

**T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**MİKRO KRİSTAL SİLİSYUM İNCE FİLM MALZEMELERDEKİ KARARSIZLIK
PROBLEMİNİN FOTOİLETKENLİK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKHAN YILMAZ

**HAZİRAN 2009
MUĞLA**

**T.C.
MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**MİKRO KRİSTAL SİLİSYUM İNCE FİLM MALZEMELERDEKİ KARARSIZLIK
PROBLEMİNİN FOTOİLETKENLİK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan YILMAZ

MUĞLA 2009

T.C.
MUGLA ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ danışmanlığında Gökhan YILMAZ tarafından hazırlanan *Mikro Kristal Silisyum İnce Film Malzemelerdeki Kararsızlık Probleminin Fotoiletkenlik Yöntemi İle İncelenmesi* başlıklı tez, 20/08/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şener OKTİK

İmza : 

Danışman : Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

İmza : 

Üye : Yard. Doç.Dr. Yusuf SELAMET

İmza : 

ÖNSÖZ

Fiziğe farklı bir pencereden bakmamı sağlayan bana sorgulamayı, karar vermeyi öğreten, hayatımdaki en önemli anıma şahitlik eden, çalışmalarım sırasında gerek kuramsal gerekse deneysel açıdan zorlandığım her noktada bilgi birikimi ve tecrübesi ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ'e, tez çalışması kapsamında Almanya'nın Jülich Araştırma Merkezindeki deneysel araştırma imkanlarını bana açan Dr. Friedhelm FINGER'a, Almanya'da bulunduğum süre içerisinde her soruma sabırla cevap veren Dr. Vladimir SMIRNOV'a, ERASMUS "Yaşam Boyu Öğrenme" programı kapsamında Danışmanlığımı yapan Almanya'nın Carl von Ossietzky Oldenburg Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Dr. Rudolph Brüggeman'a, tez savunma sınavımda değerli yorum ve katkıları ile bu tezin akademik niteliğinin iyileştirilmesini sağlayan, hayatımın en önemli ikinci anına da şahitlik eden saygı değer jüri üyemiz, Rektörümüz, Hocam Prof. Dr. Şener OKTİK'e, yine tez savunmamda yapıcı eleştirileri ile tezimin oluşmasında önemli bir yere sahip olan jüri üyemiz Yard. Doç. Dr Yusuf SELAMET hocama teşekkürü bir borç bilirim. Deneyletim sırasınca sürekli manevi destekte bulunan hocam Yard. Doç. Dr. Uğur ERKASLAN'a benden yardımlarını esirgemeyen oda arkadaşlarım Elif TURAN, Zeynep R.Ö. CAN ve Meliha BAYRAK'a fahri oda arkadaşımız Selman MİRİOĞLU'na, tez döneminde sürekli paylaşım içerisinde olduğumuz Ahmet ÇETİN'e, Yüksek Lisansım boyunca Araştırma Görevlisi kadrosu gibi onurlu bir göreve aldığı ve finansal anlamda desteklediğinden dolayı Muğla Üniversitesine teşekkür ederim.

Ayrıca bugün sahip olduğum değerlere ulaşmam sırasında her zaman yanımda ve destek olan başta annem, babam, ablam ve ağabeyim olmak üzere bütün aileme, bana bazen iki yanlışın bir doğru yapabileceğini gösteren, hayatta mucizelerin olduğunu unuttuğum anda bana anımsatan ve her sabah uyandığım anda yanımda olduğunu gördüğüm anda hayatımın en doğru kararını verdiğimi hatırlatan hayat arkadaşım, yol arkadaşım, eşim Gaye Gökcalp YILMAZ'a bana kattıkları her şey için çok teşekkür ederim.

Gökhan YILMAZ

MUĞLA

2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
ABSTRACT	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
BÖLÜM 1: GİRİŞ	1
1.1 Kaynakça Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	11
BÖLÜM 2: MALZEMELER VE DENEYSEL YÖNTEMLER	12
2.1 Giriş	12
2.2 Mikro Kristal Silisyum İnce Filim Malzemelerin Büyütülmesi.....	12
2.3 Karanlıkta İletkenlik ve Fotoiletkenlik Ölçüm Sistemi.....	15
2.4 Işık Kalibrasyonu.....	18
2.5 Mikro Kristal Silisyum Malzemelerin Bozunma İşlemleri.....	20
2.5.1 Laboratuar Atmosferinde Bozunma İşlemi.....	20
2.5.2 Azot Gazı Ortamında Bozunma İşlemi	20
2.5.3 Işık Altında Bozunma İşlemi – Steabler- Wronski Etkisi.....	21
2.6 Tavlama (Isıl İşlem) Yöntemi.....	22
2.7 Sıcaklığa Bağlı Karanlıkta İletkenlik Yöntemi.....	23
2.8 Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümleri.....	25
2.8.1 Işık Şiddetine Bağlı Kararlı Durum Fotoiletkenlik	25
Yöntemi.....	
2.8.2 Sıcaklığa Bağlı Fotoiletkenlik Yöntemi.....	33
BÖLÜM 3: DENEYSEL BULGULAR	35
3.1 Giriş.....	35
3.2. Atmosfer Gazlarında Elektronik Bozunumu.....	35

3.2.1. Optik soğurma katsayısı ölçümleri.....	35
3.2.2. Laboratuar atmosferinde elektronik bozunum.....	38
3.2.2.1 Karanlıkta iletkenlik ölçümleri.....	38
3.2.2.2 Fotoiletkenlik ölçümleri.....	46
3.2.2.2.1 Oda sıcaklığında ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümleri.....	46
3.2.2.2.2 Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri.....	58
3.2.3. Azot gazı ortamında elektronik bozunum.....	76
3.3 Işık Altında Elektronik Bozunumu- Steabler- Wronski Etkisi.....	79
3.3.1 Karanlıkta iletkenlik ölçümleri.....	79
3.3.2 Fotoiletkenlik ölçümleri	86
BÖLÜM 4: TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	95
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	106

MİKRO KRİSTAL SİLİSYUM İNCE FİLM MALZEMELERDEKİ KARARSIZLIK PROBLEMİNİN FOTOİLETKENLİK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gökhan YILMAZ

MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

2009

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; farklı mikro yapılarıdaki mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin karanlıkta ve fotoiletkenlik özelliklerinin atmosferik yaşlanma ve Staebler-Wronski etkisi altında nasıl değişime uğradığını belirlemek, mikro-yapı ile ilişkisini ortaya çıkarmak ve literatürde pürüzsüz taban malzeme üzerine büyütülmüş ince film malzemeler ile sınırlı sayıda yayımlanmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırma yaparak mevcut problemin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Mikro-kristal silisyum malzemelerde atmosfer koşullarından kaynaklanan aynı zamanda yaşlanma etkisi olarak da bilinen kararsızlık problemi karanlıkta ve fotoiletkenlik yöntemleri ile incelenmiştir. İnce film malzemeler VHF-PECVD yöntemi kullanılarak 200 °C de tutulan pürüzlü taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. Filmlerin sahip oldukları mikro yapılar üretim sırasında kullanılan silan gazı oranı ayarlanarak değiştirilmiştir. Malzemelerin kristal hacim oranları Raman spektroskopisi ile belirlenmiştir. Malzemelerin elektronik bozunumu (yaşlanma) için iki farklı ortam (azot ve hava ortamı) kullanılmış, malzemeler ışık almayacak şekilde oda sıcaklığında saklanmış ve ölçümleri vakum ortamında gerçekleştirilmiştir. 77K-450K aralığında malzemeler hem karanlıkta hem de fotoiletkenlik ölçümleri alınarak yaşlanmış durumda ve ısıtılmış durumda karakterize edilmişlerdir. Kararlı durum fotoiletkenlik yöntemi, ışık akısı $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ den $10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e kadar olan dar bant ışık kullanılarak ve homojen bir optik soğurma altında gerçekleştirilmiştir. Belirli sıcaklıklarda ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden γ üstel parametresi hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular sonucunda laboratuvar ortamında, karanlıkta, oda sıcaklığı ve oda basıncında bekletilen yüksek kristal hacim oranına sahip mikro-kristal silisyum ince film malzemelerde ve amorf silisyum ince film malzemelerde yaşlanmadan kaynaklı iletkenliklerinde azalma ölçülmüştür. Azot gazı ortamında, karanlıkta, oda sıcaklığı ve basıncında bekletilen malzemelerde yaşlanmadan kaynaklı iletkenlikteki azalmaya karşı azot gazının bir koruyucu etkisi gözlenmemiştir. Yüksek kristal hacim oranına sahip olan mikro-kristal silisyum ince film malzemeler uzun süre ışık banyosuna maruz kaldıklarında iletkenliklerinde herhangi bir değişim oluşmamıştır. Uzun süre ışık banyosuna maruz bırakılan amorf silisyum ince film malzemelerde ise literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiş ve yüksek oranlarda (10-100 kat) iletkenliklerinde azalma ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Amorf ve mikro-kristal silisyum ince film malzeme, Laboratuvar atmosferinde yaşlanma, Staebler-Wronski etkisi, Karanlıkta iletkenlik yöntemi, Kararlı durum fotoiletkenlik yöntemi, Fotovoltaik yarı iletken ince film silisyum güneş gözelerinin soğurucu tabakası.

Sayfa adedi : 106
Tez yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

**INVESTIGATION OF INSTABILITY PROBLEM ON HYDROGENATED
MICROCRYSTALLINE SILICON THIN FILM MATERIAL BY USING
PHOTOCONDUCTIVITY METHOD**

(M. Sc.Thesis)

Gökhan YILMAZ

**MUĞLA UNIVERSITY
INSTITUTE of SCIENCE and TECHNOLOGY**

2009

ABSTRACT

The aims of the present study were to investigate the influence of ambient conditions on the dark and photoconductivity properties of microcrystalline silicon film with different microstructures, to get insight into the link between atmospheric aging and material composition, to investigate the possibility of using rough substrates for transport measurements and eventually to find standards for sample storage, treatment and measurement conditions.

Instability effects, related to the influence of ambient atmosphere (referred to as aging) on the dark and photoconductive properties of microcrystalline silicon films have been investigated. Thin films were deposited using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) at 200°C. Rough (for better adhesion) glass substrates were used. The microstructure of the films was changed from amorphous to highly crystalline by adjusting the process gas silane concentration during deposition. The crystallinity was evaluated from Raman measurements. Aging in different atmospheres such as air or nitrogen gas was performed by storing the samples at room temperature without illumination for a period of time and compared with samples stored in vacuum. Samples were characterized in both aged and annealed conditions (after 30 min heat treatment at 450K) using dark conductivity and steady state photoconductivity in the temperature range from 77 K to 450 K. Steady-state photoconductivity was measured under homogeneously absorbed monochromatic light for generation rates between 10^{16} - 10^{21} $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ and its exponent γ was calculated at each measurement temperature.

As a result of the data gathered from experiments, decrease at dark and photoconductivity of microcrystalline silicon thin films and amorphous silicon thin films, have been measured at the laboratory conditions, at room temperature and room pressure. Any preventing effect of ageing due to nitrogen gas at nitrogen gas medium, dark, room temperature and pressure, have not been observed. There has been no conductivity change at high crystalline volume fractioned microcrystalline silicon thin films, when they were light soaked. For prologues light soaked at amorphous silicon thin films, results, that are compatible with literature and previous studies, have been gathered and high amount of decrease at conductivity (10-100 times) have been measured.

Key Words: Amorphous and Microcrystalline Silicon Thin Films, Ageing in Laboratory Atmosphere, Staebler-Wronski Effect, Dark Conductivity Method, Steady State Photoconductivity Method, Semiconductor Silicon thin film Photovoltaic Absorber Layer.

Page number : 106

Adviser : Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No</u>		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Hidrojenlendirilmiş mikro kristal silisyum [$\mu\text{c-Si:H}$] ince filimin mikro yapısal özelliklerinin şematik gösterimi.....	4
Şekil 1.2	İnce film silisyum malzemelerin Raman grafiği.....	6
Şekil 1.3	PECVD yöntemi ile üretilmiş $\mu\text{c-Si:H}$ TEM görüntüsü.....	7
Şekil 2.1	Mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin büyütüldüğü çok odalı VHF-PECVD sisteminin resmi (Jülich Araştırma Merkezi, Fotovoltaik Enstitüsü, Jülich, Almanya).....	13
Şekil 2.2 a	Tezde kullanılan $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin kesiti.....	15
Şekil 2.2 b	Tezde kullanılan $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin üstten görünümü...	15
Şekil 2.3	Karanlık ve Kararlı durum Foto iletkenlik ölçüm sistemi.....	16
Şekil 2.4	Örnek Malzeme tutucu.....	17
Şekil 2.5	Tuzak ve yeniden birleşme merkezlerinin yarı iletken yasak enerji aralığındaki buldukları bölgeler.....	27
Şekil 2.6	Sıcaklıkla kuazi-Fermi seviyeleri ve doluluk durum fonksiyonundaki değişimi.....	28
Şekil 2.7	Sabit sıcaklıkta ışıl yaratma hızına bağlı olarak kuazi-Fermi seviyeleri ve doluluk durum fonksiyonundaki değişim.....	29
Şekil 3.1	Pürüzlü cam taban malzemesi üzerine SC= %3, %4, %5 ve %6 değerlerinde büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin PDS yöntemi ile ölçülmüş relatif optik soğurma katsayısı spektrumları.....	37
Şekil 3.2	SC= %2 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısı işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.....	39
Şekil 3.3	SC= %3 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısı işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.....	41
Şekil 3.4	SC= %4 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısı işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.....	42
Şekil 3.5	SC= %5 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısı işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.....	44

Şekil 3.6	SC= %6 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıtım işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.	45
Şekil 3.7	Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %2 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.....	47
Şekil 3.8	Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %3 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.....	49
Şekil 3.9	Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %4 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.....	51
Şekil3.10	Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %5 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.....	53
Şekil3.11	Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %6 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.....	55
Şekil3.12	Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen (a) Karanlıkta iletkenlik, (b) Aktivasyon enerjisi değerlerinin SC silan gazı oranına göre değişimi.....	58
Şekil3.13	Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen (a) Fotoiletkenlik, (b) Gamma değerlerinin SC silan gazı oranına göre değişimi.....	58
Şekil3.14	SC= %2 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtım işlem uygulanmış durum için ışık şiddetine göre değişimi	60
Şekil3.15	(a) SC= %2 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıtım işlem sonrası durumda $F=7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	62
Şekil3.16	SC= %3 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtım işlem uygulanmış durum ışık şiddetine göre değişimi.....	64

Şekil3.17	(a) SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıtıl işlem sonrası durumda $F=7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	65
Şekil3.18	SC= %4 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtıl işlem uygulanmış durum için ışık şiddetine göre değişimi	67
Şekil3.19	(a) SC= %4 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıtıl işlem sonrası durumda $F=7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	68
Şekil3.20	SC= %5 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtıl işlem uygulanmış durum ışık şiddetine göre değişimi.....	71
Şekil3.21	(a) SC= %5 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıtıl işlem sonrası durumda $F=7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	72
Şekil3.22	SC= %6 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtıl işlem uygulanmış durum ışık şiddetine göre değişimi.....	75
Şekil3.23	(a) SC= %6 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıtıl işlem sonrası $F=7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	76
Şekil3.24	Azot gazı doldurulmuş plastik torba içinde ve laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin (a) fotoiletkenlik (b) karanlıkta iletkenlik ve (c) γ üstel parametresinin, sıcaklıkla değişimi.....	79
Şekil3.25	SC= %2 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıtıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	82
Şekil3.26	SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıtıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	83
Şekil3.27	SC= %4 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıtıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	84

Şekil3.28	SC= %5 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	85
Şekil3.29	SC= %6 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	86
Şekil3.30	(a) SC=%2 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	89
Şekil3.31	(a) SC=%3 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	90
Şekil3.32	(a) SC=%4 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	91
Şekil3.33	(a) SC=%5 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	92
Şekil3.34	(a) SC=%6 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	93
Şekil3.35	Değişik silan gazı oranlarında büyütülmüş mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin ışık altındaki iletkenlik değerlerindeki bozunumun sıcaklığa bağlı değişimi.....	95

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No</u>		<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Tezde incelenen $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin Raman spektroskopisi yardımı ile belirlenen kristal hacim oranları (KHO).....	13
Tablo 2.2	Tezde incelenen $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin listesi.....	14

SEMBOLLER DİZİNİ

σ_D	Karanlıkta iletkenlik
σ_0	İletkenlik ön çarpanı
σ_{ph}	Fotoiletkenlik
I_d	Karanlıkta akım
I_{ph}	Işık altında akım
t	Kalınlık
p	Serbest deşik yoğunluğu
n	Serbest elektron yoğunluğu
d	Kontaklar arasındaki genişlik
V	Gerilim
q	Elektron yükü
l	Kontakların uzunluğu
$\mu\tau$	Mobilite yaşam süresi çarpımı.
G	Işıl yaratma hızı
F	Işık akısı (1cm^2 alana 1s 'de düşen foton sayısı)
QE	Kuantum verimliliği
α	Optik soğurma katsayısı
R	Yansıma katsayısı
A	Alan
T	Sıcaklık
γ	Fotoiletkenlik üstel parametresi
E_A	Aktivasyon enerjisi
E_F	Karanlıkta Fermi enerjisi
E_{Fn}	Elektronlar için kuazi Fermi seviyesi
E_{Fp}	Deşikler için kuazi Fermi seviyesi
E_C	İletkenlik bandı enerjisi
E_V	Değerlik bandı enerjisi
k	Boltzman sabiti
$g(E)$	Durum yoğunluğu

BÖLÜM 1: GİRİŞ

Hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ince film malzemeler görünür bölgede tek kristal silisyumdan, kızıl ötesi bölgede amorf silisyumdan daha yüksek optik soğurma katsayısına sahip olması sebebi ile çok katmanlı ince film silisyum fotovoltaik uygulamalarda düşük yasak enerji aralığına sahip soğurucu katman için en ideal malzemelerden biri haline gelmiştir. Fakat ince film büyütme koşullarının değişimi sonucu mikro yapısındaki amorf ve kristal oranları değişmekte, bunun sonucunda çok farklı elektronik ve optoelektronik özelliklere sahip $\mu\text{-Si:H}$ ince film malzemeler üretilmektedir. Bunun sonucunda, üretilen güneş gözelerinin enerji dönüşüm verimlerinde büyük değişim ortaya çıkmaktadır. Heterojen yapıya sahip bu tür ince film malzemelerin mikro yapı fiziksel özellikler arasındaki ilişkilerin anlaşılması hem bilimsel olarak hem de teknolojik olarak büyük önem arz etmektedir.

1.1 Kaynak Özetleri

İlk hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{-Si:H}$) ince film malzeme Veprek ve Marecek tarafından 1968 yılında $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ de hidrojen plazma ve kimyasal iletim metodu kullanılarak silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gazlarından elde edilmiştir (Veprek ve Marecek, 1968). Bu çalışmanın ardından yaklaşık 10 yıl sonra Usui ve Kikuchi hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum malzemeyi “Plazma Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme” (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)) yöntemini kullanarak üretmişlerdir [Usui ve Kikuchi, 1979]. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) üretmek için oldukça gelişmiş olan 13,56 MHz RF-PECVD yöntemi, çok az sayıda sistem değişiklikleri yapıp, silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gazları kullanılarak hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{-Si:H}$) ince film malzeme üretiminde de oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Fakat, mikro-kristal silisyum ince film büyütme hızları amorf silisyum büyütme hızlarına göre çok düşüktür ($\sim 1\text{-}2\text{ \AA/s}$). Mikro-kristal silisyum malzemenin temel özellikleri hakkındaki ilk çalışmalar Veprek ve çalışma arkadaşları tarafından 1980’lerin başlarında yayımlanmıştır (Veprek 1983). Bundan sonra uzun bir süre bu malzeme hakkında yayımlanmış çalışma görülmemektedir. Ancak, 1990’da Wang ve Lucovsky, 1992’de Faraji ve arkadaşları tarafından mikro-kristal silisyum ince film

malzemeler ilk olarak güneş gözelerinin soğurucu tabakası olarak kullanılabilceği anlaşılmış ve bu konu üzerinde bir çok araştırma yapmışlardır (Lucovsky,1990; Faraji,1992). Yaptıkları araştırmalar sonucunda katkılanmamış mikro-kristal silisyum malzemenin optik soğurma katsayısının 1,4 eV seviyesinde hem kristal silisyumdan hem de amorf silisyumdan fazla olduğu ve uzun süre ışığa maruz kalmalarında dahi Staebler-Wronski etkisinin göstermemesidir (Lucovsky,1990; Faraji,1992). Bu özellik mikro-kristal silisyumu güneş hücrelerinin optik soğurucu tabakası olarak önemli bir malzeme haline getirmiştir.

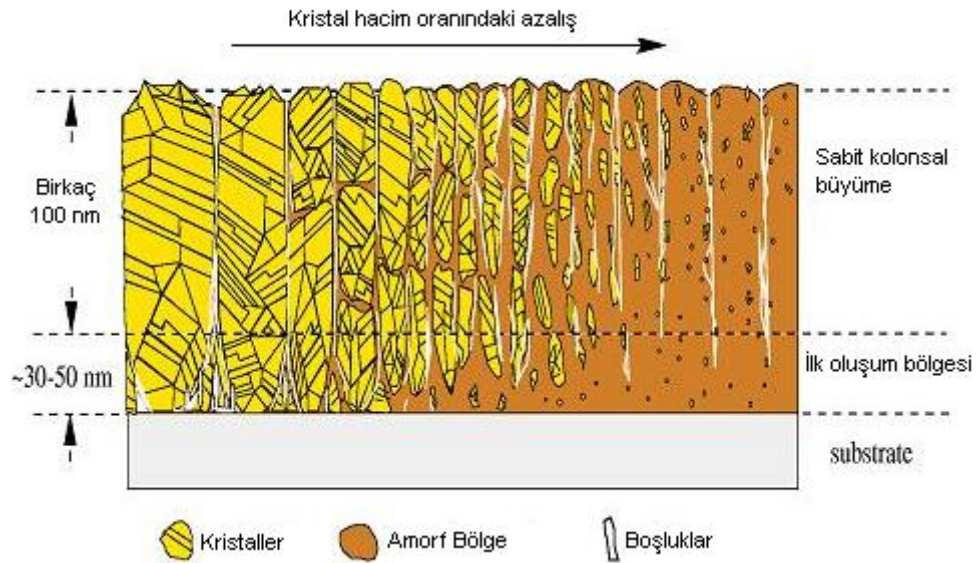
1994'de Meier ve çalışma arkadaşlarının standart 13,56 MHz RF-PECVD tekniğini geliştirerek çok yüksek frekanslarda çalışan (70 MHz ve üstü) RF-PECVD tekniğini uygulayarak malzeme büyütme hızı ve elektronik kalitesini arttırmayı başarmışlar ve ilk olarak güneş hücresindeki optik soğurucu tabaka olarak kullanılan mikro-kristal silisyumun Staebler-Wronski etkisine sahip olmadığını gözlemlemişlerdir (Finger,1994; Meire,1994). Bu çalışmaların sonucunda, yeni tasarlanan bu sistem “ çok yüksek frekanslı plazma yardımcı kimyasal buhar fazdan büyütme sistemi” (very high frequency Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (VHF-PECVD) method) olarak mikro-kristal silisyum ince film malzemenin üretiminde araştırma laboratuvarlarında kullanılmaya başlanmıştır. VHF-PECVD tekniğinde oluşan plazma içindeki yüksek enerjili iyonların taban malzemesi üzerinde büyümekte olan ince film malzemeyi bombalayabilmekte ve malzemenin elektronik kalitesini etkilemektedir. İnce film malzeme büyütme işlemi SiH₄ gazının toplam (SiH₄+H₂) gazlara oranı değiştirilerek kristal hacim oranı çok yüksek malzemeden tamamen amorf yapıya kadar değişen mikro yapıya sahip malzemeler üretilmektedir. Taban malzemenin sıcaklığı 200 °C ile 300 °C arasında değişmektedir.

µc-Si:H ince film üretiminde kullanılan diğer bir yöntem ise “Kızgın Tel Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme Tekniği” (HWCVD) olarak bilinen yöntemdir. Bu ince film büyütme yönteminde vakum odasında wolfram tellerden yüksek dc akımı geçirilerek akkor haline gelmesi sağlanır ve 1500-2000 °C sıcaklıkta kızgın tel üzerine gönderilen silan ve hidrojen gazlarının parçalanması sonucu açığa çıkan radikaller (PECVD yönteminde olduğu gibi) taban malzeme üzerine depolanır. RF-PECVD ve VHF-PECVD tekniklerinde olduğu gibi HW-CVD ile büyütülen

mikro-kristal silisyum ince film malzemenin kristal oranları silan gazı oranı $SC=SiH_4/(SiH_4+H_2)$ tarafından kontrol edilmektedir. Fakat, HWCVD tekniğinde plazma yoktur. Dolayısı ile plazma içerisinde oluşan yüksek enerjili iyonların taban malzemesi üzerinde büyümekte olan ince film malzemeye verdiği zararlar (elektronik kusurların yaratılması gibi) HWCVD ile üretilen malzemelerde mevcut değildir. Bundan dolayı, HWCVD tekniği çok nazik ve yumuşak bir şekilde malzeme büyütme tekniği olarak hızla teknolojik önem kazanan bir teknik olmaktadır.

Mikro-kristal silisyum malzemelerin büyütülmesi hangi yöntem kullanılarak yapılırsa yapılsın, malzemenin mikro yapısı kristal adacıklar, adacıkları sarmalayan amorf tabakalar ve “void” olarak adlandırılan boşluk kısımlardan oluşmaktadır. Dolayısı ile mikro-kristal silisyum ince film malzemenin standart özellikte bir mikro yapısı mevcut değildir. Heterojen bir yapıya sahiptir (Finger, 2003). Yayımlanmış bilimsel çalışmalarda mikro-kristal silisyum malzemenin kristal oranları referans alınarak malzemenin özellikleri yayımlanmaktadır. Kristal adacıkların boyutları birkaç nanometreden birkaç yüz nanometreye kadar değişebilmektedir.

Hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu c-Si:H$) ince film malzemenin mikro yapısal özelliklerinin anlaşılması malzemenin optiksel ve elektronik özelliklerinin doğru bir şekilde yorumlanmasına olanak sağlayacaktır. Almanya'nın Jülich Araştırma Merkezi Fotovoltaik Enstitüsü araştırmacıları tarafından yayımlanan mikro-kristal silisyum malzemenin mikro yapısındaki değişim şematik olarak şekil 1.1'de gösterilmiştir. Şekil 1.1 e bakacak olursak sol taraftaki yüksek kristal hacim oranının sağa doğru gidildikçe azaldığı ve amorf fazın arttığı net bir şekilde görülmektedir. Bu fazların oluşumu üretim sırasında kullanılan silan gazı oranının yüksek olması ya da düşük olması sonucu oluşmaktadır. İnce film malzeme üretimi sırasında yüksek oranda silan gazı kullanılması malzemeyi amorf yapı olarak oluştururken düşük silan oranı kullanılması sonucunda malzemenin sahip olduğu kristal hacim oranı artmaktadır. $\mu c-Si:H$ malzemenin mikro yapısal özelliklerine bakacak olursak, içeriğinin heterojen bir yapıya sahip olduğunu ve bu heterojen yapının damarlı yapılar (grain), boşluklar (void), mikro adacıklar halinde bulunan kristaller ve bu adacıkları çevreleyen hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) tabakalardan oluştuğu görülmektedir. Yukarıda bahsedilen bu yapılar şekil 1.1 deki şematik çizimde ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.



Şekil 1.1: Hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum [$\mu\text{c-Si:H}$] ince filmin mikro yapısal özelliklerinin şematik gösterimi. (Vetterl 2000)

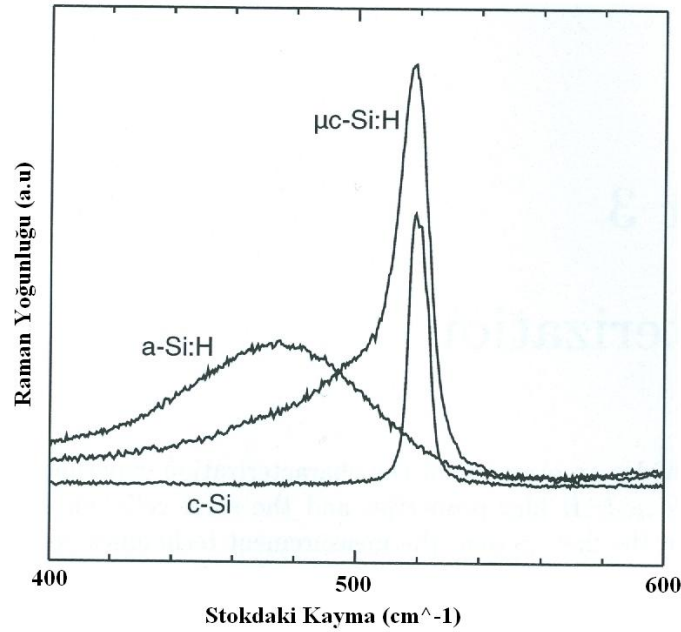
Malzeme içerisindeki kristal adacıklar malzemenin büyüme ekseninde ilerlemekte ve birbirlerine paralel bir yönelimde bulunmaktadır (Finger, 1998, Shah, 2003). $\mu\text{c-Si:H}$ malzeme içerisindeki mikro adacıkların çapı üretim esnasındaki SC'na bağımlı olmakta ve bu adacıkların düzensiz bir şekilde damarsı yapılar tarafından sarıldığı bilinmektedir (Finger, 1998). Malzeme üretimi esnasında geçiş fazı olarak adlandırılan bir faz vardır ve bu faz SC %7 ile %9 arasında gerçekleşir (Brueggemann, 2000, Vetterl, 2000, Shah, 2000). Bu geçiş fazında malzeme ne tamamen amorf yapıdadır ne de çok yüksek kristal oranına sahiptir. Geçiş fazında iken malzeme içerisinde rastgele ve düzensiz birçok kristal adacıklar vardır ve bu adacıklar amorf matrisi içerisinde bulunur. Şekil 1.1'deki gibi mikro yapıdaki kristal oranındaki değişimin silan gazı oranına göre değişimini belirten benzer bir çalışma Shah ve grubu tarafından geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak belirlenmiştir (Shah ve grubu 2000).

Mikro-kristal silisyum ince film malzemenin mikro yapısının bilinmesi ve buna bağlı olarak elektriksel ve opto-elektronik özelliklerin anlaşılması ve teknolojik aygıt uygulamaları için son derece önem kazanmaktadır. Değişik SC oranlarında büyütülen mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin mikro yapı analizleri yaygın

olarak kullanılan Raman spektroskopisi, X-ışınları spektroskopisi ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) yöntemleri ile yapılmaktadır.

Raman spektroskopisi $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin mikro yapısal özelliklerinin karakterize edilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Raman spektroskopisi malzemenin sahip olduğu kristal hacim oranı hakkında bilgi vermektedir. Deney genellikle geri saçılma geometrisini temel almaktadır. Gönderilen ışın demetleri (fotonlar) malzeme ile dik bir açıya sahiptir ve esnek olmayan saçılmaları sonucu fononlar (örgü titreşimleri) üretilir ya da soğurur. Bu etkileşim sonucunda ise foton enerji kaybeder ya da kazanır. Bu değişim gelen ışının frekansında kaymalara sebep olur. Frekanstaki bu kaymalar bize malzeme içerisindeki kristal hacim oranı hakkında bilgi vermektedir. Örnek olarak, kristal silisyumdaki (c-Si) fononların (örgü titreşimleri) momentumunun korunması sonucu dalga sayısı $k=520\text{ cm}^{-1}$ de ve tepe değerinin yarı yüksekliğinde iken ölçülen maksimum genişlik $3,5\text{ cm}^{-1}$ civarındadır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) ince film malzeme içerisinde uzun ve sürekli bir düzen görülmediğinden momentumun korunumu uygulanamamaktadır. Bunun sonucunda, amorf silisyumda $k=480\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında ve tepe değerinin yarı yüksekliğinde iken ölçülen maksimum genişlik 60 cm^{-1} civarında yayvan bir tepe gözlenmektedir. Heterojen bir yapıya sahip hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler ise hem amorf hem de kristal bölgelere sahip olduğundan, yukarıda bahsedilen iki tepede iç içe geçmiş bir şekilde gözlenmektedir. Buna ek olarak hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemelerde $k=505\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı değerinde bir tepe değeri daha gözlenmektedir (Houben 1998). Şekil 1.3 de mikro-kristal silisyumun üç farklı mikro yapı için sahip olduğu Raman spektrumları gösterilmiştir. Raman spektrumu 480 cm^{-1} , 520 cm^{-1} ve 505 cm^{-1} dalga sayılarına karşılık gelen eğrilere ayrıştırılarak her eğrinin altında kalan alan hesaplanır. Bunun sonucunda malzeme içerisindeki kristal ve amorf fazın oranları hesaplanmaktadır. Bu hesaplama sonucu I_C^{RS} kristal hacim oranı aşağıda verilen eşitlik yardımı ile bulunmaktadır.

$$I_C^{RS} = \frac{I_{520} + I_{505}}{I_{520} + I_{505} + I_{480}} \quad (1.2)$$

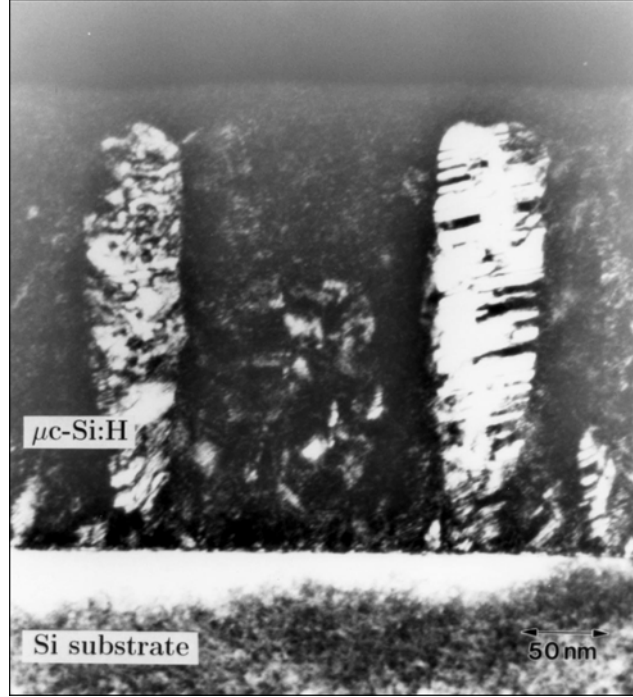


Şekil1.2 İnce film silisyum malzemelerin Raman grafiği[Vetterl 2001, Doktora TEZ]

X-ışınları kırınımı spektroskopisi hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemenin yapısal özelliklerinin anlaşılmasında kullanılan diğer bir yöntemdir (Houben 1998). Kristal silisyumun sahip olduğu farklı düzlemler için farklı kırınım düzenleri vardır. Örnek olarak (2θ) $\langle 111 \rangle$ $28,4^\circ$, $\langle 220 \rangle$ $47,3^\circ$, $\langle 311 \rangle$ $56,1^\circ$. Amorf silisyum malzemelerde ise bu tepeler daha yayvandır ilk tepe 27° ikincisi ise 52° dedir. Malzeme içerisindeki kristal hacim oranını belirleyebilmek için kristal ve amorf tepe değerlerinin altında kalan alanların toplanması ve bu alanların toz kristal ve amorf değerlerine kalibre edilmesi gerekmektedir.

Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince filmin görsel olarak görülebileceği ilk yerdir. Temeli elektronların kırınımına dayanır. Elektronlar çok ince filmlerden ya da boşluklardan direk geçmektedirler ancak kristal bölgelerde ve amorf bölgelerde saçılmalara uğramaktadırlar. Bu saçılmalar bir renk karşıtlığı yaratmaktadırlar. Karanlık figürlerde kristal bölgeler açık renkte görülmektedirler. Yukarıdaki bölümlerde

danlatıldığı gibi SC artışı ya da azalışı ile malzemedeki kristal büyüme eksenleri (kolonsal ya da küresel) TEM sayesinde net bir şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 1.3 PECVD yöntemi ile üretilmiş $\mu\text{c-Si:H}$ TEM görüntüsü (Vetterl 2000)

Yüksek SC oranlarında büyütülen ince film silisyum malzeme tamamen amorf fazındadır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum içinde silisyum atomları rast gele dizilmiş, atomlar arası bağ uzunlukları, bağ açıları belirli bir istatistiksel dağılım göstermemektedir. Silisyum atomunun tek kristal yapıda sahip olduğu dört kovalent bağı amorf yapıda tamamen oluşmamıştır. Bağların bazıları kırık ya da sallanan bağ özelliğindedir. Sallanan bu bağların bir kısmı hidrojen atomu ile pasif hale getirilmiştir. Bazıları ise tek elektronlu (yüksüz) silisyum sallanan bağ, iki elektronlu (negatif yüklü) silisyum sallanan bağ ve hiç elektronu olmayan (pozitif yüklü) silisyum sallanan bağ olarak ortaya çıkmaktadır. Elektron spin rezonans yöntemi ile karanlıkta ve ışık altında yapılan ölçümler bu bağların karakteristik “gyromanyetik”

(g) sabitlerini belirlemiştir. Fakat, büyüme işlemi sırasında SC oranı azaldığında oluşan malzeme mikro-kristal silisyum malzeme olarak değişik kristal ve amorf oranlarında oluşmaktadır. Bunun sonucu mikro-kristal silisyum yapısında oluşan elektronik kusurların yapıları ve doğaları da farklılık göstermektedir. ESR ölçümleri amorf silisyumda mevcut kusurlardan farklı gyromanyetik sabitlerde elektronik kusurları algılamaktadır (Finger, 2003). Sonuç olarak heterojen bir yapıya sahip $\mu\text{-Si:H}$ ince film malzemelerin mikro yapılarında oluşan elektronik kusurlar malzemenin elektriksel, optik ve optoelektronik özelliklerini kontrol eden başlıca etmenler haline gelmektedir. Bu tür ince film malzemelerden üretilen çok katmanlı ince film silisyum güneş gözelerinin enerji dönüşüm verimlerini belirleyen en önemli parametredir. Dolayısı ile mikro-kristal silisyum malzemelerin mikro yapılarında oluşan elektronik kusurların proses koşulları ve değişen mikro yapı ile nasıl etkilendikleri henüz çok iyi anlaşılmamıştır.

