., 1991. The Density of States below Midgap Determined from The Space Charge Limited Currents of Holes in Intrinsic Hydrogenated Amorphous Silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 58, (3),272.

Den Boer, W., 1981. Determination of Midgap Density of States in a-Si:H Using Space Charge-Limited Current Measurement. *Journal Phys.*, 42, p. C4-451.

Frenkel, J., 1938. *Phys. Rev.*, 54, 647.

Fuhs, W., Finger, F., 1989. Defects and Recombination in a-Si_{1-x}Ge_x:H. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.114, part 2, p. 387.

Guha, S., Payson, J.S., Argaval, S.C., Ovshinsky, S.R., 1987. Fluorinated Amorphous Silicon Germanium Alloys Deposited from Disilane-Germane Mixture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 97-98, p.1455.

Knoll, M., 1935, Aufladepotential und Sekundäremission Elektronenstrahlter Körper. *Zeitschrift für technische Physik*, 16, 467-475.

Kolodzey, J., Aljishi, S., Smith, Z.E., Chu, V., Schwarz, R., Wagner, S., 1986, Measurements of Light-Induced Degradation in a-Si,Ge:H,F Alloys. *Materials Issues in Amorphous-Semiconductor Technology Symposium*, 1986, p.237.

Lampert, M.A., 1956. Simplified Theory of Space Charge-Limited Current in an Insulator with Traps. *Phys. Rev.*, vol. 103, issue 6, 1648-1656.

Lampert, M.A., 1964. Current Injection in Insulator. *Reports on Progress in Physics*, vol. 27, 329.

Lampert, M.A., Mark, P., 1970. *Current Injection in Solids*, New York, Academic Press.

Matsuda, A., Yagii, K., Koyama M., Toyama, M., Imanishi, Y., Ikuchi, N., Tanka, K., 1985, Preparation of Highly Photosensitive Hydrogenated Amorphous Si-Ge Alloys Using a Triode Plasma Reactor. *Applied Physics Letters*, vol. 47, no. 10, p. 1061.

Matsuda, A., 1985. *Appl. Phys. Lett.*, 47

Matsumura, H., Ihara, H., 1988. *Journal Applied Physics*, 64, 6505

Mott, N.F., Gurney, R.W., 1940. *Electronic Processes in Ionic Crystals*. Oxford University Press, New York, 1st ed., p. 172.

Nebel, C.E., Weller, H.C., Bauer, G.H., 1988. Extended State Mobility and Tail State Distribution of a-Si_{1-x}Ge_x:H Alloys. *Amorphous Silicon Technology Symposium*, 1988, p. 507.

Nespurek, S., Sworakowski, J., 1977. *Physics Status Solid*, A41, 619; (1078).

Palinginis, K.C., Cohen, J.D., Yang J., Guha, S., 2000. Defect Bands in a-SiGe:H Alloys with Low Ge Content. *J. Non-Cryst. Solids*. 266–269, p. 665.

Rose, A., 1955. Space Charge-Limited Current in Solids, *Physical Review*, vol. 97, p. 6.

Rose, A., 1955. Recombination in Insulators and Semiconductors. *Phys. Rev.*, B., 97, 322.

Smith, R.W. and Rose, A., 1955. Space Charge Limited Current in Single Crystals of Cadmium Sulfide. *Physics Rev.*, 97, no. 6.

Solomon, I. and Benferhat, R., 1984, Space Charge Limited Conduction for The Determination of Midgap Density of States in Amorphous Silicon: Theory and Experiment. *Physics Rev.*, (b) 30, no. 6, 3422.

Spear, W.E., LeComber, P.G., 1975. Substitutional Doping of Amorphous Silicon. *Solid State Commun.*, 17, p. 1193.

Staebler, D.L. and Wronski, C.R., 1977. Reversible Conductivity Change in Discharge-Produced Amorphous Si. *Applied Physics Letters*. vol. 31, (2):p.292.

Stöckmann, F., 1981. An Exact Evaluation of Steady State Space Charge Limited Currents for Arbitrary Trap Distributions. *Physics Status Solid*, (a) 64, 475.

Stutzman, M., Street, R.A., Tsai, C.C., Boyce, J.B., Ready, S.E., 1989. Structural Optical and Spin Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon-Germanium Alloys. *Journal of Applied Physics*, vol. 66, (2), p. 569.

Taylor, P.C., 2005. Characterization of Amorphous Silicon Advanced Materials and PV Devices. *NREL*.

Von Ardenne, M., 1939. Das Elektronen-Rastermikroskop, Theoretische Grundlagen. *Zeitschrift für Physik*, 108 (9–10): 553–572.

Wronski, C.R., Lee, S., Hicks, M. And Kumar, S., 1989. Internal Photoemission of Holes and The Mobility Gap of Hydrogenated Amorphous Silicon. *Phys. Rev. Lett.*, 63, 1420-1423.

Wronski, C.R., 1990. Instabilities in a-Si:H Solar Cells Materials and Device Issue. *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty First IEEE*, 21-25 May 1990, Kissimmee, FL, USA, vol. 2, p. 1487-1492.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğreniminde 1. ve 2. sınıflarını Elazığ'da, 3., 4. ve 5. sınıflarını Antalya'da okudu. Ortaöğrenimini Antalya'da tamamlayan Zeynep R. Ö. Can lise öğrenimini Antalya Lisesinde tamamladı. 2004-2005 eğitim öğretim yılında Muğla Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümüne başladı. 2008 yılının haziran ayında bölümünden 4.00 ortalama üzerinden 3.11 not ortalamasıyla başarılı bir şekilde mezun oldu. 2008-2009 eğitim öğretim yılında Muğla Üniversitesi Fizik Bölümünde lisansüstü öğrenimine başladı.