

7884

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AMORF SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNDE
"DEGRADING" OLAYININ İNCELENMESİ

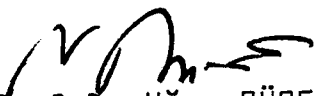
Tülay SERİN

DOKTORA TEZİ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 4.1.1988 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından 90 (Doksan)
Not Takdir Edilerek Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.


Prof. Dr. Acar IŞIN


Prof. Dr. Uğur BÜGET


Doç. Dr. Arsin AYDINURAZ

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

ÖZET

Doktora Tezi

AMORF SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİNDE
"DEGRADING" OLAYININ İNCELENMESİ

Tülay SERİN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Arslan AYDINURAZ

1987, Sayfa: 98

Jüri: Doç.Dr. Arslan AYDINURAZ

Prof.Dr. Acar İŞİN

Prof.Dr. Uğur BÜGET

Bu çalışmada amorf silisyumdan p/i/n ve Schottky diyodları (Metal/yarıiletken) şeklinde yapılmış güneş pillerinde, zaman, ışık, sıcaklık gibi çevresel şartlarla meydana gelen değişimler (degradation) ele alınmıştır.

ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al şeklinde yapılan yapılar uzun süreyle aydınlatılmış, akım-gerilim belirtgenlerinin önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Ters beslem 2 V'ta ve 130°C'de yapılan tavlama $\eta \approx \%4$ olan verimin iki kat arttığı görülmüştür. Değişik sıcaklıklarda, karanlık akım-gerilim belirtgenlerinden engel yüksekliği $V_{bi} = 0,526$ eV, aydınlık akım-gerilim belirtgenlerinden enerji band aralığı $E_g = 1,45$ eV bulunmuştur.

Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr şeklinde yapılan Schottky diyodlarında akım-gerilim belirtgenleri değişik sıcaklık ve zamanlarda ölçülmüştür. Yapıların akım-gerilim belirtgenlerinin zamanla ve tavlama sıcaklığıyla önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Karanlık akım-gerilim belirtgenlerinden engel yüksekliği Au'lu yapılar için $\phi_{Bn} = 0,78$ eV, Cu'lu yapılar için $\phi_{Bn} = 0,65$ eV ve Ag'li yapılar için $\phi_{Bn} = 0,55$ eV bulunmuştur. Yüzey durum yoğunluğu D'nin zamanla ve tavlama sıcaklığıyla değişimi incelenmiştir. Zamanla, D'nin değişimi 4.41×10^{13} durum/cm²/eV- $3,98 \times 10^{13}$ durum/cm²/eV aralığında; tavlama ile D'nin değişimi 4.40×10^{13} durum/cm²/eV - 4.00×10^{13} durum/cm²/eV aralığındadır.

p/i/n yapılarının akım-gerilim belirtgenlerinde meydana gelen değişimler i tabakasındaki tuzakların sayısındaki değişimlerle, ITO/a-SiC:H(p⁺) arasındaki yüzey durumlarına, a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i) arasındaki yüzey durumlarındaki değişimlerle, engel yüksekliğinde meydana gelen değişimlere bağlanmıştır. Schottky diyodlarında akım-gerilim belirtgenlerinde meydana gelen değişimler de Metal/a-Si:H(i), a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺) arasındaki yüzey durumlarıyla açıklanmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Işıklıa değişme, Güneş pilleri, p/i/n tipi güneş pillerinde fotovoltaiık olay, a-Si:H Schottky diyodlarında tavlama etkisi, a-Si:H Schottky diyodlarında yaşlanma.



ABSTRACT

PhD Thesis

DEGRADATION OF AMORPHOUS SILICON
SOLAR CELLS

Tülay SERİN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Engineering Physics

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Arsin AYDINURAZ

1987, Page: 98

Jury: Assoc.Prof.Dr. Arsin AYDINURAZ

Prof.Dr. Acar IŞIN

Prof.Dr. Uğur BÜGET

In this study the degradation of amorphous silicon p/i/n structures and Schottky diodes (Metal/Semiconductor) have been investigated.

It was seen that the current-voltage characteristics of ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al type structures strictly depend on the illumination. The annealing process carried out at 130°C and 2 Volts reverse bias showed that the efficiency is increased approximately two times the original value of 4%. The diffusion barrier height and energy band gap of a-Si:H were determined as $V_{bi} = 0.526$ eV and $E_g = 1.45$ eV by means of dark and illuminated current-voltage characteristics respectively.

The current-voltage characteristics of Schottky diodes in the structure of metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr were measured at different temperatures and times. It was observed that the current-voltage characteristics have considerably changed with time and annealing. Barrier heights of the rectifier metal side ϕ_{Bn} for Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr, for Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr, for Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr structures were determined as $\phi_{Bn} = 0.78$ eV, $\phi_{Bn} = 0.65$ eV, $\phi_{Bn} = 0.55$ eV respectively by means of dark current-voltage measurements. The time and the annealing temperature-dependency of density of the surface states D_s , were also investigated. It was observed that the range for time dependency and for the annealing temperature-dependency would be as 4.41×10^{13} state/cm²/eV - 3.98×10^{13} states/cm²/eV and 4.40×10^{13} states/cm²/eV - 4.00×10^{13} states/cm²/eV respectively.

The changes occurred in the current-voltage characteristics of the p/i/n structure were explained by means of the changes in the trap density intrinsic amorphous silicon thin film and the changes in the surface states between metal and a-Si:H(i), between a-Si:H(i) and a-Si:H(n⁺).

The changes occurred in the current-voltage characteristics of the Schottky diode were also explained by means of surface states between metal and a-Si:H(i), a-Si:H and a-Si:H(n⁺) and the changes of barrier height ϕ_{Bn} .

KEY WORDS: Degradation, Solar cells, Photo-voltaic effect in p/i/n type solar cells, Annealing effect in a-Si:H Schottky diodes, Ageing in a-Si:H Schottky diodes.



TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üzerine alarak amorf silisyum gibi g¼ncel bir konuda çalışma imkanı sağlayan, çalışmalarım sırasında g¼sterdiđi ilgi ve yardımlardan dolayı danışmanım ve hocam Sayın Doç.Dr. Arsin Aydınuraz'a, konumun seçiminde ve çalışmalarım sırasındaki maddi ve manevi yardımlarından dolayı hocam Sayın Doç.Dr. Necmi Serin'e, deneysel çalışmalarımda laboratuvar imkanlarından yararlandığım Kaiserslautern ¼niversitesi Fizik B¼l¼m¼ne, bu imkanı sağlayan merhum Prof.Dr. Jurgen Geiger'e, Dekan Yardımcısı Sayın Dr. Bernd Schr¼der'e teőekk¼r¼ bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımın deneysel kesimini yurt dışında yapabilmem için gerekli olan iznin verilmesinde yardımlarını esirgemeyen zamanın Fizik M¼hendislik B¼l¼m¼ Başkanı Sayın Prof.Dr. Erol Ayg¼n'e, Fen Fak¼ltesi Dekanlığına ve Ankara ¼niversitesi Rekt¼rl¼g¼ne teőekk¼r¼ ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	6
2.1. Güneş Pillerine Kuramsal Bakış	6
2.1.1. Giriş	6
2.1.2. Güneş pillerinde verim	11
2.2. Güneş Pili Çeşitleri	12
2.2.1. Schottky (metal/yarıiletken) güneş pilleri ...	13
2.2.2. MIS (metal/yalıtkan/yarıiletken) güneş pilleri	13
2.2.3. p/n ve p/i/n güneş pilleri	14
2.2.4. Heteroeklem güneş pilleri	14
3. p/i/n ve SCHOTTKY YAPILAR	15
3.1. p/i/n Yapılar	15
3.1.1. L_p deşik difüzyon uzunluğunun bulunması	18
3.1.2. Çevresel şartlar etkisiyle yapı belirtgenlerinin değişimi (Degradation)	19
3.2. Schottky Yapılar	21
3.2.1. Schottky yapılarda akım-gerilim ilişkileri ...	28
3.2.2. Yaşlanma (Ageing)	29
4. YAPILARIN HAZIRLANMASI	30
4.1. ITO/a-SiC:H(p ⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Al Yapılarının Hazırlanması	30
4.1.1. Kullanılan malzeme	30
4.1.2. Filmlerin hazırlanmasında kullanılan yöntemler	30
4.1.3. Filmlerin hazırlanması	31

4.2. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Cr Yapılarının Hazırlanması	31
4.2.1. Kullanılan malzeme	31
4.2.2. Filmlerin hazırlanması ve kullanılan yöntemler	33
5. DENEYSEL İNCELEME	37
5.1. Kullanılan Aygıtlar	37
5.2. ITO/a-SiC:H(p ⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Al Yapısıyla İlgili Ölçümler	37
5.2.1. Değişik aydınlanma durumlarında akım-gerilim değişimi	37
5.2.2. Karanlık ve aydınlıkta, sıcaklıkla akım-gerilim değişimi	38
5.2.2.1. Engel yüksekliğinin bulunması	43
5.2.2.2. Enerji aralığının bulunması	44
5.2.3. Kısa devre akımının ve verimin ışığın dalga boyuna bağlılığının incelenmesi	46
5.2.4. Uzun süreli aydınlanma ve zamanla değişimin incelenmesi	49
5.2.5. Tavlama sıcaklığının akım-gerilim belirtgenlerine etkisi	55
5.3. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Cr (Schottky) Yapılarıyla İlgili Ölçmeler	56
5.3.1. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Cr yapısında akım-gerilim belirtgenlerinin sıcaklığa bağlılığı	56
5.3.2. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Cr yapısında akım-gerilim belirtgenlerinin zamanla değişimi	60
5.3.3. Tavlama sıcaklığının Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n ⁺)/Cr yapısına etkisi	71
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	78
6.1. Tartışma ve Sonuç	78
6.2. Öneriler	86
KAYNAKLAR	89
EK	95

SİMGELER

A	Richardson sabiti
B	Sabit
D	Difüzyon sabiti
D_n	Elektron için difüzyon sabiti
d	Difüzyon kalınlığı
E	Elektron enerjisi
E_c	İletim band enerjisi
E_F	Fermi enerji düzeyi
E_g	Enerji band aralığı
E_v	Değerlik band enerjisi
E_u	Maksimum elektrik alan
h	Planck sabiti
I	Akım
I_L	Işıkla yaratılmış akım
I_M	Maksimum güç noktası akımı
I_o	Doyma akımı
I_{sc}	Kısa devre akımı
J	Akım yoğunluğu
J_o	Doyma akım yoğunluğu
J_d	Eklem bölgesi akım yoğunluğu
J_n	Elektron akım yoğunluğu
J_p	Deşik akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
L_n	Elektron difüzyon uzunluğu
L_p	Deşik difüzyon uzunluğu
N	Foton akısı
N_A	Alıcı durum yoğunluğu
N_D	Verici durum yoğunluğu
N_C	İletim bandı durum yoğunluğu
n	Diyot ideallik faktörü
P	Basınç
P_M	Maksimum çıkış gücü
P_s	Güneş gücü
Q_M	Metal yüzeyindeki yük
Q_{sc}	Yarıiletkendeki uzay yükü

Q_{ss}	Yüzey durum yük yoğunluğu
q	Elektron yükü
R	Yansıma katsayısı
R_K	Kontakt direnci
R_p	Paralel direnç
R_s	Seri direnç
S	Yüzeyde yeniden birleşme hızı
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$ veya K)
t	Zaman
V	Gerilim
V_{bi}	Difüzyon potansiyeli
V_M	Maksimum güç noktası gerilimi
V_{oc}	Açık devre gerilimi
W	Eklem bölgesi genişliği
x	Uzaklık koordinatı
α	Optik soğurma katsayısı
ΔE	Enerji farkı
ΔE_c	İletim bandı süreksizliği
ΔE_v	Değerlik bandı süreksizliği
δ	Yüzler arası tabaka kalınlığı
ϵ	Dielektrik sabiti
ϵ_i	Yükler arası tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_o	Serbest uzayın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
η	Verim
λ	Dalgaboyu
μ_n	Elektron mobilitesi
ν	Işığın frekansı
ρ	Uzay yük yoğunluğu
σ	İletkenlik
τ	Yarı ömür
ϕ	İş fonksiyonu
ϕ_M	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_{Bn}	Potansiyel engel yüksekliği
χ	Elektron alınganlığı

KISALTMALAR

a-Si	Amorf silisyum
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum
a-SiC:H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum karbür
BASREA	Geri yüzey yansımali elektro soğurum
ff	Doldurma çarpanı
ITO	Indiyum kalay oksit
MIS	Metal/yalıtkan/yarıiletken
p/i/n	p tipi yarıiletken/intrinsic yarıiletken/n tipi yarıiletken
p/n	p tipi yarıiletken/n tipi yarıiletken
RF	Radyo frekans
SS	Paslanmaz çelik



1. GİRİŞ

Işığın elektrik enerjisine dönüştürülmesine fotogerilim olay (fotovoltaik olay) denir. En önemli fotogerilim aygıtlar güneş pilleridir. Güneş pillerinin geçmişi Becquerel'in (1839) keşfine kadar uzanmaktadır. Becquerel, deney sırasında elektrolit içindeki elektrodun üzerine düşen ışığın fotogerilim oluşturduğunu görmüştür. Benzer olayı Adams ve Day (1877) katı selenyumda da gözlemişlerdir.

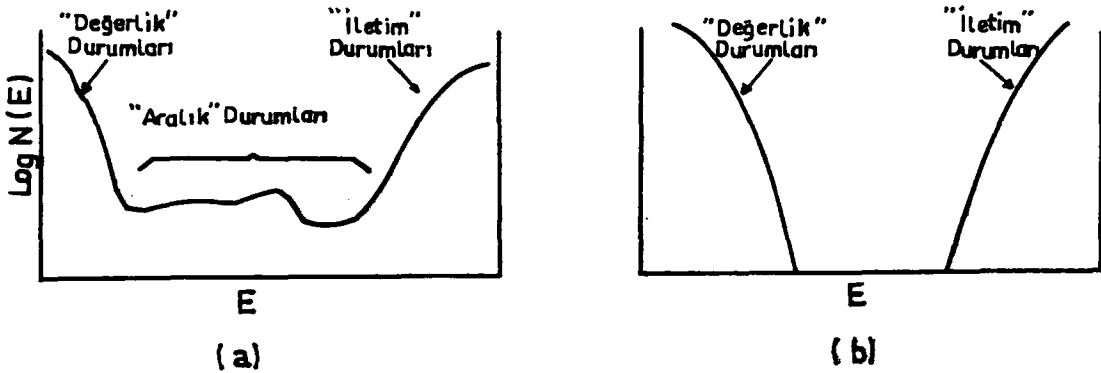
İlk modern güneş pili Si tek kristalinden p/n eklemi oluşturularak yapılmıştır ve %6'lık verim elde edilmiştir (Chapin vd 1954). Güneş pili yapımında o yıllarda CuS/CdS ve GaAs'tan da yararlanılmıştır. GaAs'tan yapılan güneş pillerinde 1956 yılında %4'lük bir verim elde edilirken yeni teknoloji gelişmeleriyle %24'lük verime Si tek kristalinden yapılan güneş pillerinde ise %19'lük verime ulaşılmıştır.

Güneş pillerinin maliyeti 1956 yılında watt başına 350 dolarken yapılan teknolojik gelişmelerle 1983 yılında watt başına 2 dolara kadar düşürülmüştür. Güneş pilleri, maliyetinin yüksek olması nedeniyle ilk yıllarda sadece uzay araştırmalarında, uzay araçlarının enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılmıştır. Dünyada son yıllarda baş gösteren enerji kriziyle yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyaç güneş pillerinin önemini arttırmıştır. Si tek kristalinin büyütülme, safsızlık yerleştirilmesi, büyütülen tek kristal çubuktan dilimler kesilmesi sırasındaki madde kaybı ve tek kristal kalınlığının çok az kısmının kullanılması maliyet yönünden çok büyük sınırlamalar getirmiştir. Bu sınırlamayı kaldırmak için güneş pilleri konusunda çok yoğun çalışmalar başlatılmış ve a-Si (amorfsilisyum)'un yukardaki sınırlamaları karşılayabileceği belirlenmiştir. Bir güneş pilinde 1 µm kalınlığında silisyum tabakasına gerek duyulması, bunun güneş ışığının bütün spektrumundan yararlanacak şekilde çok katlı güneş pilleri yapımına imkan vermesi a-Si'a büyük önem kazandırmıştır.

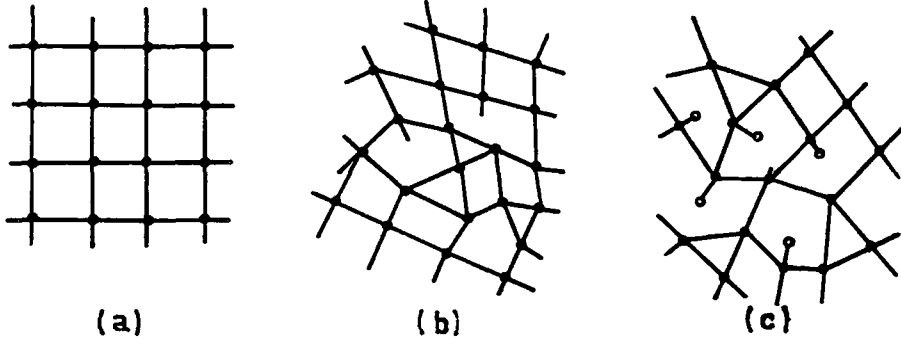
Amorf maddeler çok eskiden beri bilinmelerine rağmen 1960 yılına kadar bu konuda ciddi araştırmalar yapılmamıştır. Bunun nedeni amorf yarıiletkenlerin, kristallerden farklı olarak, yasaklanmış band aralığında yüksek durum yoğunluğuna sahip olmaları

(Şekil 1.1) yüzünden küçük miktarlardaki safsızlık katkılarına karşı duyarsızlıkları ve ayrıca iletkenliklerinin küçük olmasıdır. Yasaklanmış band durum yoğunluğunu azaltmak ve kristal silisyuma hiç benzemeyen bu özelliğini istenen doğrultuda geliştirmek için a-Si hidrojenlendirilmiştir. İlk hidrojenlendirme çalışması Chittick vd (1969) tarafından yapılmış, film öz direncinin (resistivite) alttabaka sıcaklığına bağlı ve fotoiletkenliğinin hidrojenlendirilmemiş a-Si filmlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Hidrojenin a-Si'a ait boş uçlu bağları yok ederek (Şekil 1.2), yasaklanmış aralık durum yoğunluğunu azalttığı (LeComber ve Spear 1970, Molhotra ve Neudeck 1976) ve böylece safsızlık katkısı yapılmasının mümkün olduğu gözlenmiştir (Spear ve LeComber 1975, Jan vd 1979, 1980). a-Si:H (Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum)'da p/n eklemi yapma teknolojisi Spear vd (1976) tarafından geliştirilmiştir. Amorf yarıiletken ilk güneş pili 1974 yılında RCA laboratuvarlarında yapılmıştır (Carlson ve Wronski 1976).

Si kristalinin 1.1 eV'luk indirek band aralığına sahip olmasına karşılık, a-Si:H'un direk band aralığı 1.6 eV olan "bir kristal gibi" optik soğurma spektrumu vermesi nedeniyle Si ve a-Si:H'un optik soğurma spektrumları arasında çok büyük fark vardır (Şekil 1.3) ve görünür spektrum bölgesinde a-Si:H'un soğurma



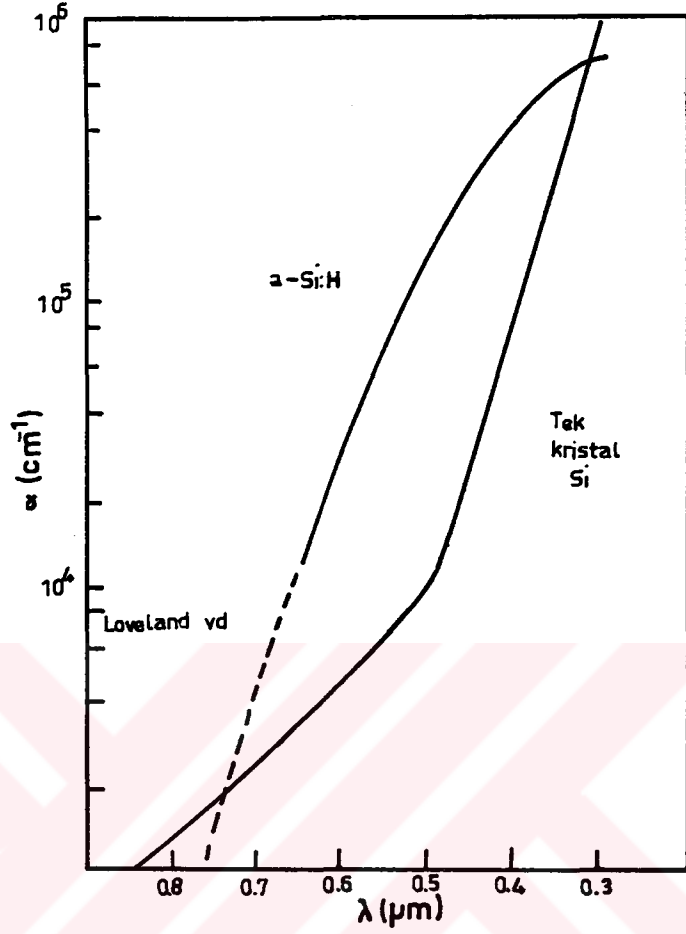
Şekil 1.1. a) Amorf yarıiletken b) Si tek kristalinde durum yoğunluklarının nitel gösterimi



Şekil 1.2. a) Tek kristal silisyumun b) a-Si'un
c) a-Si:H'un şematik gösterimi . Si
atomları, o Hidrojen atomları, - bağlar

katsayısı, silisyum kristalininkinden büyüktür ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1} - 3 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$). Bu yüzden görünür bölgede güneş ışığının büyük kısmı $1 \mu\text{m}$ kalınlığındaki a-Si:H tarafından soğurulabilmektedir. Aynı soğurulmanın yapılabilmesi için $100 \mu\text{m}$ kalınlığında silisyum tek kristaline gerek vardır. Tek kristale göre yüksek özdirençli ve düşük taşıyıcı mobiliteli a-Si:H'un güneş pillerindeki davranışı tek silisyum kristalininkinden farklıdır. a-Si:H'dan çeşitli yapı-
larda güneş pilleri yapılmıştır. Bunlar heteroeklemler, Schottky diodları, MIS yapıları ve p/i/n yapılarıdır (Carlson ve Wronski 1976, Wronski vd 1976, Wronski 1977, Carlson 1977, 1980).

a-Si:H filmlerin soğurma katsayısı, iletkenliği, özdirenci gibi özellikleri başta içerisine yerleştirilen hidrojen atomu sayısı olmak üzere filmlerin hazırlanmasında kullanılan sisteme bağlıdır ve bu, a-Si:H'un durum yoğunluğu dağılımını belirler. Bu filmlerden Schottky diodu, güneş pili gibi yapılar yapıldığında, metalle a-Si:H veya farklı tip a-Si:H tabakaları arasında meydana gelen arayüzey durumları, a-Si:H ve bundan yapılmış yapıların fiziğinin açıklanmasını güçleştirmektedir. a-Si:H filminin ve buna dayalı olarak yapılan metal/yarıiletken ve p/i/n eklemlerinin fiziksel özelliklerinin ve çeşitli belirtgenlerinin sıcaklık, nem, ışık, zaman, basınç gibi etkilerle değişmesi (degradation) nedeniyle



Şekil 1.3. Kristal Si ve a-Si:H için soğurma katsayısının dalgaboyuna karşı değişimi (Carlson ve Wronski 1976, Loveland vd 1973-1974)

bu konuda geniş araştırmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, p tabakası alevli boşalma (glow discharge); i ve n tabakası RF magnetron püskürtme (sputtering) yöntemiyle olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak hazırlanan p/i/n yapıları ve tamamı RF magnetron püskürtme yöntemiyle hazırlanan Schottky yapılarının belirtgenlerinde zaman, ışık ve sıcaklıkla meydana gelen değişimler incelenmiştir. Değişik sıcaklıklarda, karanlıktaki akım-gerilim ölçmelerinden p/i/n yapıların engel yüksekliği, aydınlıktaki akım-gerilim ölçmelerinden ise a-Si:H'un enerji band aralığı bulunmuştur. Uzun süreli aydınlatma sonunda yapı belirtgenlerinde meydana gelen değişimler ve bunun deşik difüzyon uzunluğu

ile ilişkisi araştırılmıştır. Deşik difüzyon uzunluğunun belirlenmesinde sabit şiddette farklı dalgaboylu ışık altında yapılan kısa-devre akımı ölçümlerinden yararlanılmıştır. Uzun süreli aydınlanma ve zamanla, yapı belirtgenlerinde meydana gelen değişmelerin tavlama ile tersine çevrilebilirliği incelenmiştir. Schottky tipi yapılarda değişik sıcaklıklarda akım-gerilim ölçmelerinden yararlanarak yapıların engel yüksekliği belirlenmiş, metal a-Si:H arasındaki yüzey durumlarının engel yüksekliğine ve diyot kalitesine etkisi incelenmiştir. Zamanla ve tavlama ile arayüz durumlarının değişimi, bu değişimin diyot belirtgenlerine etkisi ve yüzey durumlarının kaynağı araştırılmıştır.



2. KURAMSAL BİLGİLER

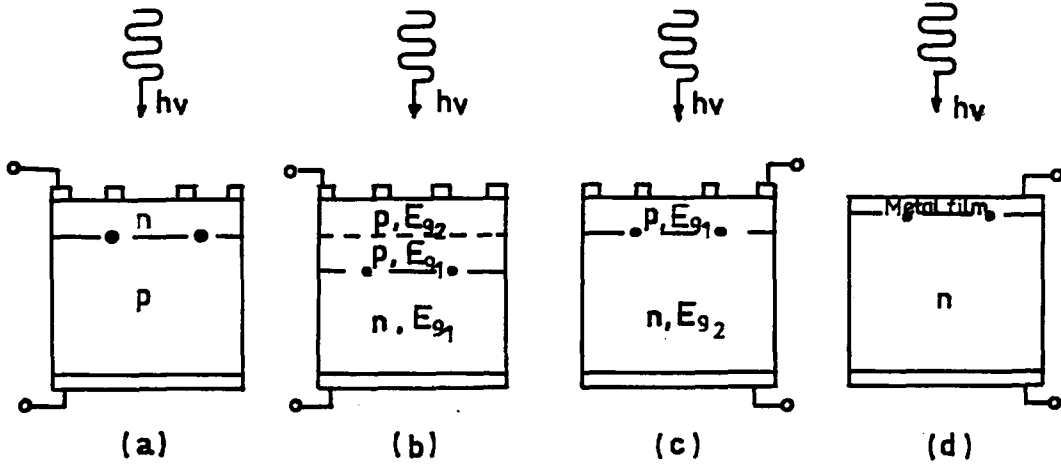
2.1. Güneş Pillerine Kuramsal Bakış

2.1.1. Giriş

Güneş pilleri, zıt taşıyıcılı iki tip yarıiletkenin eklemi veya metal/yarıiletken eklemi (Schottky tip) ile meydana gelen potansiyel engelinden oluşur. Bu potansiyel engelinde yarıiletken tarafından soğurulan $h\nu > E_g$ enerjili fotonların yarattığı elektron-deşik çiftleri, ayrılarak bir fotoakım oluştururlar. Genel olarak dört tip engel vardır:

- Şekil 2.1.a aynı yarıiletkenden yapılmış p/n eklemi (Homojunction);
- Şekil 2.1.b aynı yarıiletkenden yapılmış ve önyüzüne yüzey kayıplarını önlemek için daha büyük enerji aralığı olan bir yarıiletken konmuş, p/n eklemi (Heteroface yapılar);
- Şekil 2.1.c enerji band aralığı farklı iki yarıiletken arasında oluşturulan p/n, n/n, p/p ve n/p eklemi (Heteroeklem yapılar);
- Şekil 2.1.d metal/yarıiletken eklemi (Schottky yapılar) göstermektedir.