1994 yılında Meier ve arkadaşlarının yayımladıkları çalışma ile mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin güneş gözelerinin soğurucu tabakası olarak kullanılabilceği, üretilen güneş hücrelerinin enerji dönüşüm veriminin %4,6, açık devre geriliminin $V_{oc}= 389$ mV ve doluluk faktörünün $FF= \%60$ olduğu, ışık altında uzun süre beklemesi sonucu Staebler-Wronski etkisini göstermediği belirlendi (Meire,1994). Mikro-kristal silisyum malzemenin fotovoltaik bir soğurucu tabaka olarak kullanılmasında bazı temel özelliklerinin ayrıntılı karakterizasyonunu gerektirmektedir. Bunlardan en önemli olanlarından birisi optik soğurma katsayısı spektrumunun ölçülmesidir. Fotovoltaik soğurucu katmanın optik soğurma katsayısı spektrumunun güneş spektrumu ile örtüşmesi gerekmektedir. Mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin optik soğurma katsayısı ölçüm yöntemleri olarak hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzemeler için geliştirilen yöntemler kullanılmıştır.

Bunlar sırası ile, Isıl Işın Saptırma Spektroskopisi (**Photothermal Deflection Spectroscopy (PDS)**), Sabit Işık altında akım Yöntemi (**Constant Photocurrent Method (CPM)**) ve İki Demetli Fotoiletkenlik Yöntemidir (**Dual Beam Photoconductivity (DBP)**). PDS yöntemi ilk olarak 1981 yılında Jackson ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve amorf silisyum malzemelere uygulanmıştır (Jackson 1981). Mikro-kristal silisyumla ilgili optik soğurma katsayısına ait

çalışmalar Veprek ile başlamış daha sonra çok sayıda araştırmacı PDS yöntemini kullanarak $\mu\text{-Si:H}$ malzemenin optik soğurma katsayısı spektrumunu ölçmüşlerdir (Beck 1996, Bronner 2000, Vanecek 1998, 2000, Veprek 1981, Göktaş, 2006).

PDS yöntemine ek olarak, CPM ve DBP yöntemleri kullanılarak VHF-PECVD ve HWCVD yöntemleri ile büyütülen mikro-kristal silisyum ince film malzemenin optik soğurma katsayısı spektrumundaki değişimlerin, malzemenin büyütülmesinde kullanılan silan gazı oranının değiştirilmesi ile amorf silisyumun optik soğurma katsayısı spektrumundan mikro-kristal silisyumun optik soğurma katsayısı spektrumuna doğru kaydığı gözlemlenmiştir (Göktaş, 2006). Değişik SC gaz oranlarında büyütülen malzemenin optik soğurma katsayısı spektrumlarını PDS ve DBP yöntemlerini aynı malzemeye uygulayarak en düşük elektronik kusur yoğunluğuna sahip mikro-kristal malzemenin geçiş fazı bölgesindeki SC gazı oranlarında büyütülen mikro-kristal malzemelerde olduğunu göstermişlerdir.

Mikro-kristal silisyum malzemelerin amorf silisyum malzemelerden üstün özelliği ışığa karşı bozunum etkisi göstermemesidir. Fakat, üretilen malzemelerin mikro yapısının gözenekli ve geçirgen olmasından dolayı vakum ortamında büyütülen malzemeler hava ortamına çıkarıldığında atmosfer gazları kolaylıkla malzeme içine iç difüzyon yolu ile girip, karanlıkta ve fotoiletkenlik değerlerini aşırı miktarlarda değiştirmektedir. Atmosfer gazlarından kaynaklı yaşlanma olarak adlandırılan bu etki malzemenin en önemli problemidir. İlk defa 1983 yılında Veprek ve arkadaşları tarafından keşfedilmiş olmasına rağmen 20 yıl boyunca bu konuda bir çalışma yapılmamıştır. Mikro-kristal silisyumun oksijen gazına maruz kaldığında karanlıkta iletkenlik değerinin birkaç merteye azaldığını ve ısıl işlem sonrası tekrar geri döndüğü yayımlanmıştır (Veprek,1983). O tarihte üretilen malzemelerin elektronik kalitesi çok düşük olduğundan gözlenen kararsızlık etkileri pek dikkat çekmemiştir. Ancak, en ayrıntılı çalışma 2003 yılında Finger ve çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır. Değişik mikro yapıya sahip malzemeler üzerinde karanlıkta iletkenlik ve elektron spin rezonans deneyleri ile kararsızlık problemi ayrı ayrı tanımlanmıştır. 1.tür (Tip I) kararsızlık problemine sahip olan malzemeler yüksek kristal hacim oranı ve geçirgen gözenekli yapıya sahip malzemelerde karanlıkta iletkenlik yaşlanma sonucu azalmaktadır. 2.tür (Tip II) kararsızlık problemi düşük kristal hacim oranına sahip ve geçiş bölgesinde büyütülen mikro-kristal silisyum

malzemelerde $I_C^{RS} = 0,20-0,40$ görülen bir kararsızlık problemi. Karanlıkta iletkenlik yaşlanma ile artmaktadır. Daha sonra, Smirnov ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda hem Tip I hem de Tip II türü kararsızlık problemleri değişik SC oranlarında büyütülmüş malzemelerde gözlenmiştir (Smirnov,2004,2006). Karanlıkta iletkenlikteki azalmanın nedeni Fermi seviyesinin iletkenlik bant ucundan uzaklaşmasına bağlanmıştır. Bunun nedeni olarak malzeme içine difüzyon ile giren atmosfer gazlarının yarattığı istem dışı katkılama etkisine bağlamışlardır. Bu araştırmalar, oda sıcaklığında ve sadece tek bir malzeme kullanılarak fotoiletkenlik ölçümleri yardımıyla yapılmış ve Tip II türü bir değişim gözlemiştir. Aynı zamanda γ üstel parametresinde değişim olduğu da yayımlanmıştır. Işık altında bozunum etkisi incelendiğinde malzemelerin oda sıcaklığında Staebler-Wronski etkisi göstermediği bulunmuştur (Smirnov,2004,2006). Ayrıca, tranzient fotoiletkenlik ölçümleri sonucunda yaşlanma ile yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurlarda bir değişimin olduğu gösterilmiştir. S. Reynold ve arkadaşları ise mikro-kristal silisyum malzemedeki yaşlanmanın Fermi seviyesindeki değişime neden olduğu ve kısmi ısıl işlemler sonunda elde edilen aktivasyon enerjileri ile iletkenlik ön çarpanı σ_0 arasında Meyer- Neldel kuralına göre olduğu bulunmuştur (Smirnov,2004). Aynı tür çalışma R. Brüggeman tarafından da yayımlanmıştır. Literatürde mikro-kristal silisyum malzemenin kararsızlık problemi üzerinde çok sınırlı sayıda çalışma vardır. Çalışmaların çoğu aynı grup tarafından yapılmıştır. Problemin incelenmesinde kullanılan yöntemlerin bir kısmı malzemeyi hava ortamında ölçtüğü için (yöntemin doğası gereği) diğer yöntemlerin uygulanmasında kısıtlamalar da mevcuttur. Literatürde yapılan çalışmalarda pürüzsüz cam üzerine büyütülen malzemeler kullanılmıştır. Bu tür malzemelerin pürüzsüz cam üzerine yapışma problemi olmasından amorf silisyum gibi 1 μm kalınlığında malzeme büyütme problemlidir. Malzeme vakum ortamından çıktıktan sonra büyütme işlemi sırasında oluşan stresten dolayı hemen soyulmaktadır. Bu problemi önlemek için malzemeler çok ince (50-1000 nm) yapılarak deney yapılabilen ya da pürüzlü cam üzerine büyütülmektedir. Pürüzlü cam üzerine büyütülen malzemelerin incelenmesinde bazı yöntemler, özellikle ışık uygulanan yöntemlerin sonuçlarının analizi, kolay değildir. Literatürde yapılan çalışmalar problemin anlaşılmasında henüz çok sınırlıdır.

1.2. Tezin Amaçları

Bu tezin amaçları birkaç aşamalıdır. İlk olarak pürüzlü cam üzerine değişik silan gazı oranlarında büyütülen mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerlerinin atmosfer gazlarına maruz bırakıldıktan sonra nasıl değiştiğini bulmaktır. Bu amaç için oda sıcaklığındaki ölçümlerle değil 77K ile 450K arasındaki geniş sıcaklık aralığında yapılan ölçümlerle oluşan kararsızlık problemini incelemek ve literatürde yayımlanmış aynı özellikteki malzemelerinki ile karşılaştırmaktır. Pürüzlü cam üzerine büyütülen malzemelerin sonuçlarını literatüre sokmaktır. İkinci amaç olarak fotoiletkenlik ile ışık şiddeti arasındaki ilişkinin, γ üstel parametresinin, $(\sigma_{ph} \propto F^\gamma)$ sıcaklıkla değişiminden malzeme içinde mevcut kusurların neden olduğu yeniden birleşme mekanizmalarını anlamaya çalışmak ve literatürde henüz yapılmamış bu bilgileri üretmektir. Tezin üçüncü amacı, atmosfer ortamındaki yaşlanmayı önleyecek ya da koruyabilecek bir yöntem olarak malzemeleri azot gazı doldurulmuş plastik torbalarda saklayarak azot gazının kararsızlık problemine ne tür etkisi olduğunu araştırmaktır. Tezin son amacı ise, değişik kristal hacim oranlarında üretilmiş mikro-kristal silisyum malzemelerin yüksek ışık şiddeti altında beyaz ışığa karşı dayanıklılığının, Staebler-Wronski etkisini gösterip göstermediğini araştırmak ve pürüzsüz cam üzerine büyütülerek literatürde yayımlanmış sonuçlarla karşılaştırmaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için malzemeleri ısıtma sonrası oda sıcaklığında havaya maruz bırakmadan, vakum ortamındayken, ışık banyosuna tutarak sadece Staebler-Wronski etkisi ile oluşacak değişimleri karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik yöntemleri ile gözlemlemektir. Son olarak, yapılacak bu çalışmalar literatürde henüz yer almadığından elde edilen bulguları konferanslarda sunmak ve yazılı dergilerde yayımlamaktır.

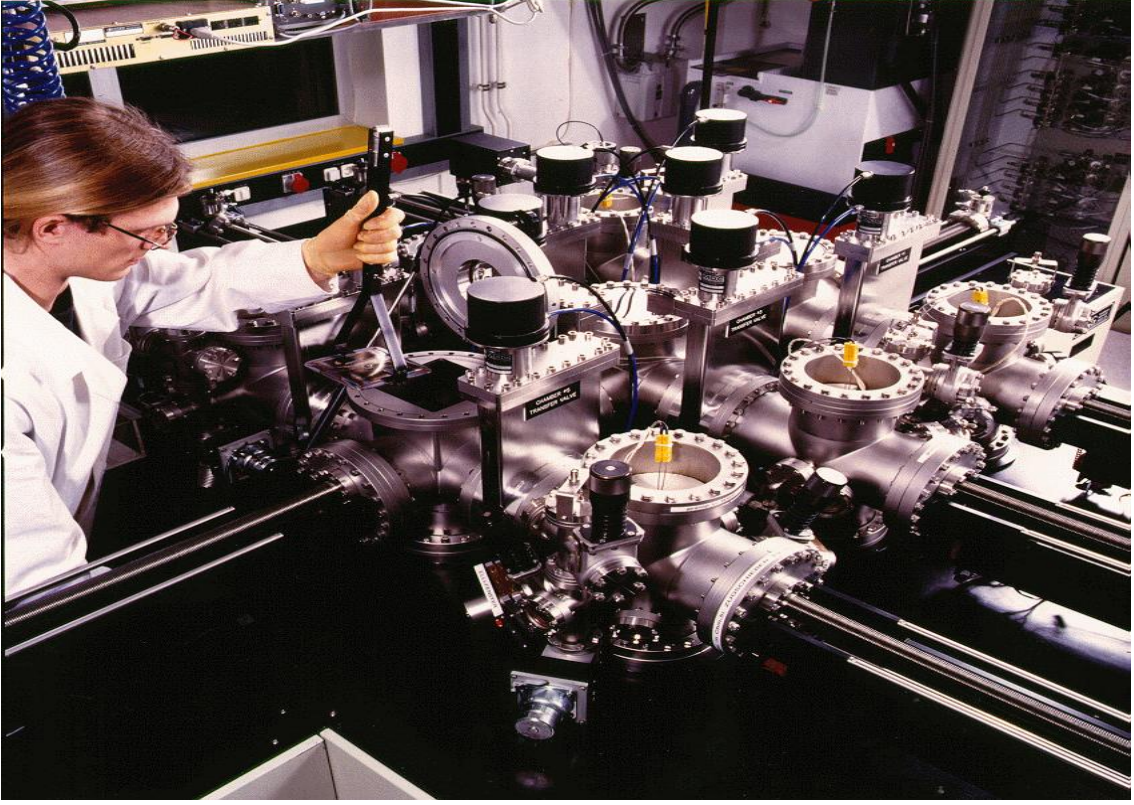
BÖLÜM 2: MALZEMELER VE DENEYSEL YÖNTEMLER

2.1 Giriş

Bu bölümde tezin hazırlanmasında kullanılan mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin hazırlık koşulları ve malzeme parametreleri ile bu malzemelerin deneysel incelenmesinde kullanılan yöntemlerin tanıtımı yapılmakta ve uygulama koşulları anlatılmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla deneysel ölçüm sistemi, ışık kalibrasyonu, mikro-kristal silisyumun bozunma işlemleri, vakumda tavlama (ısıtım işlemi), sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik, ışık şiddetine bağlı kararlı durum fotoiletkenlik, sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik yöntemlerinden oluşmaktadır.

2.2 Mikro-kristal Silisyum İnce Film Malzemelerin Büyütülmesi

Bu tezde incelenen hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler Şekil 2.1 de gösterilen “Çok Yüksek Frekanslı Plazma Yardımlı Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme Tekniği” kullanılarak (Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition VHF-PECVD) Almanya'nın Jülich Araştırma Merkezi Fotovoltaik Enstitüsünde büyütülmüştür. VHF-PECVD tekniği kullanılarak tek vakum odasında, aralarındaki mesafesi 2 cm olan elektrotlara elektrik alan uygulayarak, vakum odasına gönderilen silan (SiH_4) ve hidrojen (H_2) gaz karışımından bir plazma üretilmiş ve plazma içerisindeki radikallerin 260°C deki pürüzlü cam taban malzemeye tutunması sağlanarak büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Silan ve hidrojen gazlarının akış hızları değiştirilerek ve silan gazı oranı, SC= %2 ile %6 arasında ayarlanarak pürüzlü cam taban malzemesi üzerine 700nm kalınlığında hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler büyütülmüştür. Belirtilen kalınlıkta pürüzsüz cam üzerine büyütülen malzemeler cam üzerine yapışma problemine sahip olmasından dolayı yaşam ömrü kısa olmuş ve incelenememiştir. Hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemenin listesi ve hazırlık koşulları Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin büyütüldüğü çok odalı VHF-PECVD sisteminin resmi (Jülich Araştırma Merkezi, Fotovoltaik Enstitüsü, Jülich, Almanya)

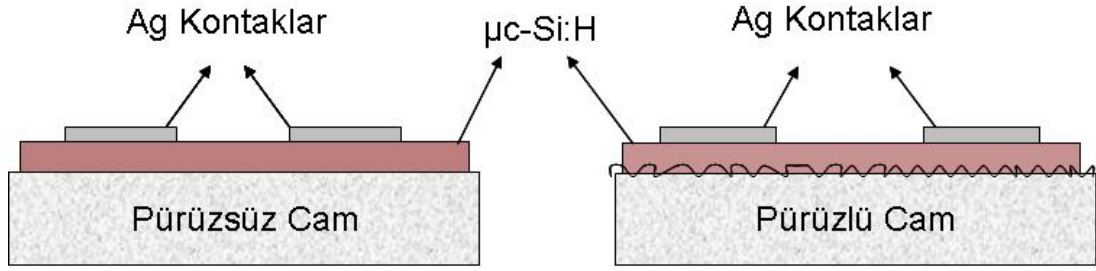
Tablo 2.1. Tezde incelenen $\mu\text{-Si:H}$ ince film malzemelerin Raman spektroskopisi yardımı ile belirlenen kristal hacim oranları (KHO).

Örnek Malzeme Kodu	SC	KHO (%)= I_C^{RS}
08B407	2	76
08B304	3	70
08B308	4	27
08B310	5	0
08B315	6	0

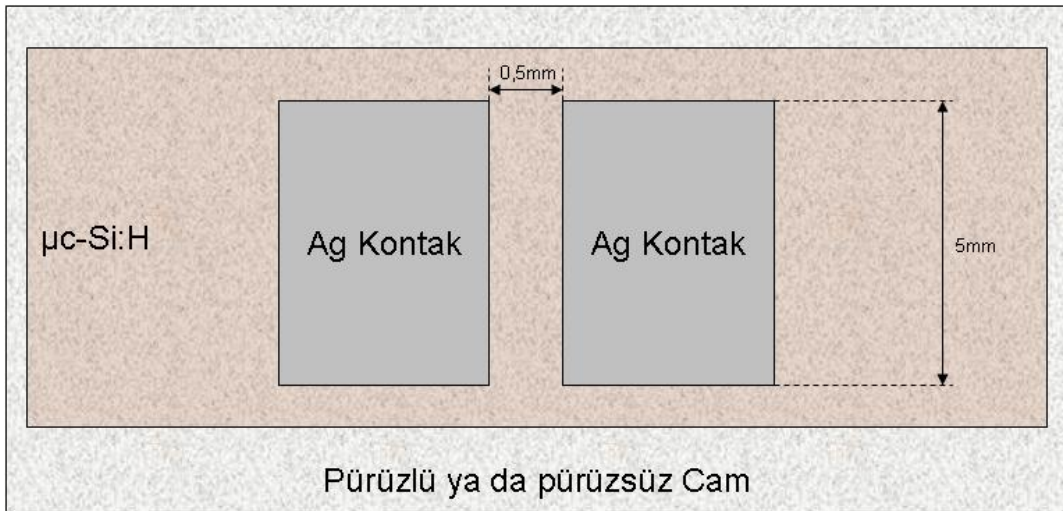
Tablo 2.2. Tezde incelenen $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin listesi

Malzeme Kodu	Taban Malzemesi	SC (%)	Kalınlık (cm)	Yaşlandırıldığı Atmosfer
08B407	Pürüzlü Cam	2	7,0 E-5	Oda koşulları
08B304	Pürüzlü Cam	3	7,0 E-5	Oda koşulları
08B304	Pürüzlü Cam	3	7,0 E-5	Azot Gazı doldurulmuş plastik torba
08B308	Pürüzlü Cam	4	7,0 E-5	Oda koşulları
08B308	Pürüzlü Cam	4	7,0 E-5	Azot Gazı doldurulmuş plastik torba
08B310	Pürüzlü Cam	5	7,0 E-5	Oda koşulları
08B315	Pürüzlü Cam	6	7,0 E-5	Oda koşulları

Büyütülen hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler daha sonra vakumlu metal buharlaştırıcı (Evaporator) sistemine yerleştirilmiş ve elektrot maskesi kullanılarak şekil 2.2 'de de görülen örnek malzeme geometrisinde gümüş metal kontaklar oluşturulmuştur. İncelenen hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemelerin kesit ve üstten görünüşü şekil 2.2a ve şekil 2.2b' de gösterilmiştir. Bu tasarımda, gümüş kontakların boyu 5mm ve aralarındaki uzaklık ise 0,5mm'dir.



Şekil 2.2a. Tezde incelenen $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin kesiti

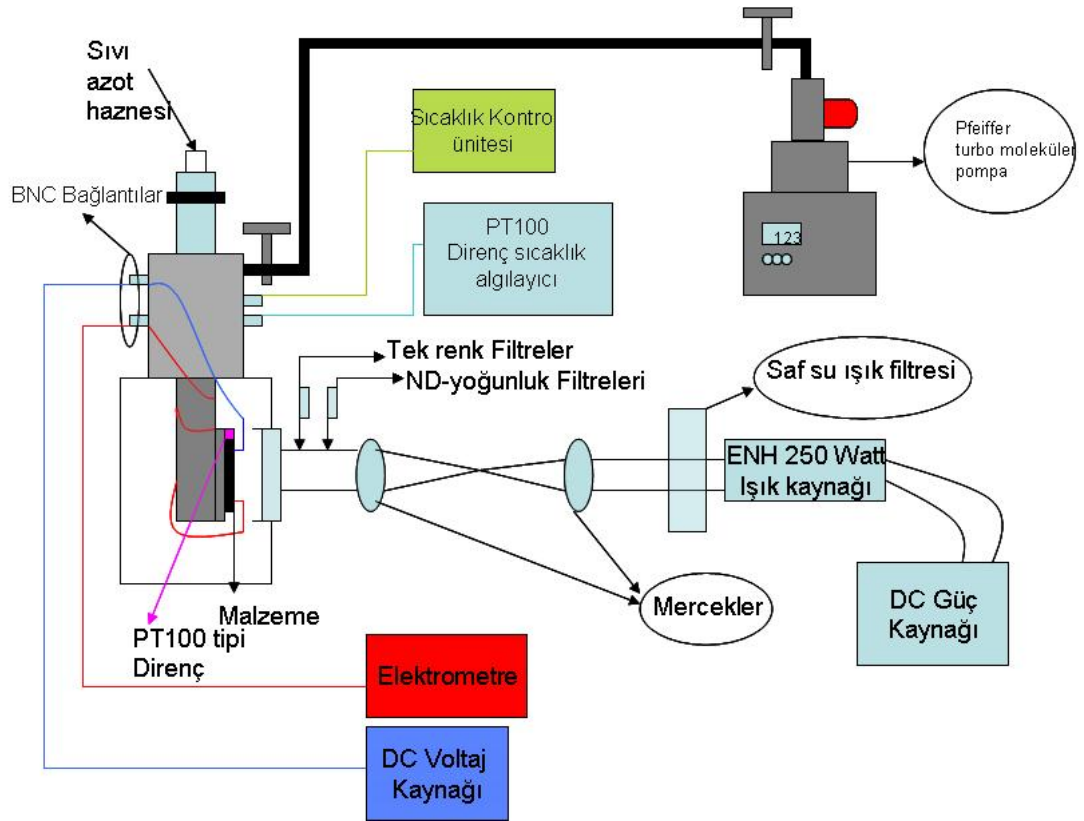


Şekil 2.2b. Tezde incelenen $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemelerin üstten görünümü

2.3 Karanlıkta İletkenlik ve Fotoiletkenlik Ölçüm Sistemi

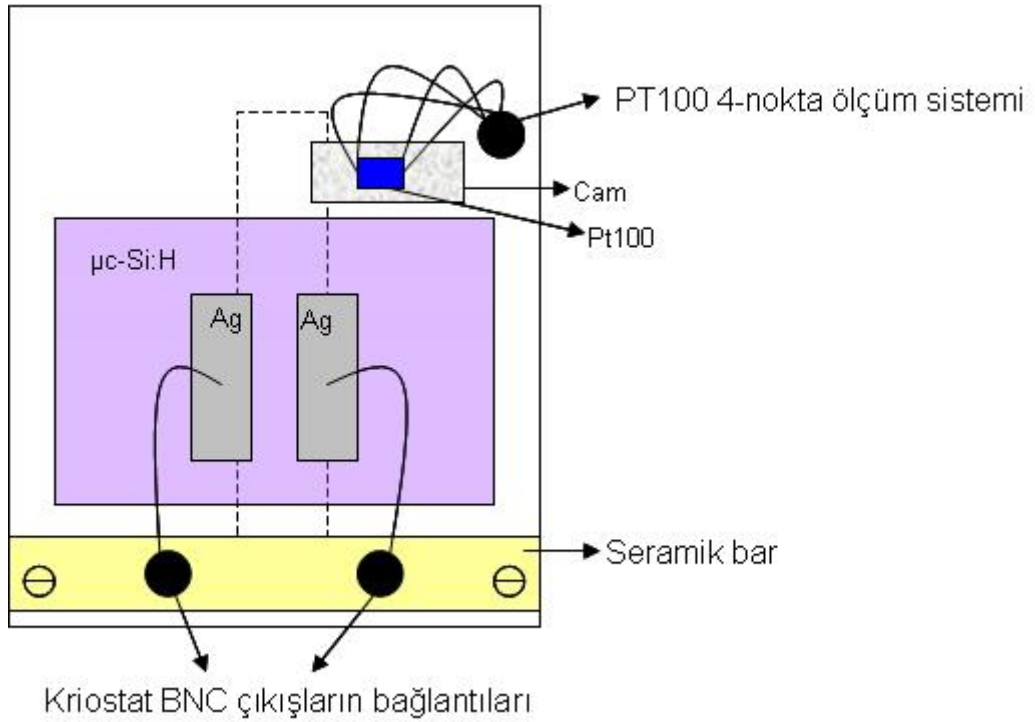
Bu tezde yapılan bütün ölçümlerde kullanılan ölçüm sistemi şekil 2.3'de gösterilmiştir. Farklı mikro yapılara sahip mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin incelenmesinde yüksek vakum ve geniş sıcaklık aralıklarında

çalışabilen bir kriostat sistemi kullanılmıştır. Sistemin kurulması ve gerekli deneysel kalibrasyonları Araş. Gör. Elif TURAN'ın yüksek lisans tez çalışması sırasında birlikte yapılmıştır. Bu ölçüm sisteminin ana parçaları şu şekilde sıralanabilir; Sıvı azot ile soğutulan JANIS VPF 475 model Kriostat ünitesine Pfeiffer marka TMH 071 P model turbo-drag moleküler pompa esnek metal hortum ve gerekli vakum bağlantı elemanları kullanılarak bağlanmıştır. Vakum hattına bağlanan PKR 251 model pirani tipi vakum ölçer ile kriostat içindeki vakum seviyesi deney süresince gözlenmektedir. Turbo-drag moleküler pompa istasyonu önce diyafram tipi mekanik pompa ile 2-3 mbar vakum seviyelerine kadar kriostatın içini boşaltıp turbo-drag moleküler pompa çalıştırılmaktadır.



Şekil 2.3 Karanlıkta ve Kararlı durum fotoiletkenlik ölçüm sistemi.

Ölçümler sırasında örnek malzemenin bulunduğu ortamın vakum seviyesi $5-6 \times 10^{-6}$ mbar seviyelerinde olmaktadır. Mikro-kristal silisyum ince film malzemeler kriostatın “cold finger” olarak adlandırılan sızdırmaz azot ile temas eden soğuk uç kısmına monte edilen Şekil 2.4 de gösterilen bakır örnek tutucu üzerine yerleştirilmektedir. Örnek tutucu soğuk sıvı azot haznesi ile ısısal temas sağlamaktadır. Ayrıca “cold finger” içine sabitlenmiş direnç tipi ısıtıcı kullanılarak örnek tutucunun sıcaklığı değiştirilmektedir. Isıtıcı ve silisyum diyot tipi sıcaklık algılayıcı bir Lake Shore 331 model sıcaklık kontrol ünitesine bağlanmıştır. Sıcaklık kontrol ünitesi ve soğutucular ayarlanarak istenilen sıcaklığa ulaşılır, böylece istenilen sıcaklıkta örnek malzemenin incelenmesine olanak sağlanmaktadır. Örnek malzeme üzerinde bulunan gümüş elektrotlar metal uçları ile elektriksel temas sağlandıktan sonra kriostat çıkışındaki BNC uçları ile dışarıdan elektriksel bağlantısı sağlanmaktadır.



Şekil 2.4. Örnek Malzeme tutucu

Karanlıkta akım ölçümleri yapılırken kriostat'ın pencereleri siyah kumaşlarla kapatılarak sıcaklığa bağlı ölçümler alınmaktadır. Bunun için kontakların birisini Agilent E3649A DC gerilim kaynağından besleme yapılırken diğer elektroda bağlı Keithley 6514 Elektrometre ile karanlıkta akımlar ölçülmektedir. Malzemenin sıcaklığı silisyum diyot algılayıcıya ek olarak malzemenin yanına tutturulmuş PT100 tipi sıcaklık algılayıcısı ile de ölçülmektedir. Işık altında akım ölçümleri için kriostatın bir penceresi önüne optik eksen üzerindeki optik elementler yardımı ile yüksek ışık şiddetinde, homojen beyaz ışık kaynağı kurulmuştur. İki adet mercek yardımı ile örnek malzeme üzerine homojen bir ışık demeti düşmesi sağlanmaktadır. Beyaz ışık kaynağı yerli imalat olan ışık evine sahiptir. Sabit akım sabit gerilim ile çalışan ENH tipi lamba 115V ve 2,08A ile beslenmektedir. Beyaz ışık demeti önüne $\lambda=690$ nm dar bant ışık filtresi konularak örnek malzeme üzerine enerjisi malzemenin yasak enerji aralığından büyük dar bant homojen ışık demetinin düşmesi sağlanmıştır. Dar bant ışık demetinin şiddeti silisyum p-i-n tipi foto diyot kullanılarak ölçülmüştür. Beyaz ışık demetinin şiddeti nötür-yoğunluk filtreleri kullanılarak dört merteye azaltılarak malzemenin ürettiği ışık altında akım değerleri Keithley 6514 elektrometre yardımı ile ölçülmüştür. Kızıl ötesi dalga boylarındaki ışığın deney sırasında malzemenin sıcaklığını arttırıcı etkisi olmasından dolayı, uzun dalga boyuna sahip görünmez ışık saf su ışık filtresi kullanılarak kesilmiştir. Sıvı azot sıcaklığı ile 450K arasında belirli sıcaklık adımları ile örnek malzemelerin karanlıkta ve ışık altında akımları ölçülmüştür. Her bir malzeme için deneylere başlamadan önce akım- gerilim grafikleri -100V ile +100V arasında karanlıkta ve ışık altında ölçülerek kontakların Ohm yasasına uygun olup olmadıkları kontrol edildikten sonra uygulanması gereken gerilim uygulanarak deneyler yapılmıştır.

2.4 Işık Kalibrasyonu

Beyaz ışık kaynağı olarak kullanılan ENH tipi lamba ile elde edilen ışığın şiddeti 1 güneş ışığı (AM1.5) altında akım-gerilim eğrisi kalibre edilmiş silisyum foto diyot yardımı ile ölçüldü. Beyaz ışık demeti önüne nötür yoğunluk ışık filtreleri kullanılarak foto diyotun 1 güneş altında kalibre edilmiş kısa devre akımı Keithley 6514 marka elektrometre ile ölçüldü. Bu kısa devre akımına, I_{sc} , karşılık gelen beyaz ışığın nötür yoğunluk filtreleri yardımı ile beş kat azaltılması

sonucunda ulaşılmıştır. Bu sonuç, gelen beyaz ışığın yaklaşık 5 güneş şiddetinde (5kW/m^2) olduğu ifade etmektedir. Nötür yoğunluk filtrelerinin optik geçirgenlik değerleri, dar bant ışık filtresi ile birlikte iken ölçülmüştür. Önce dar bant ışık filtresi ile ışık altında akım ölçülür (%100 ışık şiddetine karşılık gelir). Daha sonra her bir ND filtresi ile dar bant ışık filtresi konularak ışık altında akım ölçülür. Bunun sonucunda, ND filtresinin optik geçirgenliği aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$T = I_{ph}(\text{ND Filtre} + \text{Dar bant filtre}) / I_{ph}(\text{Dar bant filtre}) \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde $I_{ph}(\text{ND Filtre} + \text{Dar bant filtre})$ nötür yoğunluk filtresi ile dar bant filtrenin birlikte kullanılması ile elde edilen ışık altında akımı, $I_{ph}(\text{Dar bant filtre})$ ise sadece dar bant filtre kullanılarak elde edilen (%100 ışık şiddeti) ışık altında fotoakım değerini ifade etmektedir. Dalga boyu λ olan dar bant ışık filtresi için ölçülen ışık altında fotoakım, $I_{ph}(\lambda)$, dedektörün alanı, A , ve dar bant ışığın λ dalga boyuna karşılık gelen foto diyotun kuantum verimi, $QE(\lambda)$, değerini kullanarak dar bant ışığın ışık akısı, $F(\lambda)$, yani 1 cm^2 alana 1 s 'de düşen foton sayısı, denklem 2.2 yardımı ile hesaplanır;

$$F(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{A \cdot QE(\lambda) \cdot q} \quad (2.2)$$

Fotoiletkenlik deneylerinde $\lambda=690\text{ nm}$ ve $\lambda=750\text{ nm}$ dar bant ışık filtreleri kullanılmıştır. Bunlara ek olarak RG 610 tipi "long pass" filtre olarak adlandırılan bu ışık filtresi $\lambda=610\text{ nm}$ 'den yüksek dalga boylarını geçiren ve daha yüksek ışık şiddetleri elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında dar bant ışık filtresine ek olarak RG610 kırmızı ışık filtresi kullanılarak daha yüksek ışık akısı altında fotoiletkenlik ölçümleri elde edilmiştir. Dar bant ışık filtresi ve RG610 ışık filtresi için ışık şiddetine göre yapılan fotoiletkenlik ölçümleri aynı eğimi göstermesinden dolayı RG610 kırmızı filtresine karşılık gelen ışık akısı, dar bant ışık filtresinin bilinen ışık akısının belirli bir katsayı ile çarpılması sonucu elde edilmiştir.

2.5. Mikro-kristal Silisyum Malzemelerin Bozunma İşlemleri

2.5.1. Laboratuvar Atmosferinde Bozunma İşlemi

Mikro-kristal silisyum ince film malzemelerde keşfedilen en önemli fiziksel problem olarak bu malzemelerin vakum ortamından laboratuvar atmosferine çıkarıldıklarında elektronik ve optoelektronik özelliklerinde kayda değer değişimler oluşmasıdır. Bu olay literatürde kararsızlık (instability) veya atmosfer gazlarından kaynaklı yaşlanma (atmospheric aging) olarak yayımlanmıştır. Bu tezin ana amaçlarından birisi olarak pürüzlü taban üzerine üretilmiş farklı mikro yapılara sahip mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin laboratuvar atmosfer ortamına dayanıklılığının test edilmesidir. Bu amaç için, $\mu\text{c-Si:H}$ ince film malzemeler vakum ortamında ısıtılma maruz bırakıldıktan sonra, oda sıcaklığında iken vakumdan çıkarılarak havaya maruz bırakılmış ve laboratuvar ortamında (karanlıkta) belirli zaman dilimlerinde bekletilmiştir. Belirli süreler sonunda, malzemeler tekrar vakum ortamına alınarak 77K den 450K'e kadar ısıtılarak karanlıkta ve fotoiletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 450K'de belirli süre ısıtılma maruz bırakılıp 77K'e kadar soğutulurken karanlıkta ve fotoiletkenlik değerleri ölçülüp, atmosfer ortamındaki elektronik bozunmanın etkisi ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

2.5.2. Azot Gazı Ortamında Bozunma İşlemi

Malzemelerin atmosfer gazlarına dayanıklılık testlerine ek olarak, aynı anda üretilen özdeş malzemeler azot gazı doldurulmuş plastik torba içinde saklanmıştır. Bu işlem şu şekilde gerçekleştirilmiştir; Her bir malzeme vakum ortamında ısıtılma maruz bırakıldıktan sonra iletkenlik ölçümleri tamamlanıp, vakumdan çıkarılan malzeme kriostat dışına hızlıca çıkarılıp plastik torba içine yerleştirilerek azot gazı doldurulduktan sonra zaman kaybetmeden özel vakumlama aleti ile yapıştırılmıştır. Azot gazı doldurulmuş torba içine malzemenin koyulması için ortalama 10 ile 20 dakikalık bir zaman diliminde malzemeler vakum sonrası laboratuvar ortamına maruz kalmaktadır. Azot gazı içinde bozunma etkisini anlamak için, belirli sürenin sonunda torbalar açılıp, mikro-kristal silisyum malzeme kriostat örnek tutucusuna yerleştirilip vakum ortamına alınmıştır. Bu işlem sırasında malzeme 5 ila 10 dakika süre ile laboratuvar atmosferine maruz kalmaktadır.

Malzemeler vakuma alındıktan sonra 77 K'e soğutulup, 77K ile 450K arasında iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. 450K'de gerçekleşen ısıl işlem sonrası malzeme 77K'e kadar soğutulurken iletkenlik ölçümleri tekrarlanmış ve sonunda N₂ gazı ortamında bozunumun etkisi karşılaştırılmıştır.

2.5.3. Işık Altında Bozunma İşlemi – Staebler- Wronski Etkisi

Mikro-kristal silisyum ince film malzemeler heterojen bir yapıya sahip olmalarından dolayı mikro yapıları kristal adacıklar ve bunları sarmalayan amorf katmanlardan oluşmaktadır. Amorf fazın oranı arttığı zaman mikro-kristal silisyum malzemelerde de ışık altında bozunma olayı yani Staebler-Wronski etkisi de önemli bir bozunma problemi olarak mikro-kristal silisyum malzemeleri ilginç bir fiziksel model olarak çekici hale getirmektedir.

Değişik silan gazı oranlarında büyütülen mikro-kristal silisyum malzemelerin ışığa karşı dayanıklılık testlerini gerçekleştirmek için incelenen bütün malzemeler ışık altında uzun süre bekletilerek Staebler-Wronski etkisi oluşturulmuştur. Mikro-kristal silisyum malzemelerin atmosfer gazlarından etkilendikleri bilindiğinden, ışık altında bozunum etkisinin atmosfer gazlarından bağımsız bir şekilde incelenebilmesi için malzemeler ısıl işleme maruz bırakıldıktan sonra tavlanmış durumlarındaki karanlıkta ve fotoiletkenlik ölçümlerinin ardından, malzeme yüksek vakum ortamında iken (havaya maruz kalmadan) 5 güneş ışık şiddetindeki homojen beyaz ışık kriostat penceresinden malzeme üzerine düşürülerek 5 saat süre ile kesintisiz beyaz ışık banyosuna bırakılmıştır. Yüksek şiddete sahip beyaz ışık demetinin malzemeyi ısıtmasını engellemek için kriostat sıcaklığı 270K'e sıcaklık kontrol ünitesi ile ayarlanarak, sürekli sıvı azot eklenerek, malzemenin sıcaklığının 300K'de sabit kalması sağlanmıştır. Işık banyosu sırasında malzemenin sıcaklığı örnek tutucu üzerine sabitlenmiş PT100 sıcaklık algılayıcısından okunarak gözlemlenmiştir. PT100 tipi sıcaklık algılayıcısı da tamamen ışık altında kalmaktadır. Bütün malzemelerin ışık altında bozunma işlemi 300K sıcaklığında yüksek vakum altında (in situ) gerçekleştirilmiştir. Işık banyosunun sonunda malzemenin Staebler-Wronski etkisi ile ne kadar bozunuma uğradığını belirlemek için, malzeme 77K'e kadar soğutulularak 1 saat süre ile ısıl dengeye gelmesi sağlanıp yavaş bir hızla ısıtılarak karanlıkta ve fotoiletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Staebler –Wronski etkisi

ile elektronik ve optoelektronik özelliklerindeki değişim, fotoiletkenlik ile ışık şiddeti arasındaki fonksiyonel değişimler γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimleri izlenerek belirlenmiştir. Farklı kristal ve amorf fazı oranlarına sahip malzemeler karşılaştırılarak mikro-kristal silisyum malzemelerin belirli süre sonunda (5 saat) ışığa karşı dayanıklılıkları incelenmiştir. Malzeme 450K sıcaklığına eriştikten sonra uzun süreli (10-16 saat) bu sıcaklıkta bekletilip ısı işleminden geçirilerek, Staebler-Wronski etkisinin tamamen ortadan kalktığı yani geri dönüşümlü olduğu gözlemlenmiştir.