Bir p/n engeli ve p/n yapılı bir güneş pilinde ışıqla meydana gelen olaylar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bir p/n yapısı, altı bölgede incelenebilir: 1- p tipi yarıiletken ve metal arasındaki omik kontak bölgesi; 2- Işık soğurulması ile elektron-deşik çiftlerinin yaratıldığı, azınlık taşıyıcılarının difüzyonla taşındığı ve bir kısmının yeniden birleştiği p gövde bölgesi; 3- Eklem elektrik alanı ile taşıyıcıların ayrıldığı eklem bölgesi; 4- n bölgesi; 5- n tipi yarıiletken ve metal arasındaki omik kontak; 6- Azınlık taşıyıcılarının yüzeyde yeniden birleşerek kayboldukları önyüz bölgesi.



Şekil 2.1. Farklı tip güneş pillerinin gösterimi
 a) Homojunction, b) Heteroface,
 c) Heteroeklem, d) Schottky yapılar

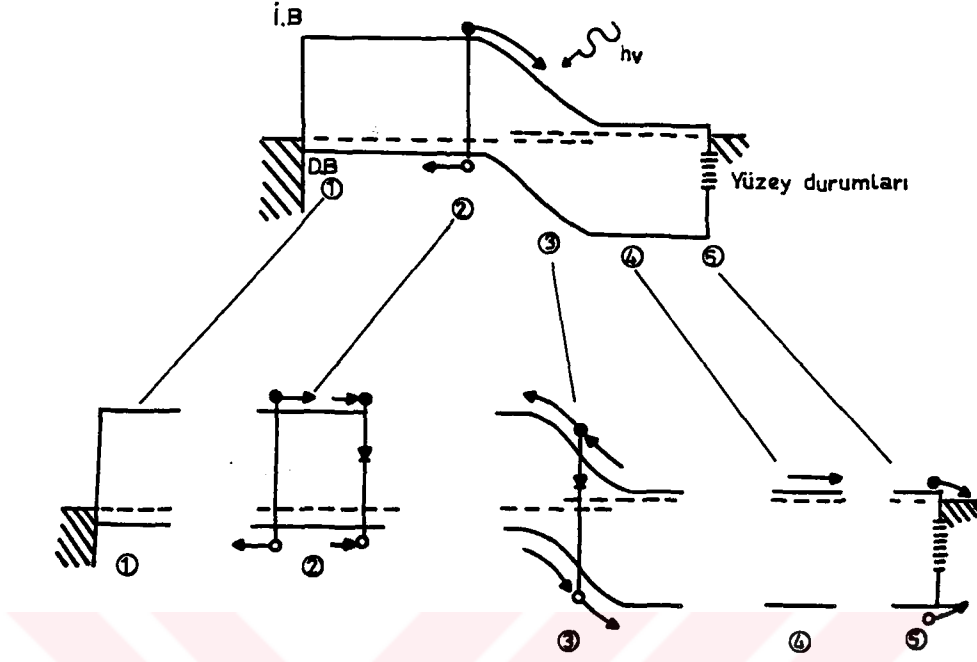
Kontak dirençleri, kullanılan metalin iş fonksiyonu, elektron alınganlığı, yarıiletken taşıyıcı yoğunluğu ve metal-yarıiletken eklemdeki arayüzey durumları tarafından belirlenir. Yapının seri direnci

$$R_s = R_{Kp} + R_p + R_n + R_{Kn} \quad (2.1)$$

dır. R_p , R_n , R_{Kp} ve R_{Kn} sırasıyla p, n bölgesinin gövde dirençleri, p, n bölgesinin kontak dirençleridir (Fahrenbruch ve Bube 1983).

p gövde bölgesinde elektron-deşik çiftinin yaratılması aydınlanma akısı ve yarıiletkenin optik soğurma katsayısına bağlıdır. p tipi bölgede difüzyonla taşınma ise azınlık taşıyıcılarının mobilitesi, yeniden birleşme kaybı, τ yarıömrü ve serbest yüzlere yakın bölgede yaratılmış taşıyıcıların S yüzey birleşme hızı ile ilgilidir.

Eklem bölgesi için karanlık eklem akımı (2.2) bağıntısıyla verilir (Kuwano vd 1981).



Şekil 2.2. Küçük düz beslem geriliminde p-n eklemünde ışıkla meydana gelen olayların nitel gösterimi

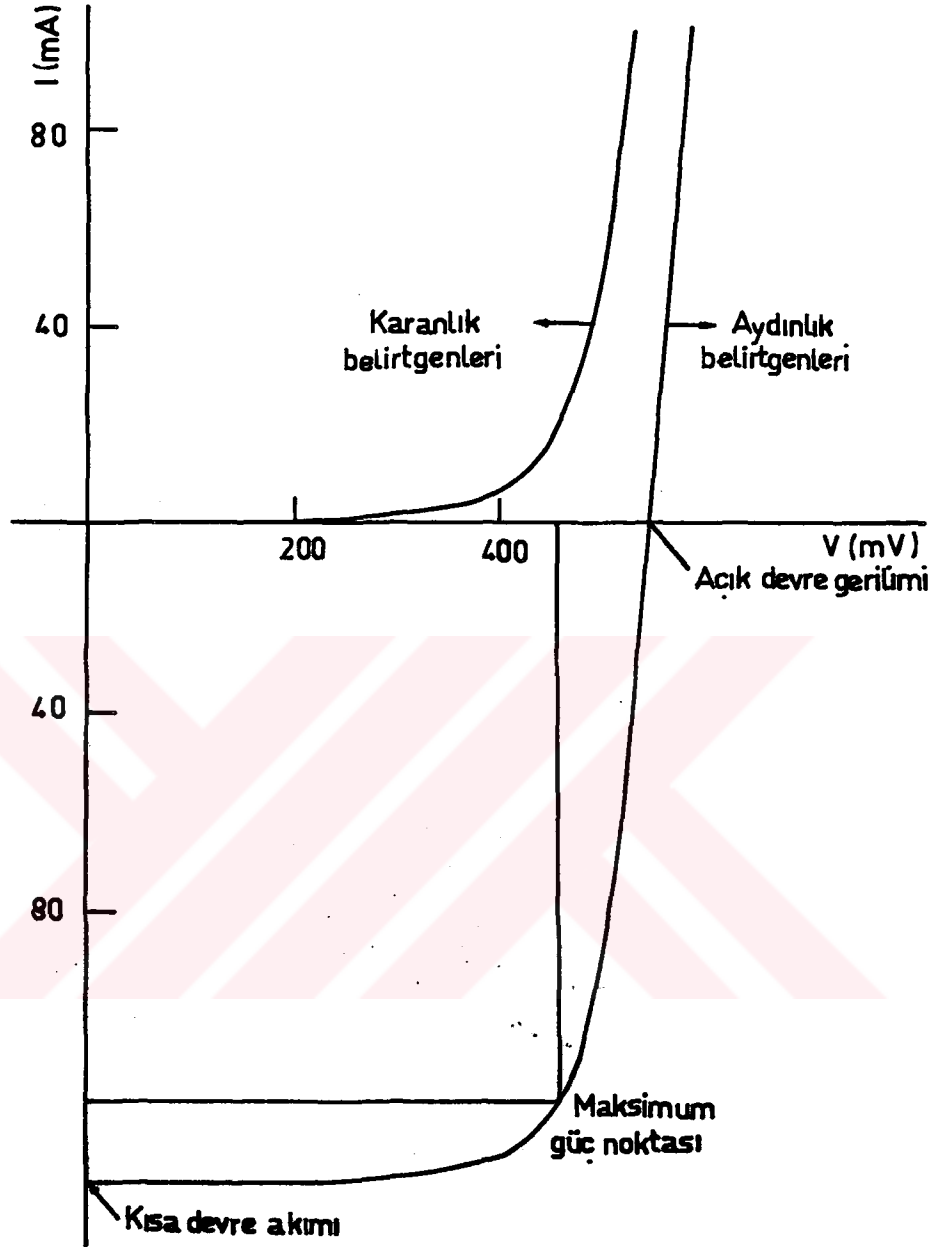
$$I = I_0 \{ \exp [q(V - IR_s)/nkT] - 1 \} \quad (2.2)$$

burada q yük, I_0 ters doyma akımı, n diyod ideallik faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve V uygulanan gerilimdir. Aydınlanma altında (2.2) bağıntısı ışıkla yeni taşıyıcılar oluştuğundan (2.3) haline gelir.

$$I = I_0 \{ \exp [q(V - IR_s)/nkT] - 1 \} - I_L \quad (2.3)$$

Burada I_L , p bölgesinde ışıkla yaratılmış akımdır (Kuwano vd 1981). Görüldüğü gibi aydınlık akım-gerilim belirtgen eğrisi, karanlık akım-gerilim belirtgen eğrisinin biçim değiştirmeden I_L kadar ötelenmesidir (Şekil 2.3).

Şekil 2.3 kusursuz bir pil için aydınlık, karanlık akım-gerilim eğrilerini ve güneş pillerini belirten bazı büyüklükleri de



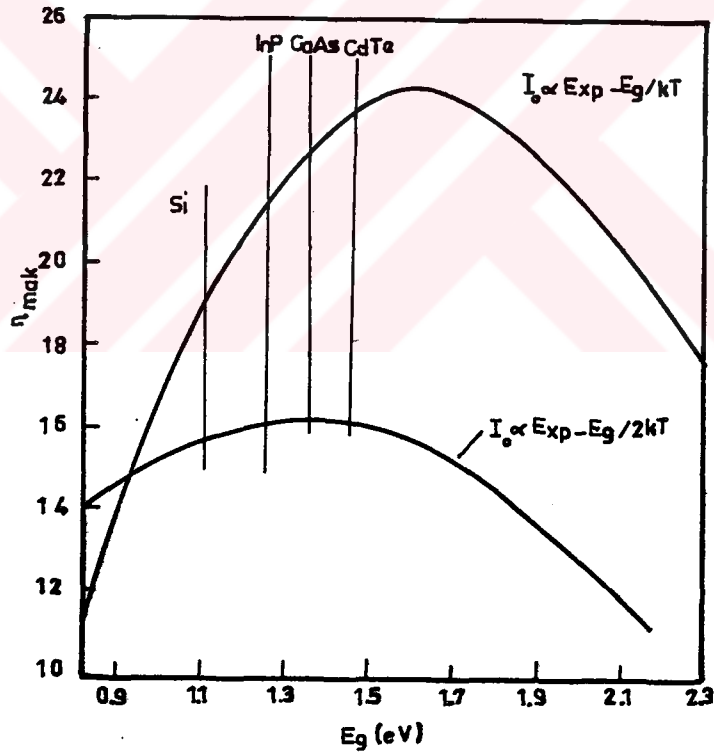
Şekil 2.3. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık I-V belirtgen eğrileri (Palz 1978)

göstermektedir. Bunlar açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası gerilimi (V_m) ve maksimum güç noktası akımı (I_m) dır.

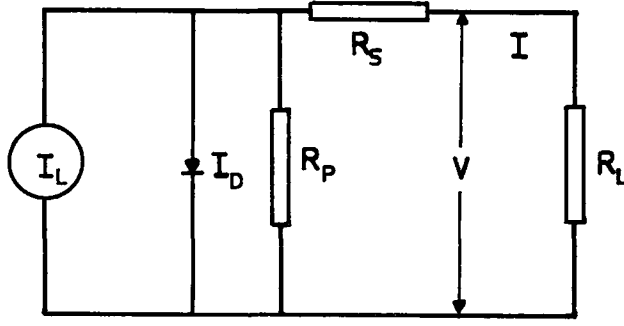
Kusursuz bir güneş pilinde (2.3) bağıntısından da görüldüğü gibi I_0 ve n , aydınlanmanın fonksiyonu değildir ve eklemede paralel

direnç sonsuzdur. Soğurma bölgesinin band aralığı (E_g) arttırılınca I_0 diyod parametresi azalacak, pilden elde edilen gerilim artacaktır. Bununla beraber E_g 'nin artması optik bölgede soğurulan güneş spektrumu ve dolayısıyla foto uyarılmış akımı azaltacaktır. Bu iki etkinin uyuşmasıyla 1,4 eV ve 1,5 eV'luk enerji aralığı bölgesinde maksimum verim elde edilir. Şekil 2.4, kuramsal verim ve band aralığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Buna göre CdTe ve GaAs yüksek verimli güneş pili elde edilmesinde en iyi yarıiletkenlerdir. Fakat bu maddelerden yapılan güneş pili maliyetleri çok yüksektir.

Gerçek bir pilde $R_s > 0$ ve $R_p < \infty$ dur (Şekil 2.5). Bu dirençler güç kayıplarına sebep olurlar. R_s ve R_p 'yi içine alan aydınlık akım-gerilim bağıntısı



Şekil 2.4. Yüzey kayıplarının olmadığı kusursuz bir pilde kuramsal verimin yarıiletken enerji aralığına göre değişimi (Loferski 1956)



Şekil 2.5. Gerçek bir güneş pilinin eşdeğer devresi

$$I = I_o \{ \exp [q(V-IR_s)/nkT] - 1 \} + (V-IR_s)/R_p - I_L \quad (2.4)$$

dır (Kuвано vd 1981, Warashina ve Ushirokawa 1982). Bu yüzden aydınlık eğrisinden karanlık eğrisinin basit bir ötelemesi olarak bahsetmek artık mümkün değildir.

2.1.2. Güneş pillerinde verim

Bir güneş pilinin verimi, maksimum çıkış gücünün (P_M) pil üzerine gelen güneş gücüne (P_s) oranıdır.

$$\eta = \frac{P_M}{P_s} \quad (2.5)$$

bir güneş pilinin doldurma çarpanı ise

$$ff = \frac{I_M V_M}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_M}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.6)$$

ile verilir; doldurma çarpanı cinsinden verimin ifadesi

$$\eta = ff \frac{I_{sc} V_{oc}}{P_s} \quad (2.7)$$

dir (Fahrenbruch ve Bube 1983).

Güneş pilinin verimi önemli bir parametre olup, verimi etkileyen birçok fiziksel neden vardır. Bunlar:

- Enerji aralığından daha büyük enerjili fotonların ($h\nu > E_g$) oluşturduğu yüksek kinetik enerjili taşıyıcıların fazla enerjilerini çarpışmalarla kaybederek elektriksel ilettime katılmayıp, enerjinin ısı şeklinde kaybolması,
- Enerji aralığından düşük enerjili fotonların ($h\nu < E_g$) deşik-elektron çifti yaratmadan pili terk etmeleri,
- Pilde ışıkla yaratılan taşıyıcıların kontak kayıpları nedeniyle tamamının toplanamaması,
- Pilin seri ve paralel direnci nedeniyle meydana gelen güç (I^2R) kayıpları,
- Doldurma çarpanının birden küçük olmasından dolayı meydana gelen kayıplar,
- Yüzeğe gelen ışığın yüzeyden yansiyarak taşıyıcı oluşturmaması,
- Pilin yüzeyine yansımayı önlemek amacıyla konulan tabaka veya yapıdaki kusurlar tarafından ışığın soğurulmasıdır.

2.2. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pillerinin kesin bir sınıflandırılması yapılmamıştır. Çok çeşitli güneş pilleri söz konusudur. Bununla birlikte iki ayrı grupta ele alınabilirler. Bunlardan birincisi kullanılan madde, diğeri güneş pilinin yapılış şeklidir. Kullanılan madde sınıfında güneş pillerini tek kristalden ve ince filmlerden yapılanlar şeklinde yine sınıflandırmak mümkündür. Tek kristalden yapılanlar arasında silisyum en önemlilerindedir. Bugüne kadar geniş uygulama alanları bulmuştur. Tek kristalin büyütülmesinde ve pilin hazırlanmasındaki uzun işlemler, kırmızı ötesi ışığın ısı olarak kaybolması, güneş spektrumunun tamamından yararlanılamaması yüzünden önemini kaybetmeye, yerini ince filmlerden yapılanlara bırakmaya başlamıştır. Bugün için a-Si ve GaAs ince filmleri önem kazanmıştır. Bunlardan daha ekonomik şartlarla çok katlı güneş pilleri yapılması ve

güneş spektrumunun tamamından yararlanmak, verimi yüzde elliye çıkarmak mümkündür, fakat farklı tabakalar arasında oluşan yüzey durumları çözümü zor bir engel oluşturmaktadır.

Yapılış biçimine göre sınıflamada, Schottky (Metal/yarıiletken), MIS (Metal/yalıtkan/yarıiletken) p/i/n, p/n ve heteroeklem güneş pilleri sayılabilir.

2.2.1. Schottky (metal/yarıiletken) güneş pilleri

Bu güneş pilinde ışığın oluşturduğu elektron-deşik çifti metal/yarıiletken arasında oluşan potansiyel engeli tarafından ayrılır. En basit Schottky tipi güneş pilleri, metal alt tabakalar (substrate) üzerine kaplanmış a-Si:H filminin iş fonksiyonu büyük metallere birleştirilmesiyle elde edilir. Bu yapılarda alt tabaka ile a-Si:H arasındaki eklem zayıf olması nedeniyle doldurma çarpanı düşüktür. Alt tabaka ve a-Si:H arasına n tipi a-Si:H ince filminin yerleştirilmesi ile pillerin verimi arttırılır. Schottky tipi güneş pilleri küçük iş fonksiyonlu metallere, p tipi a-Si:H ile birleştirilmesiyle de elde edilir. Schottky tipi güneş pilleri tek tip tabakaya gereksinim duyulması, açık devre geriliminin metalin iş fonksiyonuna bağlılığı nedeniyle daha büyük iş fonksiyonlu metallere kullanılarak açık devre geriliminin büyütülebilmesi, diyod idealite faktörünün bire yakın olması ve düşük sıcaklıklarda işlem yapılabilmesi bakımından önemlidir.

2.2.2. MIS (metal/yalıtkan/yarıiletken) güneş pilleri

Bu tip pillerin Schottky tipi pillerden farkı metal ile yarıiletken arasında oksit tabakasının bulunmasıdır (Green ve Godfrey 1976, Wronski 1978). Yarıiletken üzerinde 20-30 Å kalınlığında büyütülen oksit tabakası tek tip taşıyıcı geçişini sağlar ve p/n eklemlerde görülen yeniden birleşme olayını önler. Bu piller açık devre gerilimleri büyük olmasına rağmen nemden kolaylıkla etkilenip bozulabilirler.

2.2.3. p/n ve p/i/n güneş pilleri

p/n tipi güneş pilleri boron katkılı a-Si:H ince filminin üzerine fosfor katkılı a-Si:H filminin kaplanmasıyla oluşturulur. Azınlık taşıyıcı ömürlerindeki kayıpları önlemek için p veya n tipi tabakalardan birinin katkı oranı, diğerine göre daha düşük olmalıdır. Verimli güneş pilleri için ön ve arka elektrotlarda küçük dirençli eklemelerin istenmesi nedeniyle yüksek oranda katkılı a-Si:H'a gerek vardır. Fakat her ikisi de yüksek oranda katkılanmış p ve n tipi yarıiletkenin birleştirilmesiyle eklem bölgesinde çok büyük bir alan doğacağından yapı kırılacaktır. Bu güçlük, p^+ ve n^+ tabakaları arasına i (intrinsic a-Si:H) tabakası yerleştirilerek giderilebilir, bu tip yapılara p/i/n yapılar denir.

2.2.4. Heteroeklem güneş pilleri

Optik band aralıkları farklı iki yarıiletkenin birleştirilmesiyle elde edilir. a-Si:H ince filmlerle hetero tip güneş pili yapımında a-Si:H'dan daha büyük band aralığına sahip a-SiC:H (Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum karbür)'den yararlanılır (Tawada vd 1982). Bu tip güneş pillerinin, aynı yarıiletken kullanılarak yapılan güneş pillerine göre üstünlüğü daha büyük enerji aralığına sahip yarıiletken kullanıldığı için kısa dalga boyu tepkisinin büyük olmasıdır. $p^+/i/n^+$ tipi hetero yapılar üreterek ön ve arka elektrotlarda, verimli güneş pilleri için istenen küçük direnç sağlanabilmektedir.

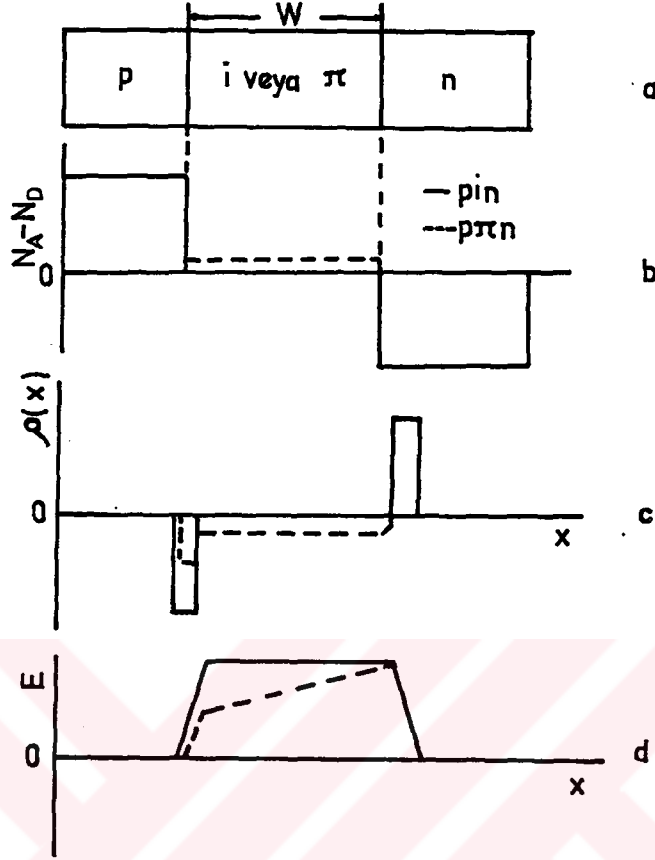
3. p/i/n ve SCHOTTKY YAPILAR

3.1. p/i/n Yapılar

p tipi yarıiletkenle n tipi yarıiletken arasına i tabakasının yerleştirilmesiyle oluşan yapılara p/i/n diyodları denir (Şekil 3.1.a). Çoğu kez aradaki i tabakayı oluşturmak teknik olarak zordur ve yapım sırasında bu ara tabaka, çok yüksek özdirençli p tipi veya n tipi yarıiletken tabaka halinde oluşur. Bu yapılar sırasıyla p/ π /n ve p/v/n yapıları olarak adlandırılırlar. p/i/n ve p/ π /n diyodları için safsızlık dağılımı, uzay yük yoğunluğu ve alan dağılımı Şekil 3.1.b,c,d de gösterilmiştir. Aradaki i veya i'e çok yakın yarıiletken tabakanın özdirencinin çok büyük olması yüzünden yapıya uygulanan gerilimin büyük bir kısmı burada düşer. Fotoelektrik olay sonucu i tabakada yaratılan deşik ve elektronlar, bu elektrik alan içersinde hareket ederek foto akım oluştururlar. Bu yüzden bu çeşit yapılar foto diyod olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Anderson ve Spear (1977) SiH₄ (Silan) ve CH₄ (Metan) karışımının alevli boşalma (glow discharge) yöntemiyle ayrıştırılması sonucunda elde edilen a-SiC:H'ün optik band aralığının 2 eV civarında olduğunu gözlediler. Bu şekilde elde edilen a-SiC:H ile band aralığı 1,6 eV olan a-Si:H eklem yapmak üzere birleştirildiğinde, band aralıkları birbirinden farklı iki yarıiletkenin eklemine benzer bir yapı oluşur. Bu tip yapılar, enerji band kuramına göre heteroyapılar olarak isimlendirilir. Son yıllarda ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/metal şeklinde yapılan p⁺/i/n⁺ yapıları güneş pili uygulamalarında çok büyük önem kazanmıştır. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/metal yapılarda safsızlıkları farklı bir maddeden diğerine geçiş birdenbire olur ve bu özelliği yansıtmak üzere adı geçen yapılara "anisotip heteroyapı" denir (Anderson, 1962).

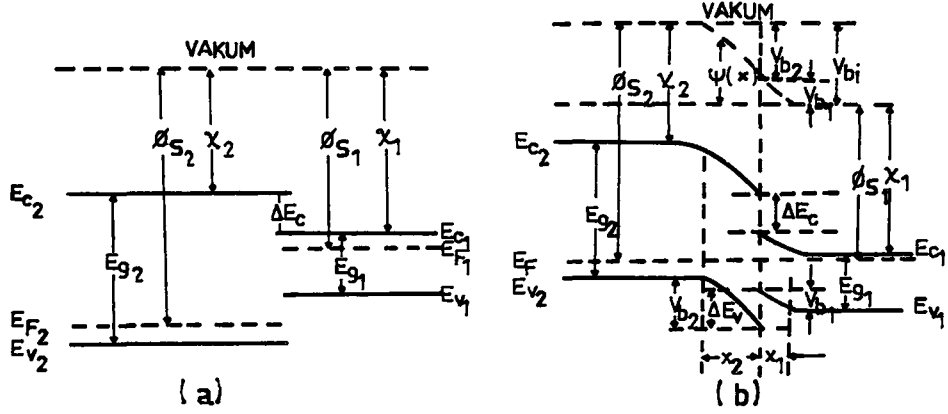
İki yalıtılmış p ve n tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı ile bir anisotip heteroyapının dengedeki enerji band diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. İki yarıiletkenin X elektron alınganlıkları, ϕ_s iş fonksiyonları, ϵ_s dielektrik sabitleri,



Şekil 3.1. a) p/i/n ve p/π/n eklemeler, b) Safsızlık dağılımı, c) Uzay yük yoğunluğu, d) Alan dağılımı

E_g enerji aralıkları farklıdır. İki yarıiletkenin elektron alınganlıklarının farklı olması iletim bandı kenarında süreksizliğe sebep olur. Bu modelde arayüz durumları olmadığı için eklem bölgesinin iki tarafındaki uzay yükleri eşit ve zıt işaretlidir ve bu nedenle potansiyel engeli, iş fonksiyonlarındaki $(\phi_{s_1} - \phi_{s_2})$ farkı ile belirlenir, toplam engel yüksekliği $(V_{bi} = V_{b_1} + V_{b_2})$ olur.

Bu modelde arayüz kenarındaki süreksizlikler nedeniyle difüzyon akımını tamamıyla ya elektronlar ya da deşikler oluşturacaktır. Ancak p/n heteroyapısı için akım taşıyıcıları çoğunlukla elektronlardır, çünkü elektronlar için engel yüksekliği deşikler için olandan daha küçüktür.



Şekil 3.2. a) Yalıtılmış p ve n tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı, b) Bir anisotip heteroyapının dengedeki enerji band diyagramı

Arayüz durumları, tünel etkileri, görüntü yük nedeniyle oluşan kaçak akımları ve yaratma/birleşme akımının ihmali ile kısıtlanmış akım yoğunluğu-gerilim ilişkisi

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{qV_{b2}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) \right] \quad (3.1)$$

bağıntısı ile verilir (Anderson 1962). V_1 ve V_2 uygulanan gerilimin p ve n tipi yarıiletkene düşen kısmı; A, Richardson sabitidir. $V_{b1} - V_1$ ve $V_{b2} - V_2$, arayüzdeki elektrik akısının süreklilik sınır şartından bulunur (3.2).

$$V_{b2} - V_2 = \frac{\epsilon_{s1} N_{D1}}{\epsilon_{s2} N_{D2}} \left\{ \frac{kT}{q} \left[\exp\left(\frac{q(V_{b1} - V_1)}{kT}\right) - 1 \right] - (V_{b1} - V_1) \right\} \quad (3.2)$$

$\frac{\epsilon_{s1} N_{D1}}{\epsilon_{s2} N_{D2}} = 1$ ve $V_{bi} \gg kT/q$ durumunda (3.2) bağıntısı

$$\exp\left(\frac{q(V_{b1} - V_1)}{kT}\right) = \frac{q}{kT} (V_{bi} - V) \quad (3.3)$$

bağıntısına indirgenir ve (3.1) bağıntısı

$$J = J_0 \left(1 - \frac{V}{V_{bi}}\right) \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1\right) \quad (3.4)$$

olur ve ters beslem akımının gerilimle çizgisel olarak arttığını gösterir. Burada J_0 ,

$$J_0 = \frac{qATV_{bi}}{k} \exp \frac{-qV_{bi}}{kT} \quad (3.5)$$

dir.