2.6. Tavlama (Isıl İşlem) Yöntemi

Bu tezde kullanılan hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler aynı ısı işlemine tabi tutuldu. Isıl işlem hem atmosfer gazları sonucu oluşan elektronik bozunumu hem de ışık altında uzun süre bekletme sonucu oluşan Staebler-Wronski etkisini tamamen ortadan kaldırmaktadır. Isıl işlem sırasında Kriostatın bütün pencereleri alüminyum folyo ile kapatıldı ve üstlerine kumaş kaplı bir maske giydirilerek tamamen karanlık bir ortam yaratıldı. Isıl işlem sırasında ince film malzemeler 450K ($177\text{ }^{\circ}\text{C}$) sıcaklıkta bekletildi. Malzemenin karanlıkta akım değeri sabit bir değere gelene kadar tavlama işlemi sürdürüldü. Bu zaman dilimi malzemenin malzemeye yarım saat ile yirmi saat arasında değişmektedir. Tavlama zamanlarındaki değişim malzemenin sahip olduğu kristal hacim miktarına ve yaşlanma miktarına bağlı olarak değişmektedir. Daha sonra ise ince film malzemeler tavlama sıcaklığı olan 450K'den 77K'e kadar her 10K aralıklarla karanlık altındaki akımları okunarak ve denklem 2.3 kullanılarak karanlık altındaki iletkenlikleri hesaplandı. Elde edilen bu veriler $1000/T$ ye karşılık çizdirilerek ince film malzemelerin aktivasyon enerjileri belirlendi. Yukarıda anlatılan bütün adımlar ince film malzemeler hem farklı atmosferik ortamlarda yaşlanmaya maruz bırakıldıktan sonra hem de beyaz ışık altında bozunmaya bırakıldıktan sonra (Staebler-Wronski işlemi) tekrarlandı. Bütün malzemeler kriostatın çıkarılıp atmosfer koşullarına bırakılmadan önce tavlama işlemine maruz bırakıldı.

2.7. Sıcaklığa Bağlı Karanlıkta İletkenlik Yöntemi

Tek kristal özellik göstermeyen bir mikro yapıya sahip ince film malzemelerin mikro yapılarında çok farklı özelliklere sahip elektronik kusurlar mevcuttur. Mikro yapıda mevcut elektronik kusurlardan dolayı yarı iletken özellik gösteren amorf silisyum ve mikro-kristal silisyum ince film malzemelerde mevcut elektronik kusurların malzemenin yasak enerji aralığında sürekli enerji dağılımlarına sahiptir. Karanlık Fermi seviyesi yasak enerji aralığında elektriksel yük dengesini sağlayacak şekilde yasak enerji aralığında belirli bir enerji değerinde sabitlenmiş enerji seviyesidir. Silan ve hidrojen gazları karışımlarından değişik silan gazı oranlarında ve hiçbir katkılama yapılmadan büyütülmüş mikro-kristal silisyum ince film malzemeler değişik kristal ve amorf fazına sahip olduğundan mikro yapıda oluşan elektronik kusurların (yükü ya da yüksüz) yasak enerji aralığı içindeki dağılımlarına göre karanlık Fermi seviyesi sabitlenmiştir. Fermi seviyesi hem karanlıkta iletkenlik hem de fotoiletkenlik özelliklerini belirleyen en önemli fiziksel parametredir. Bu nedenle, incelenen mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin ilk fiziksel ölçümleri karanlıkta iletkenlik ölçümleridir. Şekil 2.4'de gösterilen örnek tutucu üzerine yerleştirilmiş mikro-kristal silisyum ince film malzemenin paralel gümüş kontakları arasına uygulanan gerilimin sonucu oluşan akım arasında Ohm yasasına uyan bir ilişki mevcut ise malzemenin mikro yapısının elektriksel ve optoelektronik özellikleri incelenebilir. Yani malzeme bir direnç gibi davranır. Direnci sıcaklık ve ışık ile değişir. Örnek tutucu üzerine yerleştirilen malzemenin kontakları karanlıkta ve ışık altında Ohm yasasına uygun grafik gösterdikten sonra malzeme vakum odasına yerleştirilip yüksek vakum değerine ulaşılır. Ayrıca ince film taban malzemelerinin altına eser miktarda ısıl iletkenlik pastası sürülerek cam ile bakır örnek tutucu arasında iyi bir ısıl kontak oluşumu sağlanmıştır. Malzeme 450K'de ısıl işleme tabi tutulduktan sonra yavaş yavaş soğutularak her sıcaklık değişiminde sabit sıcaklık altında I_D karanlıkta akım değerleri ölçülürse, karanlıkta iletkenlik σ_D ifadesi Ohm yasasından hesaplanır;

$$\sigma_D(T) = \frac{I_D(T).d}{V.t.l} \quad (2.3)$$

Bu denklemde d gümüş kontaklar arasındaki mesafeyi, t ince film malzemenin kalınlığını ve l ise gümüş kontakların boyunu belirtmektedir. σ_D karanlıkta

iletkenlik değeri ise karanlık Fermi seviyesi E_F tarafından aşağıdaki gibi belirlenmektedir;

$$\sigma_D = \sigma_0 e^{-\frac{(E_c - E_F)}{kT}} = \sigma_0 e^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (2.4)$$

Bu denklemde σ_0 karanlıkta iletkenlik ön çarpanı, $E_A = E_C - E_F$ aktivasyon enerjisini, k Boltzman sabitin, T mutlak sıcaklığı belirtmektedir. Denklem (2.4)'ün doğal logaritmasını aldığımızda;

$$\ln \sigma_D = \ln \sigma_0 - \frac{E_A}{kT} \quad (2.5)$$

$$\ln \sigma_D (T) = \ln \sigma_0 - \left(\frac{E_A}{1000k} \right) \left(\frac{1000}{T} \right) \quad (2.6)$$

$$\ln \sigma_D (T) = \ln \sigma_0 - B \left(\frac{1000}{T} \right) \quad (2.7)$$

$Y = C - Bx$ gibi bir denklem halini alır. Bu son denklemin yarı logaritma grafiğini çizdiğimizde elde edilen grafik Arrhenius grafiği olarak adlandırılır. Bu grafik negatif eğimli bir doğru vermektedir. Doğrunun eğimi;

$$B = \frac{E_A}{1000k} = \text{sabit.} \quad (2.8)$$

Doğrunun eğiminden $E_A = E_C - E_F$, yani karanlık Fermi enerjisinin iletkenlik bant ucu E_C 'den uzaklığı hesaplanır. Ayrıca bu doğrunun $\frac{1000}{T} = 0$ olduğu dik eksenini kestiği noktanın değerinden σ_0 karanlıkta iletkenlik ön çarpanı hesaplanır. İncelenen mikrokristal silisyum ince film malzemelerin aktivasyon enerjileri ısıl işlemde sonra yüksek sıcaklık bölgesinde doğrusal bir değişim gösterdiği bölge içinde hesaplanmıştır. Düşük sıcaklıklarda Arrhenius grafiği doğrusal değişimden sapma göstermektedir. Bu bölgede exponansiyel olarak Fermi enerjisinin kontrol ettiği karanlıkta iletkenlik mekanizmasından farklı olarak yeni bir akım iletim mekanizmasının baskın olmaya başladığı görülmektedir. Bu tür iletim mekanizması "atlamalı iletkenlik" olarak adlandırılan bir mekanizmadır. Burada serbest elektrik yükleri düşük sıcaklıklarda iletkenlik band ucunda hareket ederek iletimi sağlamak yerine mikro yapıda mevcut elektronik kusurlardan zıplaya zıplaya malzeme içerisinde taşınarak yeni bir karanlıkta iletkenlik mekanizması oluşturmaktadırlar. Katkılı amorf silisyum ince film malzemelerde düşük sıcaklıklardaki karanlıkta akım

iletimi mekanizması ‐tuzaklardan atlamalı‐ akım mekanizması olarak adlandırılmıştır. Mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin bazılarında doğrusal Arrhenius grafiğinden sapmalar gözlenmektedir.

2.8 Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümleri

Fotovoltaik ince film malzemeler güneş gözelerinin soğurucu katmanını oluşturan ve ışık ile elektron-deşik çiftlerini yaratılıp dış devreden bir ışık altında akım oluşmasını sağlayan malzemelerdir. Dolayısı ile fotovoltaik malzeme olarak geliştirilen mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin ışığa karşı duyarlılığı kararlı durum fotovoltaik ölçümleri ile test edilmektedir. Bu tezde incelenen mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin kararlı durum fotoiletkenlik ölçümleri iki farklı yöntemle gerçekeştirilmiştir. Birincisi, sabit sıcaklıklarda dar bantlı ışığın şiddeti değiştirilerek, ikincisi ise sabit ışık şiddetinde sıcaklık değiştirerek ölçülmüştür. Her iki durumda da incelenen malzemeler kriostat içerisinde $5-6 \times 10^{-6}$ mbar vakum seviyesinde iken gerçekeştirilmiştir.

2.8.1 Işık şiddetine Bağlı Kararlı Durum Fotoiletkenlik Yöntemi

Işık şiddetine bağlı kararlı durum fotoiletkenlik ölçümlerini gerçekeştirmek için kullanılan dar bant ışığın enerjisi incelenen yarı iletken malzemenin yasak enerji aralığından büyük olmalı ve malzemenin kalınlığı kullanılan dar bant ışığın malzemenin tamamında homojen olarak soğurulmasına olanak sağlamalıdır. Diğer önemli durum ise, paralel metal kontaklar arasında uygulanan gerilim ile ışık altında akım arasında Ohm yasasına uyan bir ilişki olmalıdır. İncelenen bütün malzemeler için metal kontakların akım-gerilim grafikleri ölçülerek Ohm yasasına uygunluğu kontrol edilmiş ve aynı işlem ışık altında da yapılmıştır. Kararlı durum fotoiletkenlik ölçümleri dalga boyu $\lambda = 690$ nm dar bant ışık filtresini beyaz ışık demeti önüne koyarak ölçüldü. Dar bant ışığın şiddeti nötür yoğunluk filtreleri kullanılarak daha düşük ışık şiddetlerine karşılık ışık altında akım değerleri sabit dc gerilimi altında ölçüldü. Daha yüksek ışık şiddetleri altında ışık altında akım ölçümleri için ikinci olarak RG 610 kırmızı ışık filtresi ile birlikte nötür yoğunluk ışık filtreleri yardımı ile ölçüldü. Sabit dc gerilimi altında ölçülen ışık altında akım değerleri kullanılarak Ohm yasası yardımı ile σ_{ph} fotoiletkenlik değerleri aşağdaki denklem yardımı ile

hesaplanır. Sadece ışık altında yaratılan fotoiletkenlik değerlerinin hesabında karanlıkta ölçülen I_D akımı I_{ph} ışık altında akımından çıkarılmıştır.

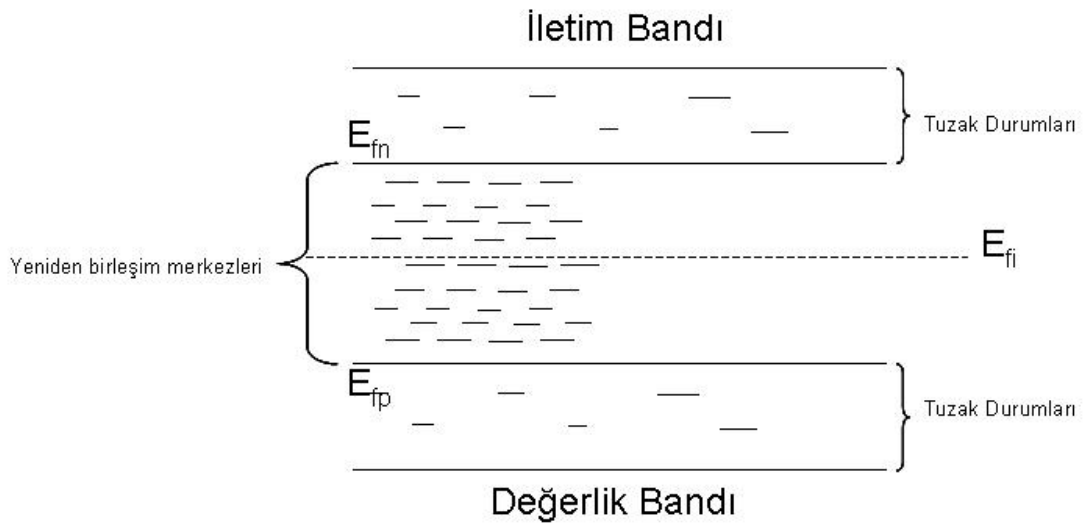
$$\sigma_{ph}(F) = \frac{(I_{ph}(F) - I_D).d}{V.t.l} \quad (2.9)$$

Bu denklemde $\sigma_{ph}(F)$ her bir ışık şiddetine karşılık gelen fotoiletkenlik, $(I_{ph}(F) - I_D)$ aynı ışık şiddetinde ölçülen net ışık altında akım, d metal kontaklar arasındaki mesafe, t ince film malzemenin kalınlığı, l metal kontakların boyunu, V ise metal kontaklar arasına uygulanan dc gerilimini göstermektedir.

Fotoiletkenlik mekanizması dört ana kısımdan oluşmaktadır bunlar sırası ile gelen fotonun soğurulması, elektron-deşik çiftleri yaratılması, ışık altında yaratılan yük taşıyıcıların taşınması ve son olarak da var olan serbest elektron ve deşiklerin yeniden birleşme merkezlerinde bir araya gelerek yok olmasıdır. İletim mekanizmasını diğer bir deyişle yeniden birleşim mekanizmalarını oluşturan iki önemli kavram vardır; bunlar yasak enerji aralığında farklı yoğunluklarda bulunan yeniden birleşme merkezleri ve tuzak durumlarıdır. Bu kavramların anlaşılması ve ayırt edilebilmesi iletim mekanizması hakkında bilgi edinmemizi sağlayacaktır.

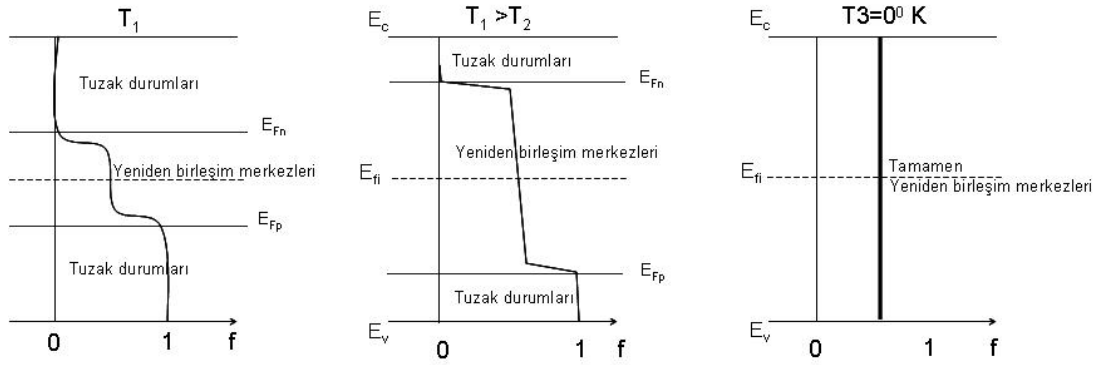
Şekil 2.5’de gösterildiği gibi tuzak durumları kuazi-Fermi seviyesi E_{fn} ile iletim bandı arasında kalan bölge ile kuazi-Fermi seviyesi E_{fp} ile değerlik bandı arasında kalan enerji aralıklarında bulunur. Bu nedenle iletim ya da değerlik bandındaki herhangi bir serbest yük taşıyıcısı (çok yüksek bir ihtimalle) tuzaklara yakalanır ve ardından belirli ısı uyarılma ile yakalanan serbest yük taşıyıcısı geldiği bant’a geri döner, serbest hale gelir.

Yeniden birleşme merkezleri ise iki kuazi-Fermi seviyeleri (E_{fn} ve E_{fp}) arasında kalan bölgede bulunmaktadırlar. Bu merkezler bant uçlarında çok uzak enerjilerdedir. Yük taşıyıcılar bu merkezler tarafından yakalanır ve diğer cins yük taşıyıcısının yakalanması ile yeniden birleşim tamamlanmış olur. Tuzak ve yeniden birleşme merkezlerinin ayrımı ve anlaşılması hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ince filmlerin iletim mekanizmalarının anlaşılması için çok önemlidir. Sürekli kusurların mevcut olduğu yarı iletkenlerde fotoiletkenlik, yük yaratılması ve yok olma mekanizmalarının ayrıntılı analizi Simmons-Taylor istatistiği ile açıklanmıştır (Simmond-Taylor, 1971).



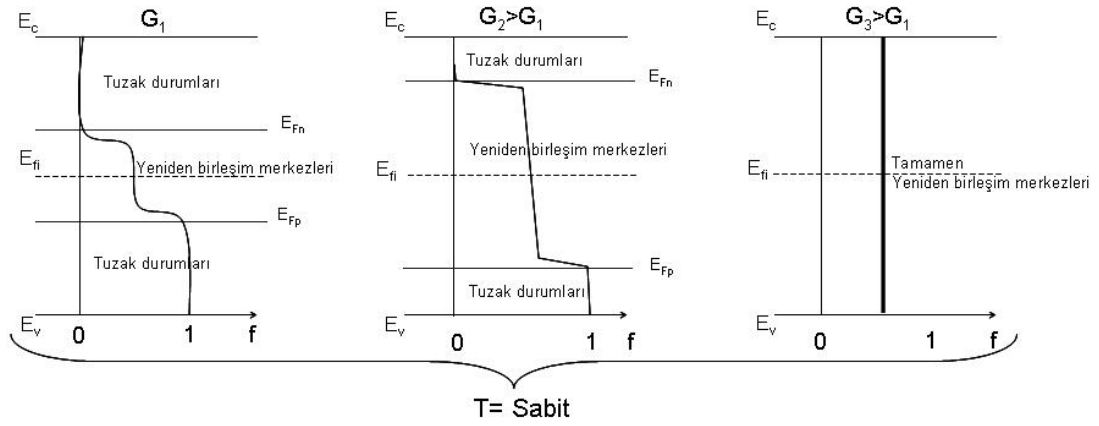
Şekil 2.5 Tuzak ve yeniden birleşme merkezlerinin yarı iletken yasak enerji aralığındaki buldukları bölgeler.

Yük taşıyıcılarının yaşam süresi (life time) yeniden birleşme merkezleri tarafından belirlenirken malzemenin yanıt verme süresi (response time) tuzak durumları tarafından belirlenmektedir. Sıcaklık ve ışık yoğunluğu ile yeniden birleşim mekanizmasında meydana gelen değişim fotoiletkenlik aracılığı net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Işık ile yaratılan serbest yüklerin yaşam süresinin belirlenmesinde kullanılan parametreler, yeniden birleşim merkezlerinin yoğunluğu, doluluk-boşluk oranı ve yakalama tesir kesitidir. Işık şiddetinin artışı serbest halde bulunan yük taşıyıcıların yoğunluğunda da artışa sebep olur. Bunun sonucunda kuazi-Fermi seviyeleri E_{fn} ve E_{fp} sırası ile iletim ve değerlik bant kenarlarına doğru hareket eder. Kuazi-Fermi seviyelerinin bant kenarlarına doğru hareketi ile tuzak durumlarının bir kısmı yeniden birleşim merkezlerine dönüşmektedirler. Sıcaklığın düşürülmesi ile tuzaklar tarafından yakalanmış olan yüklerin ısıl uyarılma ihtimalide düşmüş olur bunun sonucunda tuzak durumlarındaki yeniden birleşim miktarında azalma meydana gelir. Aşağıdaki Şekil 2.6 ve 2.7 deki şematik gösterimde sıcaklıkla ve ışık şiddeti ile kuazi-Fermi seviyelerindeki değişim ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun değişimi gösterilmiştir. (Simmons-Taylor, 1971)



Şekil 2.6 Sıcaklıkla kuazi-Fermi seviyeleri ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonundaki değişim.

Şekil 2.6'da T_1 sıcaklığında sabit ışık şiddetinde E_{Fn} ve E_{Fp} seviyeleri karanlıkta Fermi seviyesi E_{Fi} etrafında açılarak yeniden birleşim merkezlerinin miktarını ve doluluk oranlarını belirlemektedir. Yeniden birleşim merkezlerinin doluluk oranları Simmons-Taylor istatistiğinde tanımlanmış Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla hesaplanmaktadır. Sıcaklık T_2 değerine azaldığında E_{Fn} ve E_{Fp} arasındaki enerji farkı artarak daha fazla tuzak durumlarını yeniden birleşim merkezlerine dönüştürmektedir. Bu durum ölçülen fotoiletkenlik ve serbest yüklerin yaşam sürelerini belirlemektedir. $T=0K$ mutlak sıcaklık değerinde yasak enerji aralığındaki bütün durumlar yeniden birleşme merkezlerine dönüşmektedir. Bunun sonucunda bütün serbest yükler yok olup yarı iletken bir yalıtıkana dönüşmektedir.



Şekil 2.7 Sabit sıcaklıkta ışıl yaratma hızına bağlı olarak kuazi-Fermi seviyeleri ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonundaki değişim.

Şekil 2.7’de ise sabit sıcaklıkta ışık şiddeti G_1 ’den G_3 değerine kadar arttırıldığında E_{Fn} ve E_{Fp} kuazi Fermi seviyeleri yine bant uçlarına doğru genişleyerek yasak enerji aralığı içinde yerleşmiş elektronik kusurların (tuzaklar ve yeniden birleşim merkezleri) fotoiletkenlik ölçümleri ile algılanması sağlanmaktadır.

Fotoiletkenlik ölçümleri ışık şiddetine bağlı olarak ölçüldüğünde E_{Fn} ve E_{Fp} kuazi-Fermi seviyeleri yasak enerji aralığı ortasında yerleşmiş ve karanlıkta Fermi seviyesi etrafındaki elektronik kusurların yeniden birleşim merkezlerine dönüşmesi sonucu oluşur. Fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine (veya ışık altında elektron-deşik yaratma hızına) bir γ üstel parametresi ile bağılılık göstermektedir ($\sigma_{ph} \propto G^\gamma$). Yani $\ln \sigma_{ph}$ ile $\ln G$ arasında çizilen grafik doğrusal bir değişim göstermektedir. Bu doğrunun eğimi γ üstel parametresini vermektedir. γ üstel parametresi fotoiletkenlik mekanizmasını belirleyen, yeniden birleşme mekanizmasının doğasını ifade eden bir parametredir. İlk olarak, γ parametresinin teorik analizi A. Rose tarafından 1978 yılında yapılmıştır (Rose, 1978). Kısaca bu teorik analiz aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Yarı iletken malzemenin fotoiletkenlik değeri

$$\sigma_{ph} = q\mu_n n + q\mu_p p \quad (2.10)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemden $n = \tau_n G$ ve $p = \tau_p G$ ışık ile yaratılan serbest elektron ve deşiklerin yoğunluğunu, τ_n ve τ_p sırası ile elektron ve deşiklerin yaşam sürelerini ve G ise ışık altında elektron-deşik yaratma hızını belirtmektedir

$$\sigma_{ph} = q\mu_n \tau_n G + q\mu_p \tau_p G \quad (2.11)$$

Eğer verilen bir yarı iletken için $\mu_n \tau_n \gg \mu_p \tau_p$ ise fotoiletkenlik tek tip yük taşıyıcılardan oluşur.

$$\sigma_{ph} \cong q\mu_n n ; \sigma_{ph} \cong q\mu_n \tau_n G \quad (2.12)$$

Buradan,

$$\mu\tau = \frac{\sigma_{ph}}{q.G} \quad (2.13)$$

İfadesi “hareketlilik-yaşam süresi çarpımı” olarak tanımlanır.

Her G değerinde ölçülen σ_{ph} değerleri kullanılarak hesaplanan $\mu\tau$ çarpımında ışık şiddetine göre bir değişim vardır. Bu değişim yine $\mu\tau \propto G^{(\gamma-1)}$ ifadesine göre olmaktadır. $\ln \mu\tau$ ile $\ln G$ arasında çizilen grafiğin eğimi $(\gamma - 1)$ değerini verecektir. Buradan γ üstel parametresi hesaplanır. A. Rose tarafından verilen, ışık ile yaratılan elektron ve deşiklerin ifadesine yeniden dönersek,

$$n = G.\tau_n = G.\left(\frac{1}{p_r.v.s_n}\right) \quad (2.14)$$

$$p = G.\tau_p = G.\left(\frac{1}{n_r.v.s_p}\right) \quad (2.15)$$

burada

$$\tau_{(n)} = \frac{1}{N_r.v.s_{(n)}} \quad \text{ve} \quad \tau_{(p)} = \frac{1}{N_r.v.s_{(p)}} \quad (2.16)$$

Elektron ve deşiklerin yaşam sürelerini belirleyen ifadelerdir.

Burada $N_r = p_r$ serbest elektronlar için ve $N_r = n_r$ serbest deşikler için E_{Fn} ve E_{Fp} kuazi Fermi enerji seviyeleri arasında yerleşmiş yeniden birleşim merkezlerinin yoğunluklarını göstermektedir. v ortamala ısı hızı, $S_{(n)}$ ve $S_{(p)}$ elektron ve deşikler için yakalama tesir kesitlerini vermektedir. Işık altında elektron-deşik yaratma hızı G ise birkaç önemli parametreye bağlıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G = \frac{F(\lambda).\eta(\lambda).[1 - R][1 - e^{-\alpha(\lambda)t}]}{t} \quad (2.17)$$

Bu denklemde $F(\lambda)$ ışık akısını, $\eta(\lambda)$ dar bant ışığın elektron-deşik yaratma verimini (genellikle 1.0'e çok yakındır), R ışığın film yüzeyinden yansıma katsayısını, $\alpha(\lambda)$ dalga boyu λ olan dar bant ışığa karşılık gelen yarı iletken malzemenin optik soğurma katsayısını ve t ince film malzemenin kalınlığını göstermektedir. Fotoiletkenlik ile ışık altında elektron-deşik yaratma hızı arasındaki ilişki Albert Rose'un 1978 de tanımladığı şu basit model ile ortaya konmuştur. Tuzak durumların yoğunluğu yasak enerji bölgesinde üstel bir ifade ile verilen bir dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir.

$$N_t(E) = A. \exp\left[\frac{-|E_c - E_t|}{kT_1}\right] \quad (2.18)$$

Burada $N_t(E)$ E enerji seviyesinde bulunan tuzak yoğunluğunu, E_t tuzak enerji seviyesini ifade etmektedir. E_F Fermi seviyesi ile E_{Fn} kuazi Fermi seviyesi arasında kalan pozitif yüklü yeniden birleşme merkezlerinin toplamı

$$p_r = \int_{E_f}^{E_{fn}} N_t(E).dE \quad (2.19)$$

$$p_r = \int_{E_f}^{E_{fn}} A. \exp\left[\frac{-|E_c - E_t|}{kT_1}\right].dE \quad (2.20)$$

$$p_r = kT_1.N_t(E_{fn}) \quad (2.21)$$

Aynı zamanda ışıkla yaratılmış elektronların denklemi yeniden yazıldığında;

$$n = G.\tau_n = G.\left(\frac{1}{p_r.v.s_n}\right) \quad (2.22)$$

Bu denklemde p_r değerini yerine koyarsak,

$$n = G.\left[\frac{1}{kT_1.A. \exp\left[\frac{-|E_c - E_t|}{kT_1}\right].v.s_n}\right] \quad (2.23)$$

Işıklı yaratılmış elektronların diğer bir denklemi ise

$$n = N_c \cdot \exp\left[\frac{-|E_c - E_{fn}|}{kT}\right] \quad (2.24)$$

gibidir. Üstel ifadenin iç kısmını T_1 ile çarpıp bölersek

$$n = N_c \cdot \exp\left[\frac{-|E_c - E_{fn}|}{kT_1 T} \cdot T_1\right] \quad (2.25)$$

Buradan üstel ifadeyi yalnız bırakıp elde edilen sonucu denklem (2.23) da yerine koyarsak,

$$n = \left[\frac{G \cdot N_c^{T/T_1}}{kT_1 A \cdot v \cdot s_n}\right]^{T_1/(T+T_1)} = \left[\frac{N_c^{T/T_1}}{kT_1 A \cdot v \cdot s_n}\right]^{T_1/(T+T_1)} \cdot G^{T_1/(T+T_1)} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{ph} = q\mu_n n = q\mu_n \left[\frac{N_c^{T/T_1}}{kT_1 A \cdot v \cdot s_n}\right]^{T_1/(T+T_1)} \cdot G^{T_1/(T+T_1)} \propto \left\{ q\mu_n \left[\frac{N_c^{T/T_1}}{kT_1 A \cdot v \cdot s_n}\right]^{T_1/(T+T_1)} \right\} G^\gamma$$

$$\sigma_{ph} \propto G^\gamma \quad (2.27)$$

$T_1 \geq T$ olduğundan dolayı $T_1/(T_1+T)$ ifadesi her zaman 0,5 ile 1 arasında bir değer alacaktır. Denklemi biraz daha basitleştirecek olursak fotoiletkenlik σ_{ph} ışık altında elektron-deşik yaratma hızı G 'ye γ üstel parametresi ile bağlıdır. Aynı γ değeri $\mu\tau$ -çarpımına karşılık elektron-deşik yaratma hızı grafiğinin eğimidir ve denklem (2.28) de belirtilmiştir. Denklem 2.12 deki $\sigma_{ph} = q\mu\tau G$ kullanarak $\mu\tau$ yalnız bırakırsak denklem 2.13 elde edilmiş olan. $\mu\tau = \sigma_{ph}/qG$ denklemine ulaşılır. Bu denklemdeki σ_{ph} yerine denklem 2.27 deki σ_{ph} koyarsak $\mu\tau = G^\gamma/qG$ elde edilir ve bu denklemde bize 2.28 denklemini verir.

$$\mu\tau \propto G^{\gamma-1} \quad (2.28)$$

Denklem 2.27'de de görüldüğü gibi fotoiletkenlik ile ışıkla elektron-deşik yaratma hızı arasında doğrudan bir ilişki vardır ve bu ilişki $\ln \sigma_{ph} - \ln G$ grafiği çizildiğinde

gamma (γ) parametresinde doğrudan bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. Denklem (2.28) bakılacak olunursa $\ln \mu\tau - \ln G$ grafiğinin eğiminden γ üstel parametresi elde edilmektedir. γ parametresi malzemenin sahip olduğu yeniden birleşme mekanizmalar hakkında bilgi vermektedir. Bunlar sırası ile 1) Üstel ifadenin 0,5 olması ($\gamma=0,5$) iletkenlik bandındaki bir serbest elektronun değerlik bandındaki deşik ile doğrudan birleşmesini ifade etmektedir. 2) Üstel ifadenin 1'e eşit olması durumunda ise yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusur yoğunluğunun çok az seviyede olması ($\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) durumunda bunların serbest elektronların yaşam sürelerini etkilemediği ve $\mu\tau$ -çarpımının ışık şiddetinden bağımsız olduğunu gösterir. 3) Gamma üstel parametresi 1'den küçük ancak 0,5 den büyük değerler alması durumu ise ($0,5 < \gamma < 1$); ışık şiddetinin artması ile kuazi-Fermi seviyelerinin bantlara doğru yaklaşmasına, tuzakların yeniden birleşim merkezlerine dönüşmesine, buna bağlı olarak yeniden birleşme merkezlerinin yoğunluğunun artması sonucunda yük taşıyıcıların yaşam sürelerinin azalmasına neden olur. Sonuç olarak $\mu\tau$ -çarpımı artan ışık şiddeti ile doğrusal olarak azalır. Amorf silisyum ve mikro-kristal silisyum malzemelerde gözlenen γ değerleri bu sınırlar içinde kalmaktadır. 4) Gammanın 1'den büyük olması durumu ise literatürde yayımlanmış ve farklı özellikte elektronik kusurların malzemenin yasak enerji aralığında değişik enerji değerlerinde yerleşebileceğini işaret etmektedir. Bu tezde incelenen malzemelerde γ üstel parametreleri ve sıcaklık ile değişimleri incelenerek yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların özellikleri hakkında nitel bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır.

2.8.2 Sıcaklığa Bağlı Fotoiletkenlik Yöntemi

Bu tezde incelenen hidrojenlendirilmiş mikro-kristal silisyum ($\mu\text{c-Si:H}$) ince film malzemeler 77K ile 450K aralığında her 10K adımlarla tavlama öncesi, tavladıktan sonra ve Staebler-Wronski etkisinin ardından sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri alınmıştır. Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinde nörür yoğunluk filtreleri kullanılmamış sadece dalga boyu 690 nm olan dar bant ışık filtresi kullanılmıştır. Bu şekilde dar bant (690 nm) ışık demeti malzemenin üzerine düşürülmüştür. Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri malzemenin yasak enerji

aralığında yerleşmiş elektronik kusurların algılanmasına olanak vermektedir. 77K ile 450K sıcaklık aralığında kuazi Fermi seviyelerindeki değişime ek olarak dar bant ışıkla kuazi Fermi seviyeleri daha da zorlanmakta ve bu zorlama sonucunda neredeyse malzemenin bütün yasak enerji aralığı taranarak kusur durumlarının etkisi algılanabilmektedir. Hem fotoiletkenlik değerlerindeki değişimler hem de γ üstel parametresindeki değişimlerin ölçülmesi ile yasak enerji aralığında mevcut elektronik kusurlar incelenmiştir.

BÖLÜM 3: DENEYSEL BULGULAR

3.1. Giriş

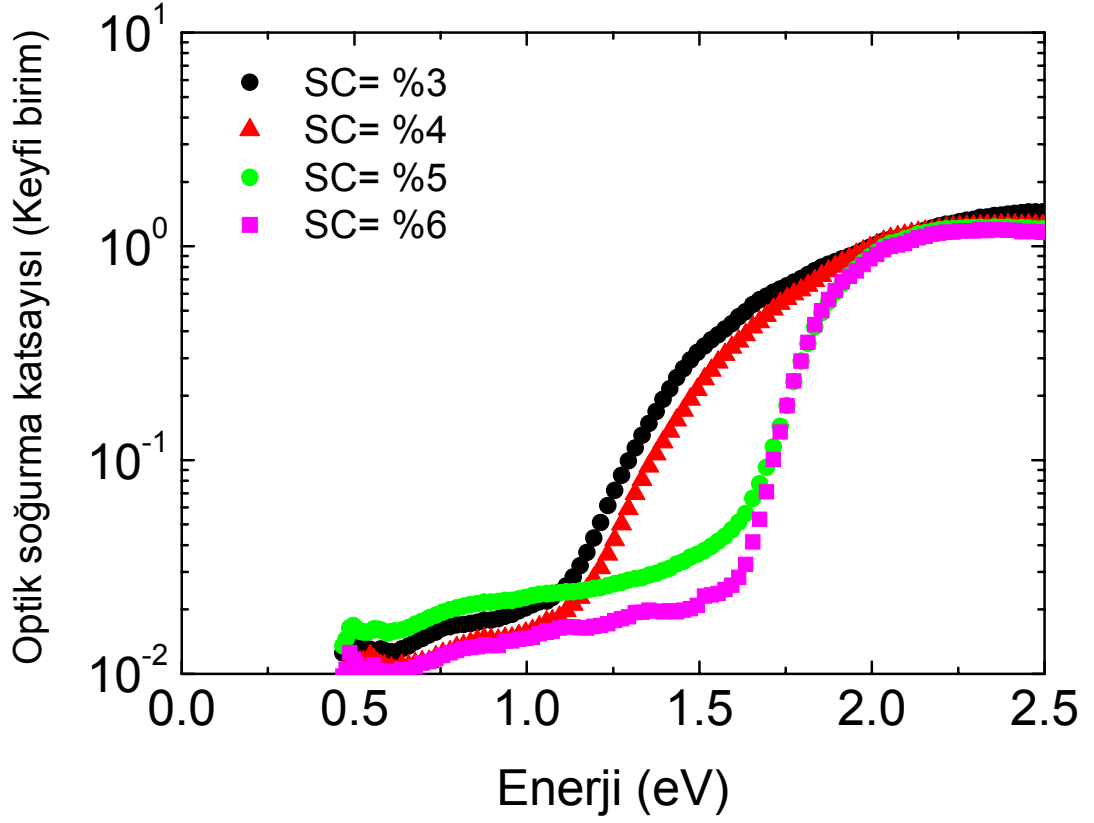
Değişik silan gazı oranlarında büyütülen mikro-kristal silisyum ince film malzemeler farklı taban malzemeleri üzerine (cam, plastik, çelik gibi) büyütülmektedir. Bu malzemelerin kristal oranları, yüksek kristal hacim oranlarından tamamı ile amorf fazına (sıfır kristal oranı) kadar değişmektedir. Bu tezde incelenen mikro-kristal silisyum ince film malzemeler pürüzlü cam taban malzemesi üzerine SC oranı %2 ile %6 arasında büyütülmüştür. Bu malzemelerdeki atmosfer gazları nedeni ile oluşan elektronik bozunum (atmosferik yaşlanma) ve ışık altında elektronik bozunum (Staebler-Wronski etkisi) incelenmiştir. Atmosfer gazları ile oluşan elektronik bozunum olayı iki ayrı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Birincisi aynı üretim sonucu oluşturulmuş malzemeler birkaç parçaya bölünmüş ve bu parçalardan biri karanlıkta laboratuvar atmosferinde uzun süre bekletilerek oluşan elektronik bozunum etkisi incelenmiştir. Diğer bir parça ise, eş zamanlı olarak azot gazı doldurulmuş plastik torbalarda bekletilmesi sonucu oluşan elektronik bozunum etkisi incelenmiştir. Işık altında elektronik bozunum yani Staebler-Wronski etkisi ise malzemeler ısıtılma işlem sonunda vakumdan çıkarılmadan aynı şiddette ve aynı süre ile ışık altında bekletilerek oluşturulan elektronik bozunum etkisi incelenmiştir. Bu bölümde ve alt bölümlerde farklı kristal hacim oranlarına sahip malzemelerde görülen kararsızlık problemleri, karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik yöntemleri sonucu elde edilmiş değişimlerle sunulmaktadır.