3.1.1. L_p deşik difüzyon uzunluğunun bulunması

Taşıyıcıların difüzyon uzunluğu, güneş pilinin verimini belirleyen önemli ve bulunması güç bir parametredir. Bu parametrenin tayini için kırmızı bölgesindeki bağıl spektral tepkinin ölçülmesinden yararlanılır (Agarwala vd 1980). Buna göre sabit ışık şiddetinde oluşan J_{sc} kısa devre akım yoğunluğu, dalga boyunun (λ), birim zamanda birim yüzeye gelen foton sayısının [$N(\lambda)$], yüzeyin yansımaya katsayısının (R), yüzeyde yeniden birleşme hızının (S), soğurma katsayısının (α), difüzyon kalınlığının (d), p bölgesindeki difüzyon uzunluğunun (L_n), baz bölgesindeki difüzyon uzunluğunun (L_p) ve eklem bölgesi genişliğinin (W) fonksiyonudur. Toplam kısa devre akımı p tipi difüzyon tabakasındaki $J_n(\lambda)$, n tipi baz bölgesindeki $J_p(\lambda)$ ve eklem bölgesindeki $J_d(\lambda)$, akımlarının toplamıdır. Bunlar

$$J_n(\lambda) = \left[\frac{qN(\lambda)(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] \left[\frac{\frac{SL_n}{D_n} + \alpha L_n - \exp(-\alpha d) \left(\frac{SL_n}{D_n} \cosh \frac{d}{L_n} + \sinh \frac{d}{L_n} \right)}{\frac{SL_n}{D_n} \sinh \frac{d}{L_n} \cosh \frac{d}{L_n} - \alpha L_n \exp(-\alpha d)} \right] \quad (3.6)$$

$$J_p(\lambda) = qN(\lambda)(1-R) \frac{\alpha L_p}{1+\alpha L_p} \exp[-\alpha(d+w)] \quad (3.7)$$

$$J_d(\lambda) = qN(\lambda)(1-R) \exp(-\alpha d) [1-\exp(-\alpha w)] \quad (3.8)$$

bağıntılarıyla verilir (Agarwala vd 1980). Uzun dalga boyu bölgesinde, difüzyon ve eklem bölgesinden gelen katkılar ihmal edilebilir ve spektral tepkiye katkı sadece baz tabakadan gelir ve (3.7) bağıntısı λ ile çarpılırsa kısa devre baz akım yoğunluğu

$$J_{sc}(\text{baz}) \approx \frac{J_p \lambda}{N(\lambda)} = q(1-R) \frac{\lambda \alpha L_p \exp[-\alpha(d+w)]}{1+\alpha L_p} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. α 'nın yeteri kadar küçük değerlerinde $\exp[-\alpha(d+w)] \approx 1$ olduğundan (3.9) bağıntısı

$$J_{sc} = \frac{K\lambda}{\alpha^{-1} + L_p} \quad (3.10)$$

bağıntısına indirgenir. Burada $K = q(1-R)$ dir. Bu ifade

$$\frac{\lambda}{J_{sc}} = \frac{\alpha^{-1}}{K} + \frac{L_p}{K} \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir. $\frac{\lambda}{J_{sc}}$ 'nin α^{-1} 'e karşı çizilmesinden elde edilen doğrunun α^{-1} eksenini kestiği noktadan L_p bulunabilir (Agarwala vd 1980, Dresner vd 1981).

3.1.2. Çevresel şartlar etkisiyle yapı belirtgenlerinin değişimi (Degradation)

Amorf silisyum ince filmlerin, görünür spektrum bölgesindeki optik soğurum katsayısının yüksek olması, iletkenliğinin içersindeki katkı maddeleri ile kontrol edilebilmesi, 200°C - 400°C 'deki alt tabaka sıcaklığında elde edilen filmlerin iyi elektronik

özellikler sergilemesi, elde edilmelerinin daha kolay ve maliyetlerinin düşük olması gibi özellikleri vardır. Ancak halen çözüm bekleyen önemli ölçüde sorunları da bulunmaktadır. Bu sorunlardan en önemli olanlarından biri film özelliklerinin ışık, zaman, nem, sıcaklık gibi dış etkenlerle değişmesidir. Amorf silisyum ince filmlerde ışıkla olan değişmeler, fotoiletkenlik (Staebler ve Wronski 1980, 1977), lüminesans (Morigaki vd 1980, Pankove ve Berkeyheiser 1980), elektronparamagnetik rezonans (Hirabayaski vd 1980, Dersch vd 1981) ve aralık durum yoğunluğu (Lang vd 1982, Stoica 1981) incelemelerinde gözlenmiştir. Amorf silisyum ince filmler kullanarak yapılmış güneş pillerinde de ışık, zaman, sıcaklık, nem (Staebler vd 1981, Crandall ve Staebler 1983, Hack ve Shur 1985, Taniellian 1981) gibi dış etkenlerle değişmeler olduğu ve bunun verimi azalttığı ortaya çıkmıştır. Işığı, elektrik enerjisine çeviren aygıtların ışık, zaman ve diğer dış etkenlerden etkilenmesi teknolojik açıdan çok büyük sorun olup, çözümü için geniş araştırmalar yapılmaktadır. Güneş pillerinin kararlılığı filmlerin hazırlanma şartlarına sıkıca bağlıdır (Kennedy ve Haneman 1983). Bu yüzden değişik şartlarda hazırlanmış pillerdeki bozulmalar, değişik olmaktadır. Bazı piller hızla bozulurken, bazılarındaki bozulma yavaştır. Fabrikasyon sırasındaki kirlenmeler, hava ve su buharının da bozulmayı arttırdığı gözlenmiştir (Carlson vd 1982).

Yapılan bazı araştırmalar da pillerin farklı beslemlerde uzun süre ışık altında tutuldukları zaman bozulmalarının farklı olduğu, örneğin düz beslemde tutulan pilin kısa devre ve ters beslemdekinden daha fazla bozulduğu gözlenmiştir (Kennedy ve Haneman 1983). Işık şiddeti de bozulmanın miktarında rol oynar, yüksek ışık şiddetiyle aydınlatma, aynı sürede düşük bir ışık şiddetiyle aydınlatmadan daha büyük bir bozulma meydana getirir (Guha 1984).

Işık, zaman, nem gibi dış etkilerle meydana gelen bu değişmeler tavlama ile tersine çevrilebilmektedir (regeneration). Tavlama sıcaklığı çeşitli araştırmacılara göre 130°C-200°C arasında değişmektedir (Kennedy ve Haneman 1983, Staebler vd 1981).

Amorf silisyumdan yapılan p/i/n ve Schottky tipi yapılarda değişik katkılı amorf silisyum tabakalarının kullanılması ve bunlardan alınan kontaklar bu tür yapılarda "degradation" ve "regeneration" olayının fiziksel nedeninin açıklanmasını

güçleştirmekte ve karmaşık yapmaktadır.

Dış etkenlerle film özelliklerinde meydana gelen bu değişimler:

- Zayıf hidrojen bağlarının kırılması (Tsuda vd 1983),
- p,i tabakasında ve p/i arayüzeyinde meydana gelen tuzaklar (Mishima vd 1985),
- Yarı kararlı tuzaklar (Crandall ve Staebler 1983),
- Taşıyıcı difüzyon uzunluğunun ve taşıyıcı ömürlerinin değişmesi (Kennedy ve Haneman 1983),
- Film içersinde SiO_2 oluşumu nedeniyle seri dirençte artmalar (Thomas 1983, Kuboi 1983),
- Silisyum monohidrat, silisyum dihidrat gibi hidrat gruplarının oluşması (Ohsawa vd 1985),
- Metal ve oksit tabakasındaki atomik göç ve kimyasal bağlardaki değişimler (Grimshaw ve Towsend 1980),
- Boron ve fosfor kirlenmesi (N.Möller vd 1982, Maruska vd 1983)

şeklinde çok sayıda olaya dayanmaktadır. Bunların sonucunda filmlerin iletkenlikleri, yapıdaki engel yükseklikleri, yapının seri ve paralel dirençleri ve sonuç olarak da aydınlık-karanlık akım-gerilim belirtgenleri değişmektedir.

3.2. Schottky Yapılar

Metal/yarıiletken eklemlerde birleşme bölgesinde oluşan engelin doğrultucu veya omik olması enerji band diyagramlarıyla açıklanır. Bir metalle yarıiletken, eklem yapmak üzere birleştirildiğinde, her iki maddenin Fermi enerji düzeyleri eşit oluncaya kadar bir taraftan diğer tarafa elektron akışı olur ve yeni bir yük dağılımı sonucunda da bir potansiyel engeli oluşur. Engelin doğrultucu ya da omik olması yarıiletkenin tipine, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. Genel olarak yüzey durumlarının bulunmadığı metal/n tipi yarıiletken eklemlerde, metalin iş fonksiyonu (ϕ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s), büyükse engel doğrultucu (Şekil 3.3.a), aksi halde omiktir

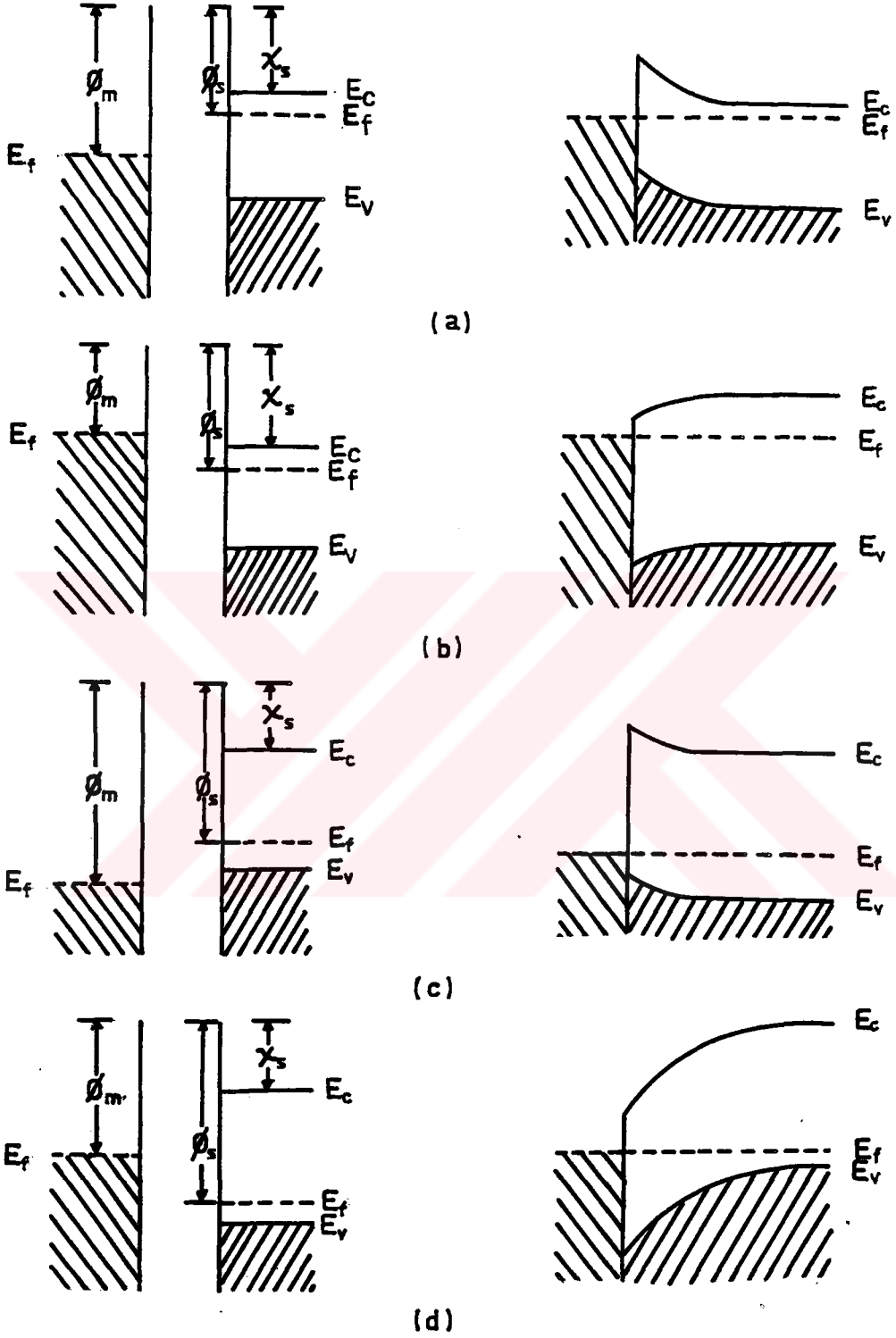
(Şekil 3.3.b). Metal/p tipi yarıiletken eklemlerde $\phi_m > \phi_s$ ise engel omik (Şekil 3.3.c), $\phi_m < \phi_s$ ise (Şekil 3.3.d) engel doğrultucudur (Cowley ve Sze 1965, Crowell vd 1965). Şekil 3.3.a'dan görüleceği gibi eklem yapılmadan önce n tipi yarıiletkenin Fermi enerji düzeyi metalinkinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıda olduğu için bu iki ortam birleştirildiğinde elektronlar yarıiletkenden metale akacaktır. Elektron akışı iki ortamın Fermi düzeyleri eşitlenip, denge kuruluncaya kadar sürecektir, bu potansiyel farkı eklem potansiyeli olarak isimlendirilir.

Metal tarafa pozitif olmak üzere yapıya bir V gerilimi uygulandığında, eklem metal yanındaki engel yüksekliği aynı kalırken yarıiletken yanındaki engel yüksekliği azalır (Şekil 3.4.a). Bu durum düz beslem olarak isimlendirilir ve elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım, uygulanan gerilime sıkıca bağlıdır. Metal tarafa negatif olmak üzere yapıya gerilim uygulandığında, yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği artar (Şekil 3.4.b). Bu durumda elektronların yarıiletkenden metale geçmesi zorlaşırken, metalden yarıiletkene olan elektron geçişi, gerilimden bağımsız olduğu için, belirli bir gerilim değerinden sonra doymaya ulaşır. Bu duruma da ters beslem denir.

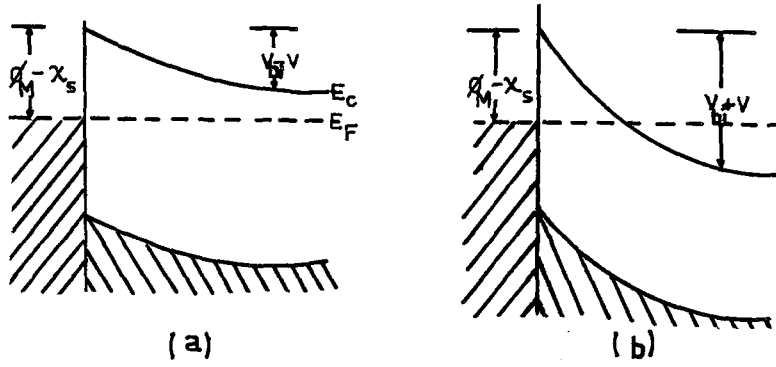
Metal/yarıiletken eklemlerin engel yükseklikleri genel olarak metalin iş fonksiyonu ve yüzey durumlarıyla belirlenir. Engel yüksekliği bağıntısı bulunurken iki varsayım yapılmıştır. Bunlardan birincisi metal ve yarıiletken yüzleri arasındaki aralık atomik boyutlardadır ve enerjileri potansiyel engelinden büyük elektronlar için geçirgendir. İkincisi arayüzeydeki yüzey durumları, yarıiletken yüzeyinin özelliğidir ve metalden bağımsızdır.

Metal/n tipi yarıiletkene ait daha ayrıntılı enerji band diyagramı Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Hesaplama kullanılacak bazı nicelikler şekil üzerinde tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi $q\phi_0$ 'dır ve metal/yarıiletken eklem oluşmadan önce yarıiletken yüzeyinde Fermi düzeyi ile değerlik bandı arasındaki enerji farkını gösterir. Yüzeyde yük nötralliğinin korunması için bu düzeyin altındaki bütün yüzey durumları dolu olmalıdır. İkinci nicelik, $q\phi_{Bn}$ metal yarıiletken eklemının engel yüksekliğidir.

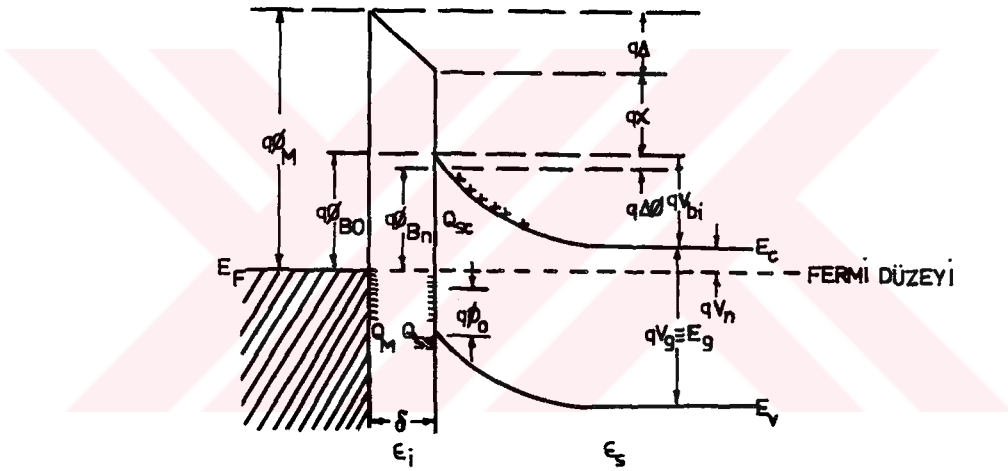
Alıcı yüzey durumları olan bir yarıiletkenin D_s yüzey durum yoğunluğunun, Fermi düzeyi ve $q\phi_0$ arasındaki enerji bölgesinde



Şekil 3.3. a) n tipi yarıiletken metal arasında doğrultucu kontak
 b) n tipi yarıiletken metal arasında omik kontak
 c) p tipi yarıiletken metal arasında omik kontak
 d) p tipi yarıiletken metal arasında doğrultucu kontak



Şekil 3.4. a) Düz beslemde metal/yarıiletken eklem
b) Ters beslemde metal/yarıiletken eklem



Şekil 3.5. Metal/n tipi yarıiletkene ait yüzey durumlarını da kapsayan ayrıntılı band diyagramı

sabit olduğunu kabul edersek yarıiletken üzerindeki yüzey durum yük yoğunluğu Q_{ss} ,

$$Q_{ss} = -qD_s(E_g - \phi_o - \phi_{Bn} - \Delta\phi_n) \quad \text{C/cm}^2 \quad (3.12)$$

bağıntısıyla verilir (Cowley ve Sze 1965). Burada $q\Delta\phi$ Schottky engel alçalmasıdır, parantez içindeki büyüklük basitçe Fermi düzeyi

ve $q\phi_0$ arasındaki farktır. Bu büyüklüğün D_s ile çarpımı ϕ_0 'ın yukarıdaki dolu yüzey durumlarının sayısını verir.

Isısal dengede yarıiletkenin eklem bölgesindeki uzay yükü, Poisson denkleminin yarıiletkenin eklem bölgesinde çözülmesinden elde edilir:

$$Q_{sc} = [2q\epsilon_s N_D (\phi_{Bn} + \Delta\phi_n - \phi_n - \frac{kT}{q})]^{1/2} \text{ C/cm}^2 \quad (3.13)$$

Burada N_D , yarıiletkenin verici yoğunluğudur. Ters (inversion) tabakası olmayan yarıiletkenler için (3.13) bağıntısı geçerlidir.

Yarıiletken yüzeyinde toplam uzay yük yoğunluğu, (3.12) ve (3.13) bağıntılarının toplamıdır. Karşılıklı yüzler arası tabakada herhangi bir uzay yükü etkisinin yokluğunda, metal yüzeyinde yarıiletken yüzeyindeki yüke eşit ve zıt yük oluşur:

$$\begin{aligned} Q_M &= -(Q_{ss} + Q_{sc}) \\ &= qD_s (E_g - \phi_0 - \phi_{Bn} - \Delta\phi_n) - [2q\epsilon_s N_D (\phi_{Bn} + \Delta\phi_n - \phi_n - \frac{kT}{q})]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Eklemde gerilim uygulaması yokken yüzler arası bölgedeki potansiyel düşmesi (Δ), metal ve yarıiletken üzerindeki uzay yüklerine Gauss kanunu uygulanarak

$$\Delta = - \frac{\delta Q_M}{\epsilon_i} \quad (3.15)$$

bulunur. Burada ϵ_i , yüzler arası tabakanın dielektrik sabiti ve δ bu tabakanın kalınlığıdır.

Diğer taraftan Δ , enerji-band diyagramından

$$\Delta = \phi_M - (\chi + \phi_{Bn} + \Delta\phi_n) \quad (3.16)$$

olarak bulunur.

Δ , (3.20) ve (3.21) bağıntılarından yok edilip Q_M 'nin değeri yerine konulursa

$$(Q_M - X) - (\phi_{Bn} + \Delta\phi) = \left[\frac{2q\epsilon_s N_D \delta^2}{\epsilon_i^2} (\phi_{Bn} + \Delta\phi - \phi_n - \frac{kT}{q}) \right]^{1/2} - \frac{qD_s \delta}{\epsilon_i} (E_g - \phi_o - \phi_{Bn} - \phi_n) \quad (3.17)$$

(3.17) bağıntısı elde edilir.

$$C_1 \equiv \frac{2q\epsilon_s N_D \delta^2}{\epsilon_i^2} \quad (3.18)$$

$$C_2 \equiv \frac{\epsilon_i}{(\epsilon_i + q^2 \delta D_s)} \quad (3.19)$$

ifadeleri (3.17) bağıntısında yerine konulup ϕ_{Bn} 'yi çözecek olursak

$$\begin{aligned} \phi_{Bn} = & [C_2 (\phi_M - X) + (1 - C_2) (E_g - \phi_o) - \Delta\phi_n] + \\ & \left\{ \frac{C_2^2 C_1}{2} - C_2^{3/2} [C_1 (\phi_M - X) + \frac{C_1}{C_2} (1 - C_2) (E_g - \phi_o) \right. \\ & \left. - \frac{C_1}{C_2} (\phi_n + \frac{kT}{q}) + \frac{C_2 C_1^2}{4}]^{1/2} \right\} \quad (3.20) \end{aligned}$$

(3.20) bağıntısı elde edilir.

δ ve ϵ_i değerleri için kestirim yapılarak (3.18) bağıntısından C_1 hesaplanabilir. İyi temizlenmiş yarıiletken tabakalarda, δ atomik boyutlarda 4 Å veya 5 Å dir. Öyle ince bir tabakanın dielektrik sabiti serbest uzay değerine yaklaştırılabilir. $\epsilon_s = 10 \epsilon_o$, $\epsilon_i = \epsilon_o$ ve $N_D < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için $C_1 = 0,01 \text{ V}$ mertebesinde ve { } parantezi içersindeki terim 0,04 V'tan daha küçük olur ve ihmal edilerek (3.20) bağıntısı (3.21) haline getirilir:

$$\phi_{Bn} = C_2 (\phi_M - X) + (1 - C_2) (E_g - \phi_o) - \Delta\phi_n \equiv C_2 \phi_M - C_3 \quad (3.21)$$

C_2 ve C_3 deneysel olarak belirlenir ve χ bilinirse o zaman

$$\phi_o = E_g - \frac{(C_2\chi + C_3 + \Delta\phi_n)}{1 - C_2} \quad (3.22)$$

ve (3.19) bağıntısından

$$D_s = \frac{(1 - C_2)\epsilon_i}{C_2\delta q^2} \quad (3.23)$$

olur. δ ve ϵ_i için kabul edilen değerler konulursa

$$D_s = 1.1 \times 10^{13} \frac{(1 - C_2)}{C_2} \text{ durum/cm}^2/\text{eV} \quad (3.24)$$

bulunur.

Denklem (3.21)'den iki limit bulunabilir:

A- $D_s \rightarrow \infty$, $C_2 \rightarrow 0$ olduğu zaman

$$\phi_{Bn} \approx (E_g - \phi_o) - \Delta\phi_n \quad (3.25)$$

Bu durumda Fermi yüzeyi değerlik bandının yukarsında ϕ_o değerinde yüzey durumları tarafından eğilmiştir. Engel yüksekliği metalin iş fonksiyonundan bağımsızdır, yarıiletken yüzeyinin özellikleri ve katkılama ile belirlenir. Buna Bardeen limiti denir (Bardeen 1947).

B- $D_s \rightarrow 0$, $C_2 \rightarrow 1$ olduğu zaman

$$\phi_{Bn} = (\phi_M - \chi) - \Delta\phi_n \quad (3.26)$$

Bu durum yüzey durumları ihmal edilmiş kusursuz Schottky engelinin engel yüksekliğidir (Cowley ve Sze 1965, Wronski ve Carlson 1977).

3.2.1. Schottky yapılarında akım-gerilim ilişkileri

i tipi a-Si:H'un yüksek direnci nedeniyle Schottky diyodlarının engel yüksekliklerini belirtmede en güvenilir yöntem akım-gerilim ölçmeleridir. Kristal yarıiletkenlerden yapılmış Schottky diyodları için akım-gerilim ifadesi.

$$J = J_0 \exp(qV/nkT) [1 - \exp(-qV/kT)] \quad (3.27)$$

dir (Sharma 1984). Burada J_0 ters beslem doyuma akımı, n diyot ideallik faktörü, V uygulanan gerilim, T sıcaklık, q elektron yükü ve k Boltzmann sabitidir. Bu bağıntı genel olarak

$$J = J_0 \exp(qV/nkT) \quad (3.28)$$

şeklinde yazılır ve $V > \frac{3kT}{q}$ için iyi bir yaklaşımdır. İdeallik faktörü, akım akış mekanizmasını anlamayı sağlar. İleri beslem akım akışı termoyonik yayılım (emission) ile sınırlı ise $n=1$ 'dir. Akış difüzyonla sınırlı ise eklem bölgesindeki yeniden birleşmeler $n=1$ 'i değiştirecek $n > 1$ olacaktır. İdeallik faktörünün $n=1$ 'den sapmasını sağlayacak birkaç etki daha vardır, bunlar arayüz tabakaları, yan düzensizlikler (Lateral inhomogenities) ve engelin elektrik alan bağıllığıdır. Bu son özellik görüntü kuvvet alçalmasıdır ve engel yüksekliği uygulanan gerilimle değişecektir. Metal ve yarıiletken arasındaki ince oksit tabakası veya a-Si:H üzerindeki kusurlu yüzey tabakası arayüzeyde yeniden birleşmelere sebep olacaktır, yan düzensizlikler engel yüksekliğinde değişmelere ve bu da ideallik faktöründe sapmalara sebep olur (Sharma 1984). Bu yüzden ideallik faktörü arayüz olaylarının bir göstergesidir. Bazı gruplar a-Si:H Schottky diyodlarının ideallik faktörünün 1'den büyük olduğunu kanıtlamışlardır (Wronski vd 1976, Wronski ve Carlson 1977). Kusursuz (intimate) kontaklarda ise ideallik faktörünün 1.05 den küçük olduğu bulunmuştur (Thompson vd 1981).

a-Si:H'un elektron mobilitesi $\sim 2 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ olduğu için akımın difüzyonla sınırlı olması beklenmektedir. Difüzyonla sınırlı akım mekanizmasında J_0 'ın sıcaklık bağıllığı

$$J_o = qN_c \mu_n E_u \exp(-q\phi_{Bn}/kT) \quad (3.29)$$

şeklindedir. Burada μ_n elektron mobilitesi, E_u maksimum alan ve N_c iletim bandındaki etkili durum yoğunluğudur. Buradan engel yüksekliği, $L_n J_o$ 'ın T^{-1} 'e karşı çizilmesinden elde edilen doğrunun eğiminden bulunur.