3.2 Atmosfer Gazlarında Elektronik Bozunum

3.2.1. Optik soğurma katsayısı ölçümleri

Mikro-kristal silisyum malzemelerde ortaya çıkan kararsızlık problemlerinin mikro yapı ile ilişkilendirilebilmesi için bu malzemelerin kristal hacim oranlarındaki değişim ve dolayısı ile bunun sonucunda oluşan optik soğurma katsayısı spektrumundaki değişimin bilinmesi gerekir. Pürüzlü cam taban malzemesi üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin SC oranları %2, %3, %4, %5 ve %6 olarak değiştirilmiş ve bunların kristal oranları %76, %70, %27, %0 ve %0 olarak Jülich Araştırma Merkezi, Fotovoltaik Enstitüsünde Raman spektroskopisi yardımı ile ölçülmüştür. Raman ölçümleri sonuçları SC oranlarının değiştirilmesi ile

mikro yapıdaki değişimin yüksek kristalli mikro-kristal silisyumdan tamamı ile amorf silisyum malzemeye doğru değişimini göstermektedir. Bu değişimin en önemli diğer göstergesi olarak Isıl Işın Saptırma Spektroskopisi (Photothermal Deflection Spectroscopy (PDS)) yardımı ile ölçülen optik soğurma katsayısı spektrumundaki kaymadır. Optik soğurma katsayısı spektrumu düşük yasak enerji aralığına sahip mikro-kristal silisyuma ait spektrumdan daha yüksek yasak enerji aralığına sahip amorf silisyumunkine doğru bir değişim göstermektedir. Malzemelerin pürüzlü cam taban malzemesi üzerine büyütülmesinden dolayı optik geçirgenlik spektrumunu ölçmek mümkün olmadığından mutlak optik soğurma katsayısı spektrumu elde edilmemiş ancak relatif olarak optik soğurma katsayısı spektrumu ölçülebilmektedir. Şekil 3.1'de PDS ölçümleri sonucu elde edilen relatif optik soğurma katsayısı spektrumları malzemelerin mikro-kristal silisyum fazdan amorf silisyum fazına doğru değiştiğini doğrulamaktadır. SC= %3 ve %4 için optik soğurma katsayısındaki değişim mikro-kristal silisyum malzeme için literatürde elde edilmiş spektrumlara benzerdir. SC= %5 ve %6 için malzemede tamamı ile amorf fazın baskın olduğunu eksponansiyel azalmanın yüksek enerji değerlerine kaymasından anlaşılmaktadır. SC= %2 koşulu altında büyütülen malzemenin optik soğurma katsayısı spektrumu ölçülemediği olmasına rağmen önceki yapılan çalışmalardan SC= %3 ile büyütülen malzemeye çok yakın bir optik soğurma katsayısı spektrumu vermektedir. Bu ölçümler literatürde amorf silisyum için yayınlanmış karakteristik optik soğurma katsayısı spektrumlarına benzerdir. Düşük enerji değerlerinde görülen omuz bölgesi ise hazırlık koşulları sonucu malzeme içerisinde oluşan mevcut elektronik kusurlardan ve taban malzemesindeki optik soğurmanın sonucunda oluşmaktadır. Sonuç olarak, bu tezde incelenen malzemelerde atmosfer gazları sonucu oluşan elektronik bozunum ve Staebler-Wronski etkisi değişik mikro yapılara sahip mikro-kristal silisyum malzemeler üzerinde incelenmiş ve sonuçlar bu bölüm içerisinde sunulmuştur.

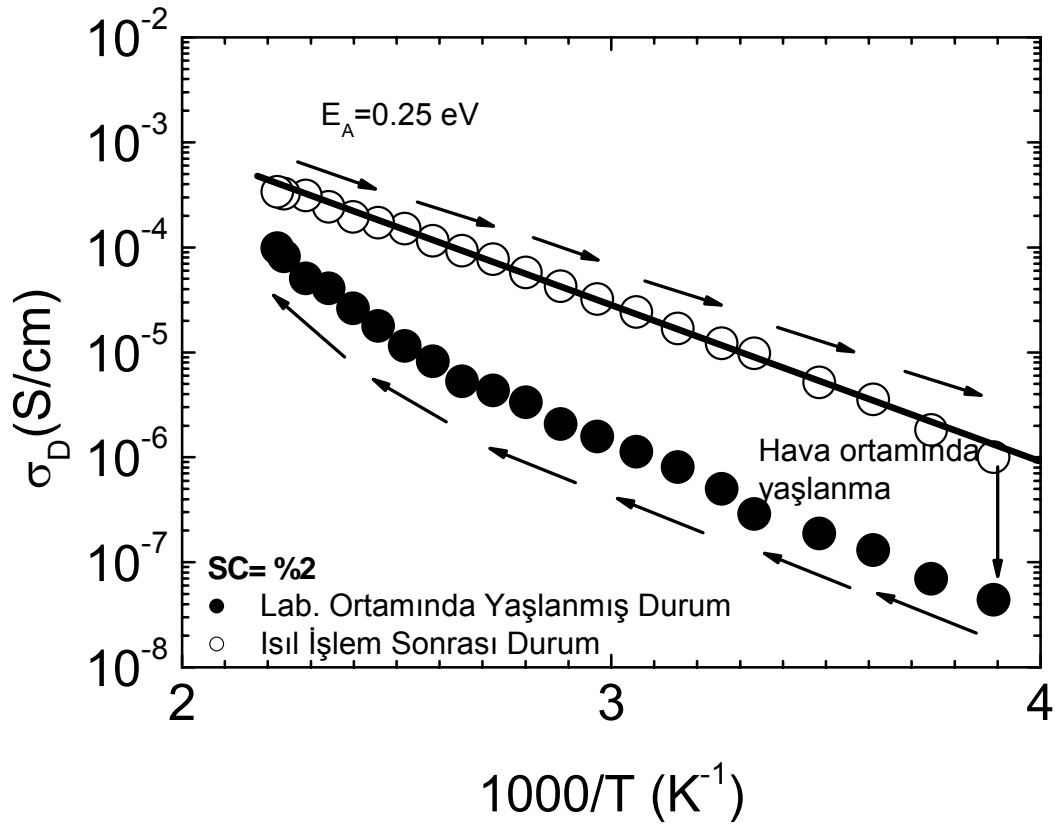


Şekil 3.1. Pürüzlü cam taban malzemesi üzerine SC= %3, %4, %5 ve %6 değerlerinde büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin PDS yöntemi ile ölçülmüş relatif optik soğurma katsayısı spektrumları.

3.2.2. Laboratuvar atmosferinde elektronik bozunum

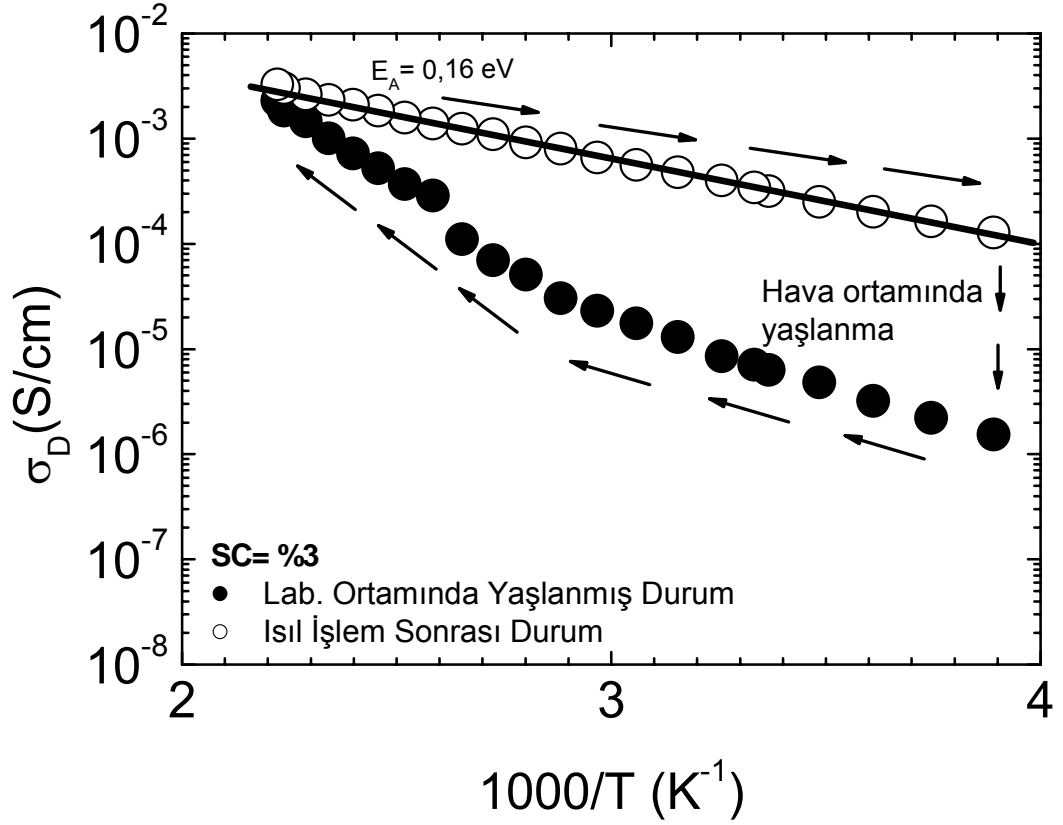
3.2.2.1 Karanlıkta iletkenlik ölçümleri

Mikro-kristal silisyum malzemeler vakum ortamından laboratuvar ortamına çıkarıldıktan sonra elektronik özelliklerinde değişimler oluşmaktadır (Finger, 2003). Pürüzlü cam taban üzerine 700nm kalınlığında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemeler vakum odasında büyütüldükten sonra 1 ay ile 3 ay arasında laboratuvar atmosferinde ve karanlıkta bekletilmiştir. Yaşlanma işleminin gerçekleşmesinin ardından malzemeler Kriostat içerisine yerleştirilip yüksek vakum ortamında karanlıkta iletkenlik değerleri sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Malzeme önce 77 K'e soğutulup sonra 450 K'e kadar ısıtılarak elde edilen karanlıkta iletkenlik sonuçları Şekil 3.2'de $SC = \%2$ malzeme için gösterilmiştir. Malzeme 450K sıcaklığında birkaç saat ısıtılma maruz bırakıldıktan sonra tekrar yavaş yavaş soğutulularak (1-2K/ dakikada hızında) karanlıkta iletkenlik değerleri tekrar ölçülmüştür. Şekil 3.2'den görüleceği gibi karanlıkta iletkenlik eğrisindeki değişim aynı yolu izlememektedir. Isıl işlem sonrası ölçülen karanlıkta iletkenlik eğrisi yaklaşık iki merteye daha yüksek değerleri vermektedir. Bu tür değişim ilk defa F. Finger ve çalışma arkadaşları tarafından 2003 yılında yayınlanmıştır (Finger, 2003). Karanlıkta iletkenlikteki bu tür değişim Tip I türü kararsızlık problemi olarak tanımlanmıştır. Malzeme ısıtılma sonrasında tekrar hava ortamına bırakıldığında karanlıkta iletkenlik değerleri zamanla birkaç merteye azalmakta, tekrar vakum ortamında ısıtılma alındığında yine ısıtılma sonrası karanlıkta iletkenlik değerlerine erişmektedir. Belirli süreler sonunda yapılan yaşlandırma-ısıtılma işlem çevrimi sonucunda tekrar edilebilir karanlıkta iletkenlik çevrimi elde edilmiştir. $SC = \%2$ oranına sahip malzemenin karanlıkta iletkenlik değişimleri Tip I türü bir kararsızlık problemi. Isıl işlem sonrası ölçülen karanlıkta iletkenlik eğrisinin yüksek sıcaklık bölgesinin doğrusal bir değişim gösterdiği ve denklem 2.5'e göre bu doğrunun eğiminden karanlıkta Fermi seviyesinin iletkenlik bant ucundan uzaklığı 0,25 eV olarak bulunmuştur. Bu değer malzemenin Fermi seviyesinin bant ucuna yakın olduğunu ve n-tipi iletkenliğe yani elektronların baskın olduğu bir iletkenlik mekanizmasına sahip olduğunu işaret etmektedir.

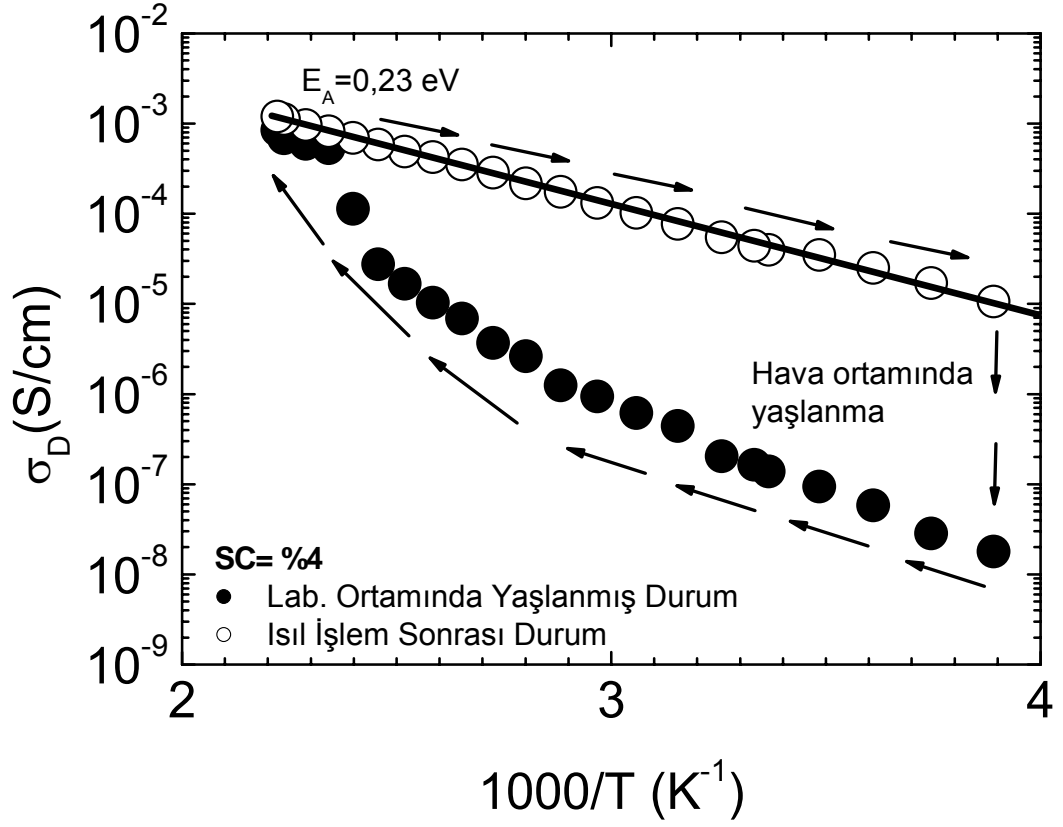


Şekil 3.2. SC= %2 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıl işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.

SC oranı arttırıldığı zaman kristal hacim oranı azalmaktadır. SC= %3 ve SC= %4 koşullarında büyütülen malzemelerin karanlıkta iletkenlik çevirimleri Şekil 3.3 ve 3.4'de gösterilmiştir. SC= %3 ile büyütülen malzemelerin 300K'deki karanlıkta iletkenlik değerleri vakumdan çıkarıldıktan sonra azalmakta yani Tip I türü kararsızlık problemi göstermektedir. Buna ek olarak aynı zaman sonunda karanlıkta iletkenlik değerleri SC= %2 olan malzemedan daha fazla olmuştur. Isıl işlem sonrası ölçülen karanlıkta iletkenlik değerleri $1000/T$ 'ye göre doğrusal bir değişim göstermekte ve doğrunun eğiminden denklem 2.4'e göre aktivasyon enerjisi 0,18 eV olarak bulunmuştur. Bu değer Fermi seviyesinin iletkenlik bant ucuna daha yakınlığını göstermektedir. Malzeme oda sıcaklığına ulaştığında vakumdan çıkarılmıştır. Karanlıkta iletkenlik değerleri atmosfer gazlarının iç difüzyonu sonucu tekrar azalmaktadır. Isıl işlem-yaşlandırma çevrimi birkaç kez tekrarlanmış ve geri dönüşümlü bir çevrim olduğu bulunmuştur. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi karanlıkta iletkenlik değişimi Tip I türü bir değişim izlemekte ve oda sıcaklığındaki değişim bir önceki malzemedan daha fazla olmuştur. SC= %4 değerine sahip malzeme için de ısıl işlem-yaşlandırma çevrimi birkaç defa tekrarlanarak geri dönüşümlü bir değişim olduğu belirlenmiştir. Karanlıkta iletkenlik eğrisinin yüksek sıcaklık bölgesinde 450K ile 250K arasında doğrusal bir değişim vardır. Bu doğrunun eğiminden Fermi enerjisinin iletkenlik bant ucundan 0,23 eV kadar aşağıda olduğu anlaşılmaktadır. Amorf oranının artması ile malzeme hala mikro-kristal silisyum gibi Tip I türü kararsızlık problemine sahiptir.

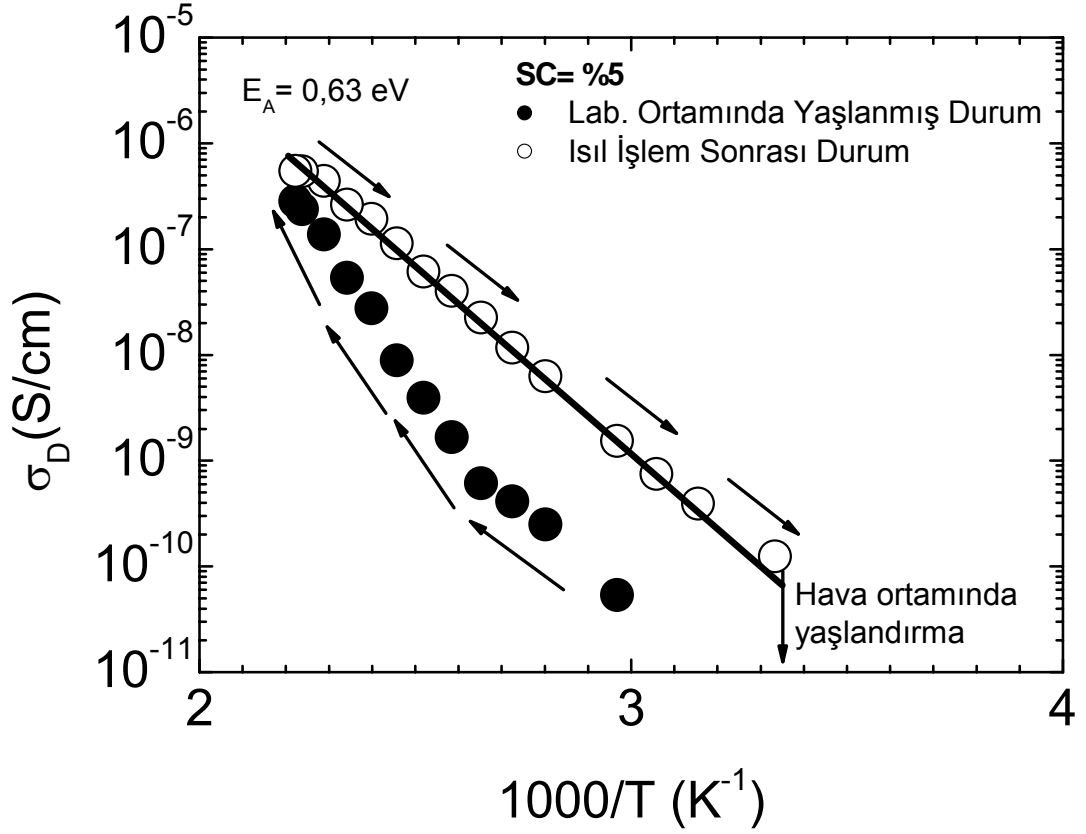


Şekil 3.3. SC= %3 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıl işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.

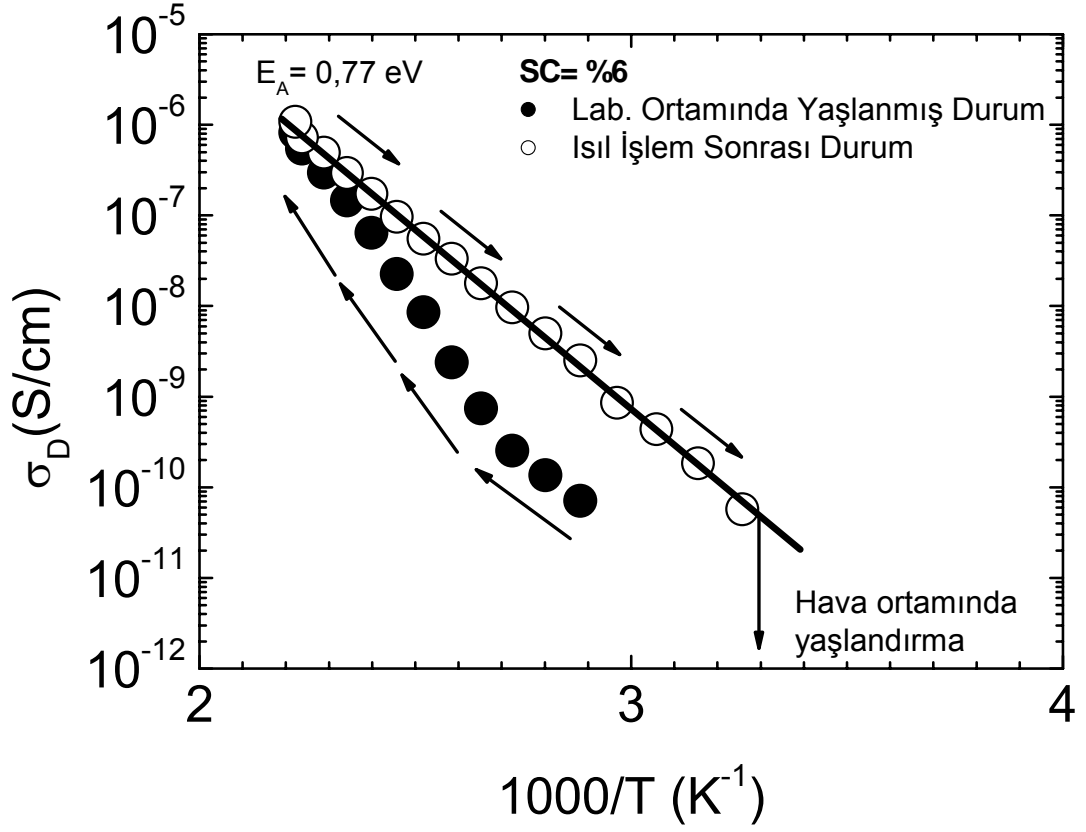


Şekil 3.4 SC= %4 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıl işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.

SC oranı %5 ve %6 değerlerine arttırıldığında kristal oranının sıfır olduğu ve optik soğurma katsayısı spektrumlarının amorf silisyumunki gibi olduğu Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Amorf silisyum için bu tür atmosfer gazları sonucu geri dönüşümlü bir elektronik bozunuma problemi yayımlanmamıştır. Bunun aksine 1977 yılında Staebler ve Wronski tarafından ışık altında bozunum ve ısı işlem sonrası tamamı ile geri dönüşümlü olan bir etki keşfedilmiştir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da SC=%5 ve %6 değerlerine sahip malzemelerin karanlıkta iletkenlik ölçümleri gösterilmiştir. Her iki malzemenin de laboratuvar atmosferinde beklerken karanlıkta iletkenlik değerlerinin azaldığı ve ısı işlem sonrası arttığı belirlenmiştir. Bir başka deyişle, mikro-kristal silisyumda görülen Tip I türü kararsızlık problemi amorf malzemeler içinde görülmektedir. Bu iki malzemenin amorf olduğu optik soğurma katsayısı spektrumu ve aktivasyon enerjisi değerlerinden görülmektedir. Oda sıcaklığında ölçülen karanlıkta iletkenlik değerleri SC= %3 ve %4 malzemelerden birkaç mertebe daha düşüktür. Aktivasyon enerjileri SC= %5 ve %6 ile büyütülen malzemeler için sırası ile 0,63 eV ve 0,78 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatürde katkısız amorf silisyum ince film malzemeler için yayımlanmış değerlerle örtüşmektedir.



Şekil 3.5 SC= %5 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıl işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.



Şekil 3.6 SC= %6 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikrokristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferinde bozunmuş ve ısıl işlem sonrası sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik çevrimi.

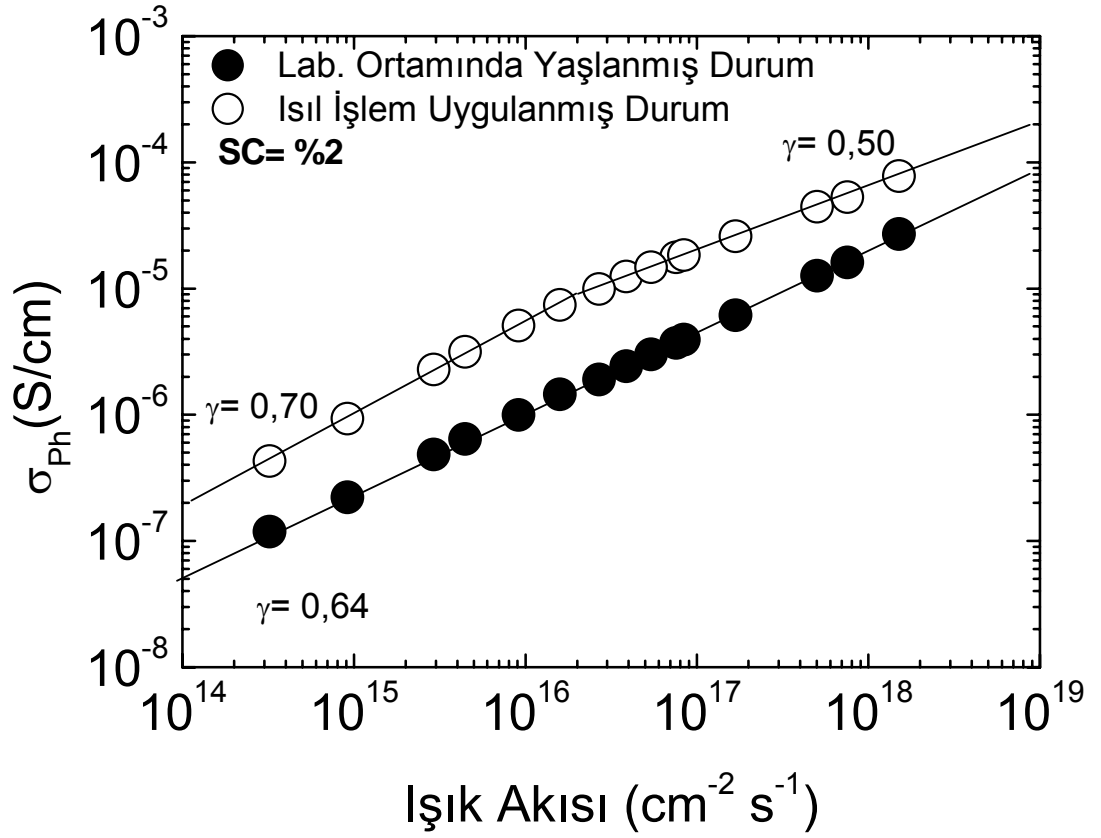
Aktivasyon enerjisinin yüksek olmasından dolayı oda sıcaklığından düşük sıcaklıklarda karanlıkta iletkenlik değerleri Elektrometre'nin ölçüm sınırları dışında kalmaktadır. Bu iki amorf silisyum malzemenin ölçümleri iki defa tekrar edilmiş ve laboratuvar ortamındaki elektronik bozunumun tekrar edilebilir olduğu hem karanlıkta iletkenlik hem de fotoiletkenlik ölçümleri ile tespit edilmiştir.

Sonuç olarak pürüzlü cam taban malzemesi üzerine SC= %2, %3, %4, %5 ve %6 değerlerinde büyütülen 700nm kalınlığındaki mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin laboratuvar ortamında beklerken karanlıkta iletkenlik değerlerinde çok ciddi azalmalar olduğu, hatta bu etkinin amorf silisyum malzemelerde bile ortaya çıktığı bulunmuştur. Bu değişimlerin 2003 yılında Finger ve arkadaşları tarafından yayımlanan Tip I türü bir kararsızlık etkisi olduğu açıktır (Finger, 2003). Önceki çalışmada bu tür kararsızlık etkileri pürüzsüz cam taban malzemesi üzerine büyütülen mikro-kristal silisyum malzemelerde gözlenmiştir. Aynı etki ilk defa bu tez kapsamında pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş malzemelerde de gözlenmiştir.

3.2.2.2 Fotoiletkenlik ölçümleri

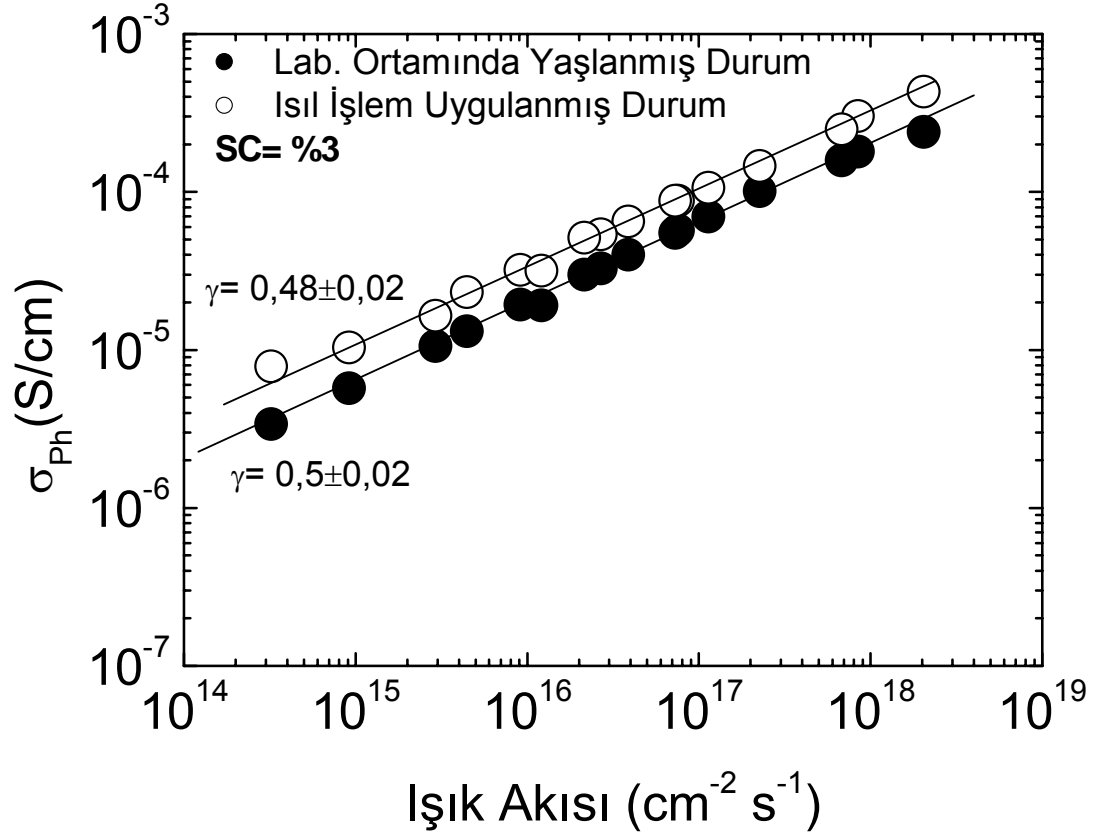
3.2.2.2.1 Oda sıcaklığında ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümleri

$\mu\text{c-Si:H}$ malzemelerin en önemli kullanım alanlarından biri olan fotovoltaik uygulamaların çalışma sıcaklığı oda sıcaklığı ve $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklardadır. Bu nedenle oda sıcaklığında fotoiletkenlik değerlerinin belirlenmesi malzemenin içerisinde gerçekleşen iletim mekanizmasının anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.7'de SC= %2 değerine sahip mikro-kristal silisyum malzemenin ışık şiddetine bağlı olarak ölçülen fotoiletkenlik değerleri gösterilmiştir. Laboratuvar ortamında birkaç ay bekledikten sonra ölçülen fotoiletkenlik değerleri ısıtma işlem sonrası vakumda ölçülen değerlerden daha düşük değerlere sahiptir. Isıtma işlem öncesi ve sonrası ölçülen fotoiletkenlik değerlerin log-log grafiği çizildiğinde ışık şiddetine bağlı olarak doğrusal ilişki göstermektedirler. Doğrunun eğimi hesaplandığında γ üstel parametresi her iki durumda da birbirine çok yakındır. Isıtma işlem öncesi tek bir γ değerine sahipken ($\gamma=0,64$) ısıtma işlem sonrası iki farklı γ değeri gözlemlenmektedir bunlar sırası ile düşük ışık akılarında 0,7 yüksek ışık akılarında 0,5 değerine ulaşmaktadır.



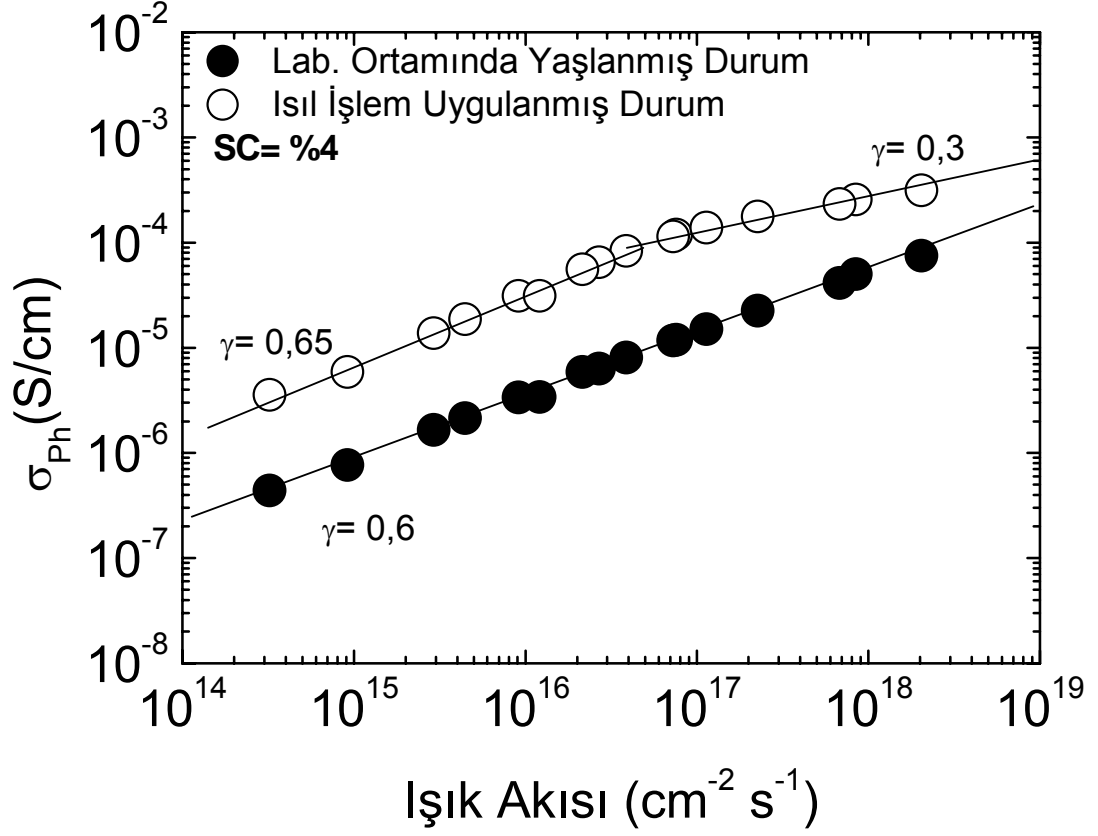
Şekil 3.7 Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %2 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.

Şekil 3.8’de SC= %3 ile büyütülen malzemede ise ısıtım işlem öncesi ve sonrası elde edilen γ değerleri verilmiştir. Isıtım işlem sonrası ve öncesi γ $0,46 \pm 0,02$ değerine sahiptir. Yani γ üstel parametresi hemen hemen aynıdır. Her iki durum için ölçülen γ değerleri deneysel hata sınırı içerisinde $\gamma = 0,5$ değerine çok yakındır. Bunun anlamı; Işıık ile yaratılan elektron ve deşiklerin doğrudan birleşip yok olduklarını ifade etmektedir. Yasak enerji aralığında yerleşmiş kusurların herhangi bir katkısı yoktur. Bunun anlamı, tek kristal silisyum malzemenin fotoiletkenlik mekanizmasında olduğu gibi, iletkenlik bandındaki serbest foto elektronların doğrudan değerlik bandındaki deşiklerle birleşerek yok olmasıdır. Isıtım işlem sonrası fotoiletkenlik değerlerindeki artış yaklaşık 2 kat kadardır. Karanlıkta iletkenlik çevrimindeki gibi Tip I türü kararsızlık problemi göstermektedir.



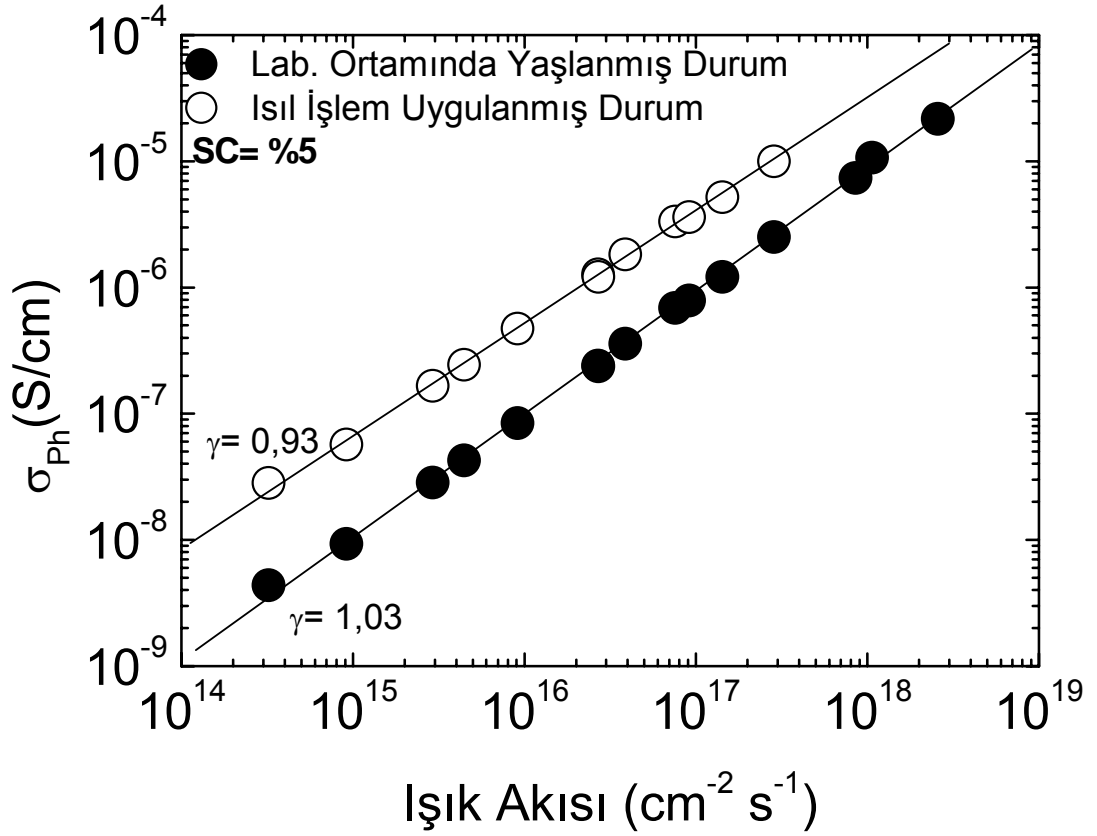
Şekil 3.8 Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %3 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.