3.2.2. Yaşlanma (Ageing)

Schottky diyodlarının engel yükseklikleri, diyot ideallik faktörleri ve akım-gerilim belirtgenlerinde zamanla meydana gelen değişiklikler yaşlanma olarak isimlendirilmektedir. İlk defa Turner ve Rhoderick (1968) kristal silisyumdan yapılmış Au'lu diyodların engel yüksekliğinin zamanla değiştiğini ve bunun silisyum yüzeyinin hazırlanma yöntemine bağlı olduğunu gözlemiştir. Yaşlanmanın arayüz tabakasındaki yavaş değişmeden veya atomik göçten ileri geldiği sanılmaktadır. Arayüz tabakasında meydana gelen değişmeler farklı yöntemler için farklı yapı sergilemektedir. Amorf silisyumdan yapılmış Pd'lu diyodlarda zamanla diyot ideallik faktöründe, doyma akımında azalma ve J-V belirtgenlerinde değişme olduğu Thompson vd (1981) tarafından görülmüş, bu değişikliklere arayüzeyde meydana gelen silikatların sebep olduğu ileri sürülmüştür. Au'lu diyodlarda durum Pd'lu diyodlardan farklıdır. Çünkü Au'lu diyodlarda arayüzeyde Au-Si karışımı ve kristalleşme meydana gelmektedir (Thompson vd 1983).

4. YAPILARIN HAZIRLANMASI

4.1. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al Yapılarının Hazırlanması

4.1.1. Kullanılan malzeme

Filmlerin kaplanmasında alt tabaka olarak, üzerinde iletken ITO (indiyum kalay oksit) ince filmi kaplı Corning 7059 cam tabakaları kullanılmıştır.

a-SiC:H filmi elde etmek için CH₄ (Metan)/SiH₄(Silan) gaz karışımından, a-Si:H filmi elde etmek için ise Si tek kristalinden yararlanılmıştır. Safsızlık maddesi olarak B₂H₆ (diboron) ve PH₃ (fosfin) gazları filmlerin hidrojenlendirilmesinde ise H₂ gazı kullanılmıştır.

4.1.2. Filmlerin hazırlanmasında kullanılan yöntemler

a-Si:H filmlerin fiziksel özellikleri film hazırlama yöntemine bağlıdır. Kaliteli a-Si:H filmlerin hazırlanması için kullanılan yöntemlerden biri alevli boşalma (glow discharge) yöntemidir. a-Si:H filmler, püskürtme (sputtering) ve vakumda buharlaştırma (vacuum evaporation) yöntemi ile de elde edilebilirler. Vakumda buharlaştırma diğerlerine göre kolay olmasına rağmen elde edilen film kalitesi düşüktür. Püskürtme yöntemi, yüksek enerjiye sahip atom veya iyonların hedef maddesinden söktükleri parçacıkların alt tabaka üzerinde toplanması esasına dayanır. Bu yöntem geniş yüzeylerin a-Si kaplanması bakımından en uygun olanıdır. Birçok tipleri olmasına rağmen içlerinde en iyisi radyo frekans (RF) magnetron püskürtme tekniğidir ve kullanılan magnetik alanla kaplama hızı arttırılmış, plazma alt tabakadan uzakta tutulmuş, daha düşük basınçlara inilebilmiştir. Alevli boşalma yöntemi SiH₄ gazının ayrıştırılması esasına dayanır. Bu yöntemle elde edilen filmler çok kalitelidir.

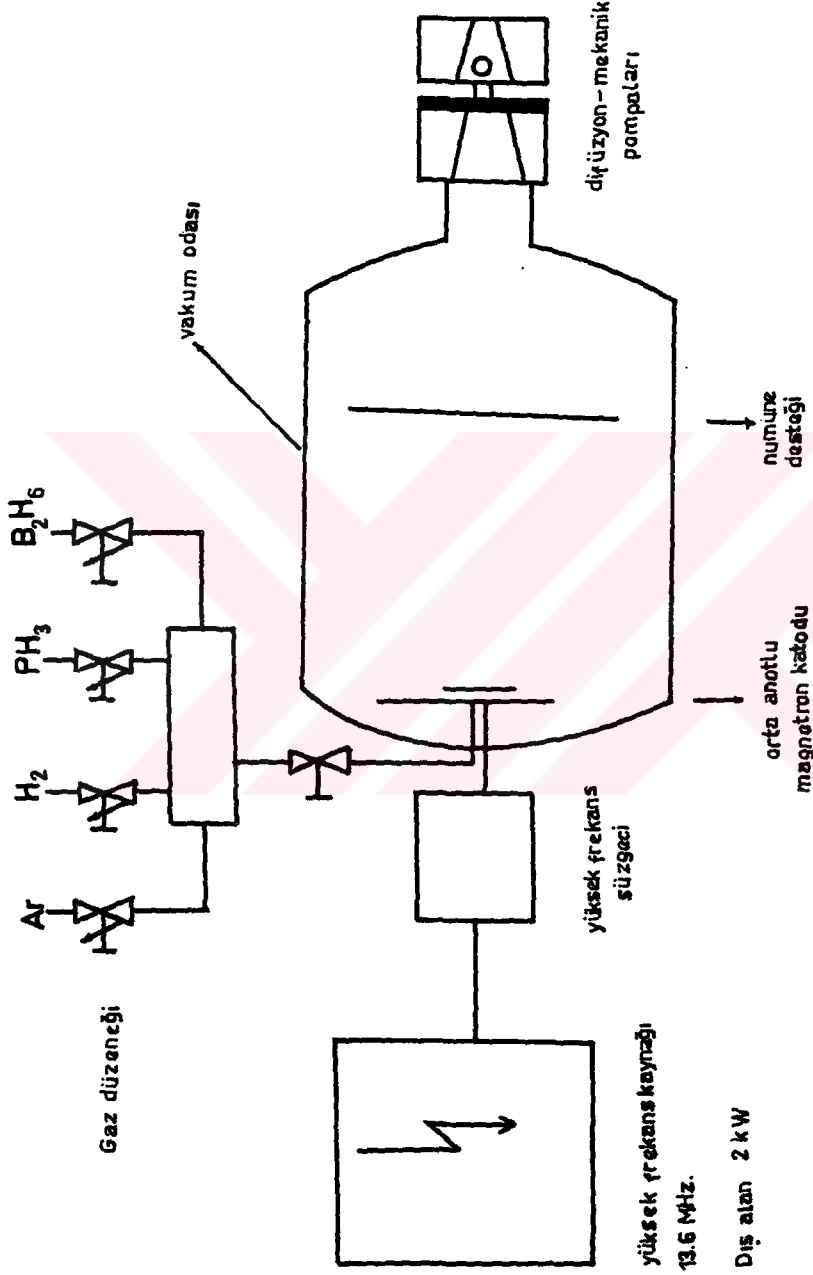
4.1.3. Filmlerin hazırlanması

Püskürtme yönteminde ITO tabakalarında bozulmalar olduğundan bu çalışmada ITO kaplı camlar üzerine p^+ tipi a-SiC:H ince filmi alevli boşalma yöntemiyle kaplanmıştır. Bu tabakanın kaplanmasında Siemens AG araştırma laboratuvarındaki alevli boşalma sisteminden yararlanılmıştır. Kalınlığı 100 \AA olan a-SiC:H(p^+) filmi kaplanması sırasında CH_4/SiH_4 gazı oranları 2/3 yapılmış, alt tabaka sıcaklığı 555 K de tutulmuş ve katkılamak için B_2H_6 gazı kullanılmıştır. Üzeri p^+ tipi a-SiC:H kaplı ITO'lu camlar daha sonra Kaiserslautern Üniversitesi Fizik Bölümündeki RF magnetron püskürtme aygıtında (Şekil 4.1) 7000 \AA kalınlığında a-Si:H(i), arkasından 600 \AA kalınlığında a-Si:H(n^+) ince filmi ile kaplanmıştır. Püskürtme işlemi sırasında H_2 gazının basıncı $P_{\text{H}_2} = 5.4 \times 10^{-4}$ Torr, PH_3 gazının basıncı $P_{\text{PH}_3} = 2 \times 10^{-4}$ Torr, RF gücü 650 Watt, alt tabaka sıcaklığı 550 K yapılmıştır. a-Si:H filmlerin iletkenlikleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'deki gaz basınçları eğrisiyle denetlenmiş ve yaklaşık olarak $\sigma_{\text{a-Si:H(i)}} = 1 \times 10^{-8} (\Omega \text{ cm})^{-1}$ $\sigma_{\text{a-Si:H(n}^+)} > 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$ yapılmıştır. n^+ tipi a-Si:H üzerine Al kontak alınarak ITO/a-SiC:H(p^+)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Al yapıları oluşturulmuştur (Şekil 4.4).

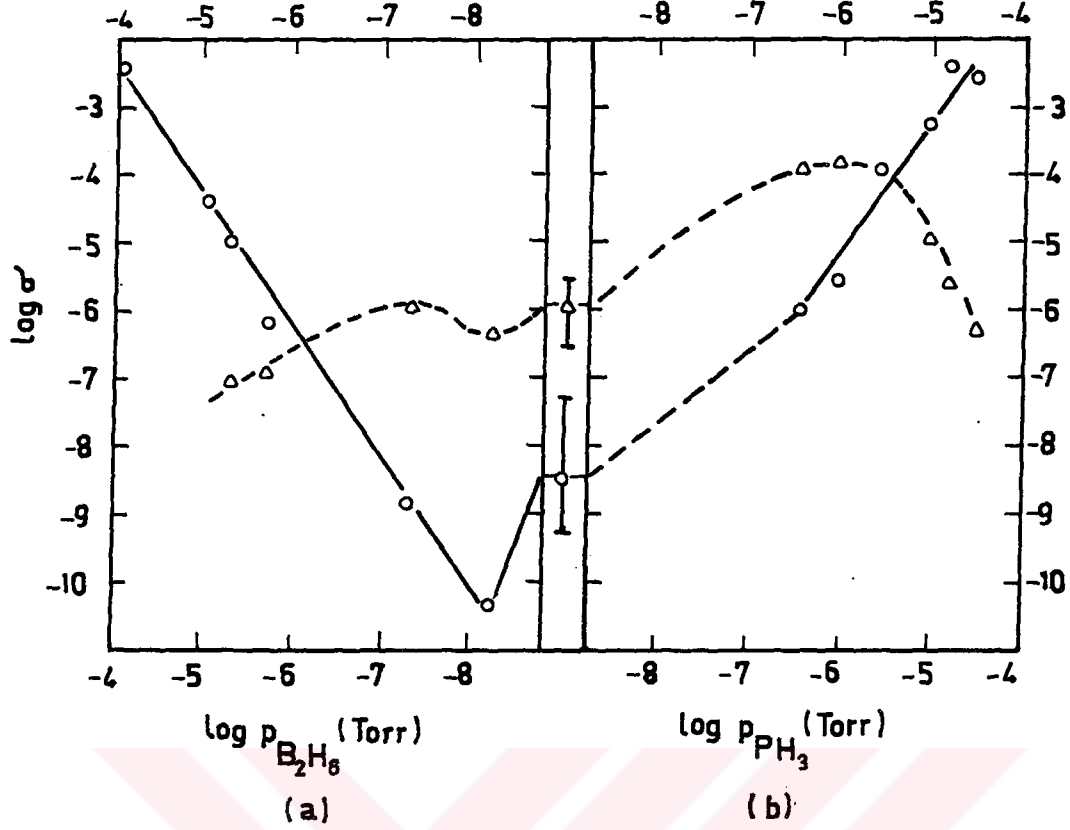
4.2. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr Yapılarının Hazırlanması

4.2.1. Kullanılan malzeme

Schottky diyodlarında gerekli filmlerin hazırlanmasında alt tabaka olarak üzerleri 10^{-5} Torr vakumda Cr kaplanmış 18 mm x 18 mm x 0,1 mm boyutlarında cam tabakalar kullanılmıştır. a-Si:H(i) ve a-Si:H(n^+) tipi filmlerin elde edilmesinde saf Si tek kristalinden yararlanılmıştır. Filmlerin hidrojenleştirilmesinde H_2 gazı, n^+ katkılama için ise PH_3 gazı kullanılmıştır. Metal kontaklar için en az % 99,9 saflıkta Au, Ag ve Cu metalleri kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Amorf silisyum ince filmlerin hazırlanmasında kullanılan RF magnetron püskürme aygıtı

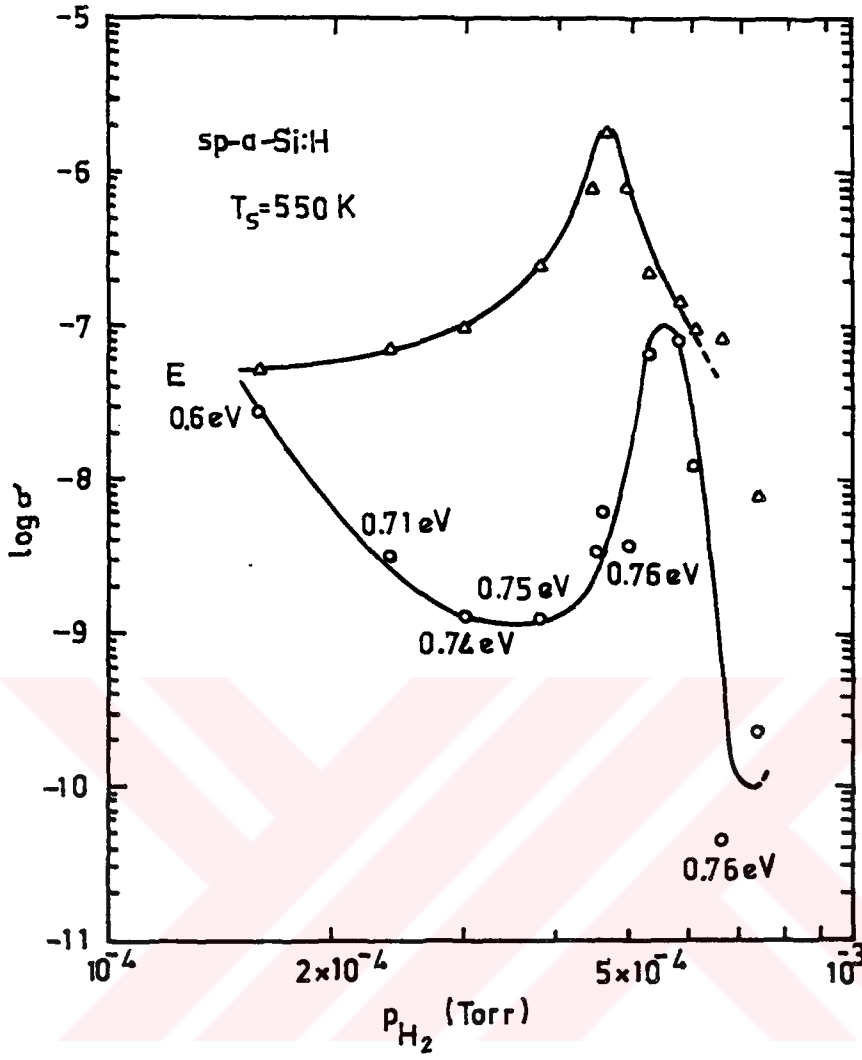


Şekil 4.2. a-Si'un karanlık (o) ve aydınlık (Δ) iletkenliğinin a) B_2H_6 gazının, b) PH_3 gazının basıncıyla değişimi

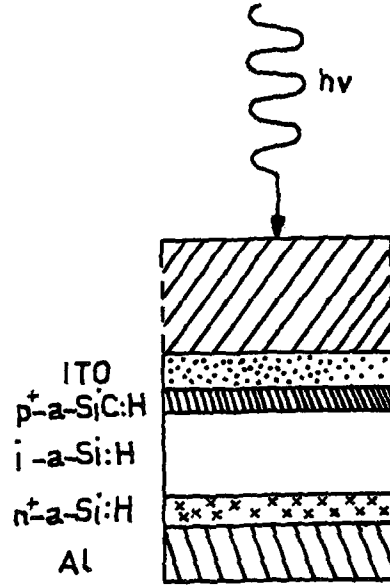
4.2.2. Filmlerin hazırlanması ve kullanılan yöntemler

Cr kaplı cam levhalar Şekil 4.1'de gösterilen RF magnetron püskürtme aygıtına yerleştirilmiş, Cr metali üzerine iletkenliği $\sigma \geq 10^{-2} (\Omega\text{-cm})^{-1}$, kalınlığı 400 \AA olan a-Si:H(n^+); daha sonra da iletkenliği $\sigma \approx 1 \times 10^{-8} (\Omega\text{ cm})^{-1}$, kalınlığı 10000 \AA olan a-Si:H(i) ince filmi kaplanmıştır. İnce filmlerin hazırlanması sırasında H_2 gazının basıncı $P_{H_2} = 5.4 \times 10^{-4}$ Torr, PH_3 gazının basıncı $P_{PH_3} = 2 \times 10^{-4}$ Torr da alt tabaka sıcaklığı 550 K de RF magnetron gücü 650 Watt 'ta tutulmuş, böylece en uygun şartlar sağlanmıştır.

Üzeri ince film kaplanmış cam levhalar yaklaşık $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ boyutlarında kesilerek Şekil 4.5'deki desteğe "araldahite" tutkallı yardımıyla yerleştirildikten sonra a-Si:H(i) üzerine 10^{-5} Torr'luk vakumda Au, Ag ve Cu metalleri buharlaştırılıp Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr, Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr ve Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr yapıları oluşturulmuştur (Şekil 4.6).



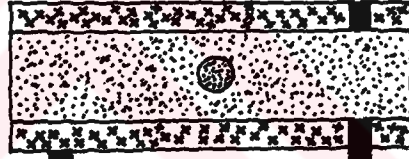
Şekil 4.3. a-Si'un karanlık (○) ve aydınlık (△) iletkenliğinin hidrojen gazının basıncıyla değişimi



Şekil 4.4. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısı



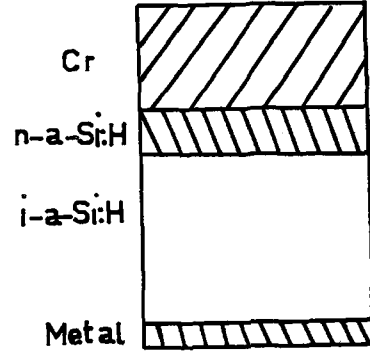
- a -



- b -

- | | | |
|--------|-------------|-------------------|
| a-Si:H | Yapıştırıcı | Bakır Tel |
| Fiber | Metal | a. Yandan görünüş |
| | | b. Üstten görünüş |

Şekil 4.5. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının yerleştirildiği desteğin a) yandan, b) üstten görünümü



Şekil 4.6. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısı

5. DENEYSEL İNCELEME

5.1. Kullanılan Aygıtlar

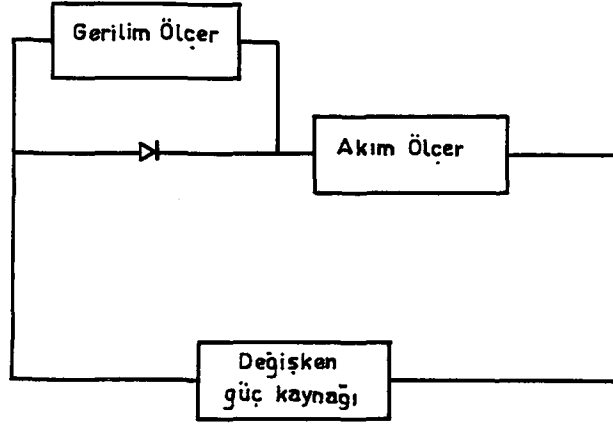
ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapılarının karanlık, aydınlık akım-gerilim ölçüleri, Hewlett Packard'ın 9826 bilgisayarı, Keithley'in 480 pikoampermetresi, Rohde-Schwarz Stewerspannungsquelle programlanabilen güç kaynağı, Hewlett-Packard'ın 7225 B çizicisi, 82905A yazıcısından oluşan bir sistemde alınmıştır. Yapının aydınlatılması quartz halojen ampullü, ayarlanabilir bir projektörle sağlanmıştır. Çeşitli dalgaboylarındaki aydınlatmalar için Spex-minimate'in monokromatörü, çeşitli dalgaboylarındaki aydınlatmalarda ışık şiddetini ayarlamak için ise balometreden yararlanılmıştır.

Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr Schottky diyodlarının akım-gerilim ölçüleri için Keithley'in 179-20 TRMS multimetresi, Keithley'in 480 pikoampermetresi, sıcaklık denetimi için Lehrmittel bau MAEY'in sayısal sıcaklık kontrol aygıtı kullanılmıştır.

5.2. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al Yapısıyla İlgili Ölçmeler

5.2.1. Değişik aydınlanma durumlarında akım-gerilim belirtgenlerinin bulunması

ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının fotogerilim özelliğini belirlemek amacıyla yapının aydınlıkta ve karanlıkta akım-gerilim ölçmeleri yapılmıştır. Ölçümler için Şekil 5.1'deki devre ve bilgisayar programı (Ek) kullanılmıştır. Aydınlıktaki akım-gerilim ölçmeleri quartz halojen ampullü, infrared filitreli ve ışık şiddeti güneş ışığına göre ayarlanmış bir projektör altında yapılmıştır. Karanlıkta alınan ölçülerden düz beslemde akımın gerilimle üstel olarak arttığı, ters beslemde ise 0,3 V'tan küçük gerilimlerde akımın gerilimle çizgisel olarak arttığı görülmüştür. Bunun da p/n tipi heteroyapılar için çıkarılmış olan ve karanlık



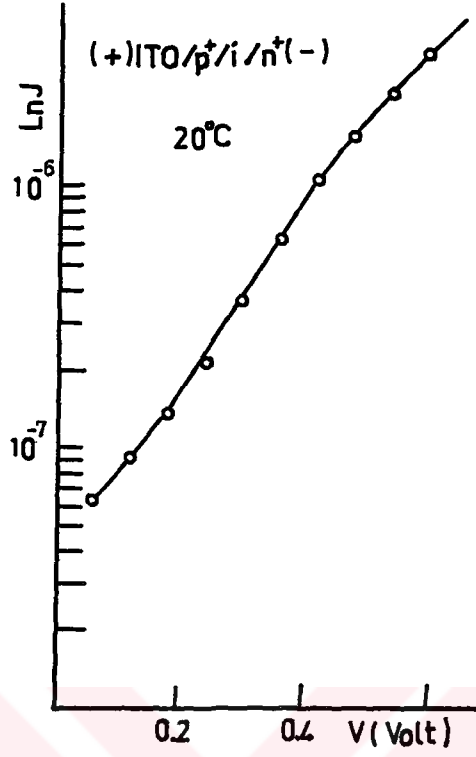
Şekil 5.1. Güneş pili akım-gerilim ölçme devresinin blok gösterimi

akımının gerilimle değişiminin düz beslemde üstel, ters beslemde ise çizgisel olması gerektiğini belirten (3.4) bağıntısını doğruladığı gözlenmiştir (Şekil 5.2). Şekil 5.2.a'da görülen düz beslem ln J-V değişiminin 0,5 V'tan büyük gerilimlerde çizgisellikten ayrılması, güneş pilinin seri direnci yüzündendir, bu davranışın Hack ve Shur'la (1983) uyuşma halinde olduğu saptanmıştır. Şekil 5.2.a'daki doğrunun eğiminden yararlanarak diyot ideallik faktörü $n=3,3$ olarak bulunmuştur. Bu, diyotta yeniden birleşme akımının olduğunun delilidir.

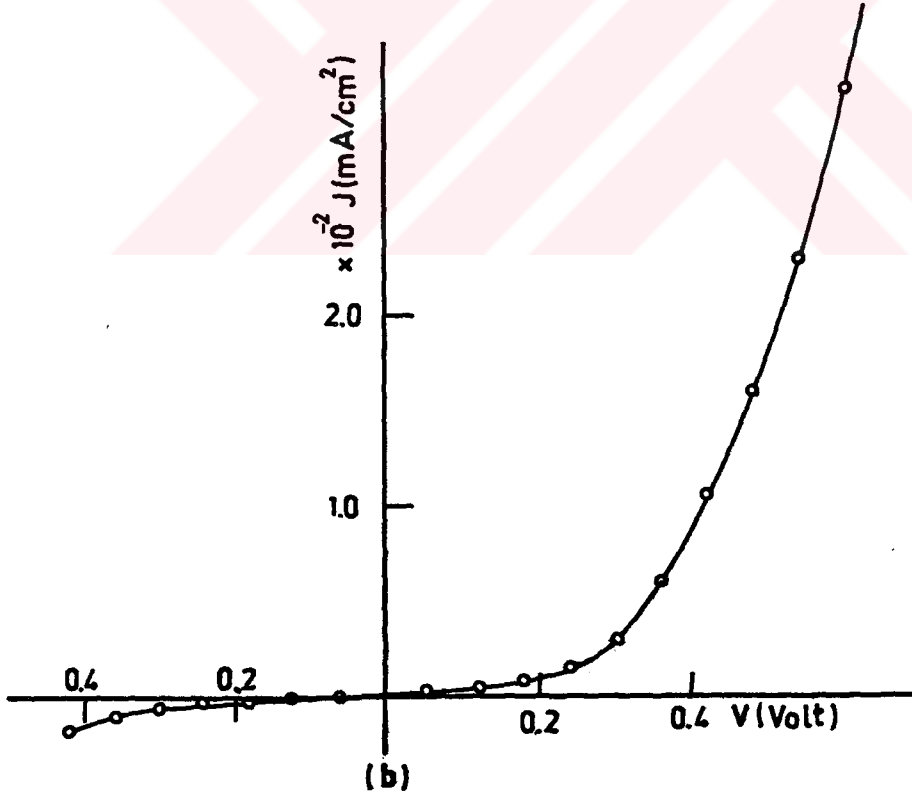
Değeri 18 mWatt/cm^2 olan aydınlatma altında yapılan aydınlık akım-gerilim ölçülerinden yapıda fotoakım oluştuğu ve yapının güneş pili özelliği gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.3). Yapıların aydınlık akım-gerilim belirtgenlerinden, (2.6) ve (2.7) bağıntısı yardımıyla sırasıyla yapının doldurma çarpanının $ff = 0,52$ ve veriminin $\eta = \%4$ olduğu hesaplanmıştır.

5.2.2. Karanlık ve aydınlıkta, sıcaklıkla akım-gerilim değişimi

ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısında yapıda oluşan engel yüksekliğinin (3.5) bağıntısı yardımıyla bulunabilmesi, verimin ve doldurma çarpanının sıcaklıkla değişiminin incelenmesi amacıyla yapının aydınlık ve karanlık akım-gerilim

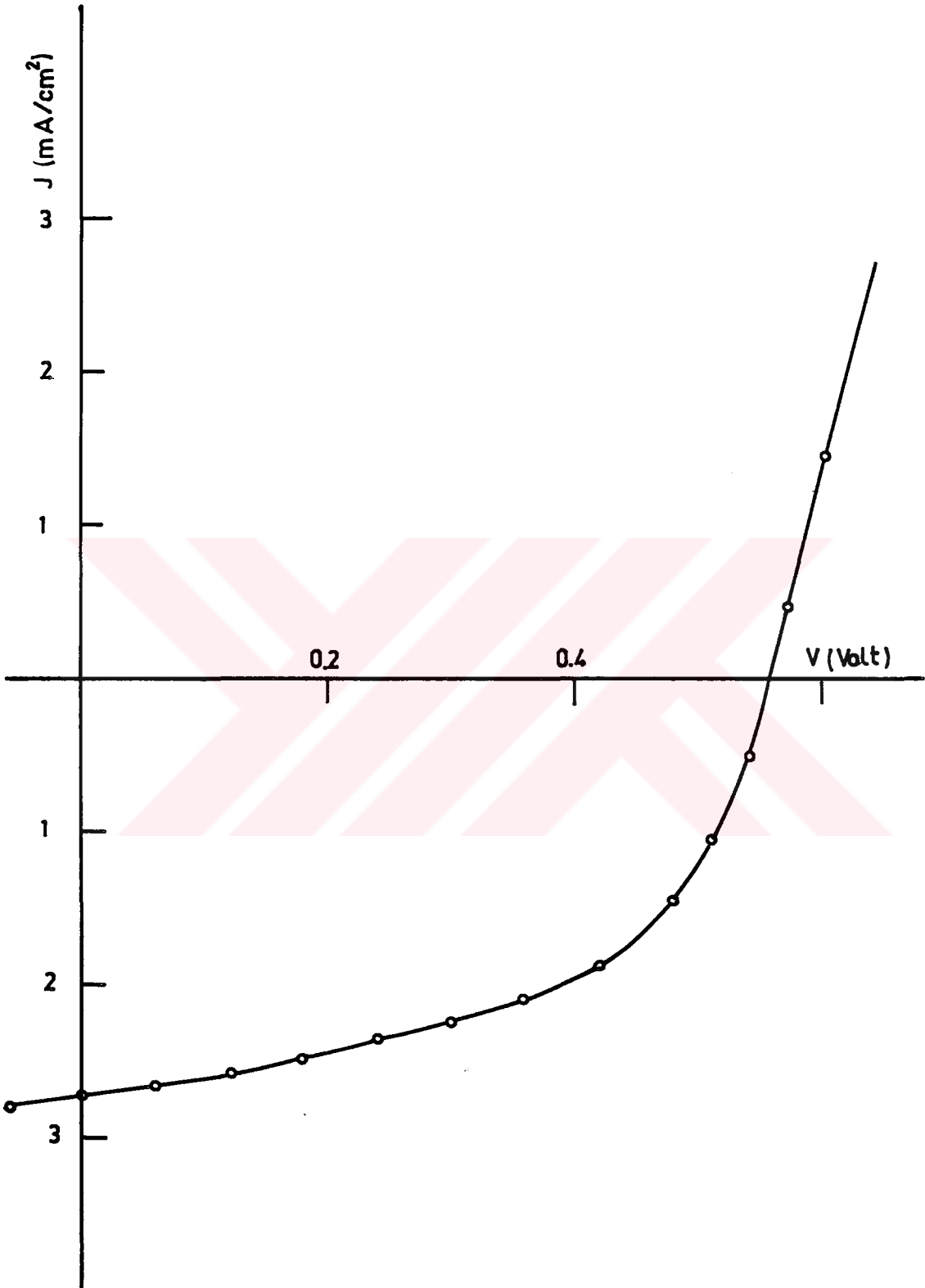


(a)



(b)

Şekil 5.2. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının karanlık akım-gerilim değişimi, a) Düz beslem ln J-V değişimi, b) J-V değişimi

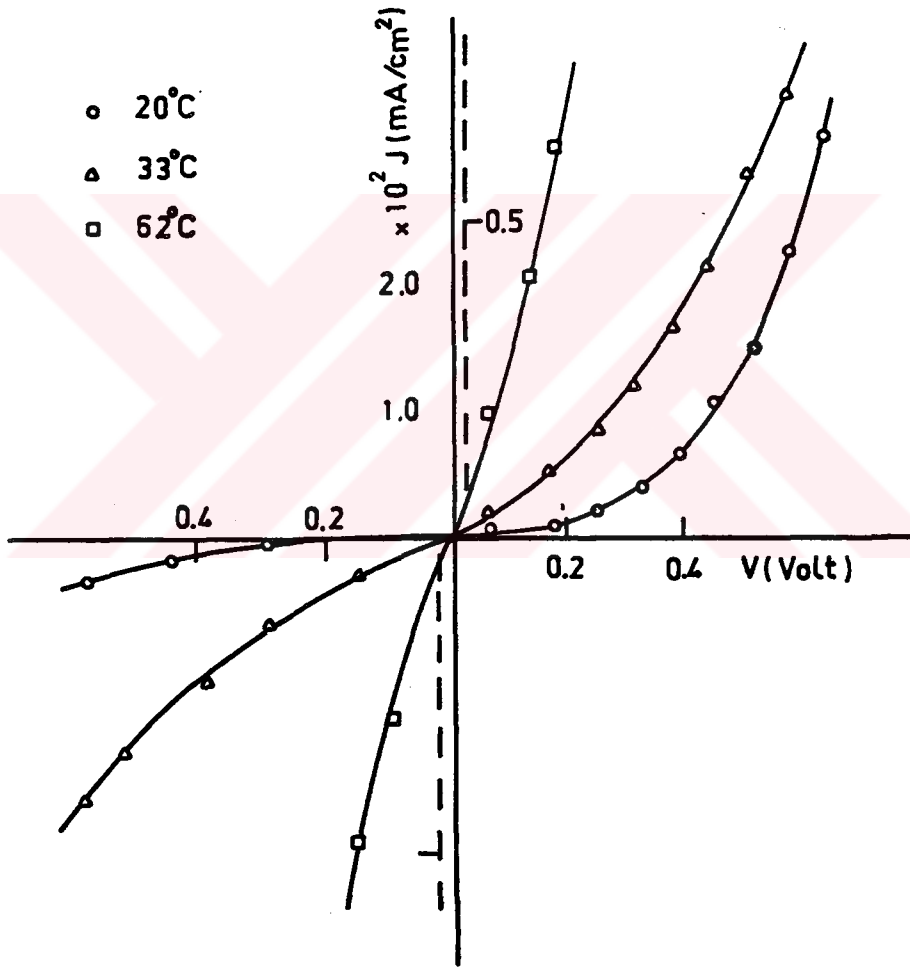


Şekil 5.3. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının aydınlık akım-gerilim eğrisi

ölçmeleri 20°C, 25°C, 33°C, 42°C, 51°C, 62°C sıcaklık değerlerinde yapılmış, daha yüksek sıcaklıklara yapının tavlanaarak özelliklerinin değişmesini önlemek için çıkılmamıştır.

Karanlık akımının düz ve ters beslemede artan sıcaklıkla arttığı görülmüştür (Şekil 5.4).

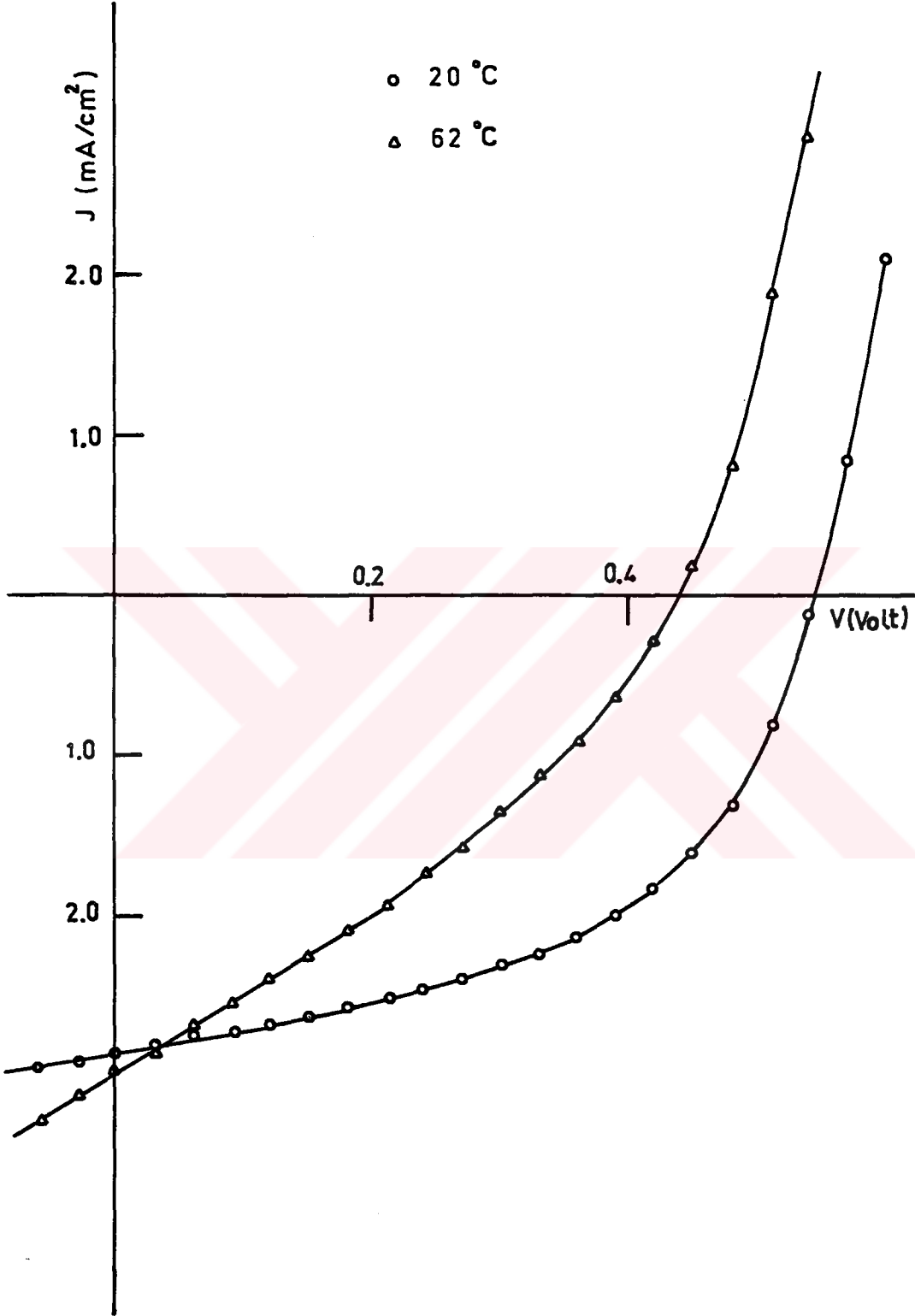
Aydınlıkta akımın gerilimle değişimi aynı sıcaklık değerlerinde 18 mWatt/cm²'lik ışık şiddeti altında yapılmıştır (Şekil 5.5). Elde edilen verilerden yapının açık devre geriliminin sıcaklıkla azaldığı, kısa devre akımının ise sıcaklıkla küçük ölçüde



(-) ITO/p⁺/i/n⁺(+)

(+) ITO/p⁺/i/n⁺(-)

Şekil 5.4. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının çeşitli sıcaklıklarda J-V değişimi



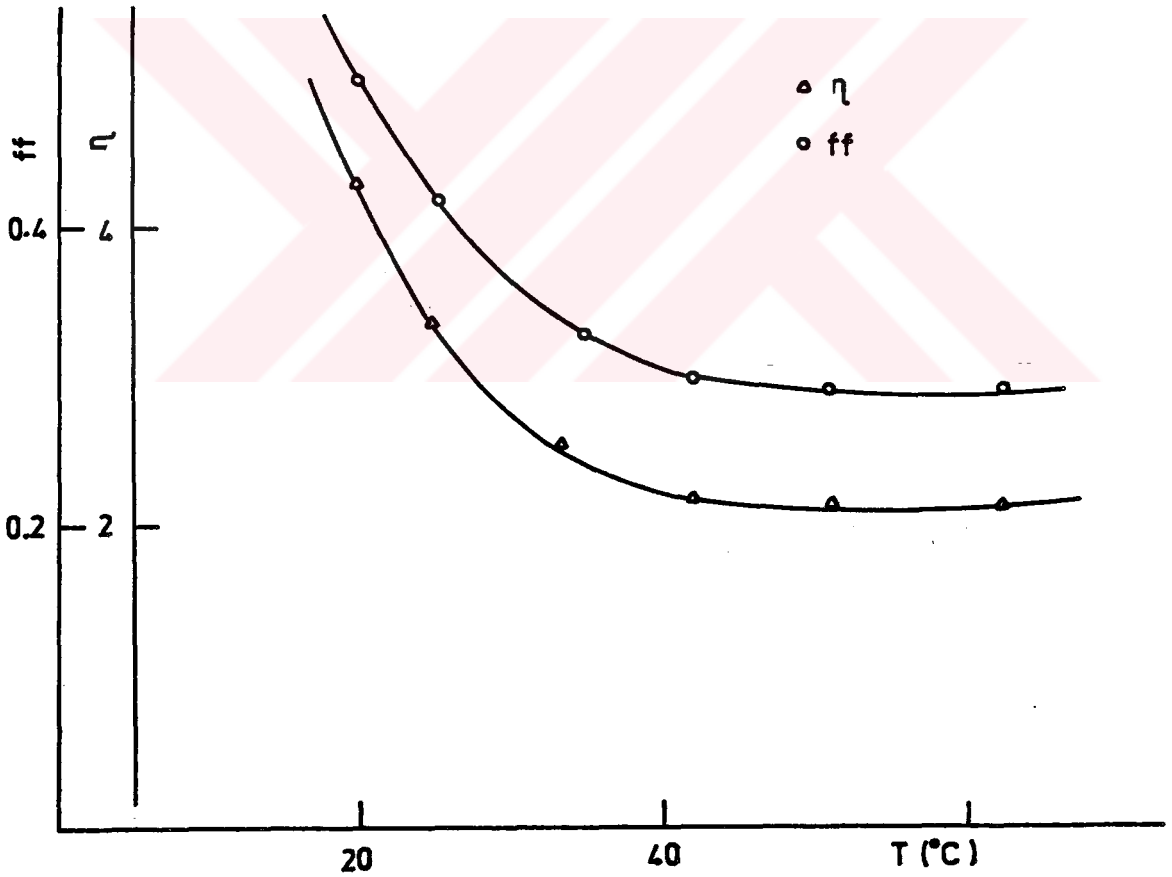
Şekil 5.5. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının değişik sıcaklıktaki aydınlık akım-gerilim eğrisi

arttığı görülmüştür. Bu arada 18 mWatt/cm^2 ışık şiddetinde, sıcaklığa bağlı olarak ölçülen değerlerden hesaplanan ff ve η' 'ın ise sıcaklıkla azaldığı görülmüştür (Şekil 5.6).

5.2.2.1. Engel yüksekliğinin bulunması

Kesim 5.2.1'de J_0 akımı ile sıcaklık arasındaki ilişki (3.5) bağıntısıyla verilmiştir. Bu bağıntının her iki tarafı T 'ye bölünüp logaritması alınacak olursa (5.1) bağıntısı elde edilir.

$$\ln \frac{J_0}{T} = -\frac{q}{kT} (V_{b1} + V_{b2}) + \ln \frac{qA}{k} (V_{b1} + V_{b2}) \quad (5.1)$$



Şekil 5.6. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısında ff ve η' 'ın sıcaklıkla değişimi

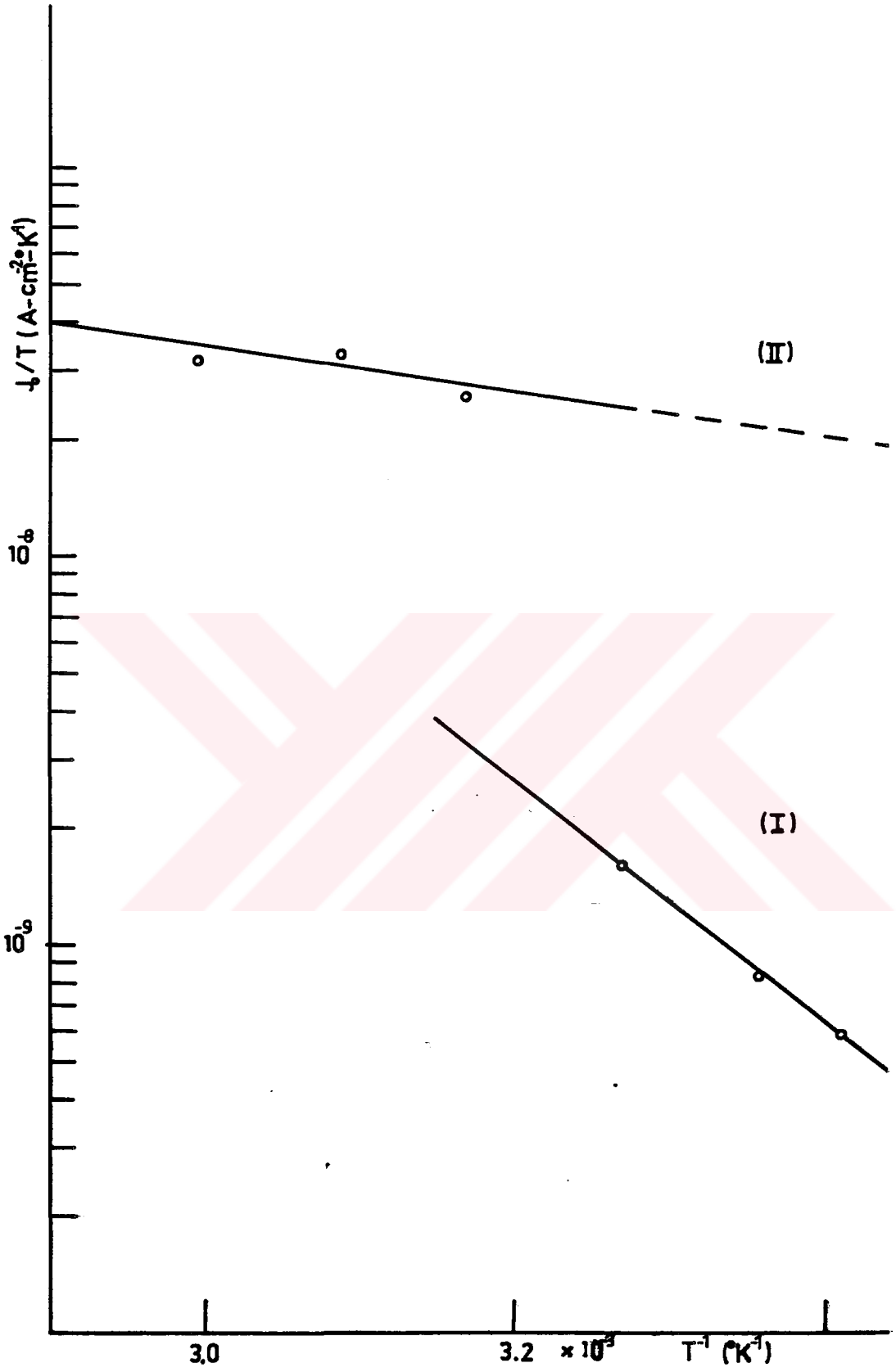
Bu bağıntı $\ln \frac{J_0}{T}$ ile T^{-1} arasındaki ilişkinin çizgisel olduğunu ve $\ln \frac{J_0}{T}$ 'nin T^{-1} 'e karşı çizilmesi ile yapının engel yüksekliğinin bulunabileceğini belirtmektedir. Bu yüzden her sıcaklık değeri için elde edilen eğrilerin ters beslemde akım eksenini kestiği noktalardan bulunan J_0 değerlerinden yararlanılarak çizilen $\ln \frac{J_0}{T}$ 'nin T^{-1} 'e karşı değişiminin yukardaki ilişkiyi doğrulayacak şekilde bir doğru çizgi vermesi gerekir. Ancak deneysel olarak $\ln \frac{J_0}{T}$ 'nin T^{-1} 'e karşı çizilmesinden iki farklı eğimli doğru çizgiler ve dolayısıyla I numaralı doğrunun eğiminden $V_{bi} = 0,526$ eV, II numaralı doğrunun eğiminden $V_{bi} = 0,094$ eV olmak üzere iki farklı engel yüksekliği bulunmuştur (Şekil 5.7). İki farklı engel yüksekliği bulunması, Fermi düzeyinin sıcaklıkla yukarı doğru kaydığının ve bunun sonucunda engel yüksekliğinin değiştiğinin bir göstergesidir.

5.2.2.2. Enerji aralığının bulunması

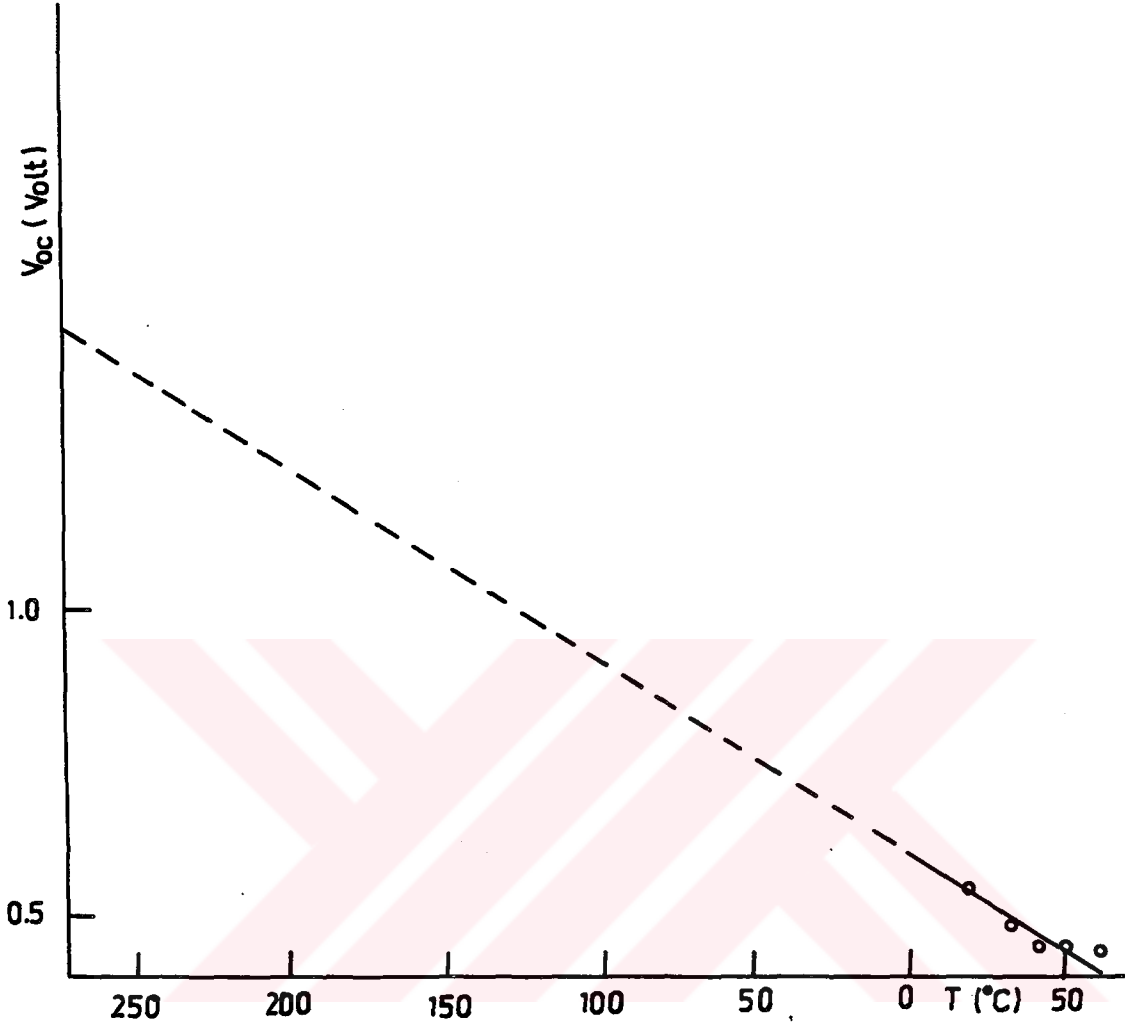
p/i/n yapılarda açık devre gerilimi ile sıcaklık arasındaki ilişkinin

$$V_{oc} = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left[BT^3 \left(\frac{D}{\tau} \right)^{1/2} / J_{sc} \right] \quad (5.2)$$

şeklinde olması gerekir (Fahrenburch ve Bube 1983). Buna göre tarafımızdan yapılan p/i/n yapıların açık devre gerilimlerinin sıcaklığa bağımlılığını incelemek üzere yapılan ölçüm sonuçlarının (5.3)'teki doğrusal ilişkiyi sağlaması gerekir. Bu yüzden V_{oc} 'yi T'ye bağlayan ölçümler arasındaki ilişkiyi vermesi gereken en uygun doğru çizgi, en küçük kareler yöntemi ile bulunmuştur (Şekil 5.8). Doğrunun $T=0$ 'a ekstrapolasyonundan, yapıda enerji aralığı küçük olan yarıiletken için $E_g = 1,45$ eV olarak elde edilmiştir ve bu değer Konagai vd'nin (1980) k_i ile uyumludur. Buna göre V_{oc} ile T arasındaki ilişkinin gerçekten Fahrenburch ve Bube'nin (1983) verdiği ilişkiye uyduğu doğrulanmıştır.



Şekil 5.7. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısında $\ln(J_0/T)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı değişimi



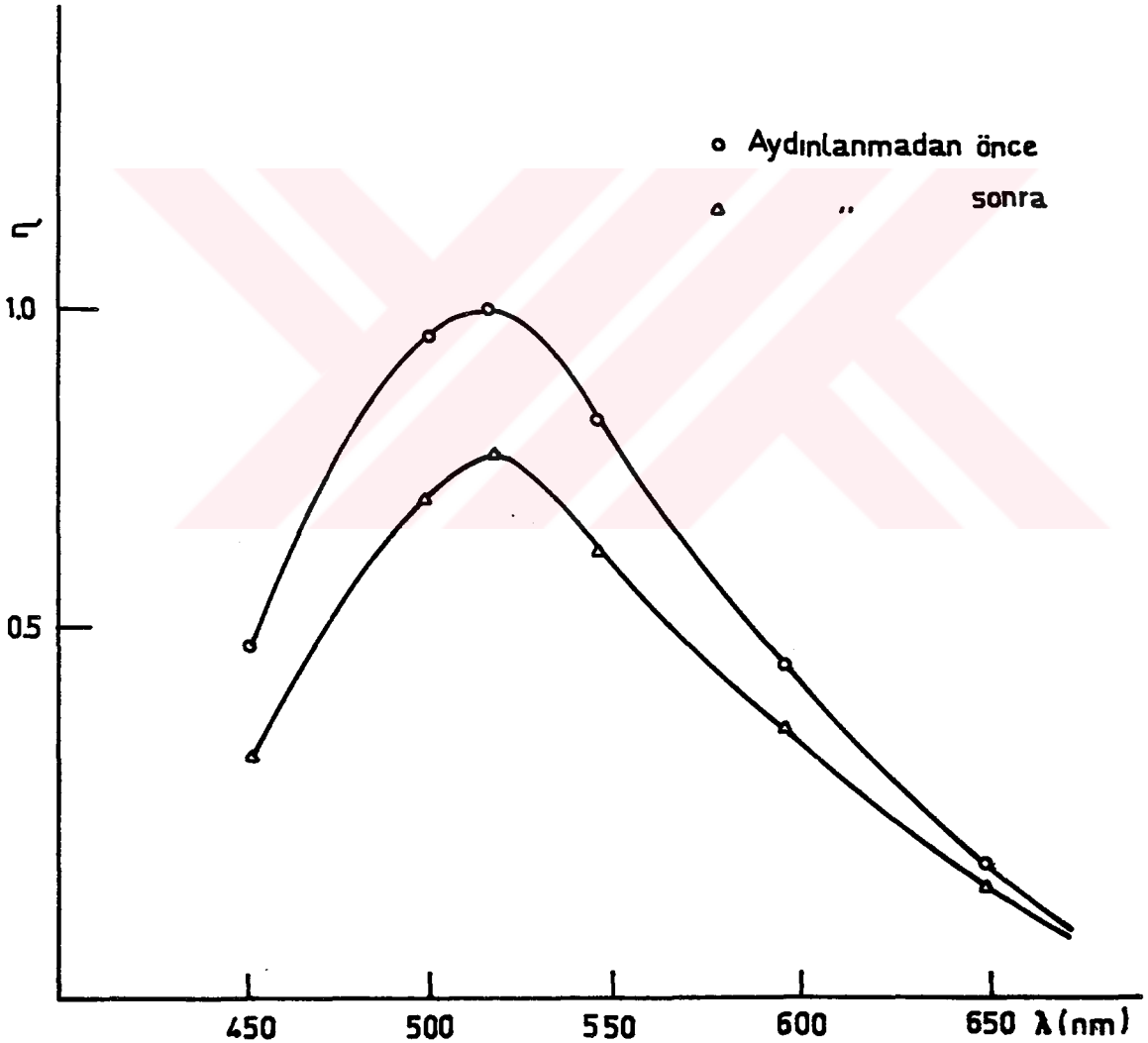
Şekil 5.8. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısında değişik sıcaklıklarda V_{oc}'nin T'ye göre değişimi

5.2.3. Kısa devre akımının ve verimin ışığın dalgaboyuna bağlılığının incelenmesi

ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısı sabit ışık şiddetinde değişik dalgaboylarında (değişik enerjili) ışıkla aydınlatılarak I_{sc}'nin dalgaboyuna bağlılığı incelenmiştir. I_{sc}'nin artan dalgaboyuyla artarak $\lambda = 525 \text{ nm}$ 'de ($E_{\lambda} = 2,3 \text{ eV}$) bir maksimumdan geçtikten sonra azaldığı görülmektedir (Şekil 5.9).