SC değeri %4 iken pürüzlü cam taban üzerine büyütülen mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığındaki fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Laboratuvar ortamında yaşlanmış durumda ölçülen fotoiletkenlik değerleri ışık şiddetine göre doğrusal bir değişim göstermekte ve doğrunun eğiminden γ üstel parametresi 0,60 olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem sonrasında fotoiletkenlik eğrisi yaklaşık 10 katlık bir artış göstererek bir önceki malzeme gibi Tip I türü kararsızlık problemi sergilemektedir. Fakat fotoiletkenlik değerlerindeki artış daha fazladır, yaklaşık olarak 10 kat bir artış göstermektedir. Bu malzemenin karanlık Fermi seviyesi yaşlanma ile bant ortalarına doğru daha fazla değişim göstermesinden dolayı hem karanlıkta hem de fotoiletkenlik değerleri daha fazla azalmaktadır. Buna ek olarak, fotoiletkenlik değişimleri iki farklı doğrusal bölge sergilemektedir. Düşük ışık şiddetlerinde γ üstel parametresi 0,65 iken yüksek ışık şiddetlerinde ikinci bir doğrunun eğimi olarak $\gamma = 0,3$ değeri hesaplanmıştır. 0,5'den küçük gamma değerleri beklenmedik bir davranıştır. Isıl işlem sonrası elde edilen yüksek ışık şiddetlerindeki ikinci doğrusal bölgenin farklı özelliklere sahip yeniden birleşme mekanizmasını baskın olmaya başladığını belirtmektedir. Yüksek ışık şiddetlerinde yeterince bant uçlarına doğru açılan kuazi Fermi seviyeleri arasına giren aktif yeniden birleşme merkezlerinin fotoiletkenlik değerlerini kontrol eder hale geldiğini göstermektedir. Literatürde bu tür 0,5'den küçük gamma değerleri çok yüksek kristal oranına sahip (%98) mikro-kristal malzemeler için yayımlanmıştır. Fakat bu tezdeki malzeme %27 kristal oranına sahiptir. Literatürde yayımlanan sonuçların çoğu $G=1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, den küçük ışık şiddetlerinde ölçülmüştür. Dolayısı ile $\gamma = 0,3$ değerine sahip mekanizmanın doğası henüz bilinmemektedir.



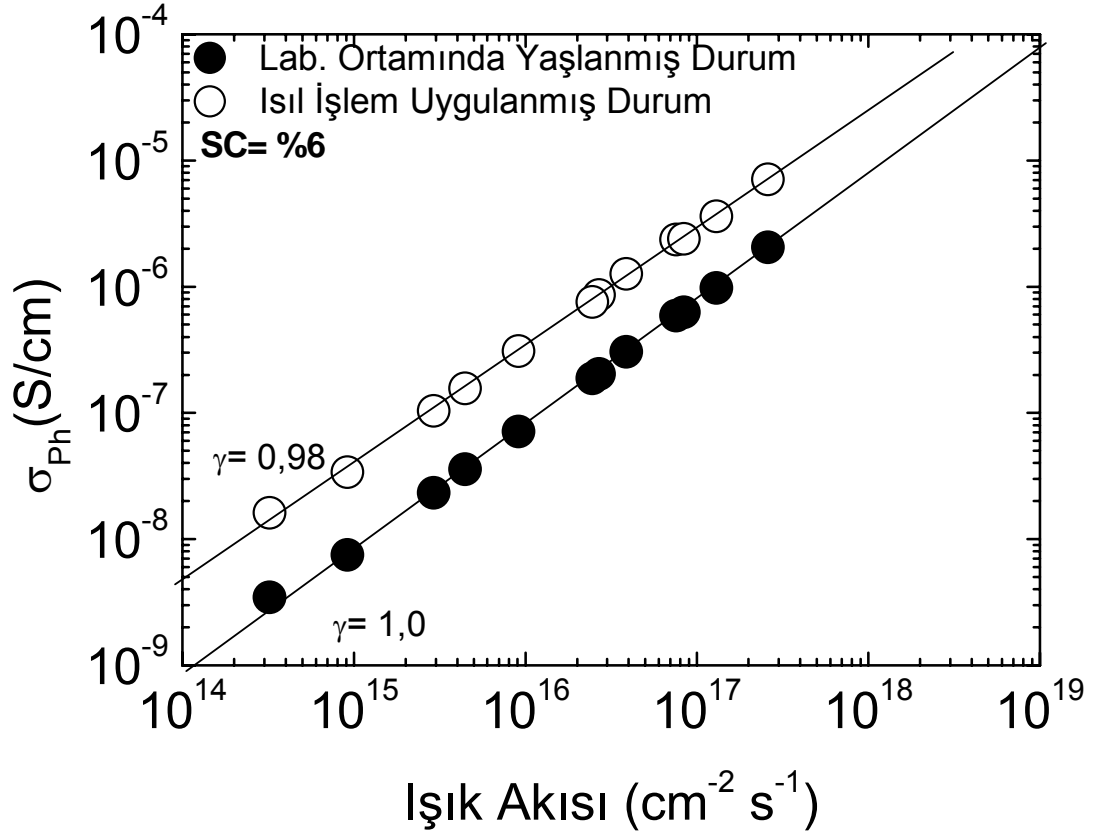
Şekil 3.9 Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %4 değerinde pürüzlü cam taban üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.

SC değeri %5 olan malzemenin kristal oranının sıfır olduğu ve amorf özellik gösterdiği belirtilmiştir. Bu malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerleri ise Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Karanlıkta iletkenlik değerlerinin dört beş mertebe küçük olmasına rağmen fotoiletkenlik değerleri önceki iki mikro-kristal malzemenin fotoiletkenlik değerlerine yakındır. Bunun nedeni amorf silisyum malzemenin görünür bölgede daha yüksek optik soğurma katsayısına sahip olmasındandır. Laboratuvar ortamında yaşlanmış durum ve ısıtma işlem sonrası ölçülen fotoiletkenlik değişimleri yine önceki mikro-kristal silisyum malzemeler gibi Tip I türü değişim sergilemektedir. Yani ısıtma işlem sonrasında fotoiletkenlik doğrusu yaşlanmış durumda ölçülen doğrudan daha yüksek değerlere kaymaktadır. Diğer önemli farklılık ise, gamma üstel parametresi ideal 1 değerine çok yakındır. Yaşlanmış durumda $1,0 \pm 0,02$ ve ısıtma işlem sonrasında $0,93 \pm 0,02$ değerine sahiptir. İdeal 1 değeri, A.Rose tarafından açıklandığı gibi, malzemedeki elektronik kusur yoğunluğunun düşük seviyelerde ($\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) olan malzemelerde gözlemlenebileceğini belirtmektedir. Bu malzemenin laboratuvar ortamında bekledikten sonra ölçülen γ üstel parametresi deneysel hata payı içinde ideal 1 değerine sahiptir. Bu γ değeri amorf malzemelerde mevcut yeniden birleşme mekanizmasının mikro-kristal silisyum ince film malzemelerde farklı olduğunu belirtmektedir. Amorf malzemelerin yüksek ışık altında çok çabuk bozunuma uğramalarından dolayı ısıtma işlem sonrasında yüksek ışık şiddetlerinde fotoiletkenlik ölçümleri yapılmamıştır.



Şekil 3.10 Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %5 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.

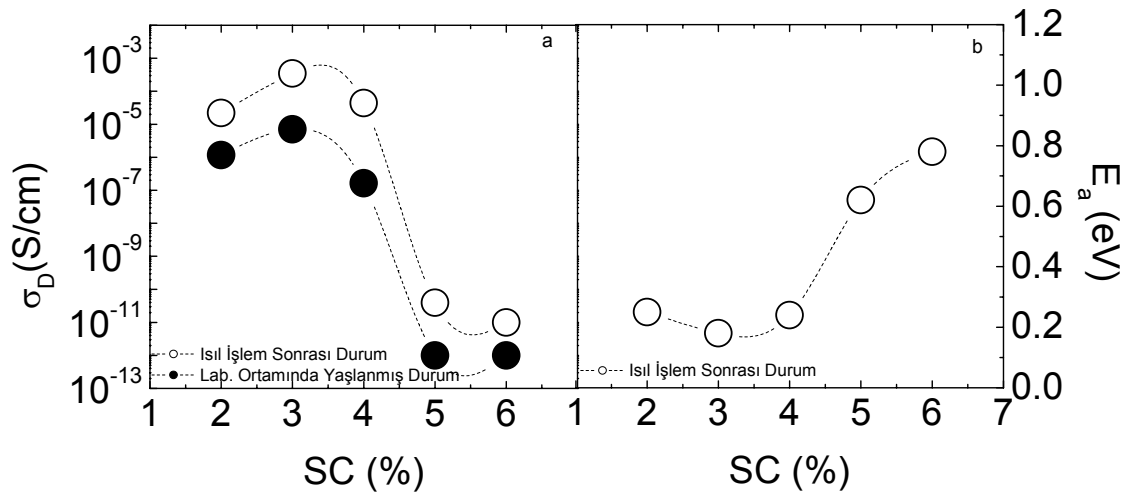
SC değeri %6 olan malzemenin de amorf silisyum özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Bu malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Isıl işlem öncesinde ve sonrasında ölçülen fotoiletkenlik değişimleri ışık şiddetine göre beklenen doğrusal bir değişim vermektedirler. Isıl işlem sonrası fotoiletkenlik değerleri artarak önceki malzemelerde olduğu gibi Tip I türü bir kararsızlık problemi göstermektedir. Isıl işlem sonrası gamma üstel parametresi 1 değerindedir. SC= %5 silan gazı oranında büyütülen amorf malzemenin fotoiletkenlik ve gamma değerlerine çok yakındır. Her iki amorf silisyum malzemenin gamma değerleri bir önceki malzemelerden farklı mikro yapıya sahip olduklarını ve yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların mikro-kristal ve amorf silisyumda birbirinden farklı olduğunu ortaya koymaktadır.



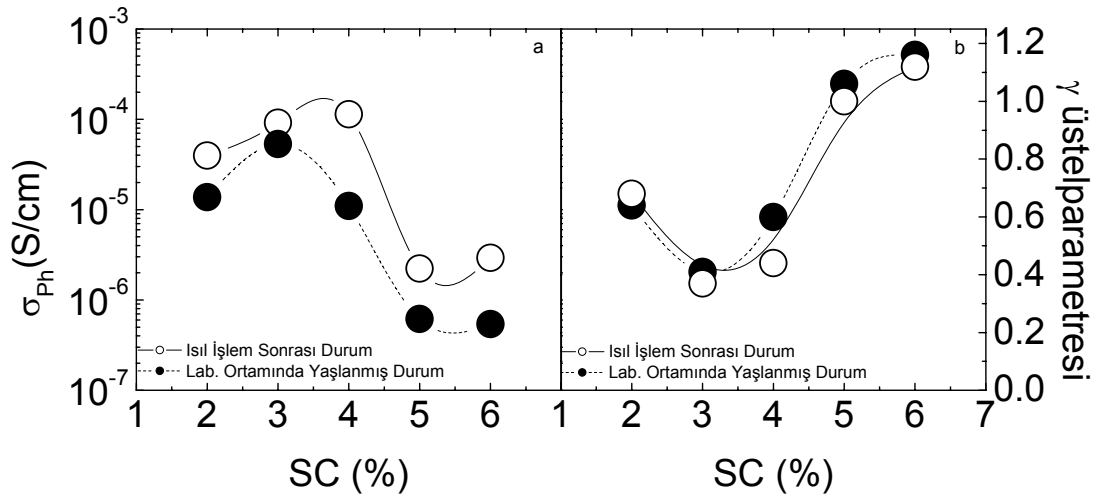
Şekil 3.11 Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %6 değerinde pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimi.

Pürüzlü cam taban malzemesi üzerine değişik SC değerlerinde büyütülen mikro-kristal silisyum malzemelerin laboratuvar ortamında birkaç ay yaşlanması sonucu oluşan değişimleri oda sıcaklığında ölçülen karanlıkta iletkenlik, fotoiletkenlik, gamma ve aktivasyon enerjilerini SC oranına bağlı olarak Şekil 3.12 ve 3.13'de özetlenmiştir. Aktivasyon enerjisi E_A 'nın SC oranına göre değişimi malzemenin SC= %2 ile %4 arasında kristal bölgelerin baskın olduğu bir iletkenlik mekanizması belirtmektedir. Bu bölgede büyütülen mikro-kristal silisyum malzemenin Fermi seviyesi iletkenlik bant ucuna daha yakın ve n-tipi iletkenlik mekanizması sergilemektedir. Bu malzeme katkısız olmasına rağmen mikro yapıda mevcut elektronik kusurların yük durumlarına göre Fermi seviyesi iletkenlik bant ucuna doğru kaymaktadır. SC= %4 den büyük değerlerde keskin bir geçişin görüldüğü yani kristal baskın mikro yapıdan amorf fazın baskın olduğu mikro yapıya geçiş vardır. Bu değişim önceki yayımlanmış çalışmalarda da görülmektedir. E_A 'nın değişimi aynı şekilde ısı işlem sonrası 300K'de ölçülmüş karanlıkta iletkenlik değerleri ile uyumlu olarak görülmektedir. SC= %4'den büyük olduğunda σ_D keskin bir düşüşle amorf fazın değerlerini belirtmektedir. Aynı şekilde fotoiletkenlik değerleri de mikro yapıdaki değişimin resmini doğrulamaktadır. Malzemeler laboratuvar ortamında yaşlanmaya bırakıldığında belirli süre sonunda tekrar vakum ortamına alınıp ölçülen karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerlerinin birkaç mertebeye kadar azaldığını belirtmektedir. Bu değişimler önceden Finger ve çalışma arkadaşları tarafından Tip I türü kararsızlık problemi olarak tanımlanmıştır. O çalışmada kullanılan malzemeler pürüzsüz cam üzerine büyütülmüştür. Bu tez çalışmasında ilk defa aynı tür etkinin pürüzlü cam üzerine büyütülen aynı mikro yapıdaki mikro-kristal silisyum malzemelerde de gözlemlendiği ortaya konulmuştur. Gamma üstel parametresi amorf ve mikro-kristal faza sahip malzemeler için kesin bir farklılık ortaya koymasına rağmen ısı işlem öncesi ve sonrası kayda değer bir değişim göstermeden aynı değer etrafında durmaktadır. Sonuç olarak pürüzlü cam üzerine büyütülen farklı mikro yapıya sahip mikro-kristal silisyum malzemeler atmosfer ortamında elektronik bozunuma uğramaktadır. Hem karanlıkta iletkenlik hem de fotoiletkenlik mekanizmaları Tip I türü bir kararsızlık problemine sahiptir. Isıl işlem-yaşlandırma çevrimi birkaç kez tekrarlanmış ve bu çevrimin geri dönüşümlü olduğu bulunmuştur. Daha derin bilgi elde edebilmek için ölçüm

yöntemlerinin sınırlarını genişletmek ya da daha farklı yöntemleri aynı malzemelere uygulamak gereklidir. Bu amaç için ışık şiddetine bağlı olarak yapılan fotoiletkenlik ölçümleri değişik sıcaklıklarda 77K'den 350K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Aşağıdaki bölümde bu sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.12 Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen (a) Karanlıkta iletkenlik, (b) Aktivasyon enerjisi değerlerinin SC silan gazı oranına göre değişimi.

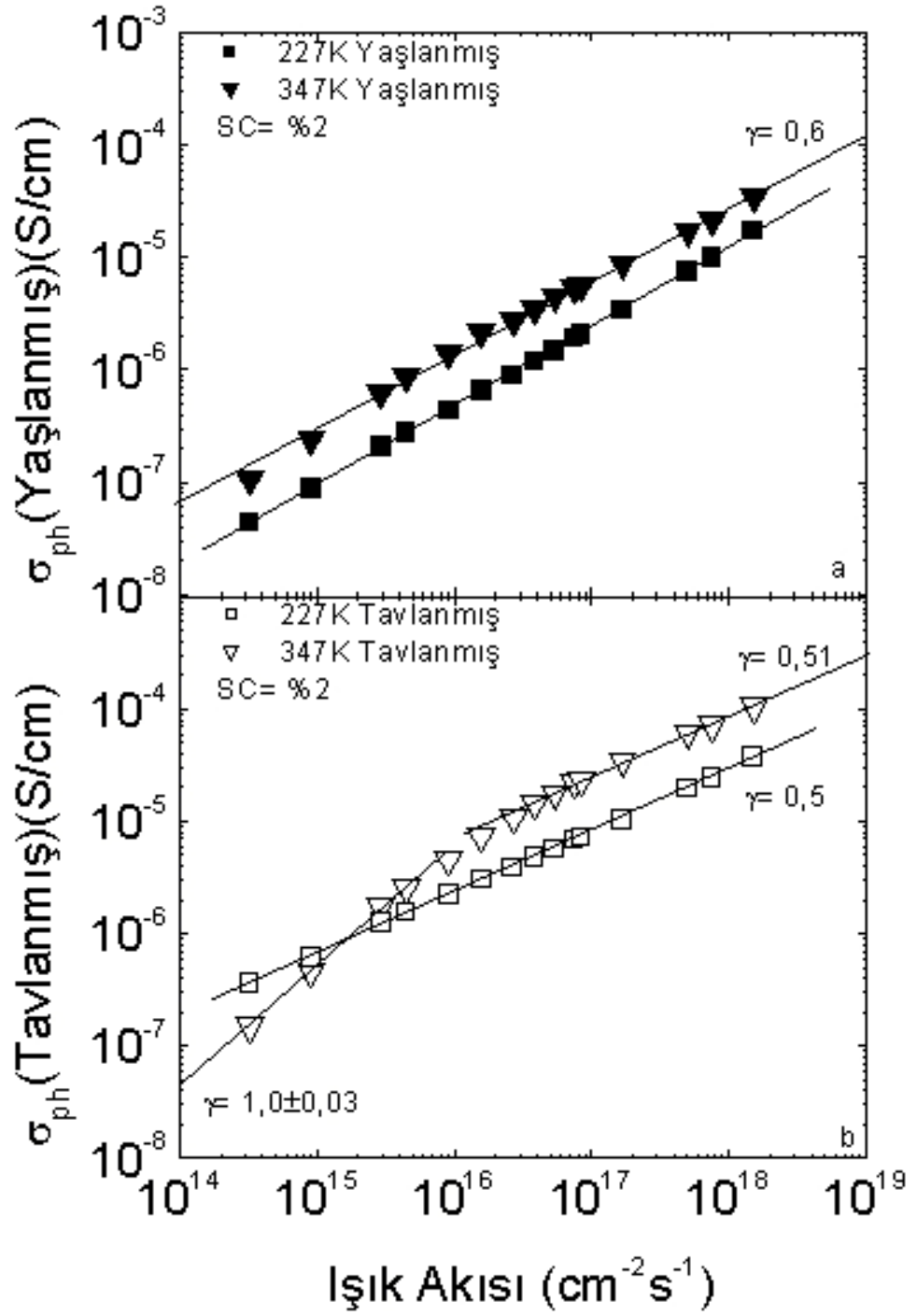


Şekil 3.13 Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemenin oda sıcaklığında ölçülen (a) Fotoiletkenlik, (b) Gamma değerlerinin SC silan gazı oranına göre değişimi.

3.2.2.2.2 Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri

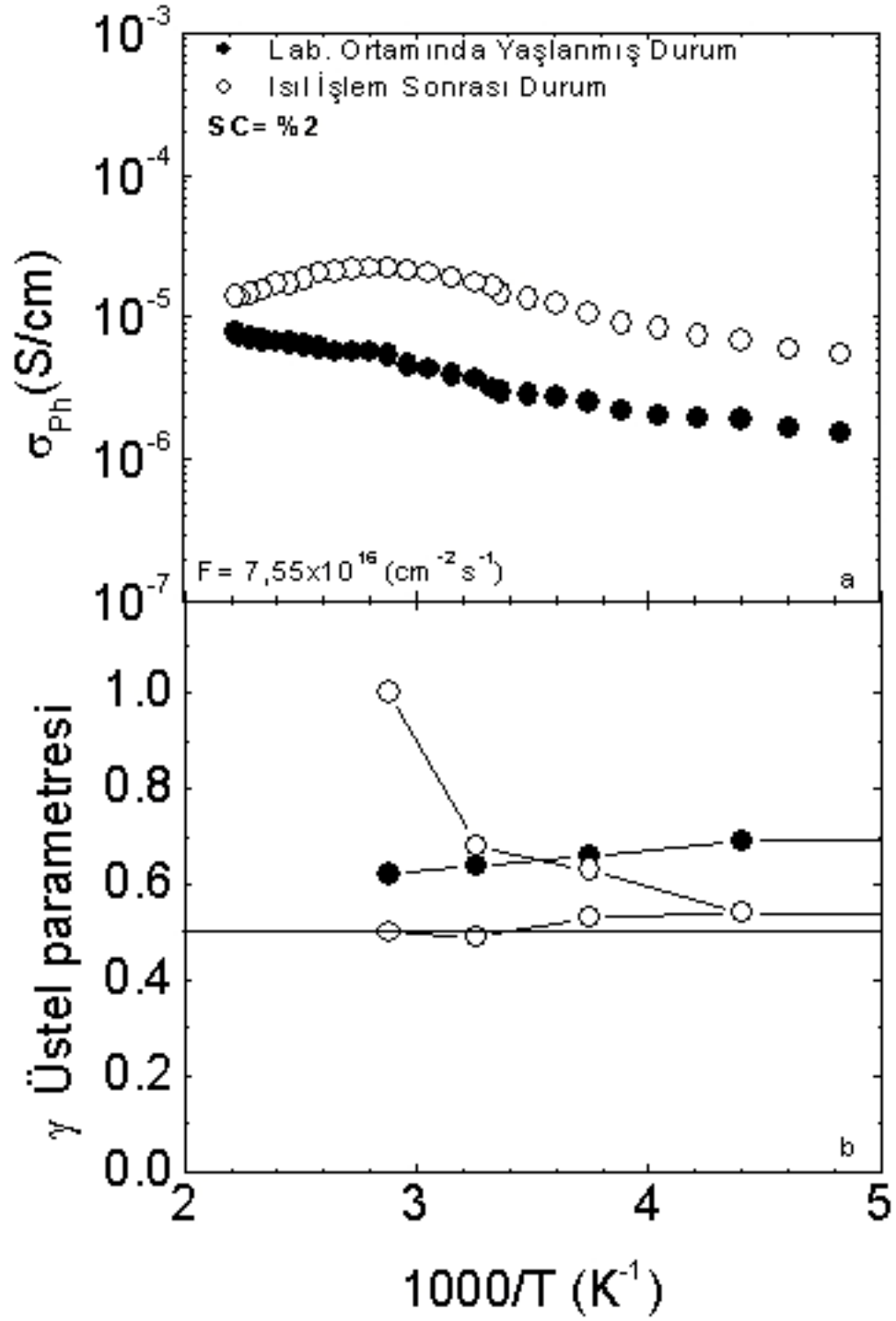
Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerin malzemeyi incelemede çok sınırlı kalmasından dolayı bu çalışmada kullanılan fotoiletkenlik yöntemi 77K ile 450K arasında uygulanmıştır. Bunun amacı denge dışı durumda Fermi seviyesinin ışık altında ikiye ayrılarak bant uçlarına doğru kayması ve bu kaymanın sıcaklığın düşürülerek daha da açılması ile malzemenin yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların ve tuzakların algılanmasında son derece güçlü bir yöntem olmasıdır. Bu nedenle pürüzlü cam üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin değişik mikro yapılarında mevcut elektronik kusurların ve hava ortamında yaşlanma ile oluşan değişimlerin algılanmasında kullanılmıştır.

SC= %2 silan gazı altında büyütülen ve 0,76 kristal hacim oranına sahip malzemenin değişik sıcaklıklarda ölçülen ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik sonuçları şekil 3,14'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her sıcaklık için fotoiletkenlik ışık şiddetine doğrusal bir bağımlılık göstermektedir. Bu doğrunun eğimi gama γ üstel parametresini vermektedir. Yaşlanmış durumda γ üstel parametresi sıcaklıktan etkilenmediği halde ısı işlem görmüş durumda bir değişim görülmektedir.



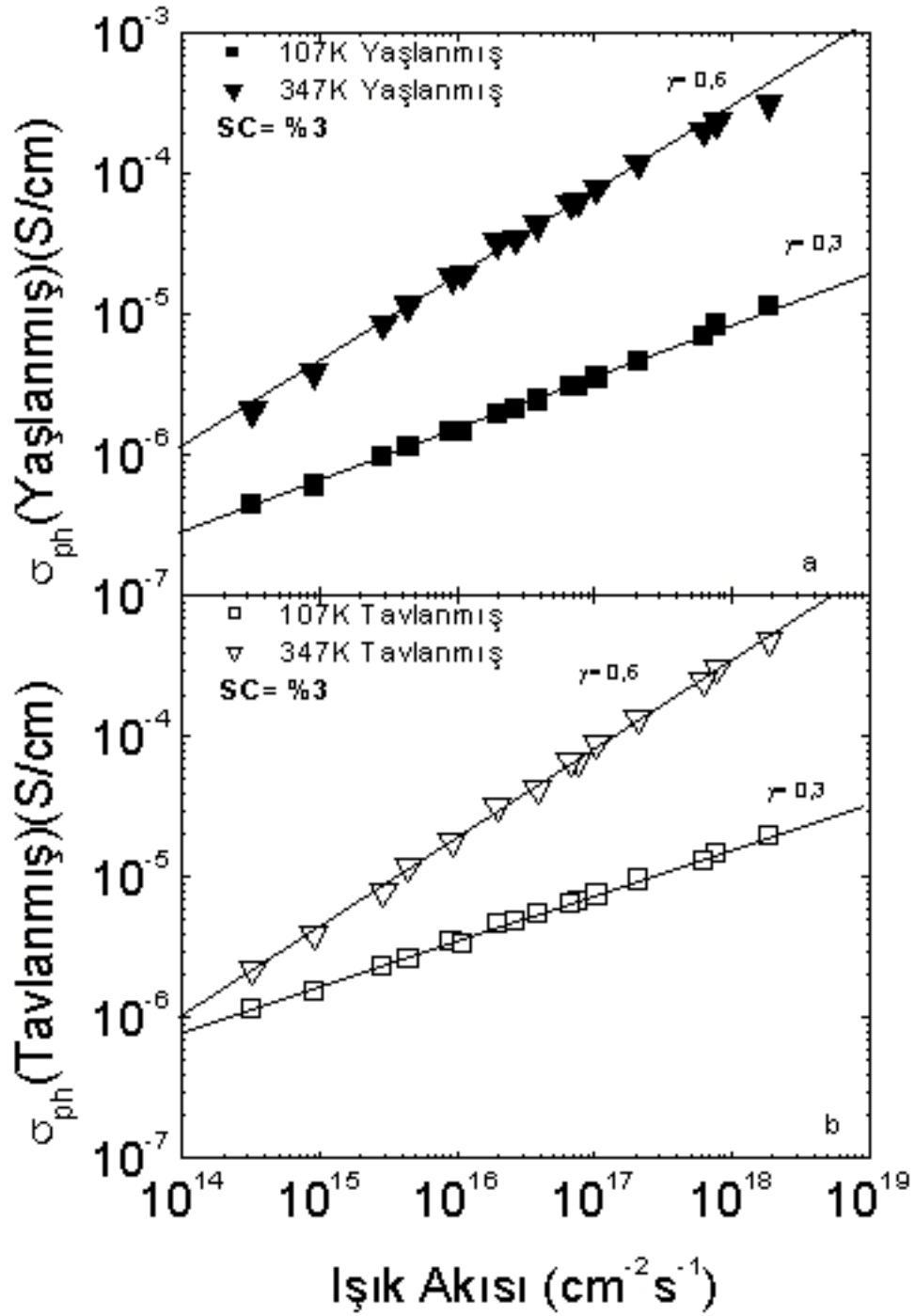
Şekil 3.14 SC= %2 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtılmış durum için ışık şiddetine göre değişimi

Laboratuar ortamında yaşlandıktan sonra 200K ile 450K arasında sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerleri ile γ gamma üstel parametresinin değişimi şekil 3.15’de gösterilmiştir. Yaşlanmış durumda ölçülen fotoiletkenlik 200K den itibaren artarak 450K değerinde $8,0 \times 10^{-6}$ (S/cm) değerine ulaşmaktadır. Birkaç saat süren ısı işlem sonrası aynı ölçümler malzeme soğutulurken yapıldığında fotoiletkenlik değerleri farklı bir yol izleyerek azalmaktadır. İki eğrinin arasındaki fark yaklaşık 8 kat kadardır. Burada fotoiletkenlik değerlerinin ısı işlem sonrasında artış göstermesi bir önceki bölümde gösterilen karanlıkta iletkenlik değerlerinde görülen Tip I türü kararsızlık problemi ile aynıdır. Fotoiletkenlik değerlerinin azalan sıcaklık ile azalmasının nedeni ise yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların yeniden birleşme merkezlerine dönüşmelerinden dolayıdır. Bu merkezlerin artan yoğunlukları ışıkla yaratılan yük taşıyıcıların yaşam sürelerini kısaltmalarından dolayıdır. Aynı sıcaklık aralığında ölçülen fotoiletkenlik üstel parametresi γ ‘nın değişimi ilginçtir. Isıl işlem ya da yaşlanma sonrasında elektronik kusurlarda bir değişimi işaret etmektedir. Yaşlanmış durumda ölçülen γ değerleri 0,6 değerinde sabittir. Fakat ısı işlem sonrasında ölçülen γ değerleri yüksek sıcaklıklarda iki farklı γ değerini işaret etmektedir. Bir önceki fotoiletkenlik ile ışık şiddeti grafiklerinden de görüldüğü gibi, yüksek ışık şiddetlerinde $\gamma = 0,51$ değerine sahip iken düşük ışık şiddetlerinde 0,5’ten artarak $\gamma = 1,0 \pm 0,03$ değerine doğru değişmektedir. İki farklı γ ’nın anlamı iki farklı yeniden birleşme mekanizmasının mevcut olduğunu göstermektedir. Düşük ışık şiddetlerinde iken elektronlar ile deşikler elektronik kusurlar yardımı ile bir araya gelip yok olurken yüksek ışık şiddetinde iletkenlik bandındaki serbest elektronlar ile değerlik bandındaki serbest deşikler doğrudan birleşip yok olurlar. $\gamma = 0,5$ in anlamı budur.

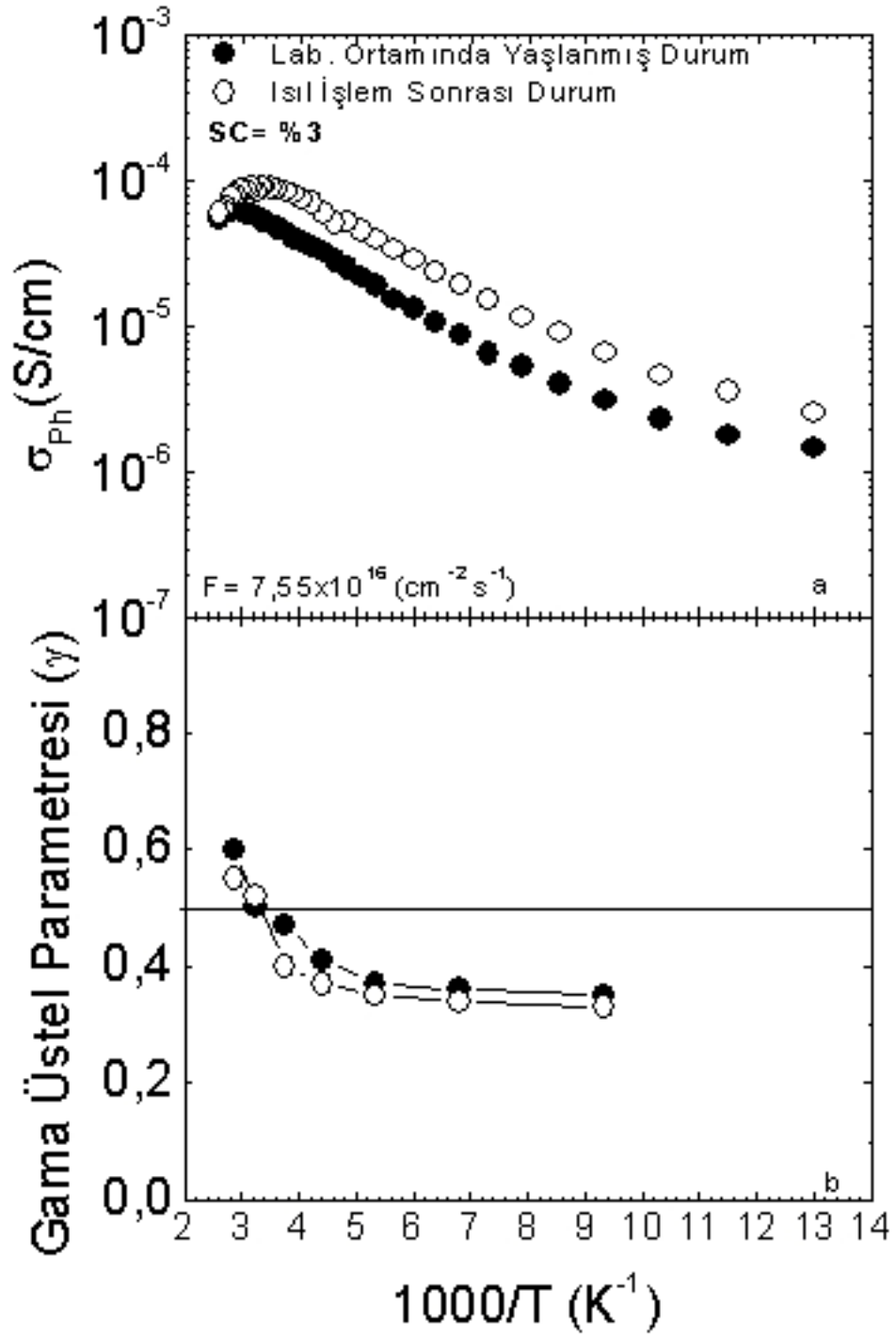


Şekil 3.15 (a) SC= %2 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durumda $F= 7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Malzeme üretimi sırasında kullanılan silan gazı yoğunluğu %3'e arttırılarak büyütülen malzemenin kristal hacim oranı 0,70 yani bir önceki SC= %2 ile büyütülen malzemedan azdır. Bu malzemenin değişik sıcaklıklarda ölçülmüş fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine göre değişimleri yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durum için Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Her sıcaklık değerinde yapılan ölçümler ışık şiddeti ile doğrusal bir değişim vermektedir. Bu malzemenin sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik ve γ üstel parametresindeki değişimleri ise Şekil 3,17'de özetlenmiştir. Yaşlanmış durumda 100K ile 450K arasında ölçülen eğri, ısıl işlem sonrasında daha yüksek fotoiletkenlik değerlerine çıkmıştır. Bu tür değişim yine bir önceki 0,76 kristal hacim oranına sahip malzemeninki ile aynı tür bir değişim yani Tip I türü bir kararsızlık problemi göstermektedir. Fakat oda sıcaklığındaki fotoiletkenlik değerlerindeki azalma karşılaştırıldığında %2'lik malzeme 5 kat azalma gösterirken SC= %3 ile büyütülen malzeme yaklaşık 2 kat bir azalma göstermektedir. SC= %3 lük malzeme daha az bir yaşlanma göstermektedir. Aynı sıcaklık aralığında ölçülen γ üstel parametrelerindeki değişim incelendiğinde ise her iki durumda ölçülen γ değerleri hemen hemen birbirinin aynısıdır. Düşük sıcaklıklarda γ değeri 0,3 değerindedir. 200K'den daha yüksek sıcaklıklarda γ artarak 0,6 değerine kadar çıkmaktadır. Bu malzemenin γ değerleri ve sıcaklıkla değişimi bir önceki SC= %2 ile büyütülen malzemedan çok farklıdır. 0,5 değerinden düşük γ değerleri fiziksel anlamı henüz bilinmemektedir. Kristal oranı 0,76'dan 0,7'e azalması ile malzemenin elektronik kusur dağılımında ve doğasında ciddi bir değişim gözlenmektedir. γ parametresinin değeri ve sıcaklıkla değişimi bunu belirtmektedir.



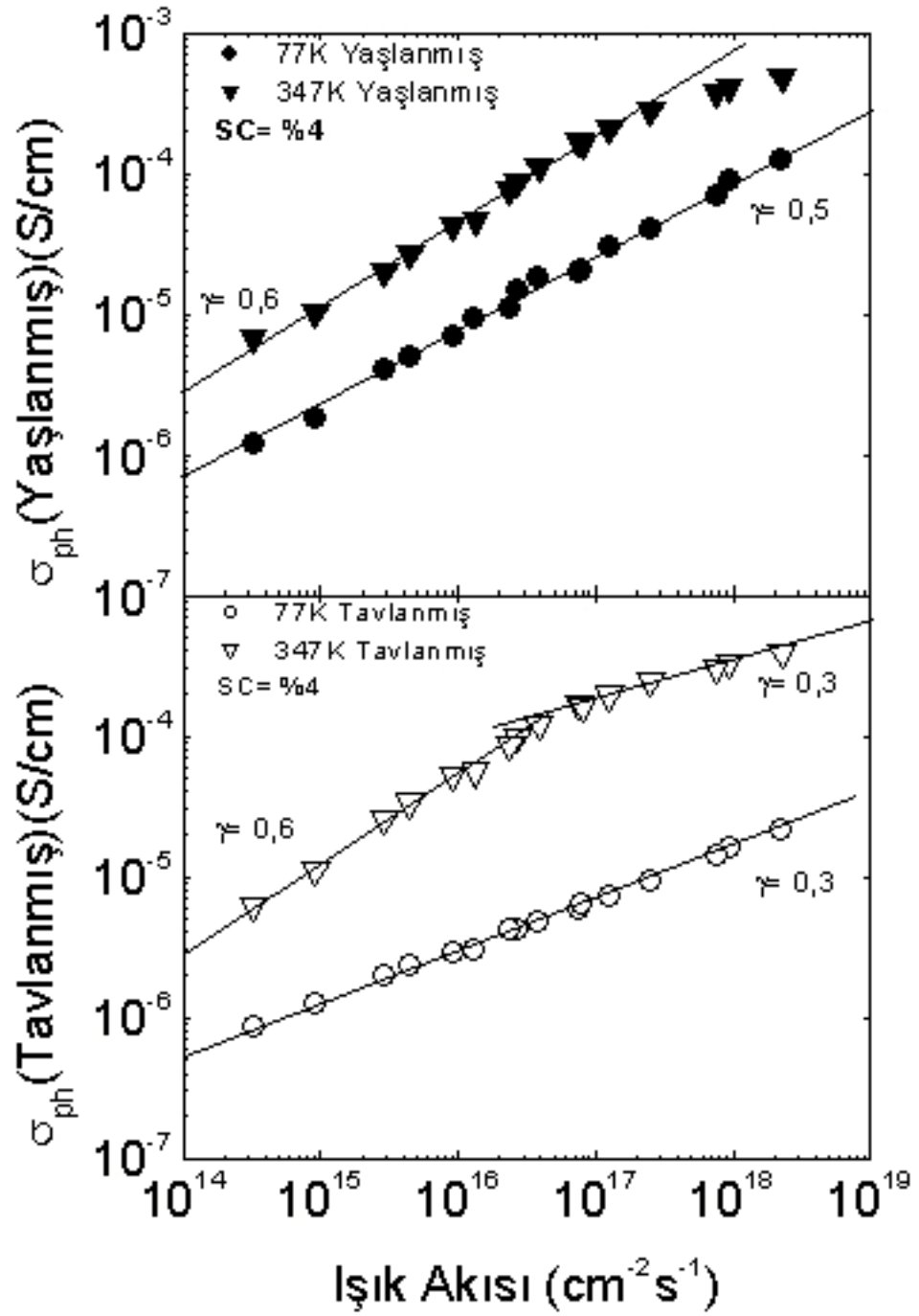
Şekil 3.16 SC= %3 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısı işlem uygulanmış durum ışık şiddetine göre değişimi.



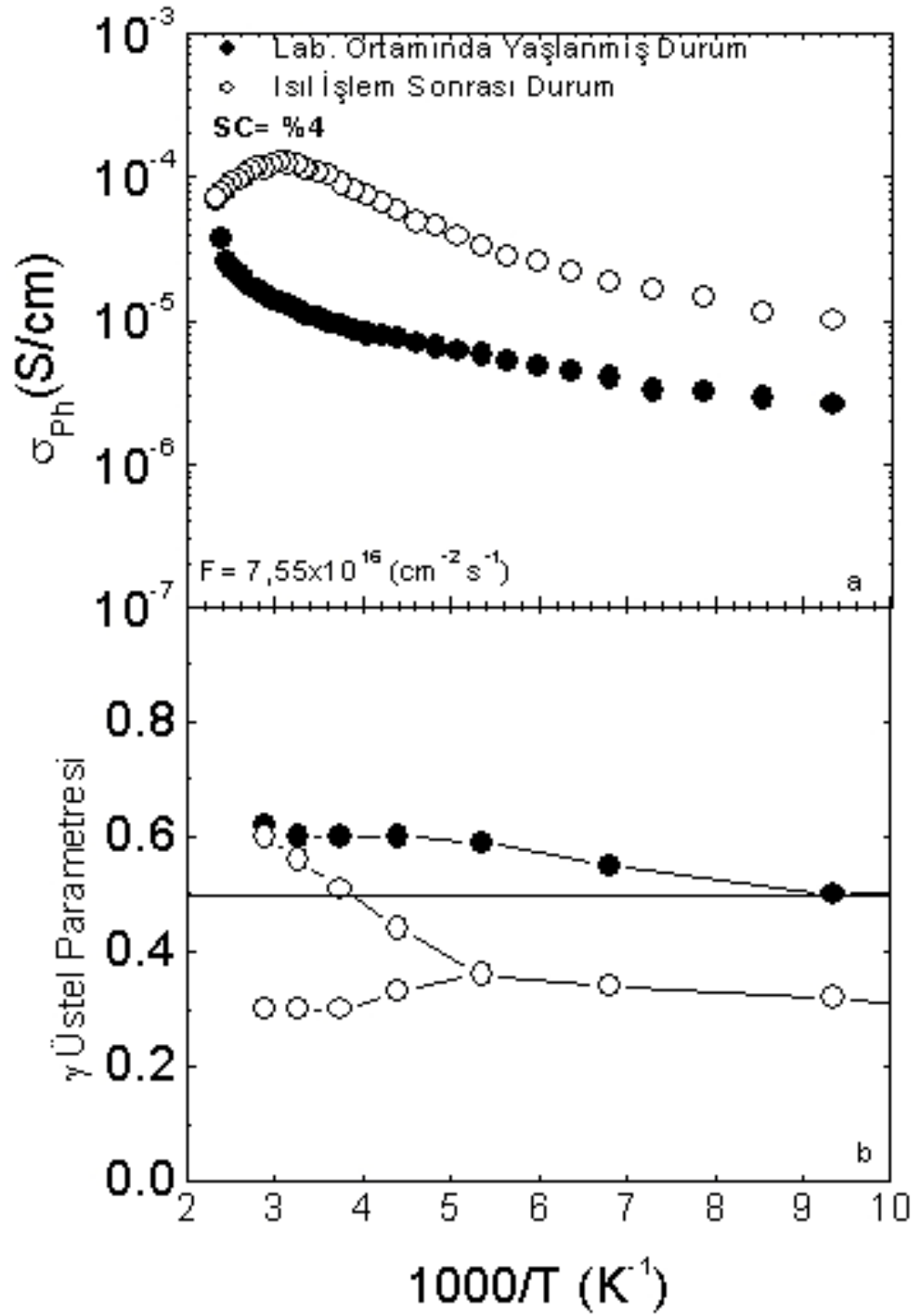
Şekil 3.17 (a) SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durumda $F= 7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Silan gazı yoğunluğu %4 ile büyütülen malzemelerin kristal hacim oranlarında ciddi bir azalma olmuştur. 0,27 olarak Raman ölçümlerinden hesaplanan kristal hacim oranlarında amorf faz ile kristal fazın karışık halde bulunduğu anlaşılmaktadır. Değişik sıcaklıklarda ışık şiddetine bağlı olarak ölçülen fotoiletkenlik değerleri Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Her sıcaklık değerindeki değişimler bir doğru üzerindedir. Sabit ışık şiddetinde ölçülen ışık altındaki iletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi ile γ üstel parametresinin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.19’da özetlenmiştir. Şekil 3.19(a)’daki fotoiletkenlik ölçümleri yaşlanmış durum ile ısı işlem sonrası durumlar için gösterilmiştir. Fotoiletkenlik değerleri laboratuvar atmosferinde beklerken azalmaktadır. Bir önceki yüksek kristal hacim oranına sahip malzemelerdekine benzer olarak Tip I türü bir kararsızlık göstermektedir. Oda sıcaklığında ölçülen fotoiletkenlik değerleri 11 kat azalmaktadır. Yani önceki yüksek kristal hacim oranına sahip malzemelerden daha fazla bir yaşlanma göstermektedir. Isıl işlem sonrasında fotoiletkenlik oda sıcaklığı civarında bir tepe değerine ulaştıktan sonra hızlıca azalarak 2 merteye değişmektedir. Fotoiletkenlik ile ışık şiddeti arasındaki ilişkiyi belirten ($\sigma_{ph} \propto F^\gamma$) γ üstel parametresindeki değişimler şekil 3.19(b)’de gösterilmiştir. Yaşlanmış durumda iken γ değeri 0,5’ten 0,6’ya doğru sıcaklığın artması ile bir değişim gösterirken ısı işlem sonrasında ciddi bir değişim olmuştur. Düşük sıcaklıklarda γ 0,3 değerinde iken 200K’den yüksek sıcaklıklarda hem $\gamma = 0,3$ değeri hem de 0,3’ten 0,6 değerine kadar çıkmaktadır. Aynı tür γ değişimi SC= %2 ile büyütülen yüksek kristal hacim oranına sahip malzemelerde de gözlemlenmiştir. 200K üzerindeki sıcaklıklarda ölçülen fotoiletkenlik değerlerini kontrol eden iki farklı yeniden birleşme mekanizmasının varlığını göstermektedir. Bu çalışmanın amacı kapsamında bu iki farklı mekanizmanın anlaşılması mümkün değildir. Daha ayrıntılı çalışmaları kapsamaktadır.

SC= %4 ile büyütülen mikro-kristal silisyum malzemeler kristal fazından amorf fazına geçiş bölgesindedir. Bu bölgede büyütülen soğurucu tabakalardan oluşturulan güneş gözeleri en yüksek enerji dönüşüm verimini göstermiştir. Fakat soğurucu katmanın kararsızlık problemi en fazla değişim gösteren malzemedir. Dolayısı ile problemin anlaşılması son derece önem arz etmektedir.



Şekil 3.18 SC= %4 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtılmış durum için ışık şiddetine göre değişimi

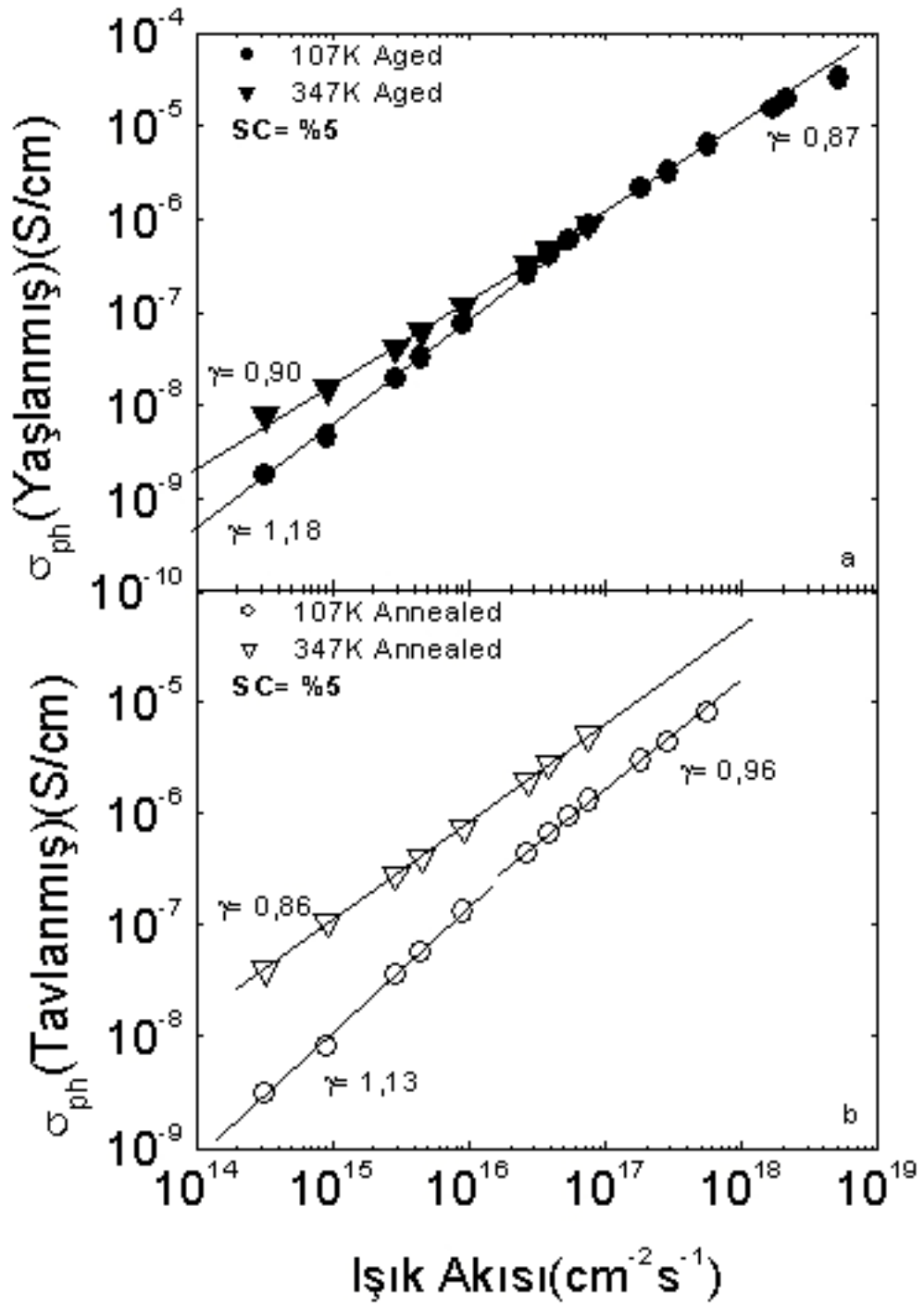


Şekil 3.19 (a) SC= %4 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durumda $F= 7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

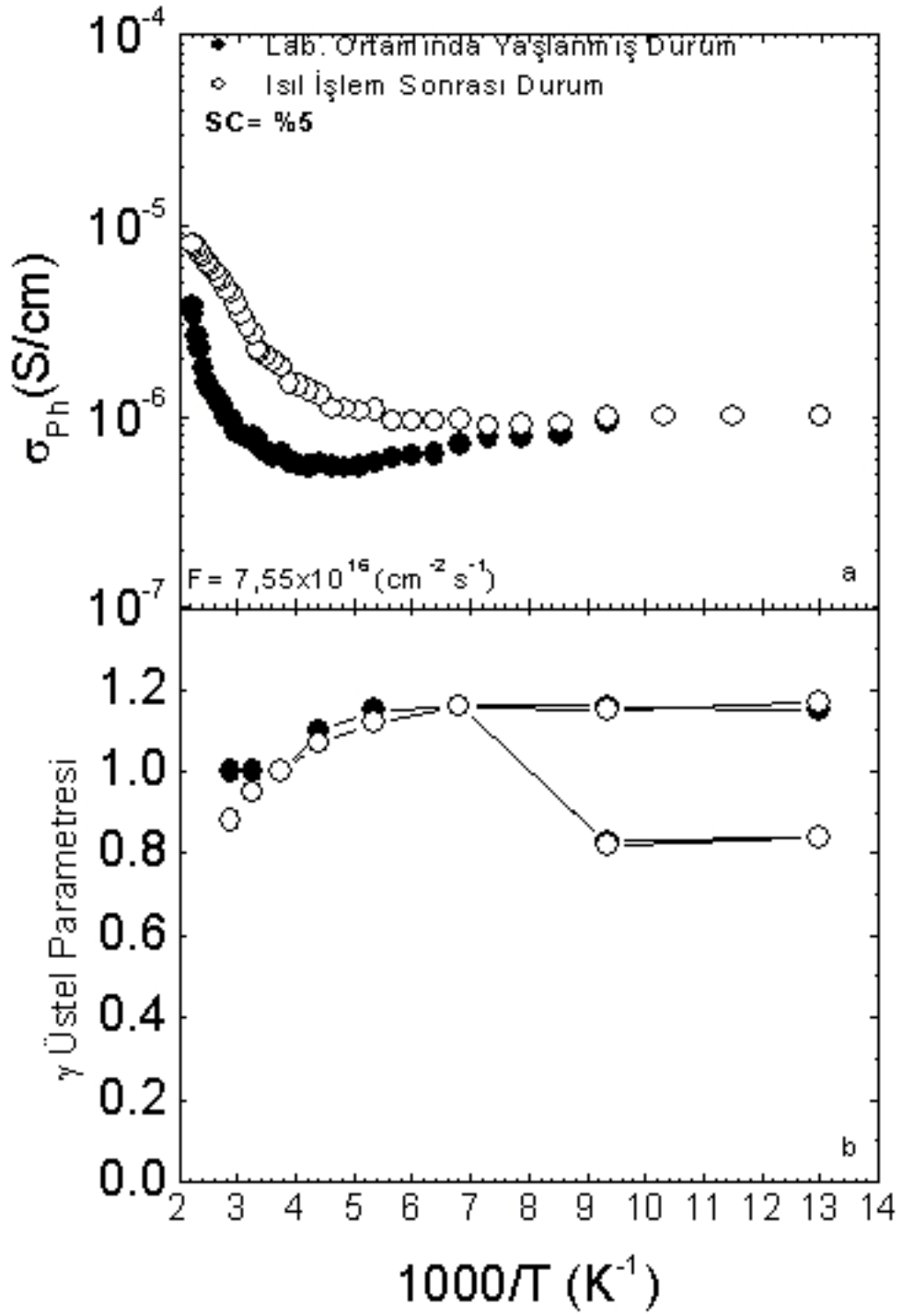
Silan gazı yoğunluğu %5'e arttırıldığında büyütülen malzemelerde amorf fazı tamamen baskın hale gelmektedir. Bu durum hem Raman ölçümünde 0 kristal hacim oranına sahip olduğunu belirtmekte hem de önceki bölümde gösterilen PDS ile ölçülen optik soğurma katsayısı spektrumu yüksek enerjilere kayarak amorf silisyumunkine benzer hale gelmektedir. Amorf silisyum için atmosfer gazlarına bağlı elektronik bozunum ortaya atılmamıştır. Fakat bu malzemelerin en önemli problemi Staebler-Wronski etkisidir. SC= %5 ile üretilen malzemenin yaşlanmış durum ve ısı işlem sonrası ölçüm fotoiletkenlik değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi Şekil 3.20(a) ve 3.20(b)'de özetlenmiştir. İki farklı sıcaklıkta ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ışık akısına göre değişimi farklı doğrusal değişimler göstermektedir. Bu ölçümlerin anlaşılabilir hale getirilmesi için sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin ve γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi şekil 3.21'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi amorf fazı baskın bir malzemenin fotoiletkenlik eğrisi ısı işlem sonrasında artarak Tip I türü bir kararsızlık örneği göstermektedir. Bu ölçümler ikinci kez aynı yaşlanma süresi sonunda tekrar edildiğinde aynı sonuçlar elde edilmiştir. SC=%5'lik malzemenin fotoiletkenlik değerleri mikro-kristal silisyum malzemelerden daha düşüktür. Oda sıcaklığı etrafında görünen tepe noktası yoktur. Yani malzemenin mikro yapısı ve elektronik kusur haritasında büyük bir değişim olmuştur. Düşük sıcaklıklarda ölçülen fotoiletkenlik değerleri üst üste gelmekte yani elektronik bir bozunum görülmemektedir. Bu durum yaşlanmış durumda ölçülen eğrinin 200K'den düşük sıcaklıklarda artarak ısı işlem sonrasında ölçülen eğri ile örtüşmesinden kaynaklanmaktadır. Amorf silisyum için bu tür değişimler gözlemlenmiştir ve "thermal quenching" etkisi olarak tanımlanmıştır.

Amorf fazın baskın olmasından dolayı oluşan değişim γ üstel parametresinde de ortaya çıkmaktadır. Mikro-kristal silisyum malzemelerde ölçülen γ değerlerinden daha yüksek ve ideal $\gamma=1,0$ 'den bile yüksek γ değerleri ölçülmüştür. Oda sıcaklığı ve üzerinde γ değeri 1,0 civarında iken düşük sıcaklıklarda artarak 1,20 değerine kadar çıkmaktadır. γ 'nın 1,0 dan büyük olmasının fiziksel olarak mümkün olduğu Balberg'in çalışmalarında yayımlanmıştır(Balberg,2002). Bunun fiziksel nedeni yasak enerji aralığında yerleşmiş elektronik kusurların bant uçlarına yakın enerjilerde "sensitizing states" olarak adlandırılan durumlardan kaynaklanmaktadır.

Bu tür elektronik kusurlar ancak düşük sıcaklıklarda kuazi Fermi seviyelerinin ışık şiddetinin artırılması ve sıcaklığın düşürülmesi ile bu tür kusurları aktif hale getirmesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu tür kusurların yoğunlukları arttığında elektronların yaşam süreleri arttırmakta ve sonuçta fotoiletkenlik sıcaklık düşerken artmaktadır. Şekil 3.21’de 250K ‘den düşük sıcaklıklarda yaşlanmış durumda ölçülen fotoiletkenlik artarak bir değişim göstermektedir. Isıl işlem sonrasında ise hemen hemen sabit kalmaktadır. SC=%5 için ölçülen fotoiletkenlik bant uçlarına yakın enerjilerde yerleşmiş “sensitizing states” türü elektronik kusurların varlığını göstermektedir. Bu kusurlar bant ortalarına doğru yayıldığından etkileri 250K’den itibaren algılanmaktadır. 100K’den düşük sıcaklıklarda ise ışık şiddetinin yüksek olduğu kısımda $\gamma = 0,8$ olan ikinci bir yeniden birleşme bölgesi her iki durumda da gözlemlenmiştir. Bu değer kuazi Fermi seviyelerinin artık eksponansiyel kuyruk durumlarına ulaştığını belirtmektedir. Bundan dolayı serbest elektronların yaşam süreleri hızla azalmaya başlamaktadır.



Şekil 3.20 SC= %5 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtılmış durum için ışık şiddetine göre değişimi



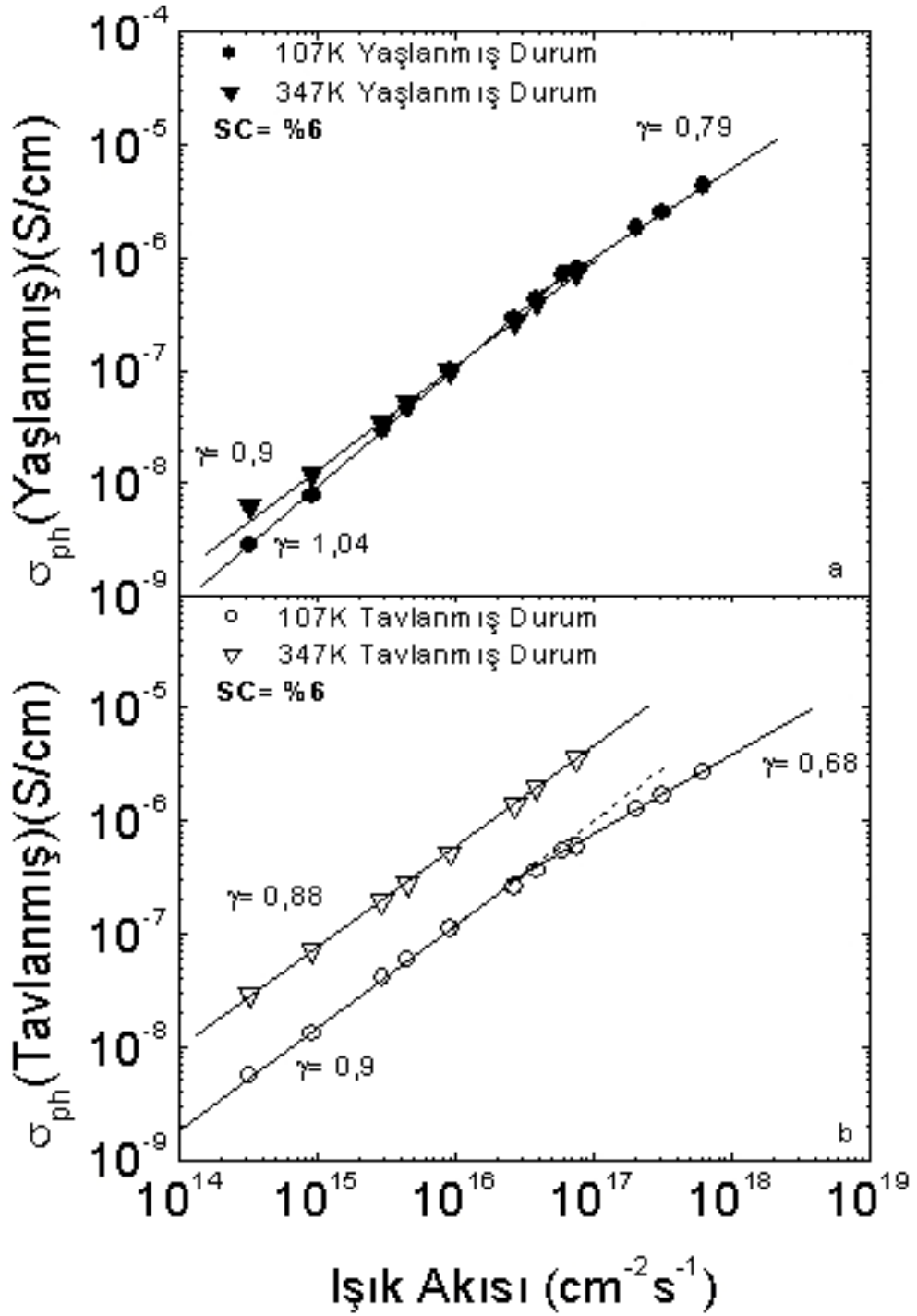
Şekil 3.21 (a) SC= %5 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durumda $F= 7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Son olarak, SC= %6 silan gazı oranında büyütülen malzemenin de amorf olduğu Raman ölçümlerinden belirlenmiştir. Ayrıca optik soğurma katsayısı spektrumu da bunu doğrulamaktadır. Şekil 3.22’de 107K ve 347K’de ışık şiddetine bağlı olarak ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin doğrusal değişimleri gösterilmiştir. Yaşlanmış durum ve ısıtma işlemi sonrasındaki fotoiletkenlik değerlerinin farklı γ üstel parametrelerini belirtmektedir. Yani malzeme içinde mevcut elektronik kusur dağılımlarında yaşlanma sonucu bir değişimi işaret etmektedir. Her iki farklı durumda sabit ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerleri ile farklı sıcaklıklarda ölçülen γ üstel parametresindeki değişimler Şekil 3.23’de özetlenmiştir. Fotoiletkenlik değişimi bir önceki SC= %5’lik malzeme ile benzerdir. Yaşlanmış durum ve ısıtma işlemi sonrasında ölçülen değerler bu malzemenin de Tip I türü kararsızlık problemi gösterdiğini belirtmektedir. Yaşlanmış durumda 250K’den düşük sıcaklıklarda fotoiletkenlik sıcaklık azaldığında artarak bir tepe değerine ulaşmakta ve daha sonra yavaşça azalarak ısıtma işlemi sonrasında ölçülen eğri ile örtüşmektedir. Bu olay önceden de sözü edilen “thermal quenching” olayıdır. Amorf malzemelerdeki elektronik bozunum yüksek sıcaklık bölgesinde algılanabildiği ve mikro-kristal silisyumdan farklı olduğu kısımdır. SC= %6’lık malzemenin γ üstel parametresindeki değişim incelendiğinde SC= %5’lik malzemeninkine özdeş bir değişim bulunmuştur. γ değeri oda sıcaklığının altında 1,0 ideal değerinin üzerine çıkarak 1,2 civarında sabit kalmıştır. 200K’nin altında ise yüksek ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değişimleri 0,8 civarında ikinci bir γ değerini vermektedir. Bu değişim SC=%5’lik malzeme de aynen gözlemlenmiştir. Her iki amorf malzemenin sıcaklığa bağlı ölçümlerinden yasak enerji aralığı içindeki elektronik kusur dağılımlarının birbirine benzer olduğu anlaşılmaktadır. Fotoiletkenlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmekte ve dolayısı ile elektronik kusurların miktarlarının da birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır.

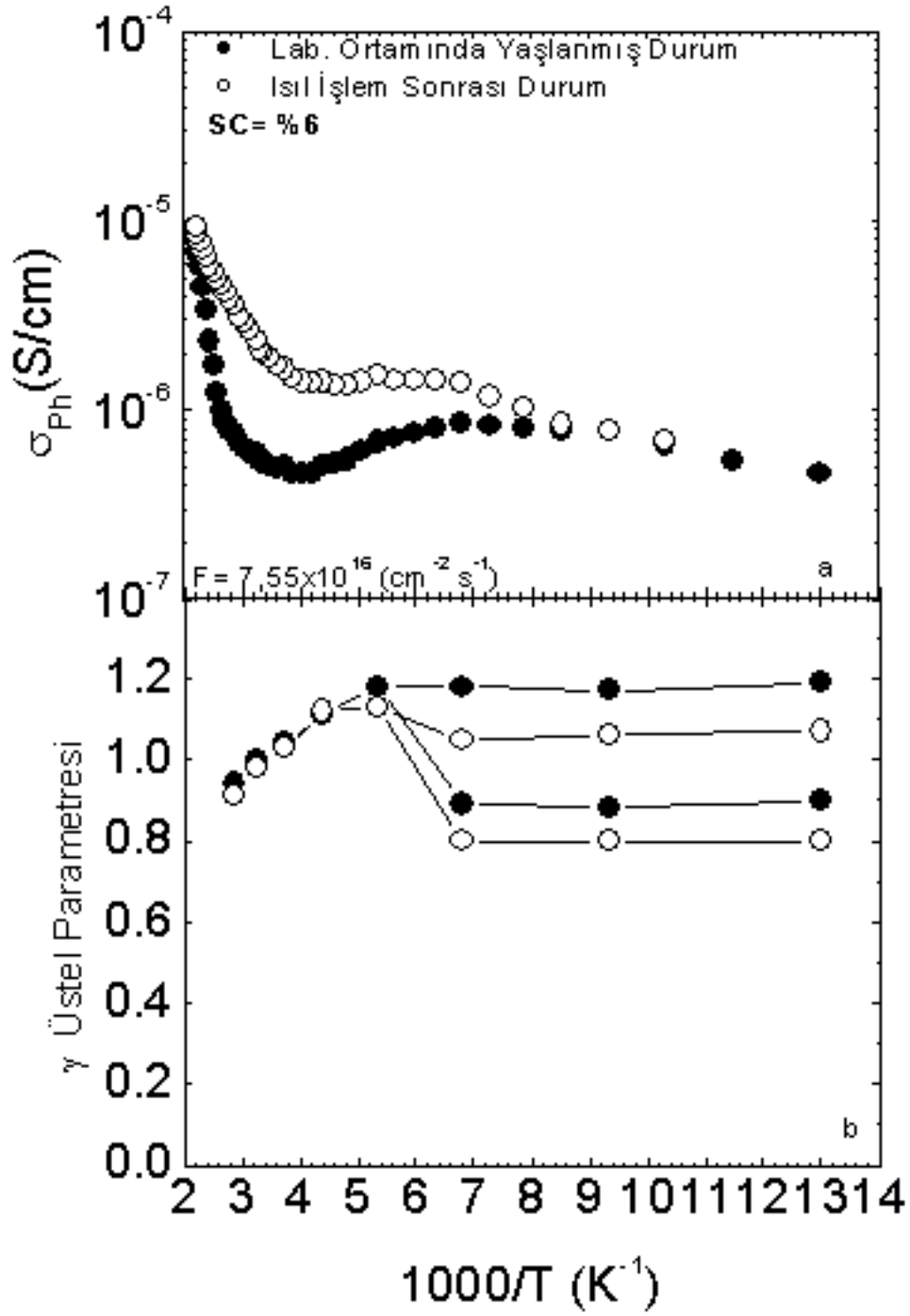
Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik bulgularını özetleyecek olursak bu yöntem ile malzemeler arasındaki mikro yapının değişimi sonucu oluşan elektronik kusur dağılımında ve doğasındaki değişimler fotoiletkenlik ve γ ’nın sıcaklığa bağlı değişimleri ile algılanabildiği ortaya çıkmaktadır. Sadece oda sıcaklığında gerçekleştirilen fotoiletkenlik ölçümleri ile malzemenin fotoiletkenlik değerleri ve γ

değerleri karşılaştırarak nitel bir karşılaştırma yapılabilir. Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ve γ üstel parametresinin değişimi malzeme içinde bulunan elektronik kusurların doğasının ve farklılıklarının algılanmasına olanak sağlamaktadır.

Kristal fazın baskın olduğu bölgelerde, SC= %2, %3 ve %4 ile büyütülen mikro-kristal silisyum malzemelerin sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik değerleri atmosfer ortamında yaşlanma ile azalmakta, eğriler birbirinden paralel bir kayma göstermektedirler. Fakat, γ üstel parametresi yaşlanmış durum ve ısı işlem sonrasında farklı yeniden birleşme mekanizmalarının varlığını ortaya koymaktadır. Bunun yanında 0,5'den küçük γ değerleri literatürde amorf silisyum ve diğer malzemeler için yayımlanmamış olmasına rağmen mikro-kristal silisyum için gözlemlenmiştir. Kumar tarafından da küçük γ değerleri yayımlanmıştır. 0,5'ten küçük γ değerlerinin fiziksel nedeni mevcut Rose veya Simons-Taylor teorileri ile açıklanamamaktadır. Yeni teorilerin kurulması ile anlaşılabilir.



Şekil 3.22 SC= %6 silan gazı oranında büyütülen malzemenin iki farklı sıcaklık değerinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin (a) yaşlanmış durum (b) ısıtılmış işlem uygulanmış durum için ışık şiddetine göre değişimi

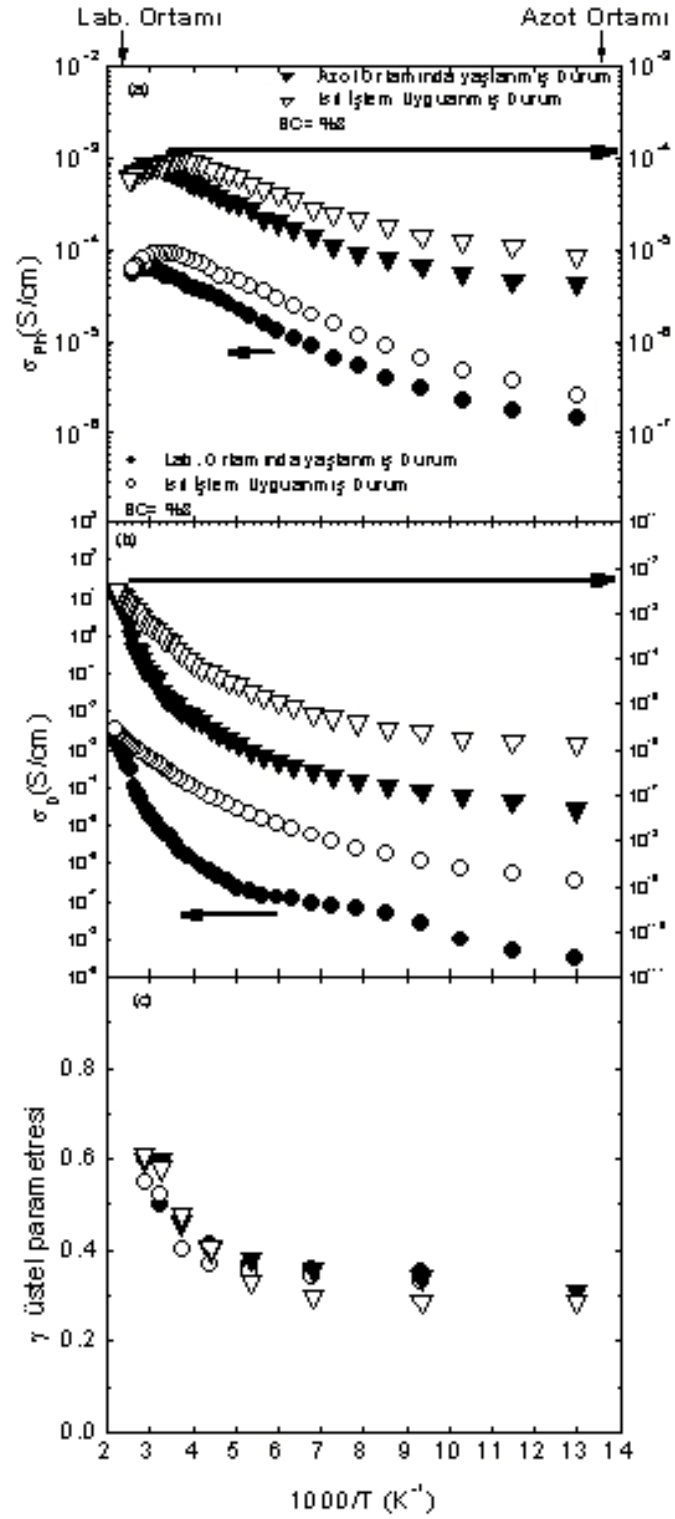


Şekil 3.23 (a) SC= %6 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin yaşlanmış durum ve ısıl işlem sonrası durumda $F= 7,55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ışık akısı altında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi (b) γ üstel parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi.