Aynı numunenin sabit ışık şiddetinde değişik dalgalıboylarında alınan akım-gerilim ölçülerinden verimin dalgalıboyuına göre değişimi de incelenmiş ve kısa devre akımının değişimine benzer bir değişim görölmüştür (şekil 5.10).

Bu deneysel sonuç, kesim 2.1'de değinilen $h\nu > E_{g2}$ enerjili fotonların yüksek kinetik enerjili taşıyıcılar oluşturarak, $h\nu < E_{g2}$ enerjili fotonların ise elektron-deşik çifti oluşturmadan numaneyi terketmeleri nedeniyle kısa devre akımında ve verimde kayıplara sebep oldukları gerçeğini doğrular niteliktedir. Enerji band aralığı a-SiC:H yaklaşık 2,3 eV olduğu için bu bölgede maksimum kısa devre akımı ve maksimum verim elde edilmiştir.



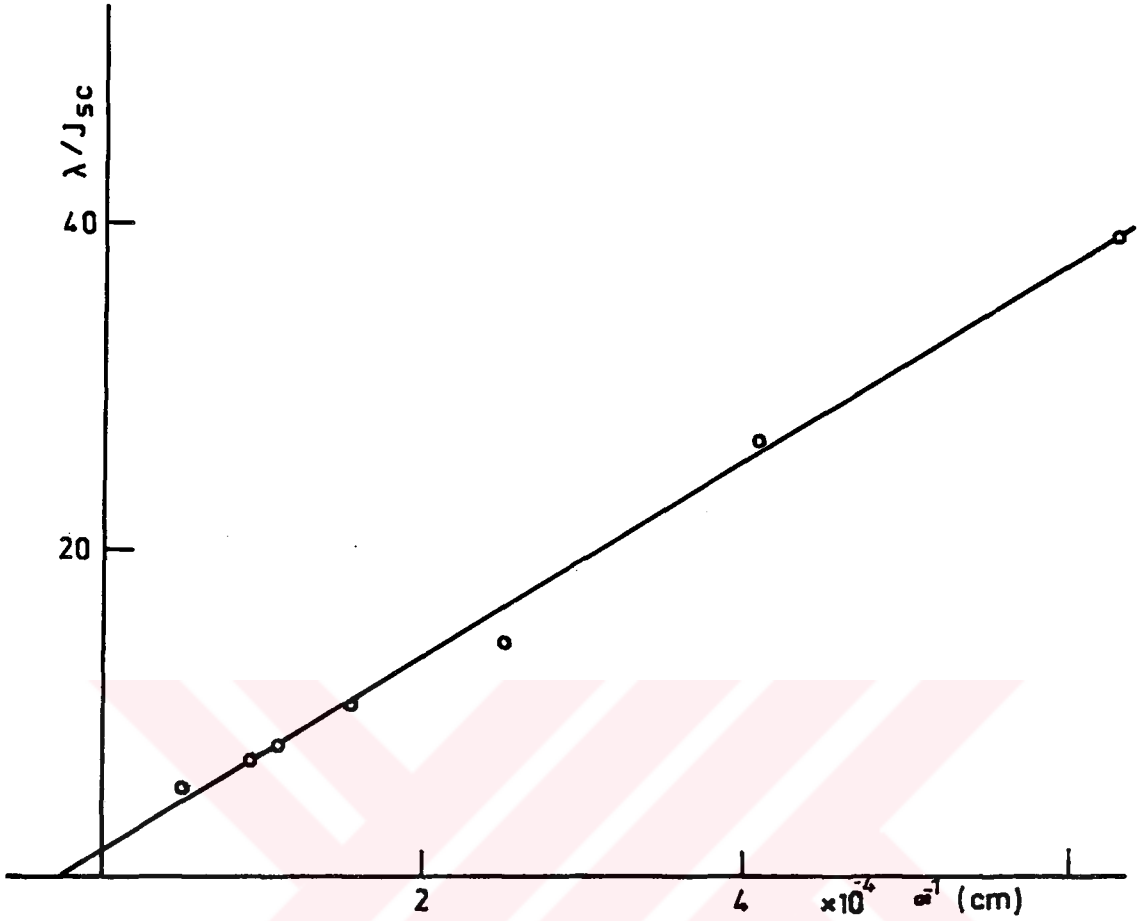
şekil 5.10. ITO/a-SiC:H(p^+)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Al yapısında η (verim)'in dalga boyuna göre değişimi

Dalgaboyuna göre incelenen numune 100 mWatt/cm^2 ışık şiddeti altında yirmi beş saat tutulduktan sonra yukardaki ölçümler yenilenmiştir. Kısadevre akımının dalgaboyuna göre değişiminde dikkate değer bir değişme olmamasına karşın (Şekil 5.9), uzun süreli aydınlanmanın verimde mavi dalgaboyu bölgesinde azalma meydana getirdiği, kırmızı dalga boyu bölgesinde değişimin maviye göre önemsiz olduğu görülmüştür (Şekil 5.10).

Kesim 3'de (3.11) bağıntısı uzun dalga boyu bölgesinde $\frac{\lambda}{J_{sc}}$ ile α^{-1} arasındaki ilişkinin çizgisel olduğunu belirtmektedir. Buna göre sabit ışık şiddetinde değişik dalgaboylarında kısadevre akımının değişiminin incelendiği deneysel verilerden yararlanarak hesaplanan $\frac{\lambda}{J_{sc}}$ 'nin α^{-1} 'e karşı değişiminin çizgisel ilişkiyi vermesi gerekir. Bu yüzden en uygun doğru en küçük kareler yöntemi ile bulunmuştur. Bu doğrunun α^{-1} eksenini kestiği noktadan $L_p = 0,28 \mu\text{m}$ değeri elde edilmiştir (Şekil 5.11). Bu da literatürde farklı yapılar için verilen değerlerle aynı büyüklük basamağındadır (Dresner vd 1981, Konagai vd 1980).

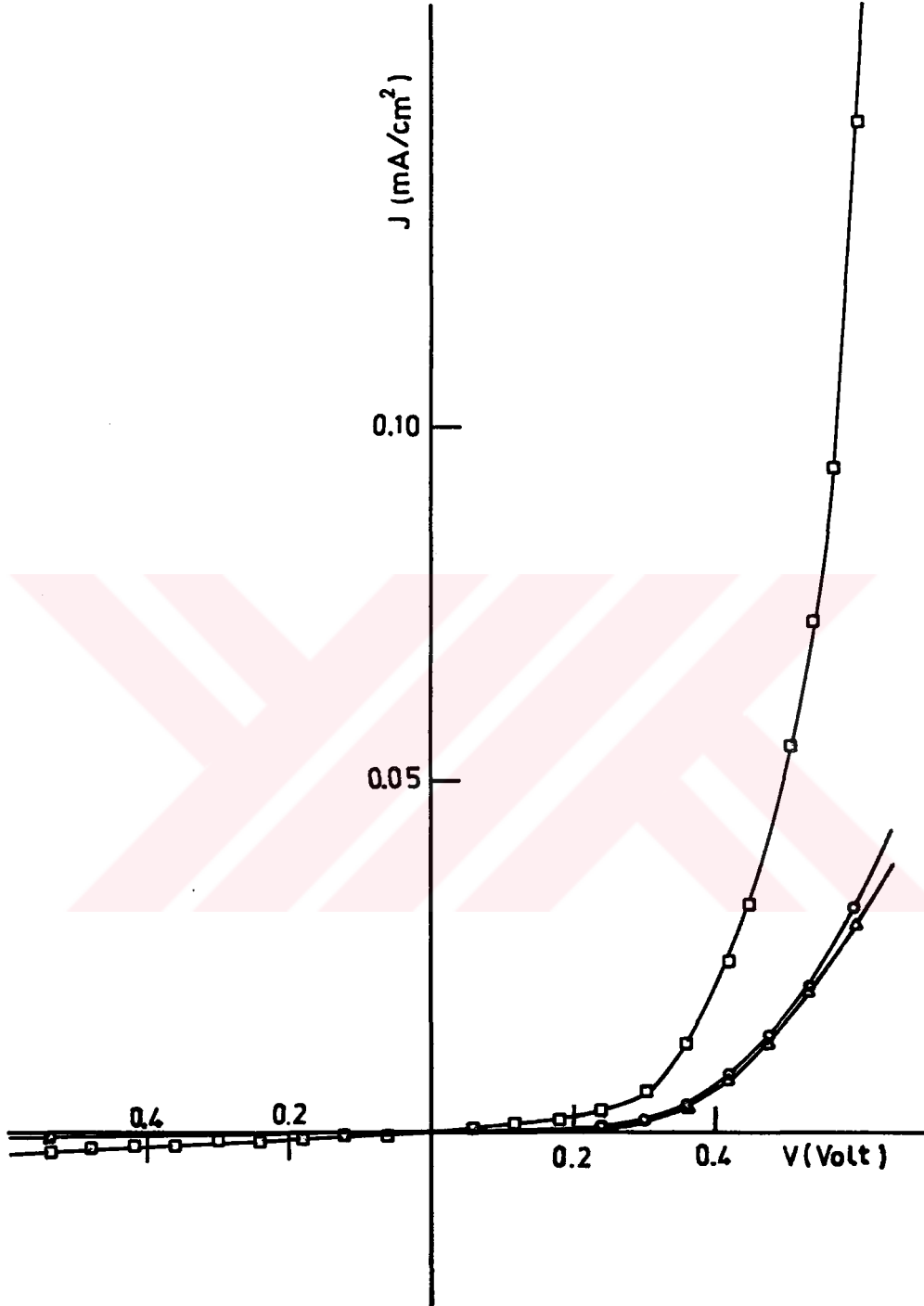
5.2.4. Uzun süreli aydınlanma ve zamanla değişimin incelenmesi

Aydınlanmanın yapının kararlılığı üzerindeki etkisini incelemek için ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısı Ostram'ın 300 Watt'lık ultraviyole lambası ile yaklaşık 100 mWatt/cm^2 'lik ışık şiddetinde 25 saat süreyle metal yanından aydınlatılmış bu aydınlatmadan önce ve sonra yapıların karanlık, aydınlık akım-gerilim ölçmeleri yapılmıştır. Karanlık akım-gerilim ölçmelerinden 0,6 V ta doğrultma oranının $r = 274$ 'ten $r = 183$ 'e düştüğü ve diyot ideallik faktörünün $n = 3,5$ 'den $n = 3,7$ 'ye değiştiği bulunmuştur (Şekil 5.12), aydınlık akım-gerilim ölçmelerinden J_{sc} 'nin $2,70 \text{ mA/cm}^2$ 'den $2,48 \text{ mA/cm}^2$ 'ye V_{oc} 'nin 560 mV 'tan 555 mV 'a, ff 'nin $0,520$ 'den $0,517$ 'ye ve verimin $\% 4,4$ 'den $\% 3,9$ 'a azaldığı görülmüştür (Şekil 5.13). Farklı sistemlerde yapılmış, farklı tip yapılarda Kennedy ve Haneman (1983), Tsuda vd (1983), Nakamura vd (1983), Mishima vd (1985) tarafından gözlenen ışıkla olan bozulmalar, bu yapıda da gözlenmiştir.

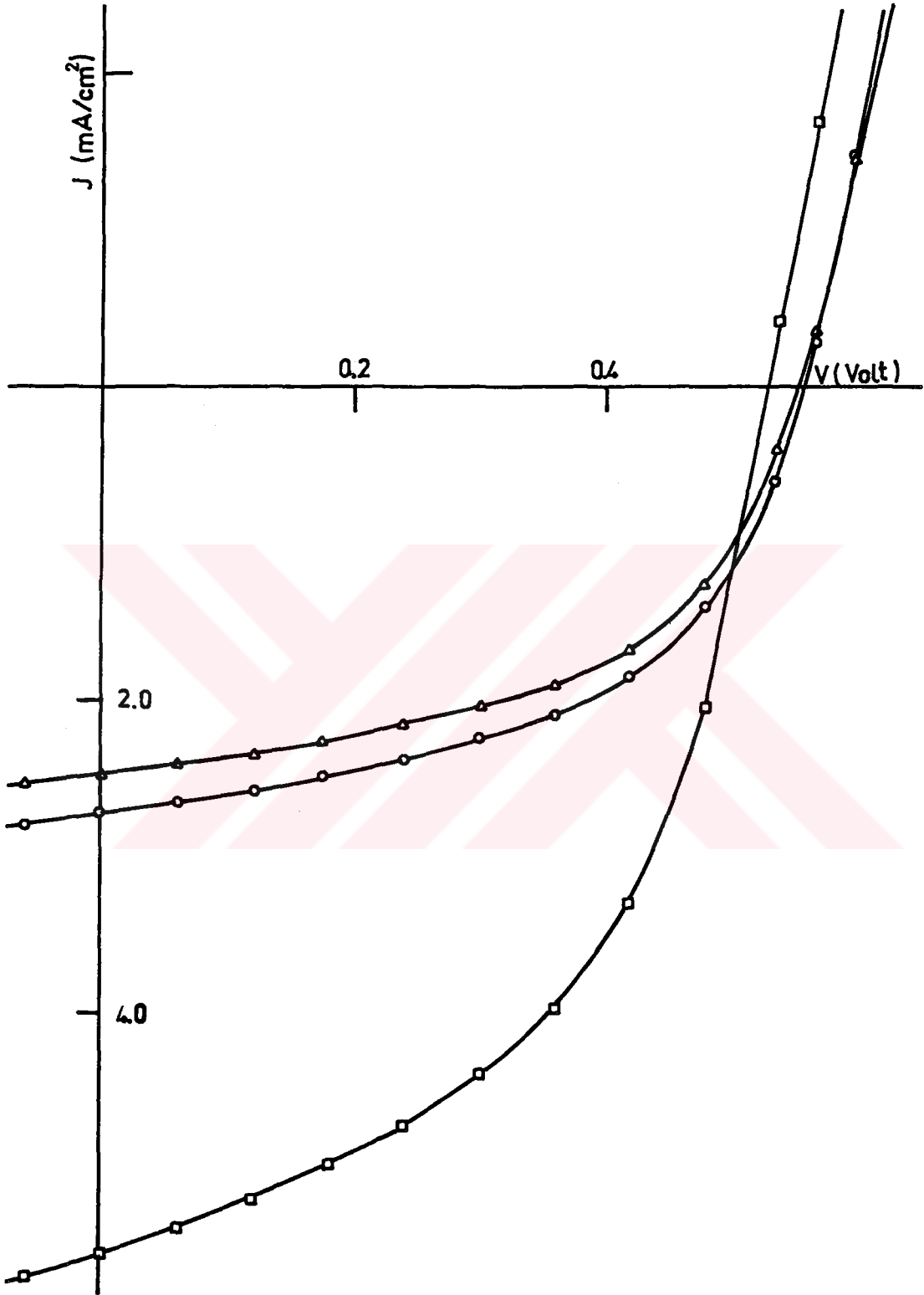


Şekil 5.11. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısında $\frac{\lambda}{J_{sc}}$ 'nin α^{-1} e göre değişimi

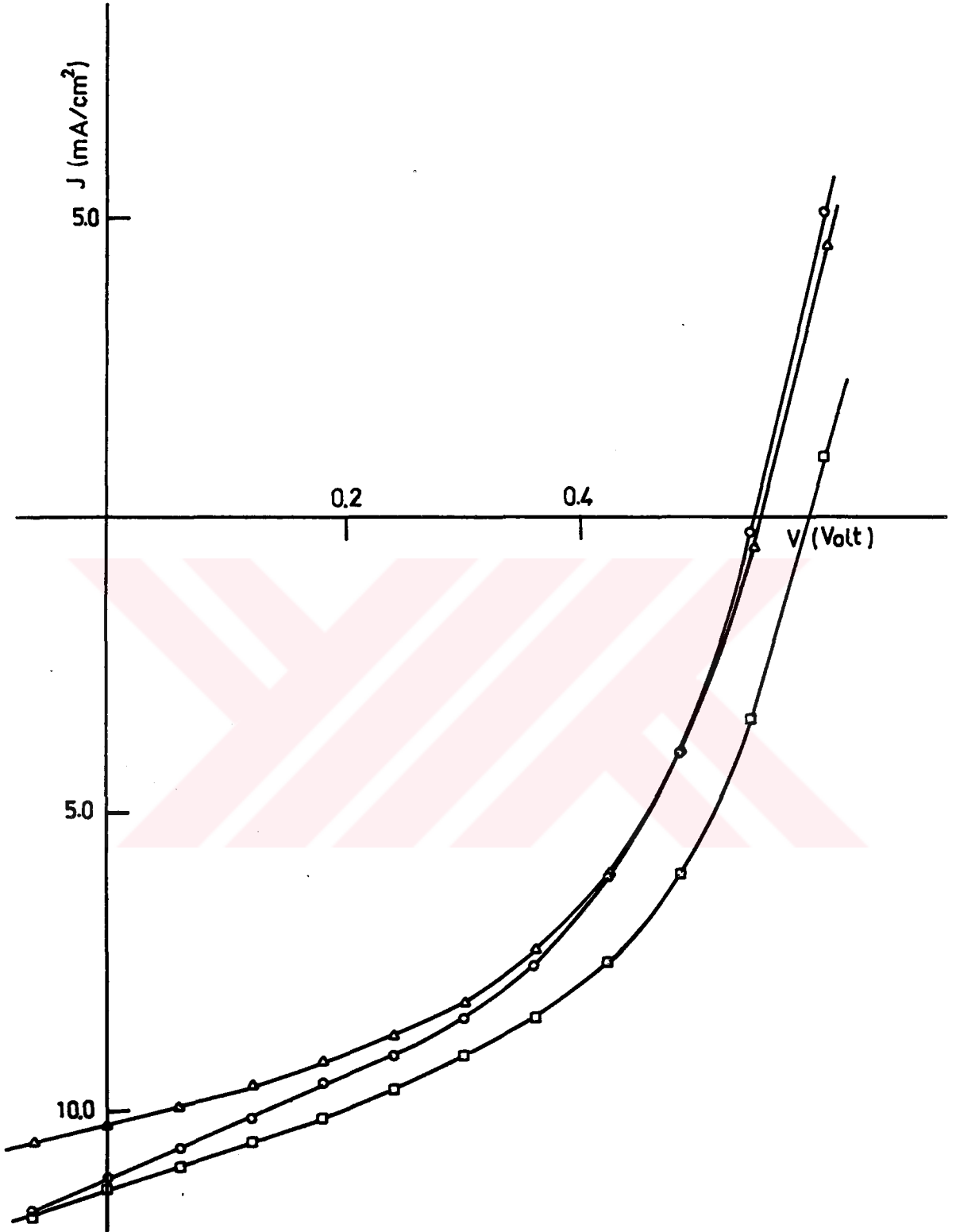
Zamanın ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapılarına etkisi araştırılmış J_{sc} 'nin azaldığı, ff'nin 0,44'ten 0,47'ye arttığı, V_{oc} 'de ve verimde önemli bir değişme olmadığı gözlenmiştir (Şekil 5.14). Yapının karanlık akımında ters beslemde artma olduğu, düz beslemde ise önemli bir değişimin olmadığı, 0,6 V'ta doğrultma oranının $r = 48$ 'den $r = 15$ 'e azaldığı ve diyot ideallik faktörünün $n = 3,6$ 'dan $n = 3,8$ 'e arttığı belirlenmiştir (Şekil 5.15). Verimi $\eta \approx 4\%$ olan bu tür yapıda aydınlanmayla meydana gelen değişikliklerin, pilin veriminde zamanla meydana gelen değişikliklerden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



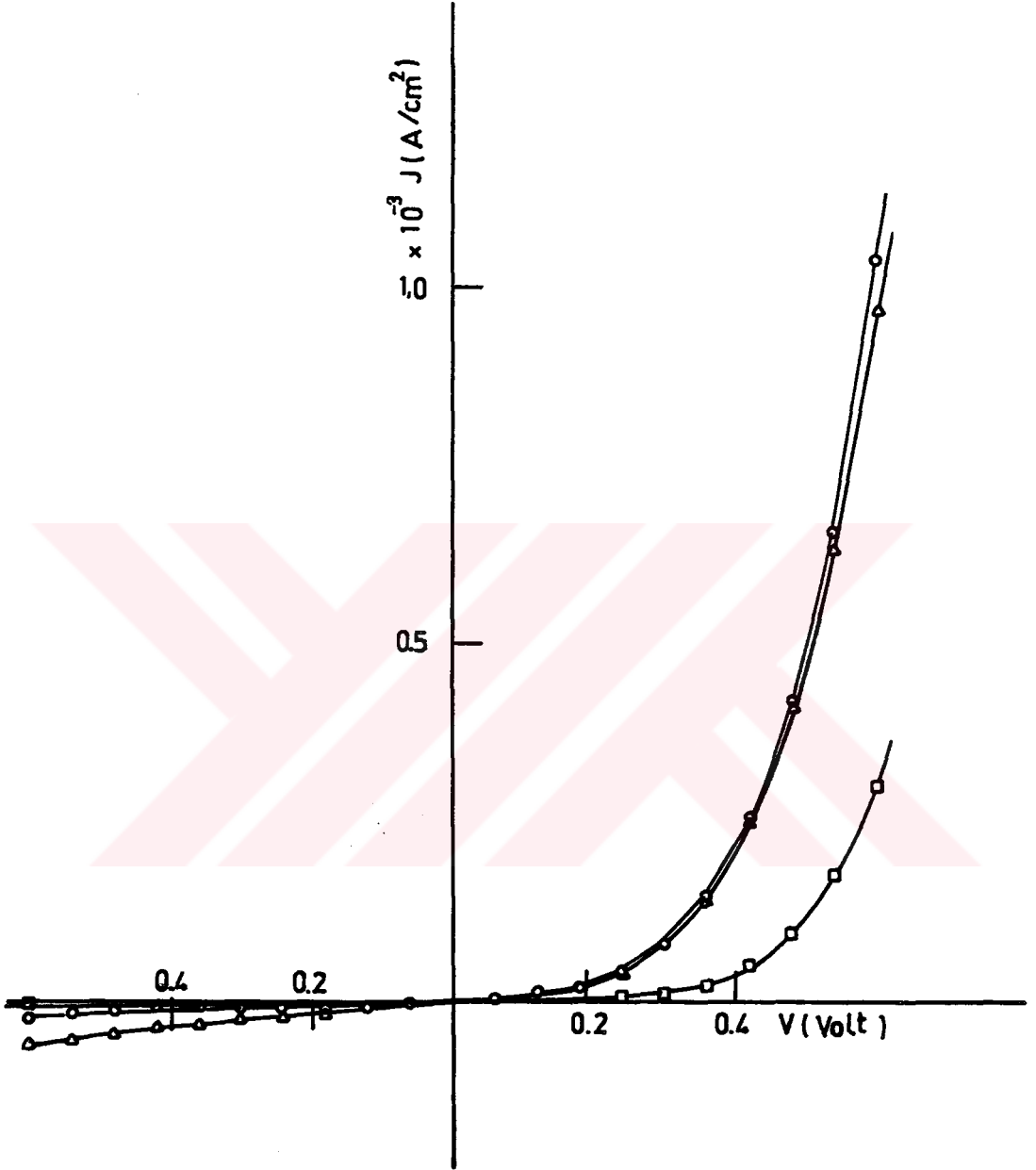
Şekil 5.12. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının aydınlanmadan önce (○), aydınlatılmadan sonra (△), tavlamadan sonra (□), karanlık akım-gerilim eğrileri



Şekil 5.13. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının aydınlanmadan önce (o), aydınlanmadan sonra (Δ), tavlama sonrası (□) aydınlık akım-gerilim eğrileri



Şekil 5.14. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının yapıldıktan hemen sonra (o), yapıldıktan 75 saat sonra (◦) ve 200°C de 1 saat tavlama yapıldıktan sonra (Δ) aydınlık akım-gerilim eğrileri



Şekil 5.15. ITO/a-SiC:H(p^+)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Al yapısının yapıldıktan hemen sonra (○), yapıldıktan 75 saat sonra (△) ve 200°C de 1 saat tavlama yapıldıktan sonra (□) karanlık akım-gerilim eğrileri

5.2.5. Tavlama sıcaklığının akım-gerilim belirtgenlerine etkisi

Yapının aydınlanma ve zamanla bozulan belirtgenlerini yeniden kazanmak amacıyla iki tür tavlama yapılmıştır. Bunlardan biri, uzun süreli aydınlatılan numunelere uygulanmış ve numune ters beslemede 2 V'ta tutularak 130°C'de bir saat tavlansmıştır. Tavlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığına ulaşınca kadar beklenip karanlık ve aydınlık akım-gerilim ölçüleri alınmıştır. Karanlık akımının ters ve düz beslemede önemli ölçüde arttığı (Şekil 5.12), bu belirtgenlerden yararlanarak hesaplanan doğrultma oranınının 0,6 V'ta $r = 51$ 'e düştüğü ve diyot ideallik faktörünün uzun süreli aydınlatılma yapılmadan önceki haline döndüğü görülmüştür. Aydınlık belirtgenlerinde tavlama ile büyük bir değişikliğin meydana geldiği, J_{sc} 'nin 2,48 mA/cm²'den 5,52 mA/cm²'ye arttığı, V_{oc} 'nin 555 mV'tan 530 mV'a azaldığı ve verimin %4'den %7,8'e çıktığı belirlenmiştir (Şekil 5.13). Bu görünüm, Shwarz 'in (1984) gözlemlerine uymaktadır.

İkinci tür tavlama, zamana göre değişimi incelenen, yapıya yapı açık devre iken 200°C'de bir saat süreyle uygulanmıştır. Numune tavlandıktan sonra oda sıcaklığına düşünceye kadar beklenip, aydınlık ve karanlık akım-gerilim ölçüleri alınmıştır. Buna göre karanlık akımının düz beslemede ve ters beslemede azaldığı (Şekil 5.15), 0,6 V'ta doğrultma oranınının $r = 260$ olduğu, diyot ideallik faktörünün $n = 3,2$ olduğu bulunmuştur. Aydınlık akım-gerilim belirtgenlerinden J_{sc} 'nin 1,02 mA/cm²'den 1,13 mA/cm²'ye arttığı ve verimin %4'den %5,3'e çıktığı görülmüştür (Şekil 5.14).

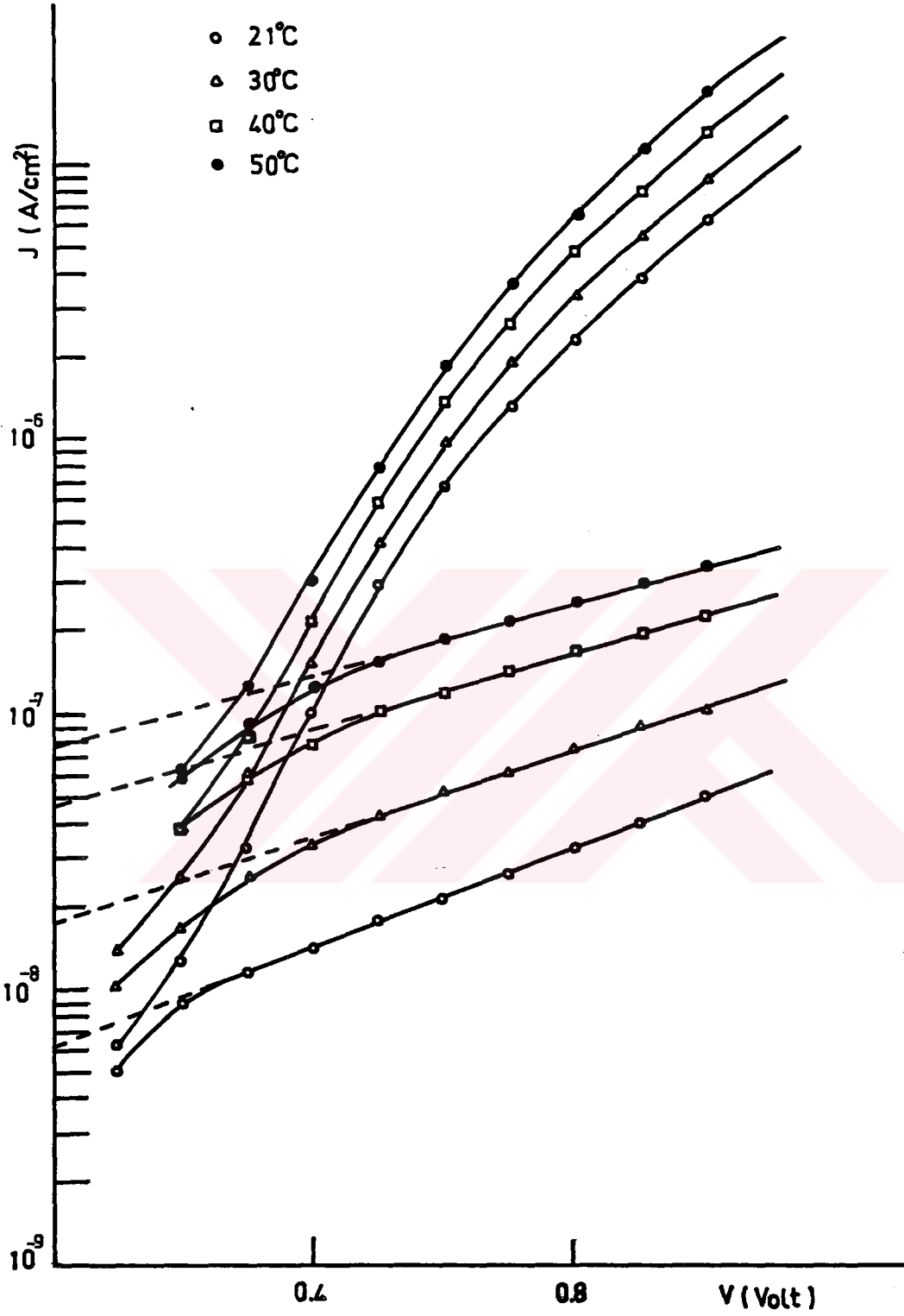
Bu artışlar ters beslemede yapılan tavlama sonucundakine kıyasla çok küçüktür. Açık devre altında yapılan tavlama belirtgenlerin ters beslemdekine bakarak iyiye doğru gitmediği sonucu çıkarılabilir.

5.3. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr (Schottky) Yapılarıyla İlgili Ölçmeler

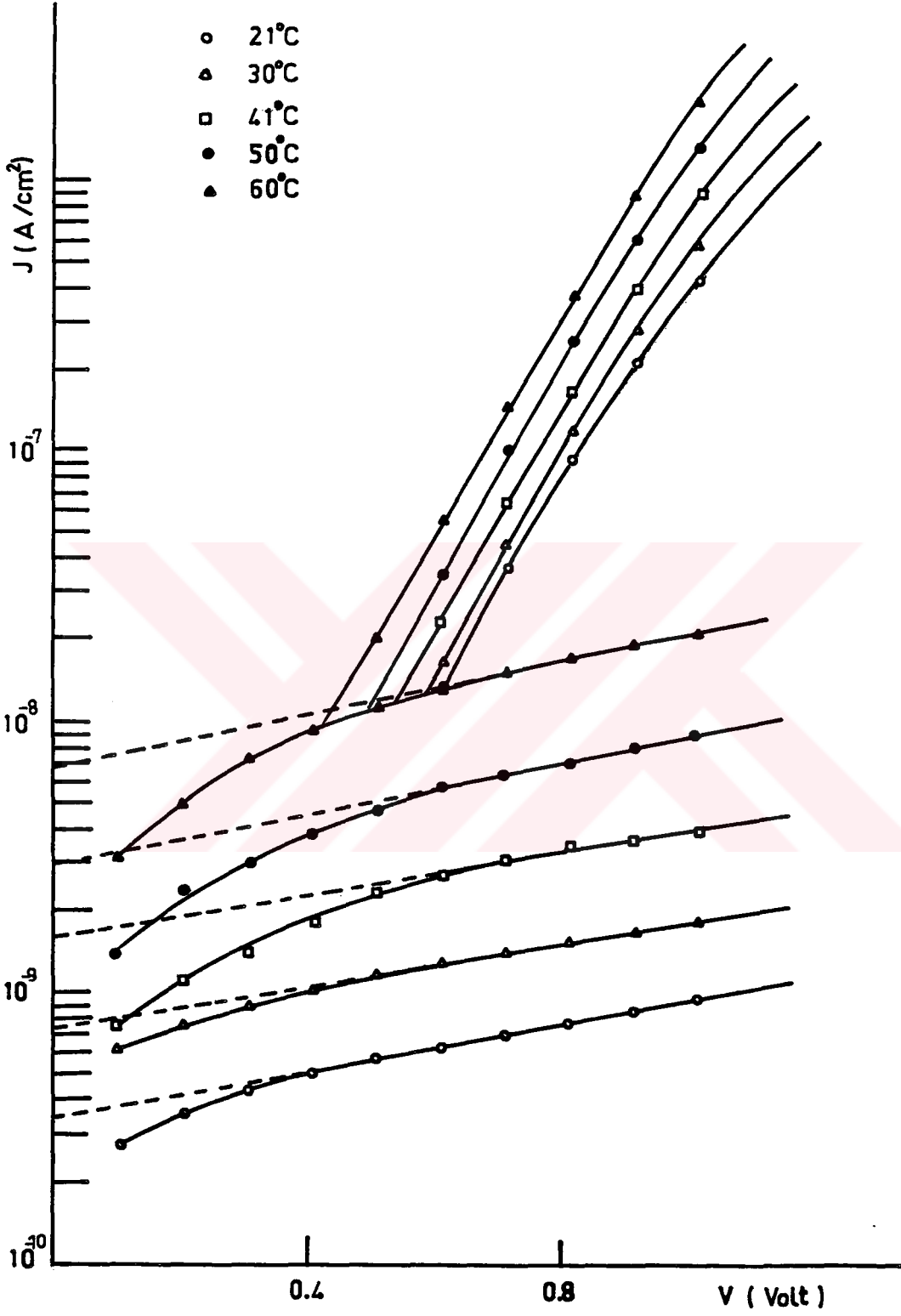
5.3.1. Metal/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında akım-gerilim belirtgenlerinin sıcaklığa bağlılığı

Metal-yarıiletken tipi yapılarda yapıda oluşan engel yüksekliği ile metalin iş fonksiyonu arasında (3.21) bağıntısıyla verilen çizgisel ilişkinin araştırılması ve yarıiletken yüzey durumlarının belirlenebilmesi için Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr, Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr ve Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr olmak üzere üç tip yapı yapılmıştır. Yalnız bir sıcaklıktaki akım-gerilim ölçülerinden yararlanarak yapının engel yüksekliğini bulmak μ_n , E_μ , N_c gibi parametreler bilinmediğinden mümkün değildir. Bu nedenle karanlık akımının gerilimle değişimi Au'lu yapılar için 21°C, 30°C, 40°C, 50°C sıcaklıklarında, Cu'lu yapılar için 21°C, 30°C, 41°C, 50°C, 60°C sıcaklıklarında ve Ag'li yapılar için 22°C, 30°C, 42°C, 51°C sıcaklıklarında ölçülmüş, 60°C den daha büyük sıcaklıklara yapının tavlanaarak özelliklerinin değişmesinden sakınmak için çıkılmamıştır (Şekil 5.16, 5.17, 5.18). Her üç yapıda da metalin pozitif olduğu düz beslemde yapıdan geçen akımın, yapıya uygulanan gerilimle üstel olarak arttığı, 0,7 V'tan büyük gerilim değerlerinde yapının seri direncinin etkin hale gelmesi yüzünden üstel artışın bozulduğu, bu davranışın Thompson vd'nin (1981) bulguları ile uyuşma halinde olduğu saptanmıştır. Metalin negatif olduğu ters beslemde ise engelin görüntü kuvvet alçalması, arayüz tabakasının varlığı, tünelleme etkisi gibi nedenlerle yapıdan geçen akımın kusursuz diyotlardaki gibi doyma göstermediği gerilimle kademeli olarak arttığı anlaşılmaktadır (Rhoderick 1980). Ancak Şekil 5.16, 5.17, 5.18'deki her bir sıcaklıktaki eğrinin bir diyot davranışı sergilediği açıkça görülmektedir. Bu da metal/yarıiletken kontak kuramına göre iş fonksiyonu a-Si:H'a göre daha büyük olan Au, Ag ve Cu'un n tipi a-Si:H'la birleşince doğrultucu kontak meydana getirmesi gerektiğini doğrulamıştır.

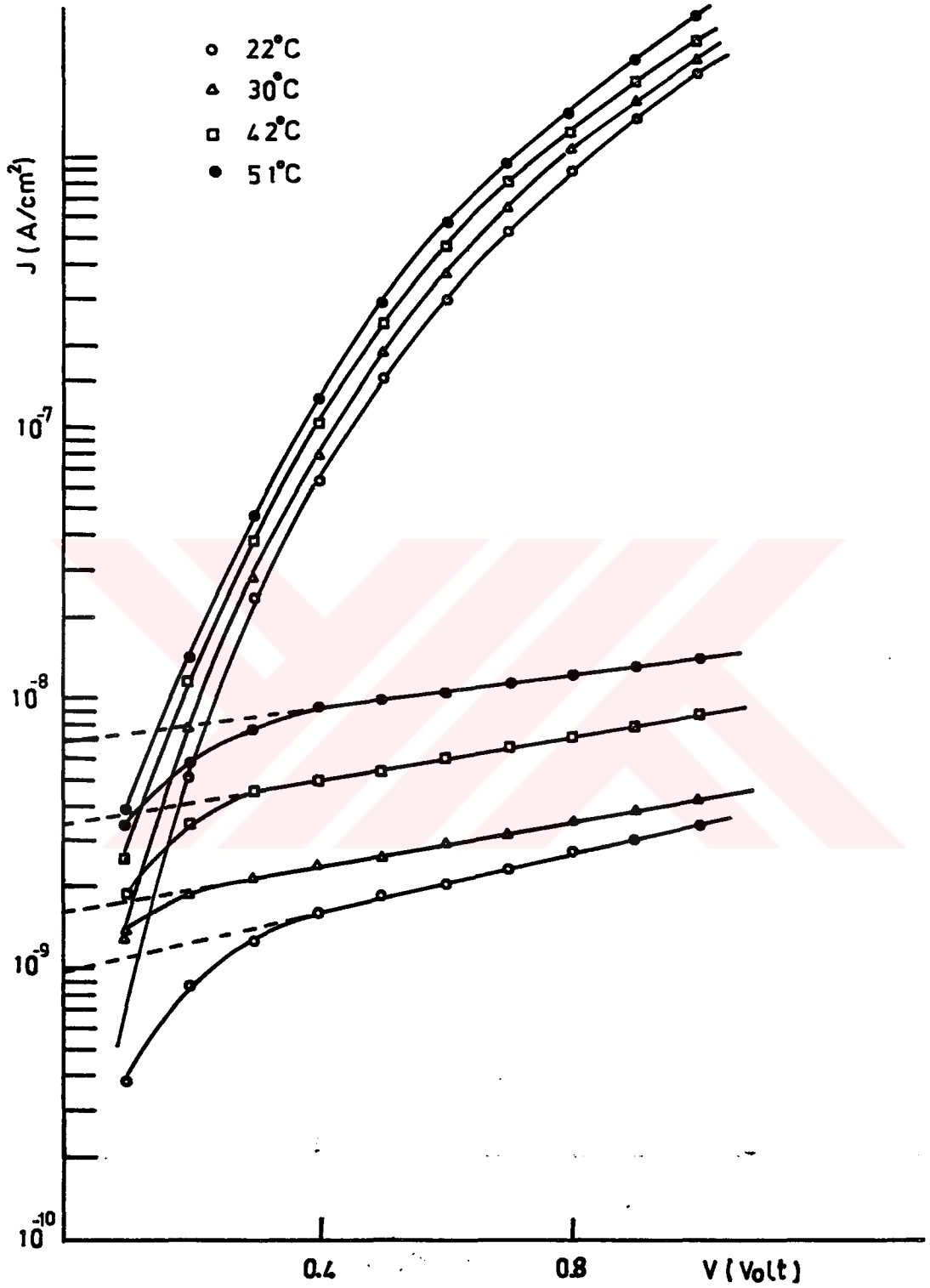
Yapıların ϕ_{Bn} engel yüksekliklerinin bulunması için Şekil 4.20'deki ters beslem akım-gerilim eğrilerinden J_0 akım değerleri benzer çalışmalardakiyle aynı şekilde hareket ederek bulunmuştur



Şekil 5.16. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında karanlıkta değişik sıcaklıklarda akım-gerilim eğrileri



Şekil 5.17. Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında karanlıkta değişik sıcaklıklarda akım-gerilim eğrileri



Şekil 5.18. Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında karanlıkta değişik sıcaklıklarda akım-gerilim eğrileri

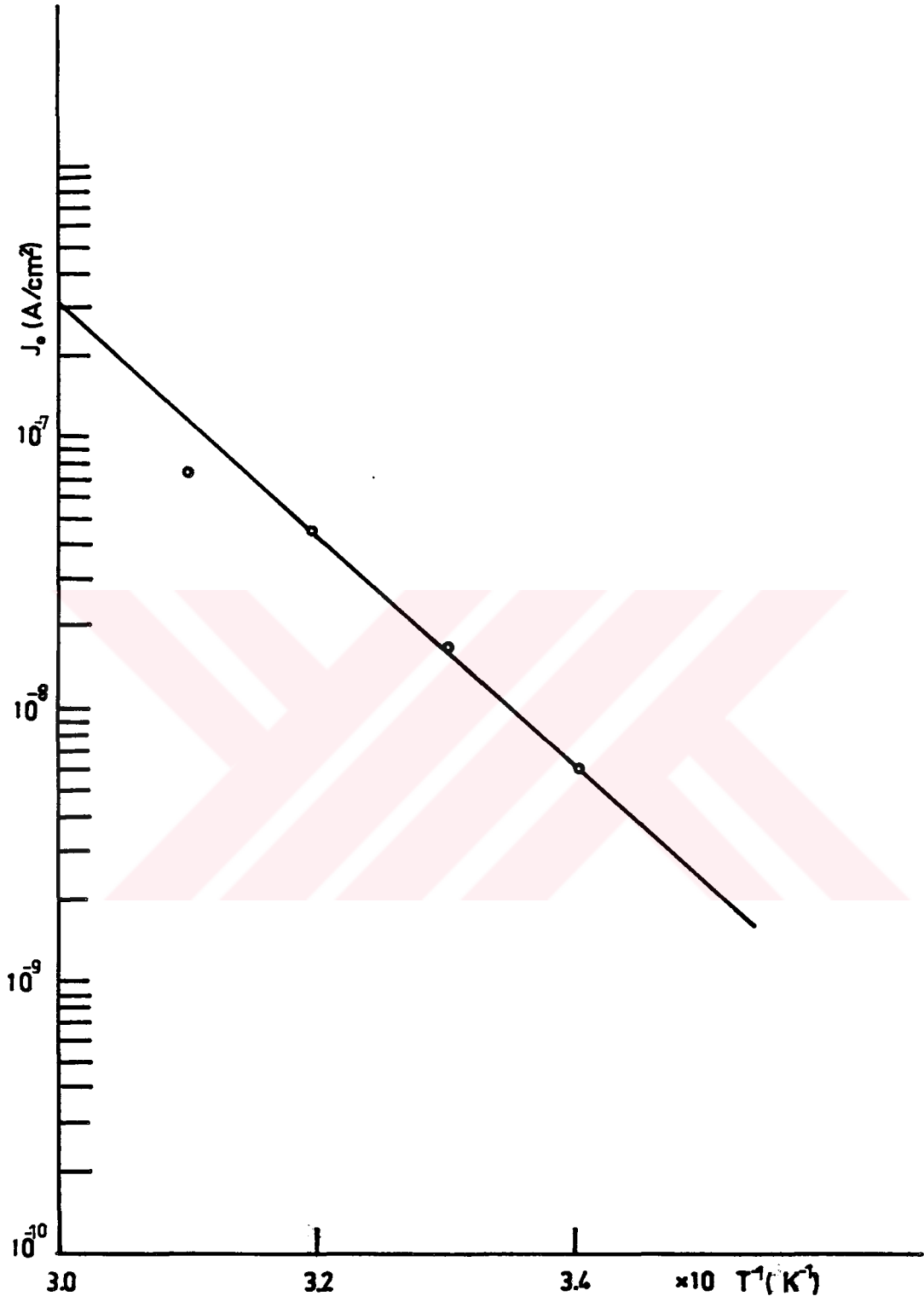
(Serin 1984) ve $\ln J_0 - T^{-1}$ arasındaki ilişki

$$\ln J_0 = \ln q N_c \mu_n E_\mu - \frac{q\phi_{Bn}}{kT} \quad (5.3)$$

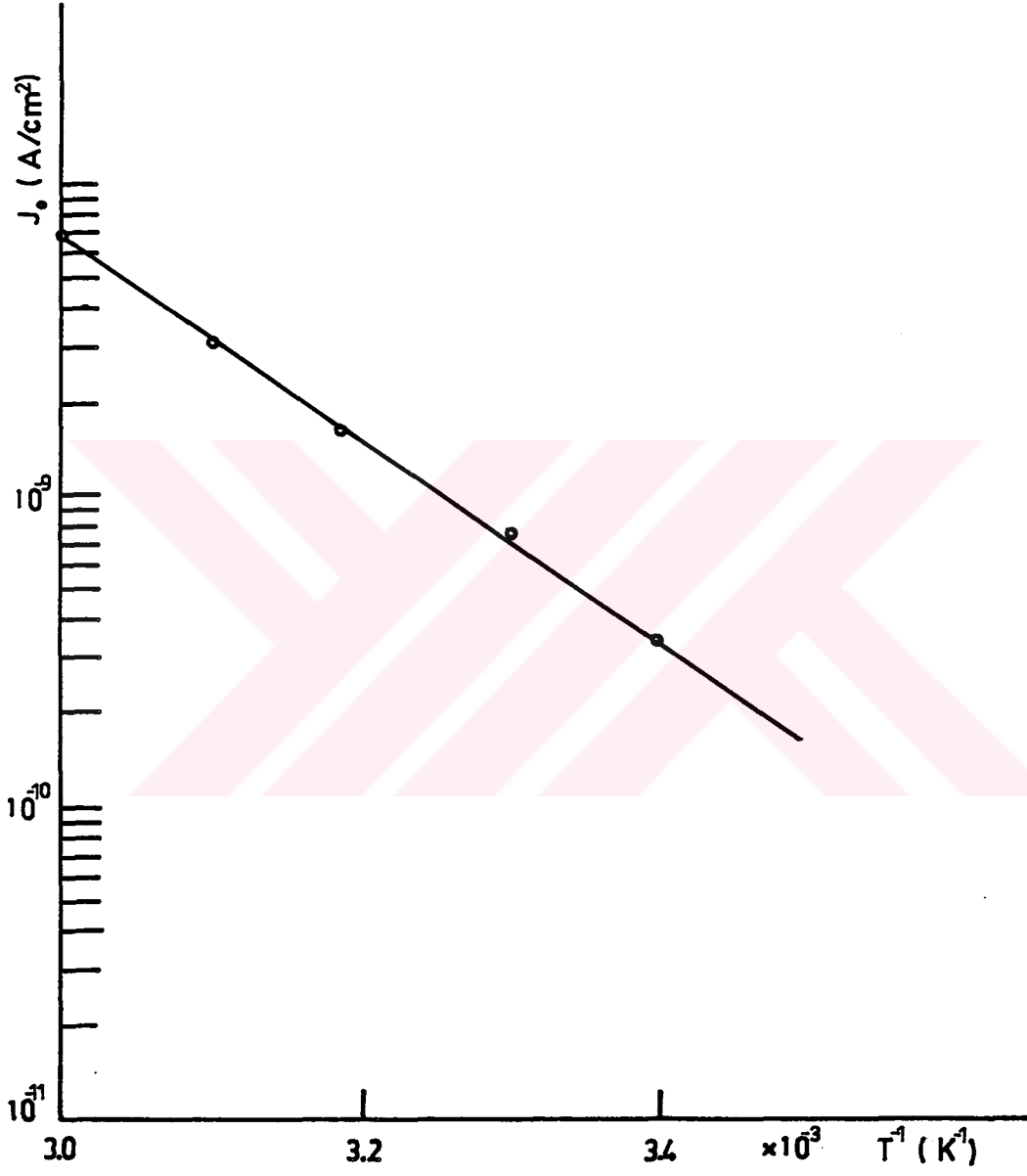
bağıntısından görüldüğü gibi çizgisel bir ilişkidir. Buna göre tarafımızdan elde edilen metal/yarıiletken yapılarda değişik sıcaklıklarda bulunan J_0 değerlerinin bu ilişkiyi sağlaması gerekir. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısına ait $\ln J_0 - T^{-1}$ değişiminin çizilmesinden bu ilişkiyi kanıtlayan bir doğru elde edilmiştir (Şekil 5.19), bu doğrunun eğiminden de Au'lu yapılar için $\phi_{Bn} = 0,78$ eV olarak bulunmuştur. Aynı şekilde Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'deki ters beslem akım-gerilim eğrilerinden bulunan J_0 değerlerinden yararlanarak çizilen $\ln J_0 - T^{-1}$ grafiklerinden (Şekil 5.20, 5.21) Cu/a-Si:H(i)/A-Si:H(n⁺)/Cr yapısı için $\phi_{Bn} = 0,65$ eV Ag/a-Si:H/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısı için $\phi_{Bn} = 0,55$ eV elde edilmiştir. Bulunan engel yükseklikleri Vieux-Rochaz vd (1979) ve Serin'in (1984) bulguları ile uyum halindedir.

5.3.2. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında akım gerilim belirtgenlerinin zamanla değişimi

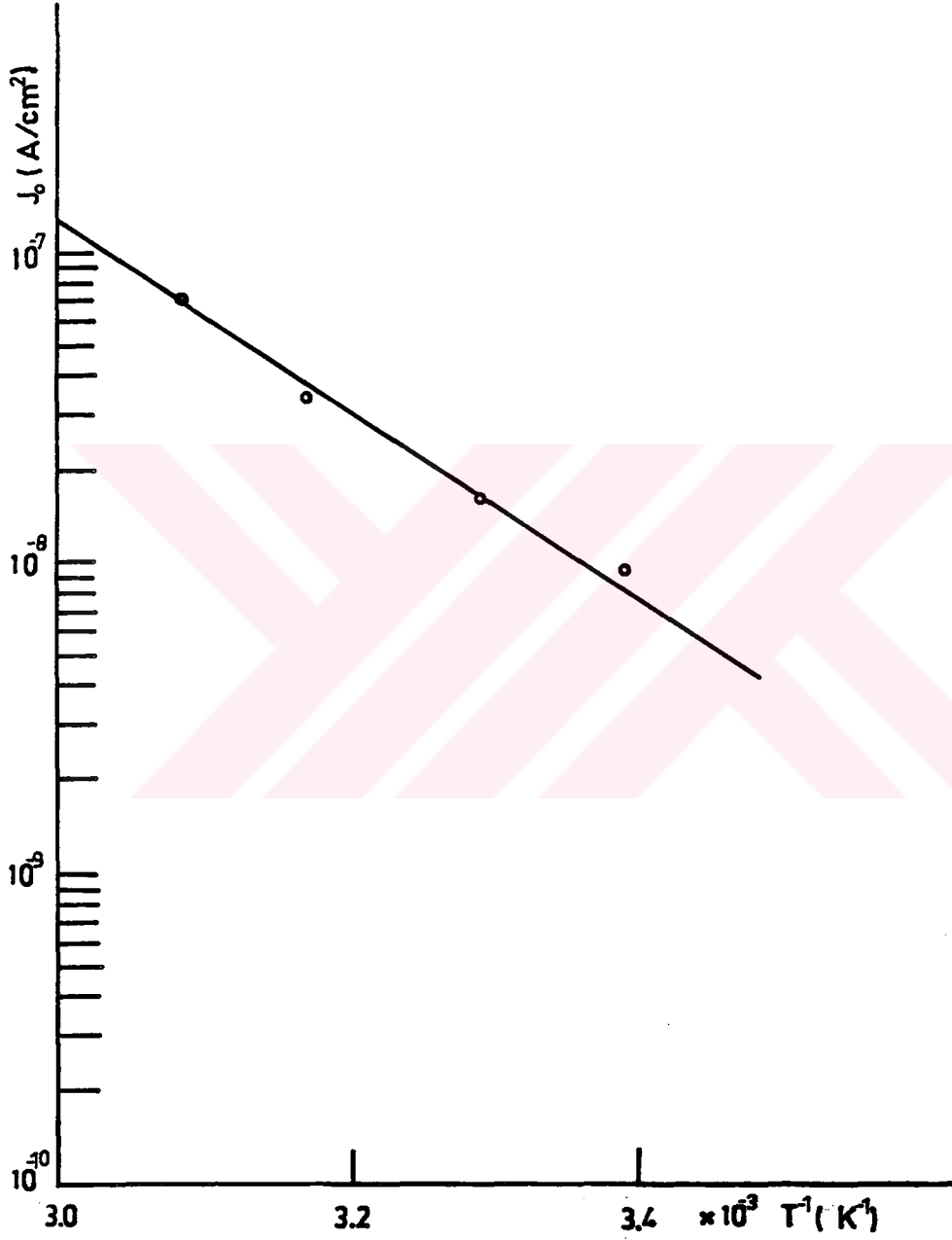
Metal/yarıiletken yapılarda oluşan engel yüksekliğinin ve yapının belirtgenlerinin zamanla değişimini incelemek üzere aynı şartlarla hazırlanmış iki numuneden yararlanılmıştır. Numunelerden birisinin akım gerilim belirtgenleri karanlıkta, sadece oda sıcaklığında ölçülmüş ve yapıdan geçen akımın farklı zamanlarda aynı gerilim değerlerinde azaldığı görülmüştür (Şekil 5.22). Bir tek sıcaklıktaki akım-gerilim değerlerinden yararlanarak yapının engel yüksekliğini bulmak mümkün olmadığından diğer numunenin akım-gerilim belirtgenleri her defasında 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C sıcaklık değerlerinde olmak üzere zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerden de her sıcaklık için yapıdan geçen akımın (Şekil 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27) ve bu eğrilerden yararlanarak bulunan diyot ideallik faktörünün zamanla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.28). Bu deneysel sonuçlar Thompson vd (1981) tarafından Pd'lu Schottky diyotlarda gözlenen sonuçlarla uyum içindedir.