3.2.3. Azot gazı ortamında elektronik bozunum

Bir önceki kısımda ayrıntılı olarak açıklandığı gibi mikro-kristal silisyum ve amorf fazı baskın malzemelerin laboratuvar ortamında beklerken bir elektronik bozunuma (yaşlanmaya) uğradığı gösterildi. Bu kararsızlık problemi vakum ortamında yapılan ısıtım sonrası tamamen ortadan kalkmaktadır. Malzemeleri sürekli vakum ortamında bekletmek pratik uygulamada olanaksız olduğundan malzemeleri tepkimeye girmeyen bir gaz ortamında saklamanın mevcut kararsızlık problemini çözüp çözemeyeceği anlaşılmalı istenmiştir. Bu amaç için aynı taban malzeme üzerinden kesilen metal kontakları yapılmış özdeş iki malzeme eş zamanlı olarak, ısıtım sonrası, bir tanesi karanlıkta laboratuvar ortamında 3 ay saklanmıştır. Isıtım sonrası vakumu açılıp 10 dakika süre içinde malzeme azot gazı ile doldurulmuş plastik torbaya konup torbanın ağzı ısıtım yöntemiyle yapıştırılmıştır. Torba içine azot gazı verilirken yapıştırma işlemi yapılmaktadır. Bu malzeme de 3 ay süre ile azot gazı dolu torba içinde karanlıkta bekletilmiştir. Yaşlanma süresi sonunda her bir malzeme kriostat içine 15-20 dakikalık süre içinde yerleştirilip vakum ortamına alınmıştır. Yeterli vakum değerine ulaştıktan sonra her bir malzemenin 77K'den 450K'e kadar karanlıkta ve fotoiletkenlik ölçümleri alınmıştır. 450K'de birkaç saatlik ısıtım sonrası, ölçümler 77K'e kadar tekrar edilmiştir. Mikro-kristal silisyum malzemenin hepsi için her iki tür yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiş ve yaşlanma-ısıtım çevrimleri ölçülmüştür. Ölçülen bütün malzemeler için elde edilen bulgular şunu ortaya koymuştur. Hava ortamında yaşlandırma ile azot gazı dolu torba içinde bekletme sonundaki değişimler birbirine çok yakındır. Azot gazının kararsızlık problemini önleyici veya koruyucu bir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bu durumu özetlemek için SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş iki özdeş malzemenin sıcaklığa bağlı karanlıkta iletkenlik, fotoiletkenlik ve γ üstel parametresindeki değişimler Şekil 3.24'de hem laboratuvar ortamında hem de azot gazı ortamında yaşlanma sonunda ölçülen yaşlanma-ısıtım çevrimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 450K'deki karanlıkta iletkenlik değerleri birbirinin aynısı ve sıcaklığa bağlı her iki eğride birbirinin aynıdır. Yaşlanma miktarı birbirine çok yakındır. Fotoiletkenlik değişimlerinde bütün sıcaklıklardaki değişimleri hemen hemen aynıdır. Yaşlanma sonucundaki azalmanın miktarı da aynıdır. γ üstel parametresindeki değişim γ 'nın sıcaklıkta ölçülen değerleri birbiri

ile çok iyi örtüşmektedir. Bu sonuçlar azot gazı dolu poşetlerde saklanan malzemelerde herhangi bir koruyucu özellik oluşmadığını göstermektedir. Bunun birkaç nedeni olabilir; Birincisi, azot gazı dolu torbalar havanın içeri girmesine izin vermiş olabilir. Torbalar ideal saklama özellikli olmayabilir. İkincisi, azot gazının bir koruyucu özelliği olmayabilir, malzeme içinde yaşlanma etkisi yaratmış olabilir. Üçüncü olarak malzeme azot gazı doldurulmuş poşetlere konuncaya kadar geçen 10-15 dakikalık zamanda hava ortamına maruz kalması ile yeterince yaşlanma etkisine sahip olmuş olabilir. Dolayısı ile azot gazı altında malzemeyi saklamak için deneylerin mutlaka azot gazı beslenebilen kriostat içinde malzemeyi havaya maruz bırakmadan yapmak gereklidir. İlerideki çalışmalarda bu deneyler kriostatı belirli bir süre bu deney için ayırarak tekrar yapılacaktır.



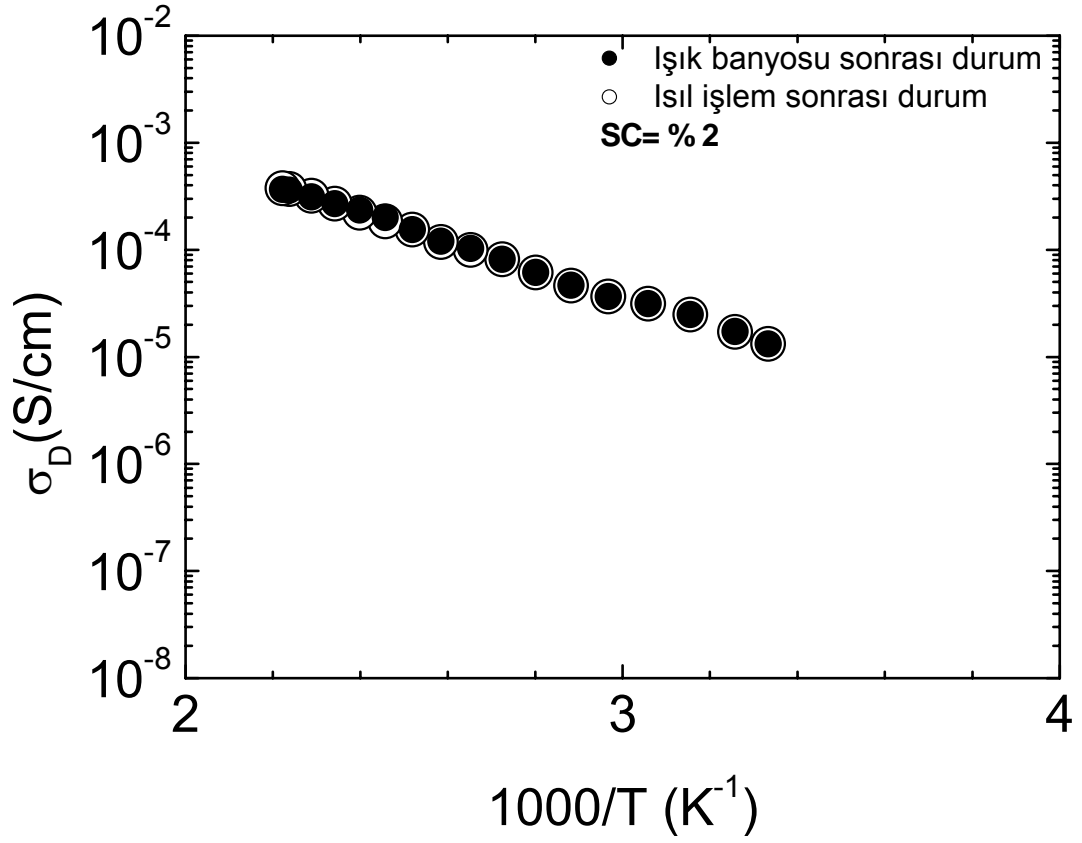
Şekil 3.24 Azot gazı doldurulmuş plastik torba içinde ve laboratuvar ortamında yaşlandırılmış olan SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin (a) fotoiletkenlik (b) karanlıkta iletkenlik ve (c) γ üstel parametresinin, sıcaklıkla değişimi.

3.3 Işık Altında Elektronik Bozunum- Staebler- Wronski Etkisi

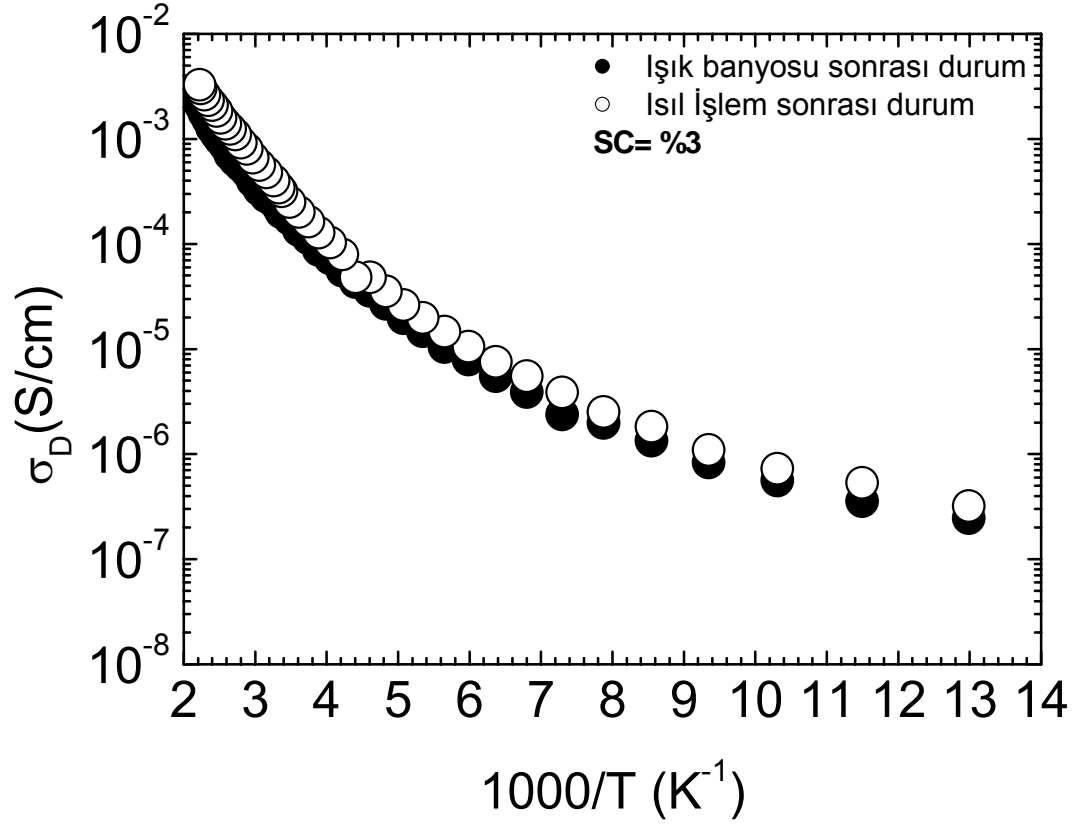
3.3.1 Karanlıkta iletkenlik ölçümleri

Staebler-Wronski etkisi ilk defa 1977 yılında Staebler ve Wronski tarafından amorf silisyum malzemelerde keşfedilmiş bir etkidir (Staebler.,Wronski, 1977) Katkısız amorf silisyum ince film malzemeler uzun süre beyaz ışık altında bırakıldıklarında karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerleri zamanla azalmaktadır. Malzeme karanlıkta 150⁰C ‘nin üzerinde ısıl işleme tabi tutulduğunda karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerleri ışık banyosundan önceki değerlerine geri dönmektedir. Amorf silisyum güneş gözeleri teknolojisinin en önemli problemi Staebler-Wronski etkisinin ortadan kaldırılamamasıdır. Bundan dolayı yeni malzeme arayışları sırasında aynı ince film büyütme sistemleri kullanılarak değişik silan gazı oranlarında büyütülen malzemelerin amorf fazından kristal adacıkların baskın olduğu mikro-kristal silisyum malzemeler keşfedilmiştir. Kristal oranları değişen bu malzemelerin Staebler-Wronski etkisine bağışık olduğu, karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerlerinde değişim olmadığının literatürde yayımlanmasından sonra bu malzemeler güneş gözelerinde amorf silisyum soğurucu tabaka yerine alternatif olmaya başlamışlardır. Mikro-kristal silisyumdan yapılmış güneş gözelerinde uzun süre ışık altında beklenmesi sonucunda Staebler-Wronski etkisinin olmadığı Meier ve çalışma arkadaşları tarafından 1994 yılında rapor edilmiştir (Meier,1994). Güneş gözelerinin ışığı soğuran tabakası olarak kullanılan mikro-kristal silisyum malzemelerin kristal adacıklar ve bu adacıkları çevreleyen amorf fazın karışımından oluşan bir heterojen yapıya sahip olması Staebler-Wronski etkisinin hala önemli bir problem olarak ortada olduğunu belirtmektedir. Bu tezde incelenen pürüzlü taban malzeme üzerine büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin beyaz ışık şiddetine karşı dayanıklılık testleri yapılmıştır. Bütün malzemeler aynı yüksek ışık şiddetinde beyaz ışık altında 5 saat süre ile bekletildikten sonra karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerlerindeki değişimler 77K-450K arasında kayıt edilmiştir. Bu malzemelerin atmosfer gazlarından ciddi bir şekilde etkilendikleri bir önceki kısımda ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bundan dolayı, ışık altında elektronik bozunumun, Staebler-Wronski etkisinin, atmosfer gazları ile oluşacak elektronik bozunumlardan ayırt edilmesi gereklidir. Bu amaç için, malzemelerin beyaz ışık altında bozunma işlemi yüksek vakum altında, malzeme hava ortamı ile temas etmeden, ısıl işlem

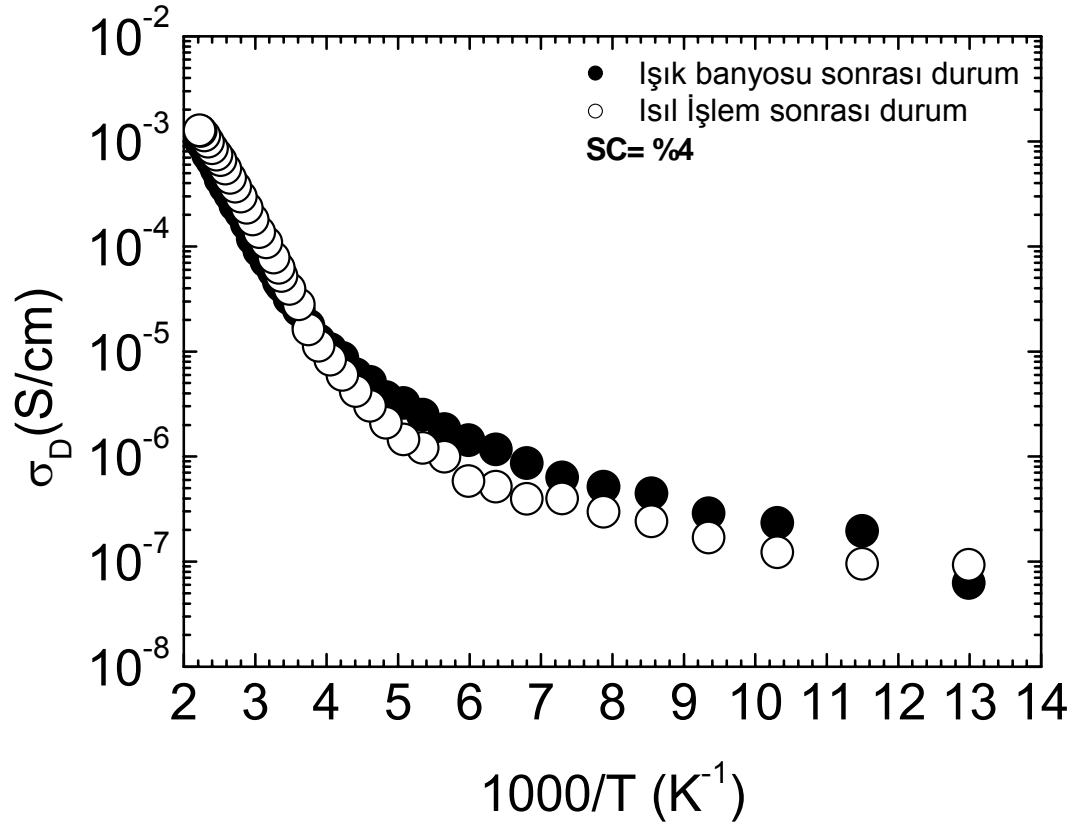
sonra gerçekleştirilmiştir. Işık banyosu sırasında malzemenin ısınmasını önlemek için saf su filtresi kullanılmış ve ayrıca kriostat sıcaklığı 270K ayarlanarak malzemenin sıcaklığı 300K'de sabit tutulmuştur. Işık banyosu sonrasında malzemede Staebler-Wronski etkisinin oluşup oluşmadığını ya da miktarını belirlemek için karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerleri 77K ile 450K arasında yeniden kayıt edilmiştir. Bu değişimler sırası ile Şekil 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 ve 3.29'da %2, %3, %4, %5 ve %6 silan gazı oranlarında büyütülmüş malzemeler için gösterilmiştir. Kristal hacim oranı baskın mikro-kristal silisyum malzemelerde, (SC= %2, %3 ve %4) karanlıkta iletkenlik değerlerinde kayda değer bir azalma olmamıştır. Bunun anlamı karanlık Fermi seviyesinde hiçbir kaymanın olmadığı ve ışık ile yeni elektronik kusurların yaratılmamış olmasıdır. Fakat, %5 ve %6 silan gazı oranlarında büyütülen malzemelerin tamamen amorf fazın baskın olması hatta Raman ölçümlerinin %0 kristal hacim oranı vermesinden dolayı, bu iki malzemenin karanlıkta iletkenlik değerleri ciddi bir şekilde azalmaktadır. Bu malzemelerin amorf özellik göstermesinden dolayı karanlıkta çok dirençli olduklarından dolayı karanlıkta iletkenlik sadece oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda ölçülebilmektedir. Staebler ve Wronski karanlıkta iletkenlik değerlerindeki bu azalmanın nedeni olarak karanlık Fermi seviyesinin ışık ile yaratılan elektronik kusurların sonucu oluşan yük dengesini korumak için bant ortasına doğru kaymasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Amorf malzemelerdeki sonuçlar bu şekilde açıklanabilmektedirler.



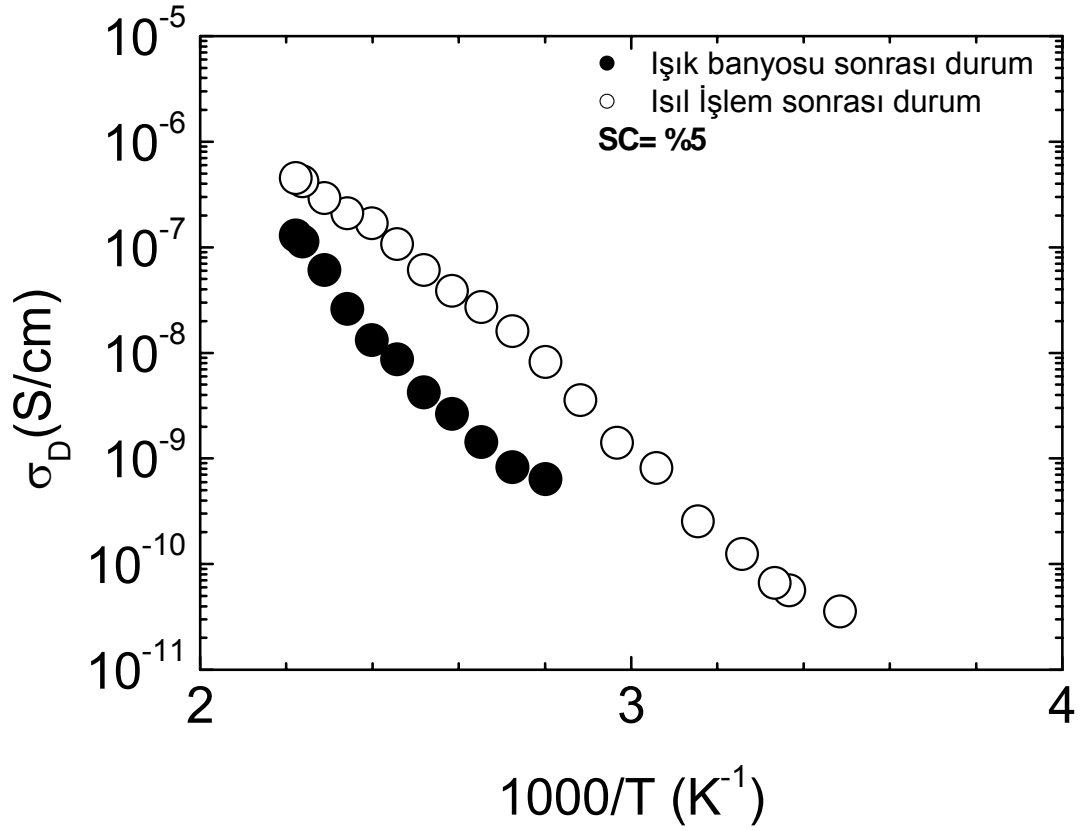
Şekil 3.25 SC= %2 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



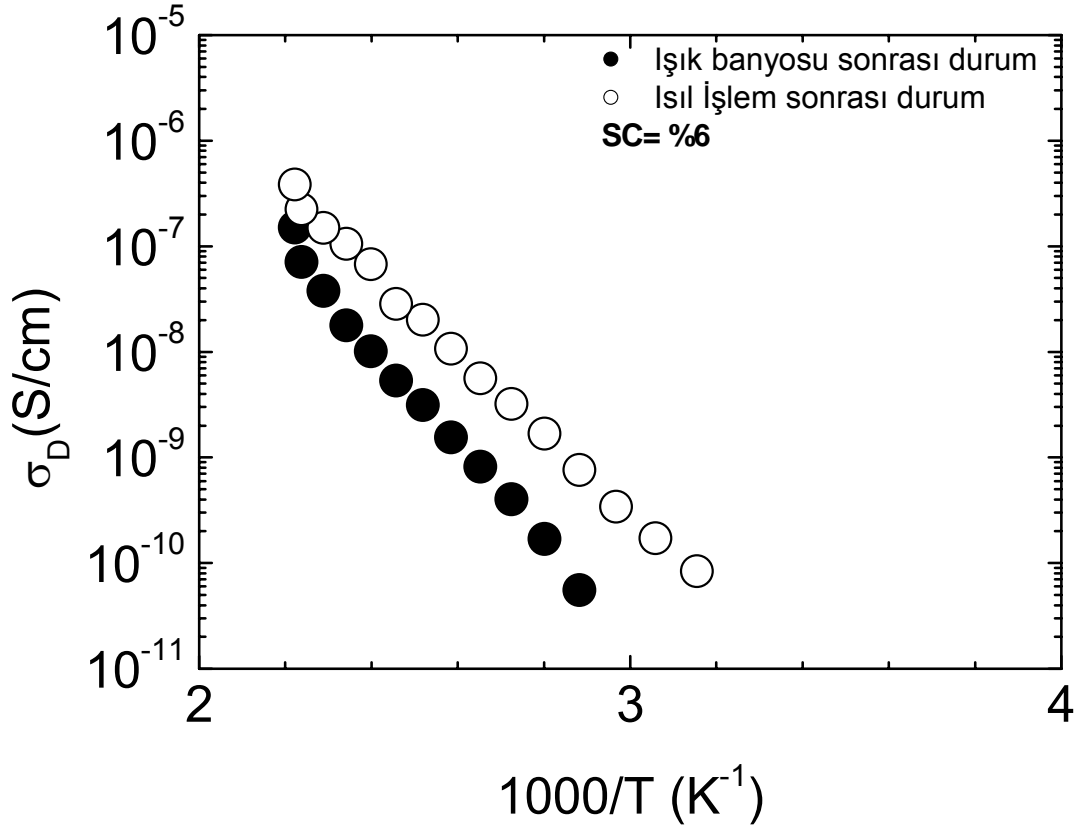
Şekil 3.26 SC= %3 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.27 SC= %4 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.28 SC= %5 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



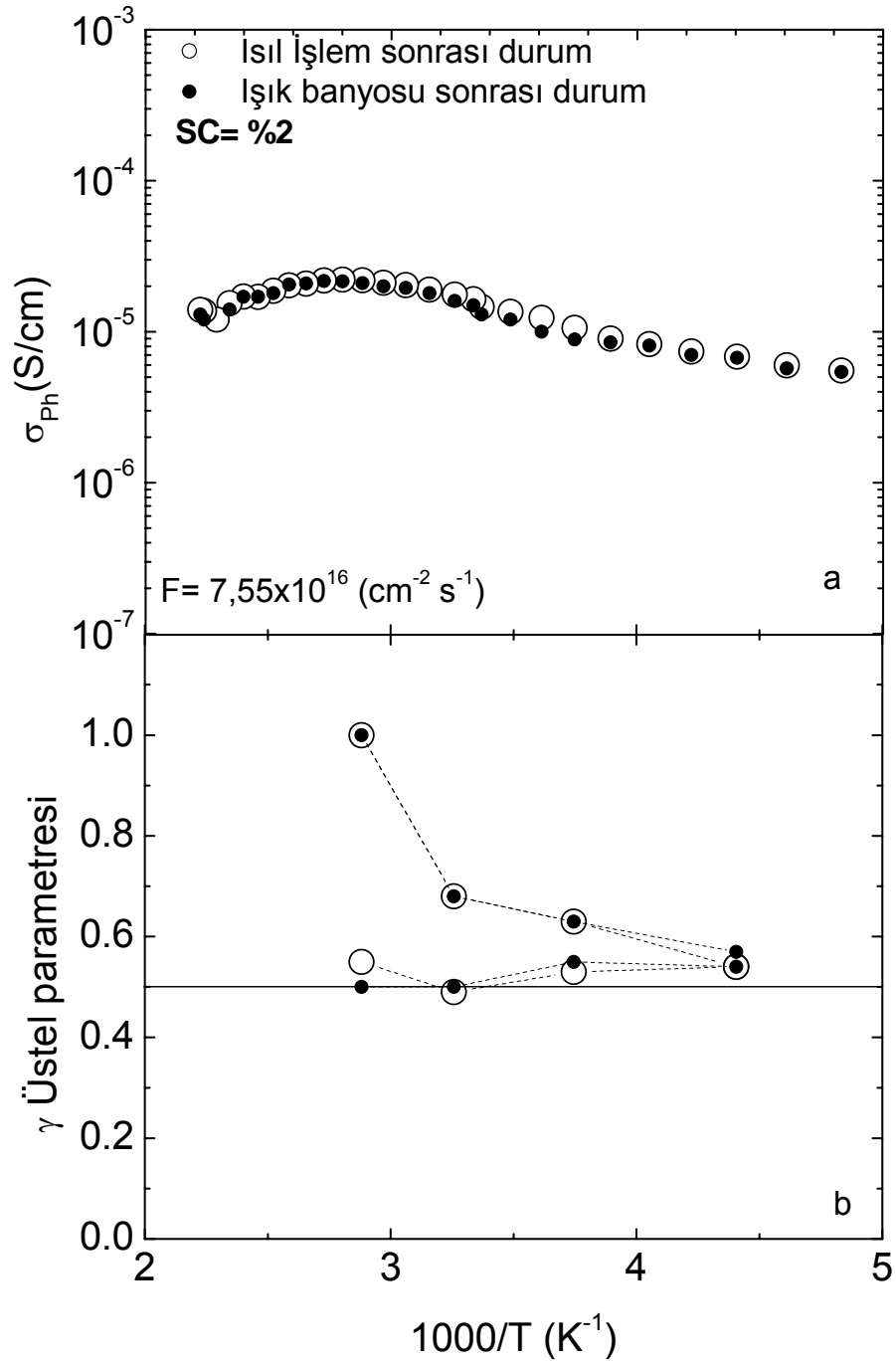
Şekil 3.29 SC= %6 silan gazı oranında büyütülmüş malzemenin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlem sonrası karanlıkta iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

3.3.2 Fotoiletkenlik ölçümleri

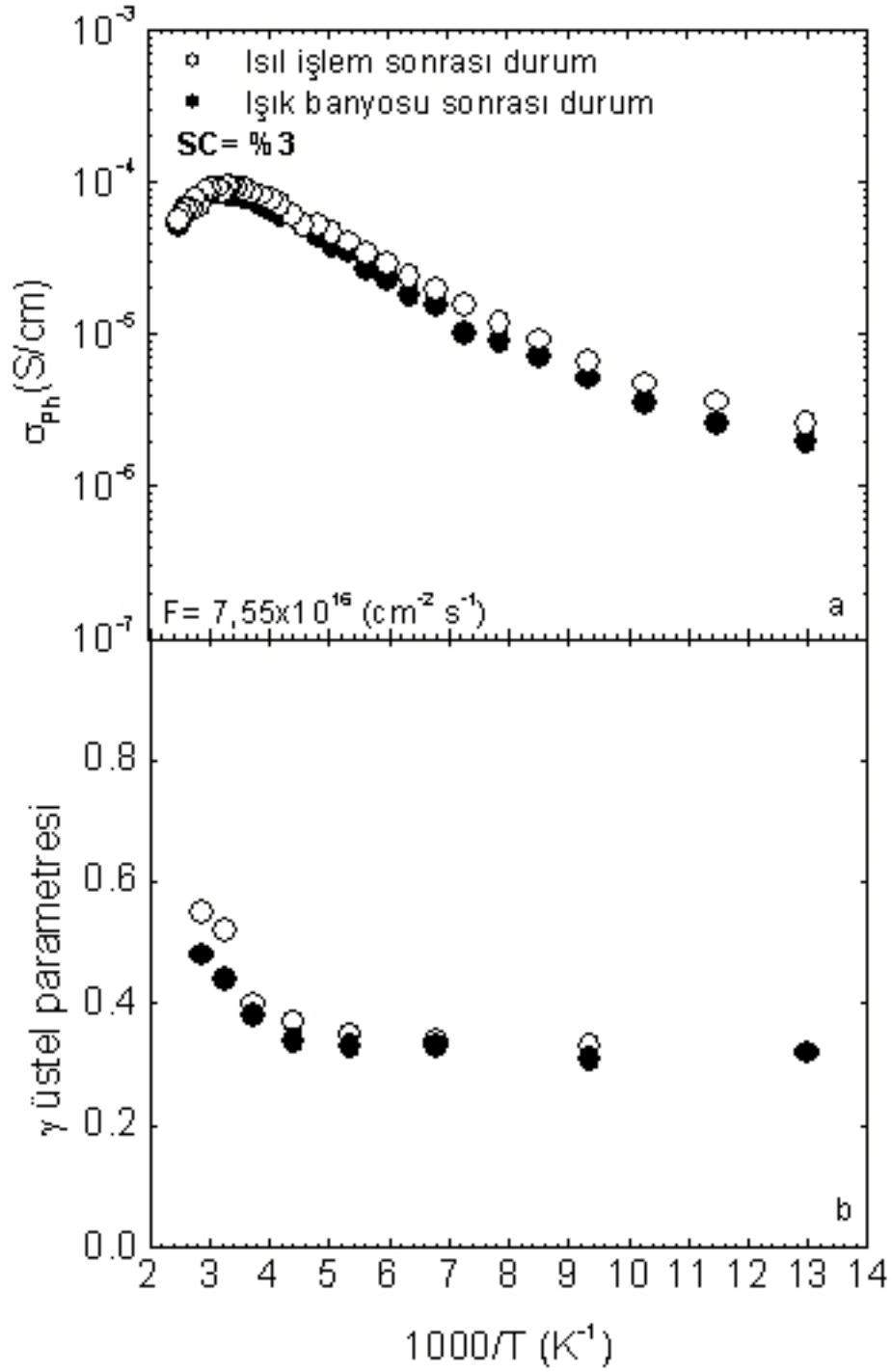
Staebler-Wronski etkisinin en önemli belirtisi ise fotoiletkenlik ölçümlerinde görülmektedir. Işık ile yaratılan yeni elektronik kusurlar amorf malzemenin yasak enerji aralığında yerleşmekte ve foto yük taşıyıcıların yaşam sürelerini kısaltmaktadır. Bu malzemelerin ışık banyosu sonrasında ve ısıl işlem sonrasında ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi sırası ile şekil 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 ve 3.34'de SC= %2, %3, %4, %5 ve %6 silan gazı oranında büyütülen malzemeler için gösterilmiştir. Kristal fazın baskın olduğu mikro-kristal silisyum malzemelerde karanlıkta iletkenlik değerleri ışıktan etkilenmemiştir. Aynı şekilde fotoiletkenlik değerlerinde de hiçbir azalma olmamıştır. Isıl işlem sonrasında elde edilen sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik değişimleri ile üst üste örtüşen bir değişim görülmektedir. Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri yasak enerji aralığında yerleşmiş çok geniş bir enerji aralığındaki elektronik kusurları algıladığından, her iki durumda da ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin aynı olması mikro-kristal silisyum malzemelerde ışık ile Staebler-Wronski kusurlarının yaratılmadığını belirtmektedir. Bu bulguları destekleyen ikinci gözlem ise sıcaklığa bağlı γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerleridir. Mikro-kristal silisyum malzemelerin γ üstel parametre grafikleri ısıl işlem sonrası ve ışık banyosu sonrasında üst üste örtüşmektedir. Sonuç olarak mikro-kristal silisyum malzemelerin Stealer-Wronski etkisine karşı bir bağışıklığı olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar literatürdeki bulgularla örtüşmektedir.

Buna karşın %5 ve %6 silan gazı oranına sahip malzemelerin fotoiletkenlik ölçümleri ışık banyosu sonunda ciddi bir şekilde azalmıştır. Yani ışıkla yaratılan Staebler-Wronski kusurları karanlıkta iletkenlik değerlerini azalttığı gibi fotoiletkenlik değerlerini de azaltmaktadır. Fotoiletkenlik değişimleri ısıl işlem sonrasında ölçülen eğriye paralel olarak düşük değerlere kaymıştır. Işık ile yaratılan kusurlar ile malzemedeki üretim sırasında oluşan öz kusurlar arasındaki benzerlik hem sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik hem de γ üstel parametresindeki değişimden anlaşılabilir. Fotoiletkenlik değerlerinin hemen hemen paralel bir şekilde aşağıya kayması ışık ile yaratılan kusurlar ile malzemenin öz kusurlarının aynı özellikte ve aynı enerji dağılımlarına sahip olduğunu, ışık ile sadece yoğunluklarının arttığını belirtmektedir. Eğer bu doğru ise, γ üstel parametresi aynı çeşit yeniden birleşme

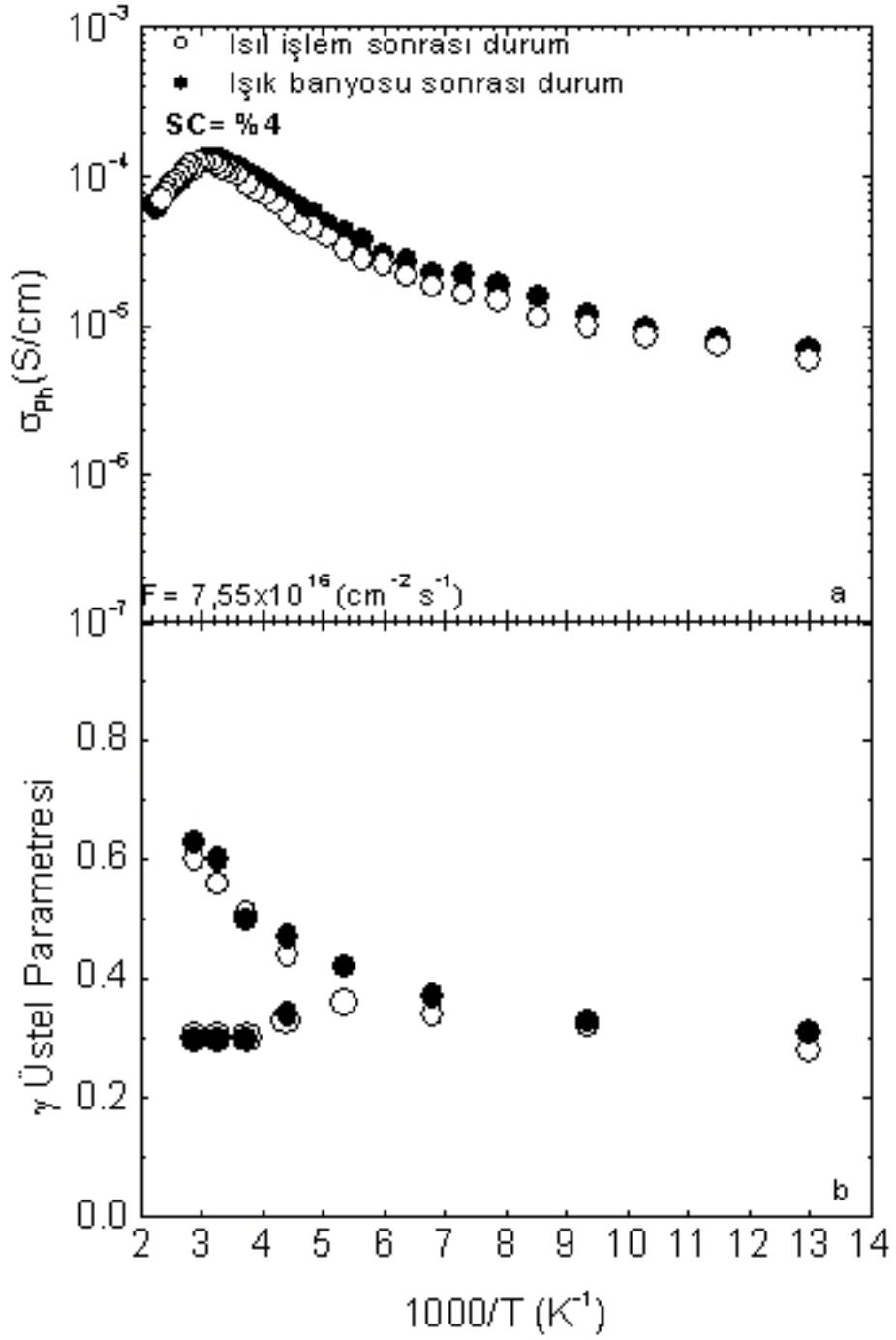
mekanizmalarını belirtmektedir. Bu iki malzemenin γ üstel parametrelerindeki değişimler incelendiğinde her iki durum için de ölçülen γ değerleri deneysel hata sınırları içinde birbiri ile örtüşmektedir. Sıcaklık ile aynı değişim göstermektedir.



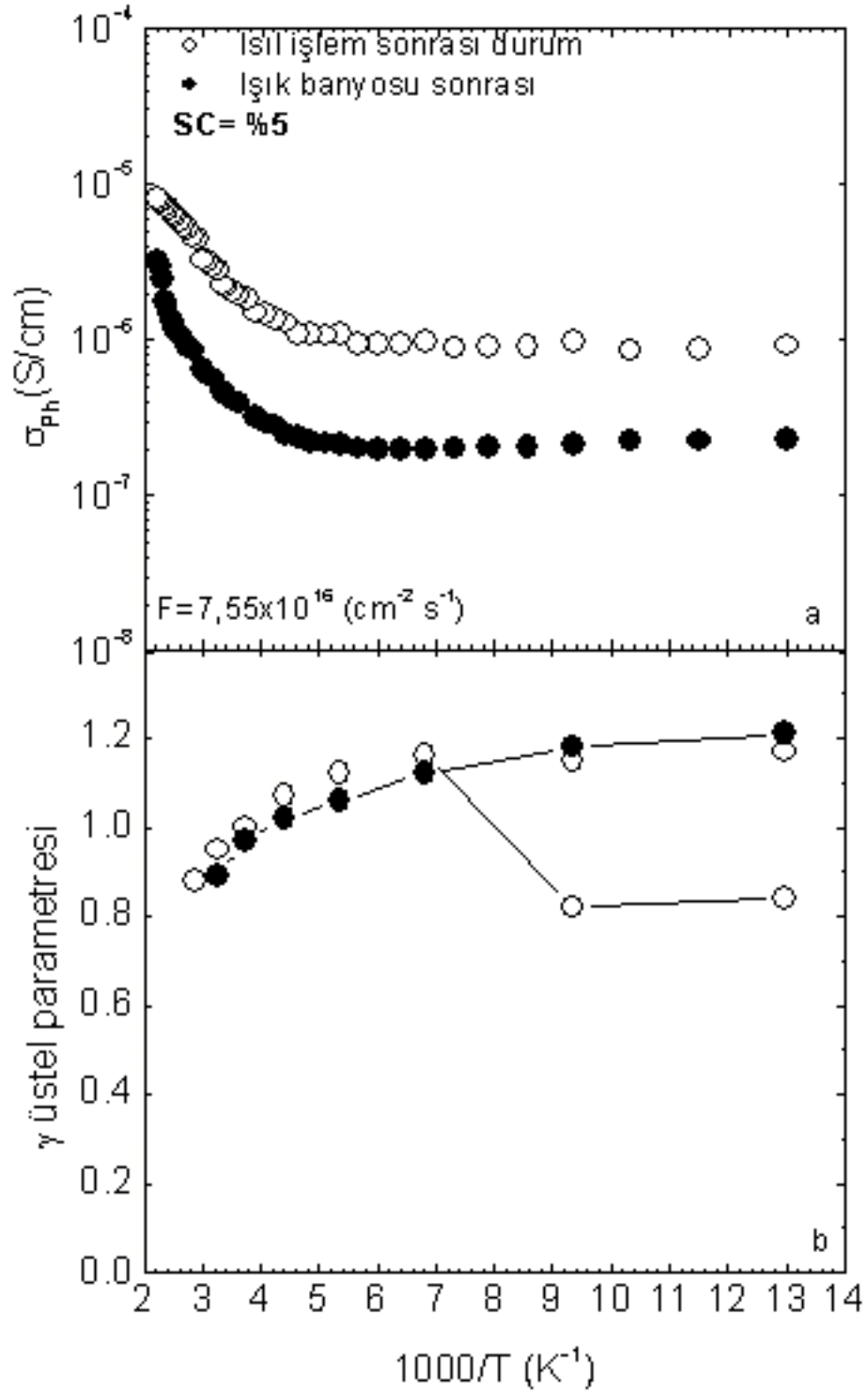
Şekil 3.30 (a) $SC=\%2$ silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.



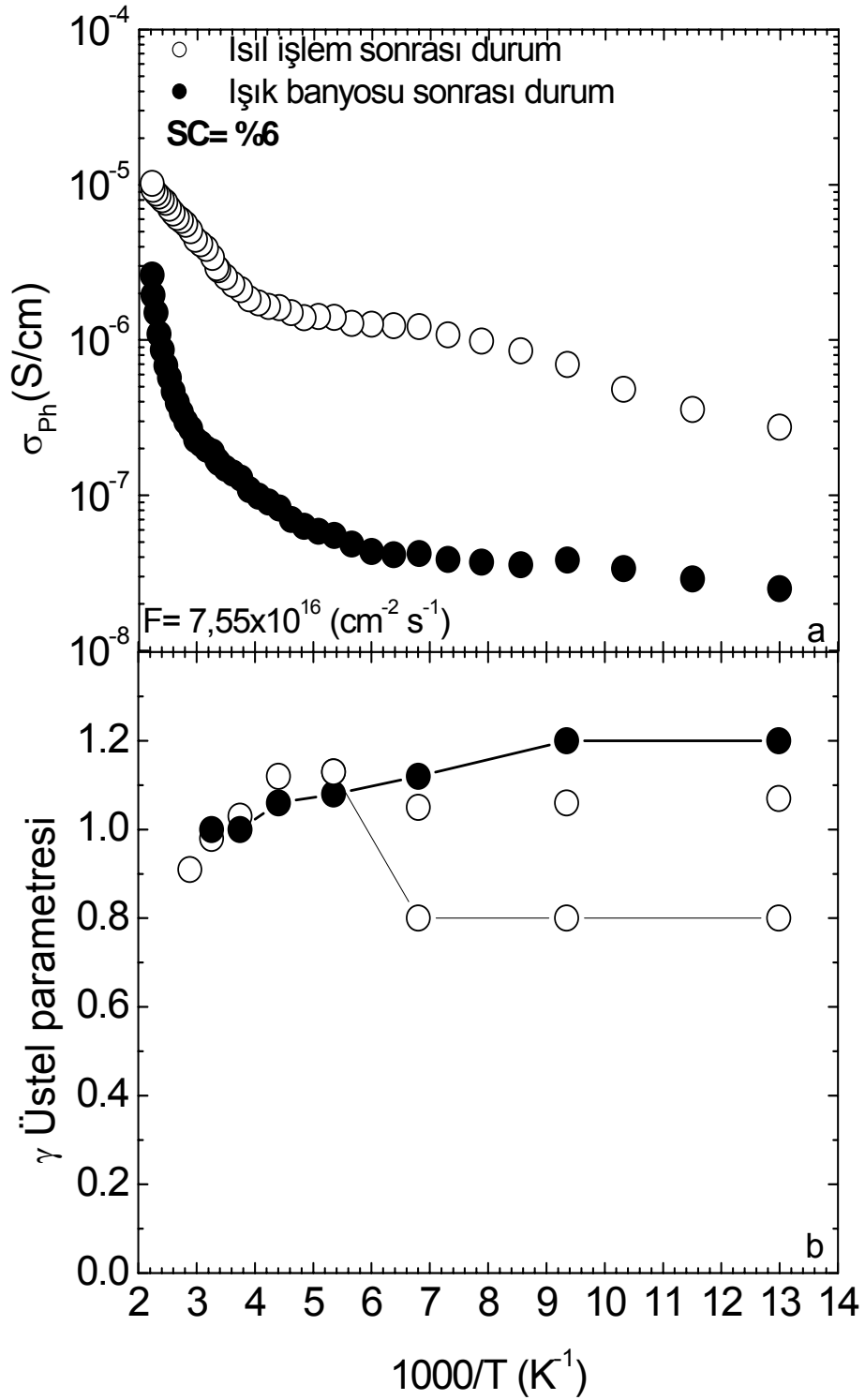
Şekil 3.31 (a) $SC=\%3$ silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemden sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 3.32 (a) $SC=\%4$ silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemten sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

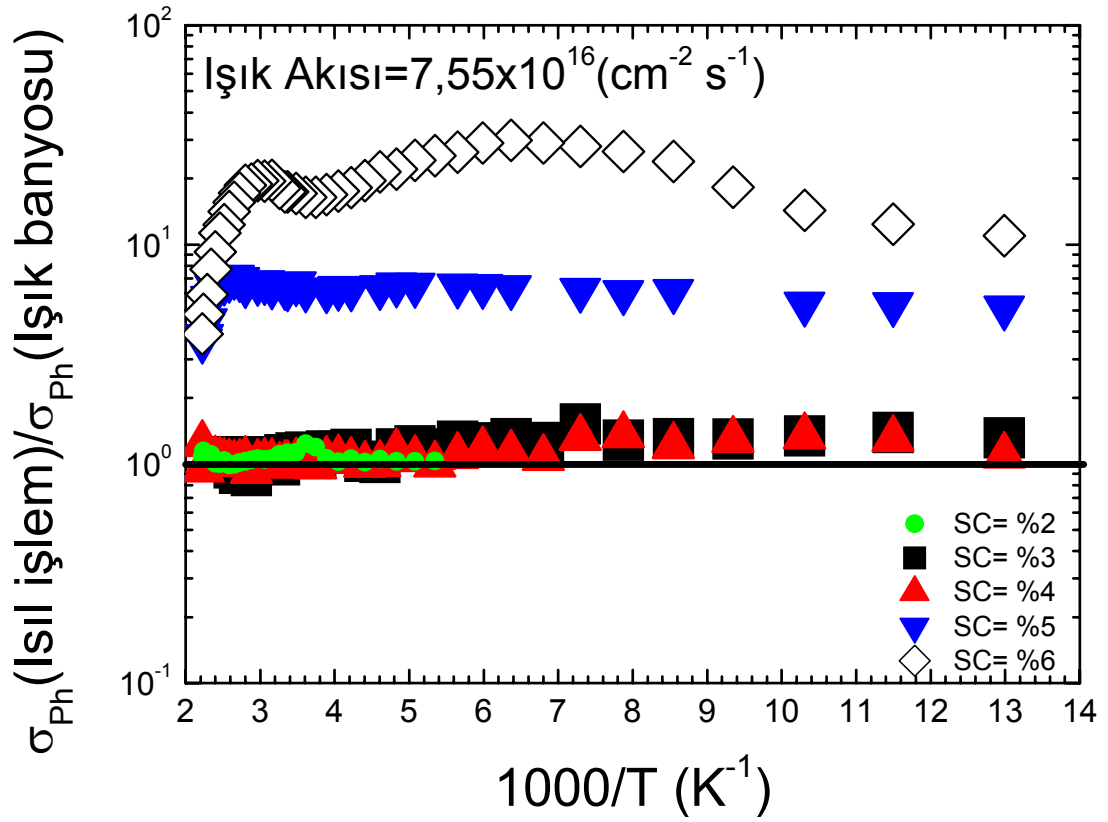


Şekil 3.33 (a) SC=%5 silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işleminden sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 3.34 (a) $\text{SC}=\%6$ silan gazı oranında büyütülmüş mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık banyosundan sonra ve ısıl işlemde sonra sabit ışık şiddetinde ölçülen fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, (b) γ üstel parametresinin her iki durumda ölçülen değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Staebler-Wronski etkisinin miktarını özetlemek için Şekil 3.36'da ısıtma işlem sonrasında ölçülen fotoiletkenlik değerleri ışık banyosu sonrası aynı sıcaklıkta ölçülen fotoiletkenlik değerlerine oranlanarak sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. σ_{ph} (ısıtma işlem sonrası)/ σ_{ph} (ışık banyosu sonrası) oranı 1'e eşit iken Staebler-Wronski etkisinin olmadığı, 1'den büyük iken bozunumun miktarının arttığını göstermektedir. SC=%2, %3 ve %4 silan gazı oranında büyütülen malzemeler Staebler-Wronski etkisini göstermez iken, SC oranı %5 ve %6'ya artınca Staebler-Wronski etkisinin arttığı görülmektedir. Sonuç olarak, amorf fazı baskın malzemelerde Staebler-Wronski etkisi mevcuttur. Işık ile yaratılan kusurlar malzemenin mevcut öz kusurları ile aynı özelliklere sahip sadece sayıları ışık altında artmaktadır. Şekil 3.33 ve 3.34'deki fotoiletkenlik değerlerinin ve γ üstel parametresinin sıcaklıkla değişimleri bu sonucu vermektedir.



Şekil 3.36 Değişik silan gazı oranlarında büyütülmüş mikro-kristal silisyum ince film malzemelerin ışık altındaki iletkenlik değerlerindeki bozunumun sıcaklığa bağlı değişimi

BÖLÜM 4: TARTIŞMA ve SONUÇLAR

VHF-PECVD sisteminde değişik silan gazı oranlarında $SC=[SiH_4/(SiH_4+H_2)]$ büyütülen ince film malzemeler değişik mikro yapılara sahip olmaktadır. SC oranı düşük olduğunda (%2-%4), kristal hacim oranı yüksek malzemeler, SC oranı artınca da amorf fazı yüksek malzemeler üretilmektedir. Dolayısı ile standart mikro-kristal silisyum malzemelerin standart özellikleri olan bir tanımı yoktur. Malzemenin büyütülmesinde kullanılan SC oranı ve bunun sonucunda malzemenin sahip olduğu kristal hacim oranının bilinmesi gereklidir. Kristal hacim oranlarını kontrol etmek kolay değildir. Kristal hacim oranlarındaki küçük değişimler farklı mikro yapıda bir malzemenin büyütülmesini sağlayabilir.

Bu tezde incelenen mikro-kristal silisyum ince film malzemeler $SC= \%2, \%3, \%4, \%5$ ve $\%6$ silan gazı oranlarında pürüzlü cam üzerine 700nm kalınlığında büyütülmüştür. Malzemelerin kristal hacim oranları sırası ile $I_C^{RS}= 0,76, 0,7, 0,27, 0$ ve 0 olarak Raman ölçümlerinde belirlenmiştir. Pürüzlü cam taban malzemesi kullanılmasının nedeni ise pürüzsüz cam üzerine büyütülen malzemelerin cam üzerine yapışma probleminin olmasından dolayıdır. Film kalınlığı artınca pürüzsüz cam üzerindeki malzeme aniden soyulmaktadır. Bu sorundan dolayı pürüzlü cam üzerine malzemeler büyütülmüştür. Literatürde kararsızlık problemini inceleyen çalışmalar pürüzsüz cam üzerinde büyütülmüş malzemelerde yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ilk defa kararsızlık problemi pürüzlü cam üzerine büyütülmüş malzemelerle incelenmiştir. Mikro-kristal silisyum malzemenin laboratuvar atmosferine maruz kalması sonucu oluşan kararsızlık problemi basit değildir. Bazı malzemelerin karanlıkta iletkenlik değerleri birkaç mertebe azalırken bazılarının artmaktadır. Bu tür değişimler ilk defa Finger ve çalışma arkadaşları tarafından iki ayrı sınıfta tanımlanmıştır. Karanlıkta iletkenlik değerleri laboratuvar atmosferine çıkınca azalan malzemelerin kararsızlık problemi Tip I türü kararsızlık problemi olarak tanımlanmıştır. Karanlıkta iletkenlik değerleri artan malzemelerin kararsızlık problemi ise Tip II türü kararsızlık problemi olarak tanımlanmıştır. Tip I türü malzemelerin yüksek kristal hacim oranına sahip, gözenekli ve geçirgen mikro yapıya sahip olduğu, Tip II türü malzemelerin ise amorf-kristal fazları arasında geçiş bölgesinde büyütülen daha sıkı mikro yapıya sahip düşük kristal oranına sahip malzemeler olarak tanımlanmıştır. Mikro-kristal silisyumda görülen kararsızlık

probleminin tanımı belki tam yapılmamıştır. Bunun nedeni ise daha sonra Smirnov ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda görülmektedir (Smirnov, 2004, 2006). Yüksek kristal hacim oranına sahip gözenekli malzemeler Tip I ve Tip II türü kararsızlık gösterebilmektedir. Aynı şekilde amorf faz ile kristal fazı geçiş bölgesine yakın mikro yapılarda büyütülmüş malzemelerde Tip I ve Tip II türü kararsızlık göstermişlerdir. Buna ek olarak SC= %5 ile %7 arasında büyütülen amorf fazı baskın kristal oranı 0 olan malzemelerde Tip II türü kararsızlık problemi görüldüğü yayımlanmıştır (Smirnov, 2004, 2006).

Bu tez çalışmasında incelenen malzemeler 700nm kalınlığında ve pürüzlü cam üzerine büyütülmüştür. Literatürde bu tür malzemeler üzerine çalışmalar yoktur. Laboratuvar atmosferine maruz bıraktıktan belirli süre sonunda ölçülen karanlıkta iletkenlik değerleri ısıtma işlem sonrasında ölçülen değerlerden daha düşük değerler göstermiştir. Malzeme vakum ortamında 450K'de ısıtma işlemine tabi tutulduğunda karanlıkta iletkenlik değerleri artarak önceki değerlerine ulaşmaktadır. Bu değişim Tip I türü kararsızlık problemi olarak tanımlanmıştır. Fakat bütün malzemelerin 0,76 kristal hacim oranına sahip malzemedan (gözenekli ve geçirgen) 0,27 kristal hacim oranına sahip (amorf fazı ile kristal fazı geçiş bölgesinde büyütülmüş) malzemeye hatta %5 ve %6 silan gazı oranında büyütülmüş 0 kristal hacim oranına sahip malzemeler bile Tip I türü kararsızlık problemi sergilemişlerdir. Yani karanlıkta iletkenlik değerleri literatürde Finger ve çalışma arkadaşlarının yayımladığı gibi bir değişim göstermiştir. Tip II türü bir kararsızlık problemi gösteren bir malzeme olmamıştır. Dolayısı ile Tip I türü veya Tip II türü kararsızlık probleminin tanımı daha kapsamlı yapılmalıdır. %5 ve %6 silan gazı oranında büyütülmüş malzemelerin kararsızlık problemleri gösterdiği Smirnov ve çalışma arkadaşlarının makalelerinde görülmektedir (Smirnov, 2004, 2006). O çalışmalarda Tip II türü bir değişim görülmüştür. Bu tezde yapılan çalışmalarda ise Tip I türü bir değişim gözlenmiştir. Bunun nedeni henüz bilinmemektedir. Bu malzemeler Raman ölçümlerinde 0 kristal hacim oranına sahip olduğu bulunmuştur. Raman ölçümleri çok küçük kristal hacim oranlarında hassas olmayabilir. Ya da mikro Raman ölçümleri ile bu tür malzemelerin kristal hacim oranları incelenmelidir. İlerideki çalışmalarda bu yöntemle ayrıntılı deneyler yapılacaktır.

Karanlıkta iletkenlik ölçümleri literatürdeki gibi gözlemlenmiştir. Fakat fotoiletkenlik ölçümleri ile ayrıntılı bir çalışma mevcut değildir. Genellikle karanlıkta iletkenlik değişimlerine bakılarak kararsızlık probleminin türü saptanmıştır. Fotoiletkenlik deneylerini kullanarak Smirnov ve arkadaşları laboratuvar atmosferinde yaşlanmanın etkisini incelemiştir. Fakat, sadece oda sıcaklığında ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümleri yaparak ısı işlem sonrası ve yaşlanma sonrasındaki fotoiletkenlik değerlerinde değişim olduğunu yayımlamışlardır (Smirnov, 2004). Sadece tek malzeme üzerinde yaptıkları ölçüm ile fotoiletkenlik değerlerinin yaşlanma ile arttığını yani Tip II türü özellik gösterdiğini belirtmektedirler. Buna ek olarak γ üstel parametresi ısı işlem sonrası 0,70 iken atmosferik yaşlanma ile $0,5 \pm 0,03$ değerine azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu deneyler sadece oda sıcaklığında yapılmıştır. Bu tez çalışmasında fotoiletkenlik ölçümleri 450K ile 77K arasında belirli sıcaklıklarda hem sabit ışık şiddetinde hem de ışık şiddetine bağlı olarak ölçülmüştür. Literatürde henüz bu tür ayrıntılı bir çalışma yoktur. Elde edilen bulgulara bakacak olursak oda sıcaklığında ışık şiddetine bağlı yapılan fotoiletkenlik deneyleri Tip I türü kararsızlık göstermiştir. Yani laboratuvar atmosferine bırakılan malzemelerin fotoiletkenlik değerleri azalmaktadır. γ üstel parametresi her malzeme için farklı değerler göstermiştir. SC= %2 olan malzemenin γ değeri $0,66 \pm 0,02$ iken SC= %3 için her iki durum için $0,50 \pm 0,02$ ve SC= %4 için $0,63 \pm 0,02$ değerleri bulunmuştur. γ üstel parametresinde yaşlanma sonucu literatürdeki gibi bir değişim gözlenmemiştir. Bu γ değerleri ise fiziksel olarak anlamlıdır. $\gamma = 0,5$ iken iletkenlik bandındaki serbest elektronlar doğrudan değerlik bandındaki boşluklarla birleşip yok olurlar. γ değeri 1 ile 0,5 arasında bir değere sahip iken iletkenlik bandındaki serbest elektronlar yasak enerji aralığındaki elektronik kusurlar yardımı ile bir araya gelip yok olurlar. Dolayısı ile bu üç malzemenin hem yaşlanma sonrası hem de ısı işlem sonrasında ölçülen γ parametreleri malzemenin elektronik kusur yoğunluklarının fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca SC= %2 ve %4 silan gazı oranında büyütülen malzemelerin ısı işlem sonrası ölçülen fotoiletkenlik değerleri yüksek ışık şiddetlerinde farklı bir doğrusal değişim göstermektedir. Bu bölgede ikinci bir γ değeri, yani yeni bir yeniden birleşme mekanizması kendini göstermektedir. Bunların nedeni henüz

bilinmemektedir. SC= %5 ve %6 ile büyütülen amorf silisyum malzemelerin oda sıcaklığındaki fotoiletkenlik ölçümleri ise daha yüksek γ değerleri vermektedir. Fotoiletkenlik değerleri yaşlanma ile azalmakta ve γ değerleri hemen hemen aynı kalmaktadır. Her iki malzeme içinde γ değerleri ideal 1,0 değerine çok yakındır, yaşlanma ile bir değişim göstermemektedir. Bulunan γ değerleri literatürde amorf silisyum için yayımlanmış değerlerle aynıdır.

Fotoiletkenlik ölçümleri ile incelenen kararsızlık problemi sıcaklığa bağlı olarak ilk defa bu tez kapsamında yapılmıştır. SC= %2, %3 ve %4 olan mikro-kristal silisyum malzemelerin fotoiletkenlik değerleri ısı işlem sonrasında 300K civarında bir tepe değerine ulaşmış daha sonra düşük sıcaklıklara doğru azalarak değişmektedir. Kristal oranı azaldıkça hızla artan bir değişim sergilemektedir. Fotoiletkenlikte azalan sıcaklıkla olan değişim kusurlu malzemelerde ölçülen sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik sonuçları ile uyumludur. Sabit ışık şiddetinde yapılan bu ölçümlerde sadece sıcaklık değiştirilmektedir. Simmons-Taylor teorisine göre, azalan sıcaklık ile kuazi Fermi seviyeleri bant uçlarına doğru açılarak tuzak olarak adlandırılan kusurları yeniden birleşme merkezine dönüştürmektedir (Simmons-Taylor,1971). Yoğunlukları artan yeniden birleşme merkezleri sayısı serbest elektronların yaşam sürelerini kısaltarak azalan sıcaklık ile azalan fotoiletkenlik ölçümleri vermektedir. Fotoiletkenlik eğrisinin şeklini yasak enerji aralığında yereleşmiş kuazi Fermi seviyeleri arasında kalan yeniden birleşme merkezlerinin çeşitleri ve yoğunlukları ile hangi enerjilerde yerleşmiş oldukları belirlemektedir. Bunlar hakkında bir ön bilgi yoktur. Dolayısı ile sonuçların ayrıntılı analizi çok derin bilgiler içermektedir. Bu çalışmalar bu tezin kapsamı ve amacının çok üzerindedir. Diğer önemli bulgu ise sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ile sıcaklığa bağlı γ üstel parametresindeki değişimin ilişkilendirilmesidir. Isıl işlem sonrasında oda sıcaklığı ve üzerinde görülen tepe noktası farklı bir değişimi işaret ediyor. Aynı şekilde, bu sıcaklık bölgesinde γ üstel parametresi iki farklı değere sahiptir. %2 ve %4 silan gazı oranlarında büyütülmüş olan malzemelerde düşük ve yüksek ışık şiddetlerinde iki farklı γ değerleri bulunmuştur. Yüksek sıcaklık bölgesinde farklı özellikte yeniden birleşme mekanizmalarının olduğunu belirtmektedir. Diğer önemli bulgu ise, γ değerinin 0,5'den küçük değerler göstermesidir. Amorf silisyum için böyle bir bulgu

yayımlanmamıştır. SC= %3 ve %4 olan mikro-kristal silisyum malzemeler ısı işlem sonrasında $\gamma \cong 0,3$ değerini göstermektedir. Bu γ değerine sahip yeniden birleşme mekanizması bu tür sıcaklık değerlerinde en baskın mekanizmadır. Literatürde γ 'nın 0,5 den küçük olduğunu belirten birkaç çalışma vardır. Kumar ve arkadaşlarınınca yapılan çalışmalarda kullanılan mikro-kristal silisyum malzeme 0,98 kristal hacim oranında bir malzemedir. Bu tezde kullanılan malzemelerden çok daha yüksek kristal hacim oranına sahiptir. Dolayısı ile bu tezde bulunan sonuçları karşılaştıracak başka çalışma mevcut değildir. Amorf malzemelerin sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ve γ ölçümleri birbiri ile uyumlu ve mikro-kristal silisyum malzemelerden farklıdır. Literatürde amorf silisyumla yapılan sıcaklığa bağlı ölçümlerle uyumludur (Balberg, 2002, Vanier, 1983). Amorf malzemelerde görülen en önemli değişim “thermal quenching” olarak adlandırılan etkidir. Fotoiletkenliğin azalan sıcaklık ile artmaya başlaması elektronik kusurlu malzemelerde görülmemesi gereken bir durumdur. Azalan sıcaklık ile açılan kuazi Fermi seviyeleri arasındaki yeniden birleşme merkezlerinin sayısı sürekli olarak artış göstermekte ve fotoiletkenlik sıcaklık ile sürekli azalmaktadır. Her iki malzemede de 250K'den düşük sıcaklıklarda fotoiletkenlik artmaya başlamış (yaşlanmış durum için) yada hemen hemen sabit kalmıştır. Amorf silisyumda ilk olarak Vanier tarafından gözlemlenen daha sonra T.S. McMahon ve Balberg tarafından yapılan çalışmalarda aynı tür ölçümler elde edilmiştir (Balberg, 2002, McMahon, 1986, Vanier, 1983). Bunun nedeni olarak bant uçlarına yakın enerjilerde yerleşmiş kusurların yayılarak bant ortasına doğru bir dağılım gösterdiği, bunların elektron yakalama tesir kesitlerinin çok küçük olmasından dolayı iletkenlik bantındaki serbest elektronların yaşam sürelerinin artmasına neden olduğu açıklanmaktadır. Bu tür yeniden birleşme merkezleri “sensitizing states” ya da “safe hole traps” olarak adlandırılmış ve negatif yüklü kusurlar olduğu ileri sürülmüştür. Bu tür kusurların baskın olduğu düşük sıcaklıklarda γ üstel parametresinin ideal 1,0 değerinden daha yüksek değerler aldığı Balberg'in teorik çalışmaları ile de belirlenmiştir. Bu tezde incelenen iki amorf silisyum malzeme de düşük sıcaklıklarda γ üstel parametresi 1,0'dan büyüktür. Yani kuazi Fermi seviyeleri arasında kalan yeniden birleşme merkezlerinin sayısı artıka elektronların yaşam süreleri de artmaktadır.

γ 'nın artmaya başladığı sıcaklık değeri aynı grafiklerde gösterilen fotoiletkenlik değerlerinin artmaya başladığı sıcaklık değerlerine karşılık gelmektedir. Dolayısı ile sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ve γ üstel parametresinin değişimleri önemli bilgileri içermektedir. Ayrıntılı analizi zengin bilgiler içermektedir ve ilerideki çalışmalarda yapılması planlanmaktadır.

Sonuç olarak, laboratuvar atmosferine maruz kalan mikro-kristal ince film malzemelerin kararsızlık probleminin çok karmaşık olduğu, şu ana kadar literatürde çok az bilgi olduğu açıktır. Bütün malzemeler hem karanlıkta iletkenlik hem de fotoiletkenlik değişimlerinde Tip I türü kararsızlık sergilemekte yani yaşlanma ile iletkenlik özelliklerini kaybetmektedirler. Bu bulgular literatürdeki Tip I ve Tip II tanımlarının eksik olduğu daha ayrıntılı yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Atmosfer gazlarının etkisini ortadan kaldıracak yada bir koruyucu olabilmesi amacı ile malzemelerin azot gazı dolu poşetlerde saklanması sonucunda elde edilen bulgular azot gazı ortamında da hava ortamı kadar yaşlanmanın olduğu yapılan ayrıntılı ölçümlerle bulundu. Literatürde henüz böyle bir çalışma yayımlanmamıştır. Bu deneylerde malzeme azot gazı dolu poşetlere konmadan önce ve yaşlanma sonrası kriostat'a yerleştirilmeden önce 10-20 dakika arasında hava ortamına maruz kalmaktadır. Dolayısı ile belki bu zaman diliminde yaşlanmaktadır. Bu deneyin daha kontrollü olarak azot gazı bağlanmış kriostat içerisinde yapılması gerekmektedir. Malzeme vakumda ısıl işleme maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına iken vakum azot gazı verilerek kırılmalı ve uzun süre azot gazı tankından beslenerek kriostat içinde malzeme bekletilmelidir. Yaşlanma sonrası ise azot gazı kapatılmalı kriostat vakuma alınarak malzemenin yaşlanması havaya maruz kalmadan yapılmalıdır. Bu çalışma ilerideki araştırmalar için planlanmıştır.

Mikro-kristal silisyum malzemelerin ışık altında bozunma göstermemeleri bu malzemelerin önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Bu malzemelerden yapılan güneş pillerinin verimlerinde bir bozunma görülmemiştir. Bu tezde incelenen mikro-kristal silisyum malzemelerin Staebler-Wronski etkisi olarak bilinen ışık altında bozunma etkisi incelenmiştir. Çünkü malzemelerin kristal hacim oranları değişiktir. Amorf fazı hala baskın olan malzemeler vardır. Literatürde ışık altında bozunmanın etkisi yine Smirnov ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Fakat malzemeler hava ortamında ışık banyosuna bırakıldıklarından hem hava

ortamındaki yaşlanma hem de Staebler-Wronski etkisinden dolayı oluşan elektronik bozunum aynı anda olmaktadır. Her iki etkiyi birbirinden ayırt etmek için malzeme vakum ortamına alınıp 90⁰C'de ve 130⁰C'de 1 dakika ısıl işleme maruz bırakılarak yaşlanma etkisini ortadan kaldırıp sadece ışık ile oluşan elektronik bozunumu belirlemeye çalışmışlardır (Smirnov, 2004). Yapılan bu çalışma pratik olarak beklenen sonucu vermeyebilir. Dolayısı ile ışık altındaki bozunma işlemi atmosfer gazlarına maruz bırakılmadan yapılmalıdır. Yani malzeme vakumda tavlandıktan sonra oda sıcaklığına soğutulup vakumdan çıkarılmadan ışık malzeme üzerine düşürülmelidir. Bu tez çalışmasında ilk defa bu ayrımı göz önüne alınarak Staebler-Wronski etkisi incelenmiştir. Bütün malzemeler aynı ışık şiddeti altında ve aynı süre ışık banyosuna maruz bırakılarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç, çok uzun sürelerde ışık banyosuna tutup malzemelerin uzun süreli dayanıklılık testini yapmak değildir. Mikro-kristal silisyum malzemelerde elde edilen bulgular göstermiştir ki, SC= %2, %3 ve %4 ile büyütülen malzemeler ışık altında hiçbir elektronik bozunma göstermemiştir. Yani karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerleri çok geniş sıcaklık aralıklarında ölçülmüş ve ısıl işlem sonrası ve ışık banyosu sonrası yapılan ölçümler birbirleriyle örtüşmektedir. Sonuç olarak, bu tezde incelenen pürüzlü taban üzerine büyütülen Mikro-kristal silisyum malzemeler kayda değer bir Staebler-Wronski etkisine sahip değildir. Literatürdeki bulgular da aynı bu yöndedir.

Fakat, SC= %5 ve %6 olan amorf fazı baskın malzemeler ışık altında çok ciddi elektronik bozunuma uğramışlar, karanlıkta iletkenlik ve fotoiletkenlik değerleri birkaç merteye azalmıştır. Tekrar yapılan ısıl işlem ile Staebler-Wronski etkisini tamamen ortadan kalktığı ve geri dönüşümlü bir etki olduğu teyit edilmiştir. Bu iki malzemenin amorf fazı baskın olduğu Staebler-Wronski etkisine sahip olduğu açıktır.

GELECEKTE PLANLANAN ÇALIŞMALAR

Bu tezde ilk defa pürüzlü cam üzerine büyütülen değişik mikro yapıya sahip mikro-kristal ve amorf silisyum malzemelerin hem atmosfer gazlarından oluşan hem de ışık altında beklemesinden oluşan kararsızlık problemlerinin ön çalışmaları yapılmıştır. Literatür bulguları ile uyumlu olan sonuçlar vardır. Literatürde olmayan ya da uyumsuz olan sonuçlar da bulunmaktadır. Bu malzemelerin kararsızlık

problemleri başka yöntemler kullanılarak da incelenmelidir. Örnek olarak, optik soğurma katsayısı ölçümleri ve azınlık yüklerin difüzyon uzunluk ölçümleri yapılmalıdır. Farklı asal gaz ortamlarında kriostat içinde kontrollü olarak havaya maruz bırakmadan yaşlandırma işlemleri yapılmalıdır. Ayrıca, pürüzlü ve pürüzsüz taban üzerine büyütülen malzemeler ayrı ayrı incelenmeli, her SC oranı için farklı kalınlıklarda malzemeler büyütülerek yaşlanmanın ayrıntılı haritası çıkarılarak Tip I ve Tip II'nin tanımları daha doğru bir şekilde yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Balberg, I., Epstein, K. A., Ritter, D., (1989) Appl. Phys. Lett. **54**, 2461

Balberg, I, (2002) Journal of Non-Crystalline Solids 299–302 531–535

Beck, N., Meier, J., Fric, J., Remeg, Z., Poruba, A., Fliickiger, R., Pohl, J., Shah, A., Vanacek, M., (1998), Enhanced optical absorption in microcrystalline silicon, Journal of Non-Crystalline Solids 198-200 903-906

Bronner, W., Brüggemann, R., Mehring, M., (2000), Standard and electrically detected magnetic resonance in nanocrystalline silicon, Journal of Non-Crystalline Solids 266-269 534-539

Brüggemann, R., Kleider, J.P., Longeaud, C., Mencaraglia, D., Guillet, J., Bour_ee, J.E., Niikura, C., (2000), Electronic properties of silicon thin films prepared by hot-wire chemical vapour deposition, Journal of Non-Crystalline Solids **266-269** 258-262

Brüggemann, R., Kunz, O., (2002) Phys. Stat. Sol. (b) **234**, R16.

Faraji, M., Gokhale, S, Choudhari, S. M., Takwale M. G. (1992), High mobility hydrogenated and oxygenated microcrystalline silicon as a photosensitive material in photovoltaic applications, Appl. Phys. Lett., Vol. 60, **(26)**:3289-3291

Finger, F., Hapke, P., Luysberg, M., Carius, R., Wagner, H., (1994), Improvement of grain size and deposition rate of microcrystalline silicon by use of very high frequency glow discharge, Appl. Phys. Lett. **65** (20), 2588-2590

Finger, F., Muller, J., Malten, C., Wagner, H., (1998) Electronic states in hydrogenated microcrystalline silicon Philosophicmaalg Azinbe, **VOL.7** 7, No. 3, 805-830

Finger, F., Carius, R., Dylla, V., Klein, V., Okur, S., Gunes, M., (2003), Stability of microcrystalline silicon for thin film solar cell applications, IEE Proc.-Circuits Devices Syst., Vol. 150, No. 4, 300-3008

Houbenm, L., Luysberg P., Hapke, P., Carius, R., Finger, F., Wagne, H., (1998), Structural properties of microcrystalline silicon in the transition from highly crystalline to amorphous growth, Philosophicmaalg Azinae, Vol. 77, No. 6, 1447-1460

Jackson, W. B., Amer, N. M., Boccara, A. C., Fouebier, D.,(1981), Photothermal Deflection Spectroscopy and Detection, *Applied Optics* 8 (20), 1333

Luysberg, M., Hapke, P., Carius, R., Finger, F., (1997), structure and growth of microcrystalline silicon: Investigation by TEM and Raman spectroscopy of films grown at different Plasma excitation frequencies, *Philosophical Magazine A* 75 (1), 31-47

McMahon, T.J., Xi, J.P., (1986) Photoconductivity and light-induced change in a-Si:H, *Phy.Rev.B*. Vol:34, 4, 2475-2481

Meier, J., Fliückiger, F. L., Keppner, H., Shah, A.,(1994), Complete microcrystalline p-i-n solar cell--Crystalline or amorphous cell behavior?, *Appl. Phys. Lett.* 65 (7), 860-862

Ritter, D., Zeldov, E., Weiser, V., (1986) *Appl. Phys. Lett.* **49**, 791

Rose, A., (1978) *Concepts in photoconductivity and allied problems*, Wiley Interscience, New York

Shah, A., Vallat-Sauvain, E., Torres, P., Meier, J., Kroll, U., Hof, C., Droz, C., Goerlitzer, M., Wyrsh, N., Vanecek, M., (2000), Intrinsic microcrystalline silicon (mc-Si:H) deposited by VHF-GD (very high frequency-glow discharge): a new material for photovoltaics and optoelectronics, *Materials Science and Engineering B* 69–70 219–226

Shah, A.V., Meier, J., Vallat-Sauvain, E., Wyrsh, N., Kroll, U., Droz, C., Graf, U.,(2003), Material and solar cell research in microcrystalline silicon, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 78 469–491

Simmons, J.G., Taylor, G.W. 1971. "Non-equilibrium steady state statistics and associated effects for insulators and semiconductors containing an arbitrary distribution of traps", *Phy.Rev.B*, 4, 502

Staebler, D. L., Wronski, C. R. (1977), Reversible conductivity changes in Discharge Amorphous Si, *Applied Physics Letter* **31** (4), L292

Smirnov, V., Reynolds, S., Main, C., Finger, F., Carius, R., (2004), Aging effects in microcrystalline silicon films studied by transient photoconductivity, *Journal of Non-Crystalline Solids* 338–340 421–424

Smirnov, V., Reynolds, S., Finger, F., Main, C., Carius, R., (2004), The Influence of Light-Soaking and Atmospheric Adsorption on Microcrystalline silicon Films studied by Coplanar Transient Photoconductivity, *Mat.Res.Soc. Symp. Proc.* Vol.808

Smirnov, V., Reynolds, S., Finger, F., Carius, R., Main, C., (2006), Metastable effects in silicon thin films: Atmospheric adsorption and light-induced degradation, *Journal of Non-Crystalline Solids* 352 1075–1078

Usui, S., Kikuchi, M. (1979), Properties of heavily doped *gd*-Si with low resistivity, *Journal of Non-Crystalline Solid* 34, 1.

Vanecek, M., Poruba, A., Remes, Z., Beck, N., Nesladek, M., (1998), Optical properties of microcrystalline materials, *Journal of Non-Crystalline Solids* 227–230 .967–972

Vanier, P.E., (1983), The effect of light soaking on the low temperature photoconductivity of hydrogenated amorphous silicon, *Solar Cells*, Volume 9, Issues 1-2, Pages 85-93

Veprek, S., Marecek, V. (1968) The preparation of thin layers of Ge and Si by Chemical hydrogen Plasma transport, *Solid-State Electronics* (11), 683

Veprek, S., Iqbal, Z., Oswald, H R., Webb, A P., (1981), Properties of polycrystalline silicon prepared by Chemical transport in hydrogen plasma at temperatures between 80 and 400, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 14 295-308.

Veprek, S., Iqbal, Z., Kühne, R. O., Capezzuto, P., Sarrot, F-A., Gimzewski, J. K. (1983), Properties of mikrokrystalline silicon: IV. Electrical conductivity, electron spin resonance and the effect of gas adsorption, *Journal of Physics C: Solid State Physics* 16 (1983) 6241-6262.

Vetterl, O., Finger, F., Carius, R., Hapke, P., Houben, L., Kluth, O., Lambertz, A., MuK ck, A., Rech, B., Wagner, H., (2000) Intrinsic microcrystalline silicon: A new material for photovoltaics *Solar Energy Materials & Solar Cells* 62 (97) 108

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Adana'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul, Tekirdağ, Giresun olmak üzere birçok okulda okudu, orta öğretimini Tekirdağ ve Giresun'da tamamlayan Gökhan YILMAZ lise öğretimini İstanbul Mehmet Niyazi Altuğ Lisesinde tamamladı. 1999-2000 eğitim ve öğretim döneminde İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümüne girdi.1999-2000, 2000-2001 dönemleri İYTE'nin İngilizce hazırlık bölümünü tamamladı ve 2006 Haziran ayında İYTE'den mezun oldu. 2006-2007 eğitim ve öğretim döneminde Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Aralık 2006'dan itibaren Muğla Üniversitesi Fizik Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.