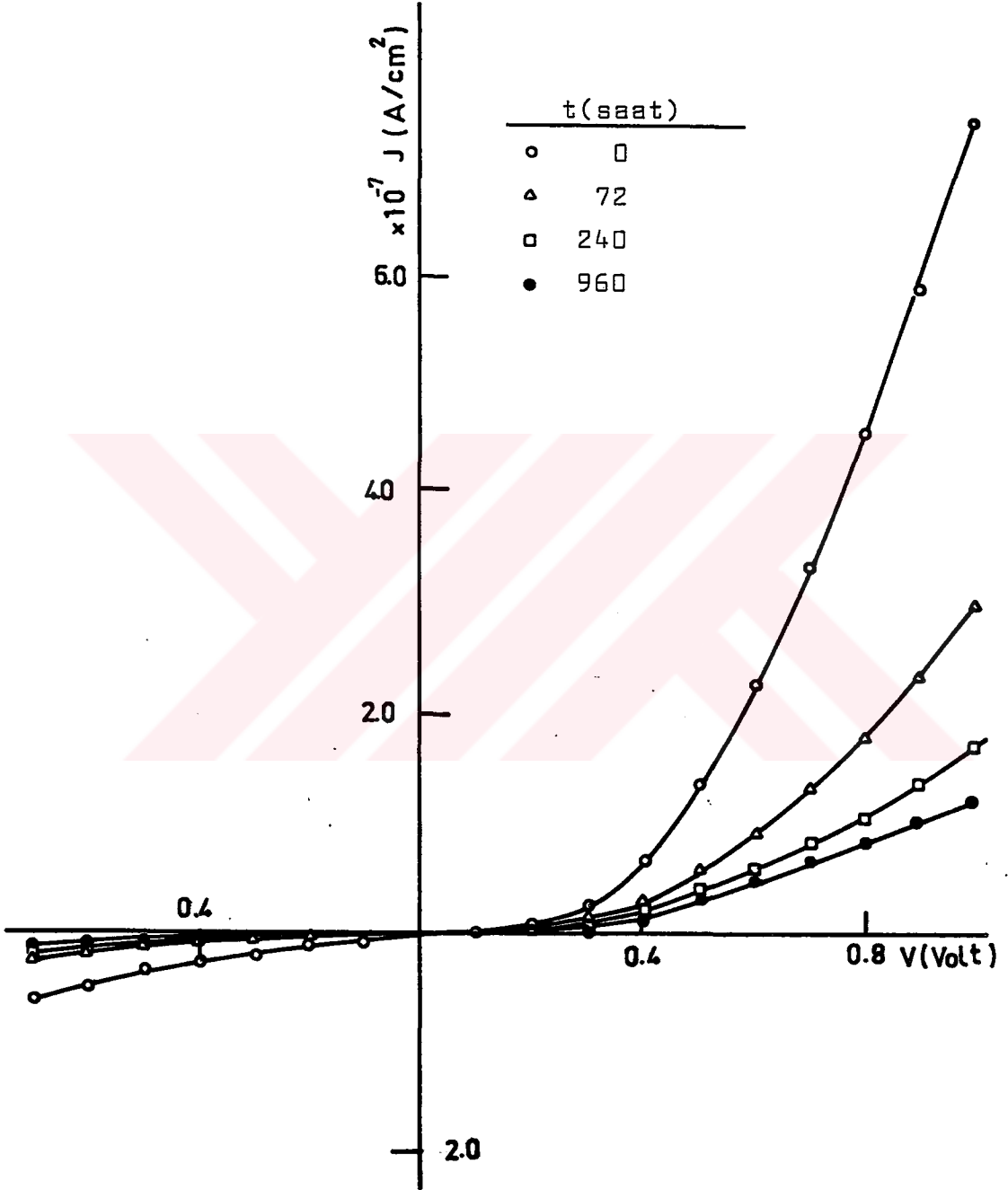
Şekil 5.19. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında $\ln J_0$ 'ın T^{-1} 'e karşı değişimi



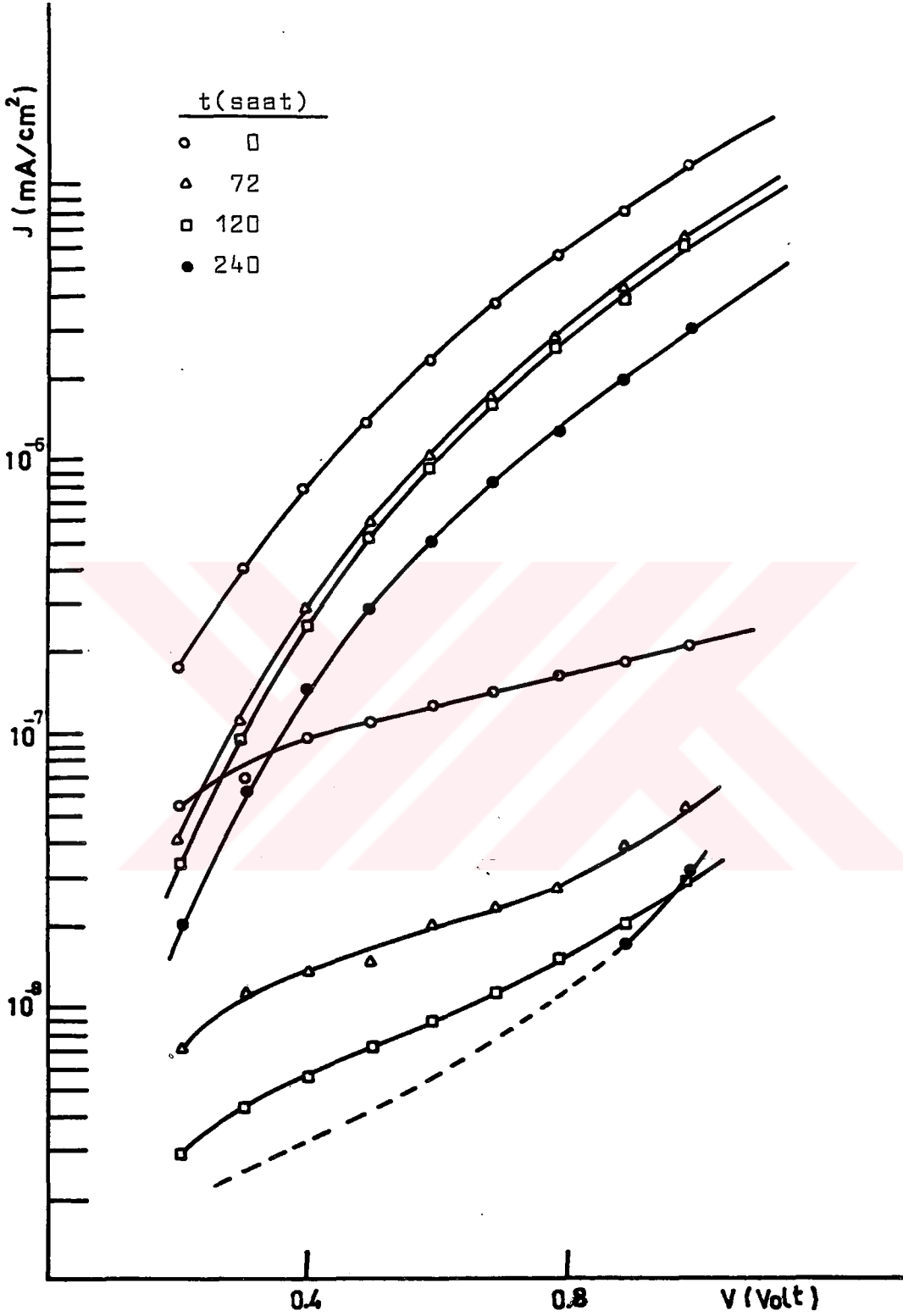
Şekil 5.20. Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında
 $\ln J_0$ 'ın T^{-1} 'e karşı değişimi



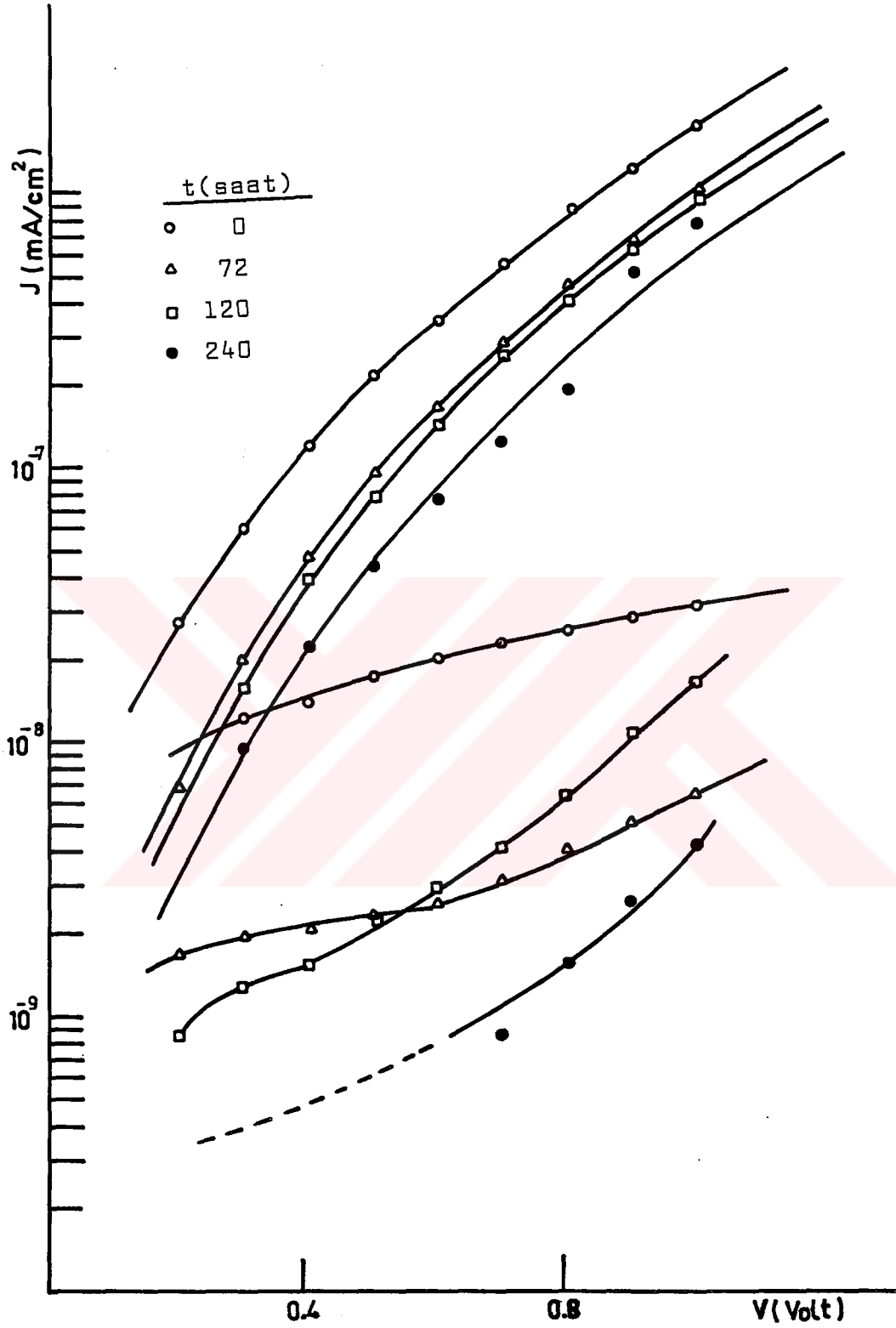
Şekil 5.21. Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında
 $\ln J_0$ 'ın T^{-1} 'e karşı değişimi



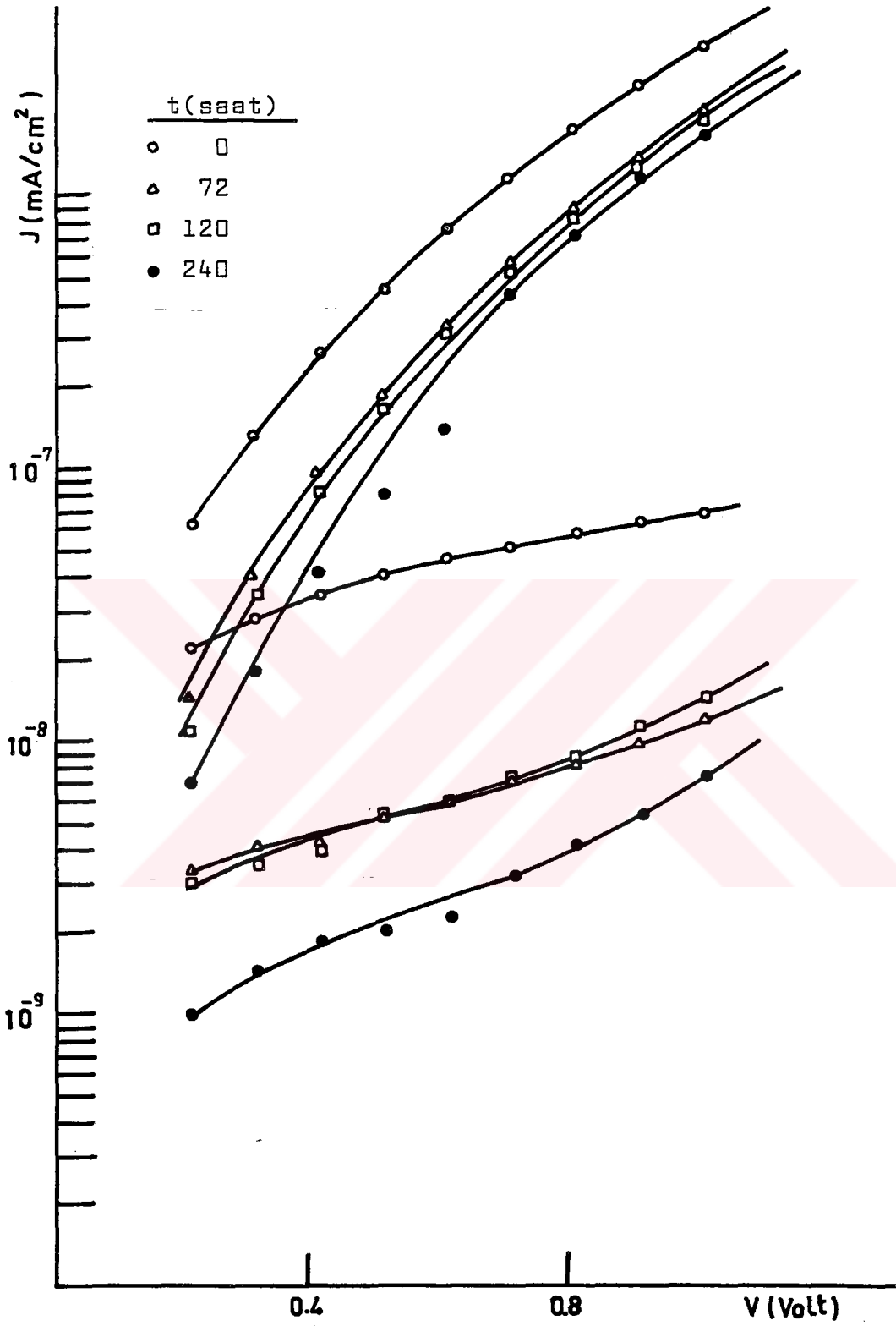
Şekil 5.22. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında değişik zamanlarda ölçülmüş akım-gerilim eğrileri



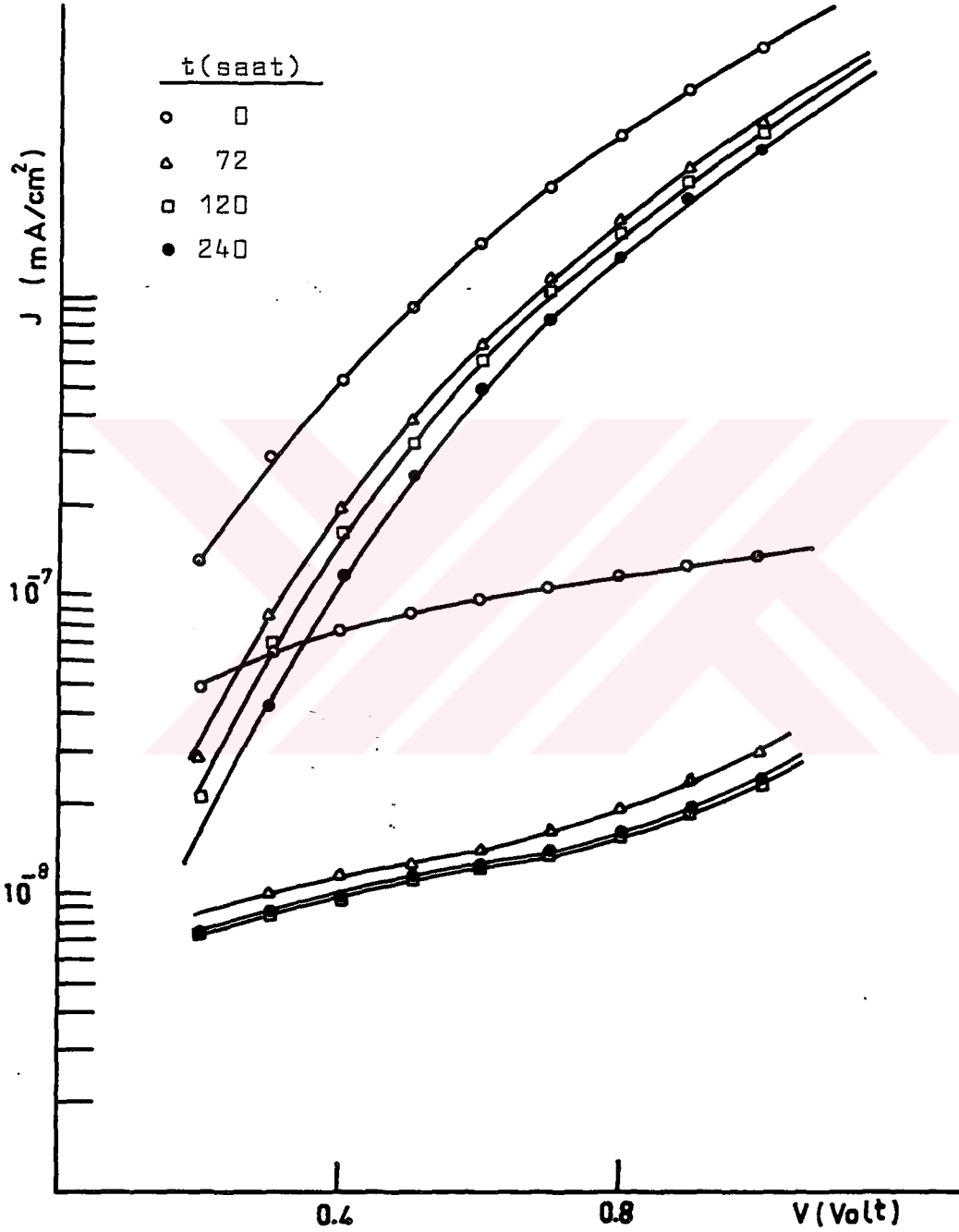
Şekil 5.23. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının karanlık akım-gerilim eğrisinin 20°C'de zamana karşı değişimi



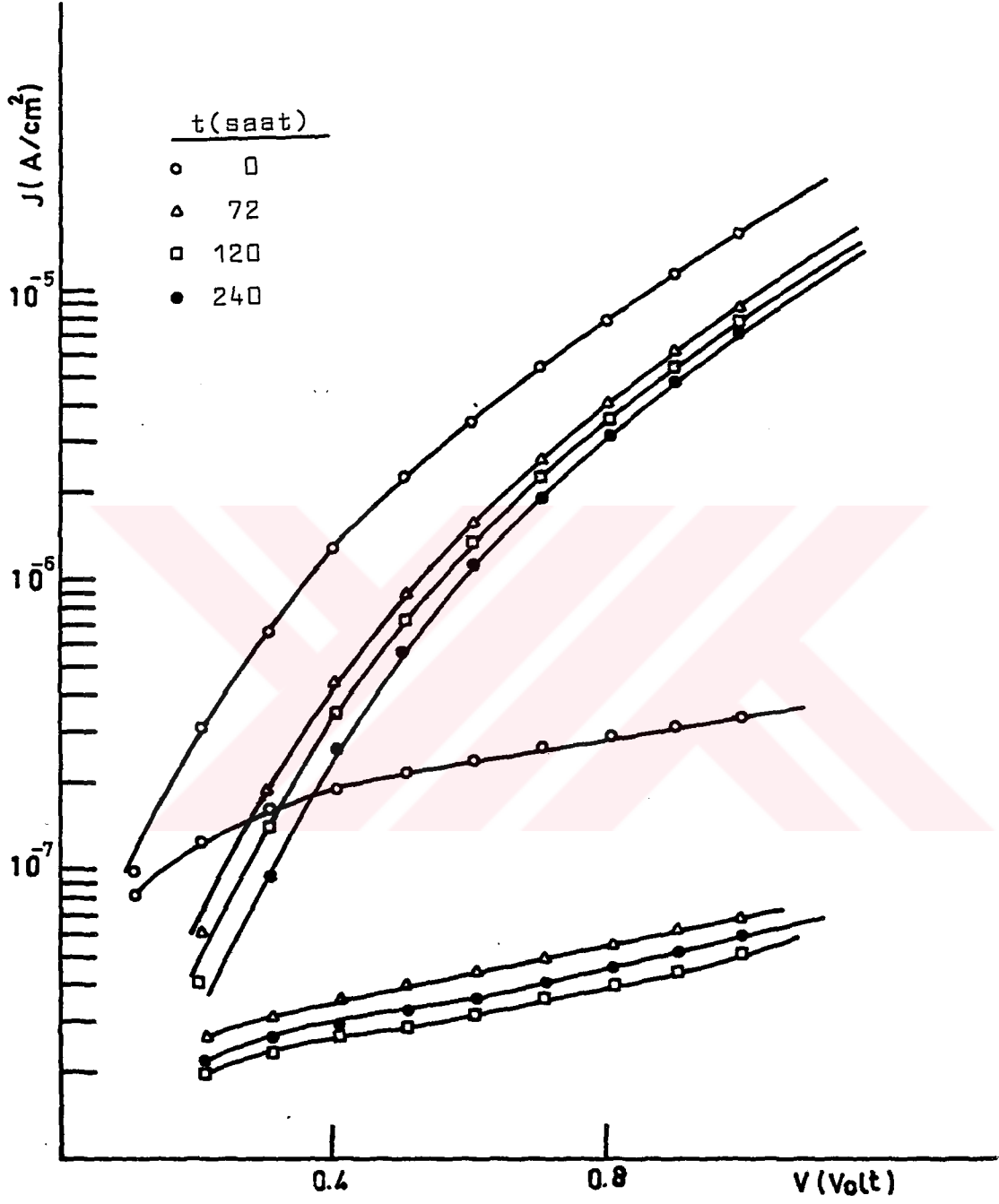
Şekil 5.24. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının karanlık akım-gerilim eğrisinin 30°C'de zamana karşı değişimi



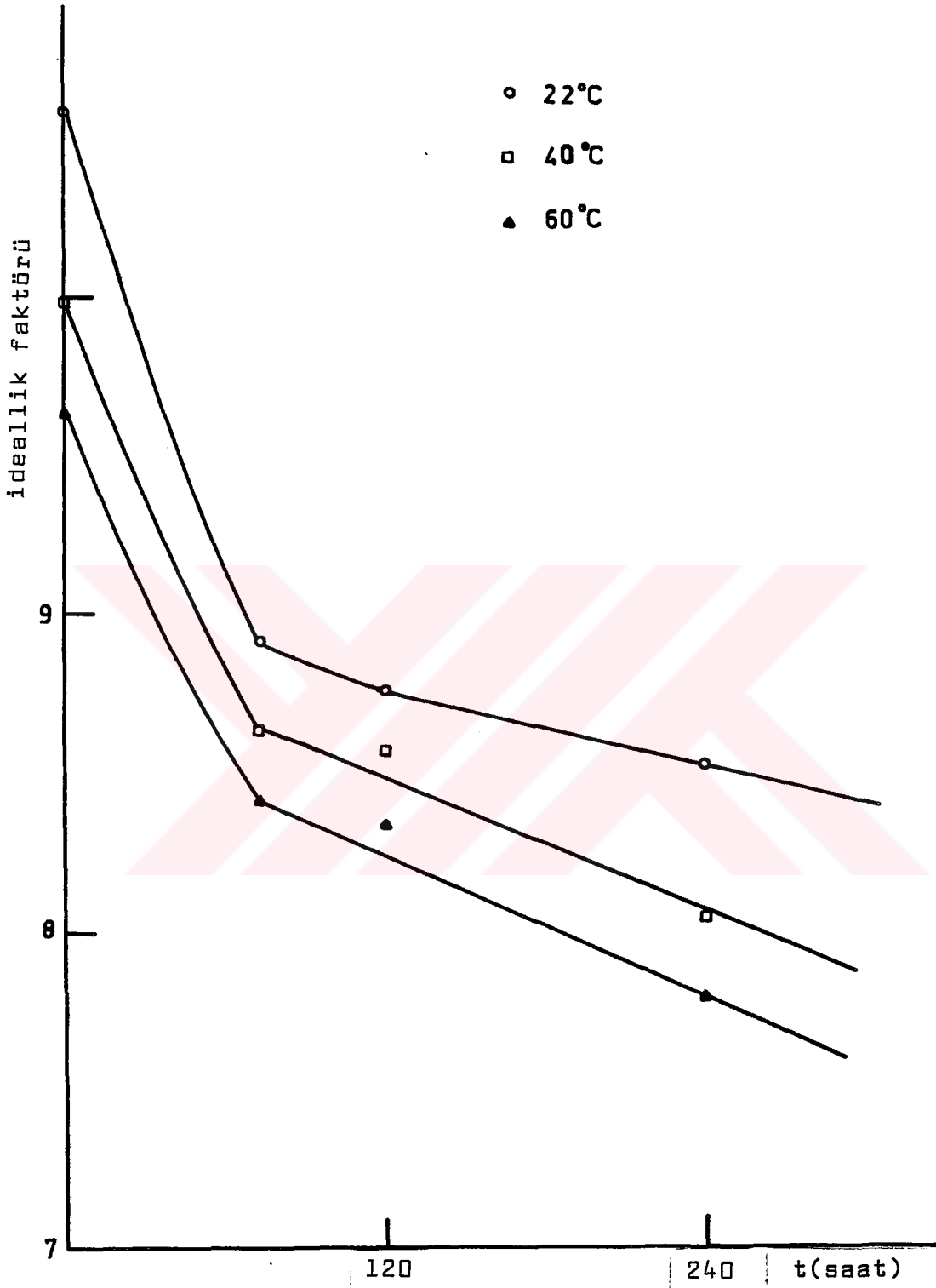
Şekil 5.25. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının karanlık akım-gerilim eğrisinin 40°C'de zamana karşı değişimi



Şekil 5.26. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının karanlık akım-gerilim eğrisinin 50°C'de zamana karşı değişimi



Şekil 5.27. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının karanlık akım-gerilim eğrisinin 60°C'de zamana karşı değişimi



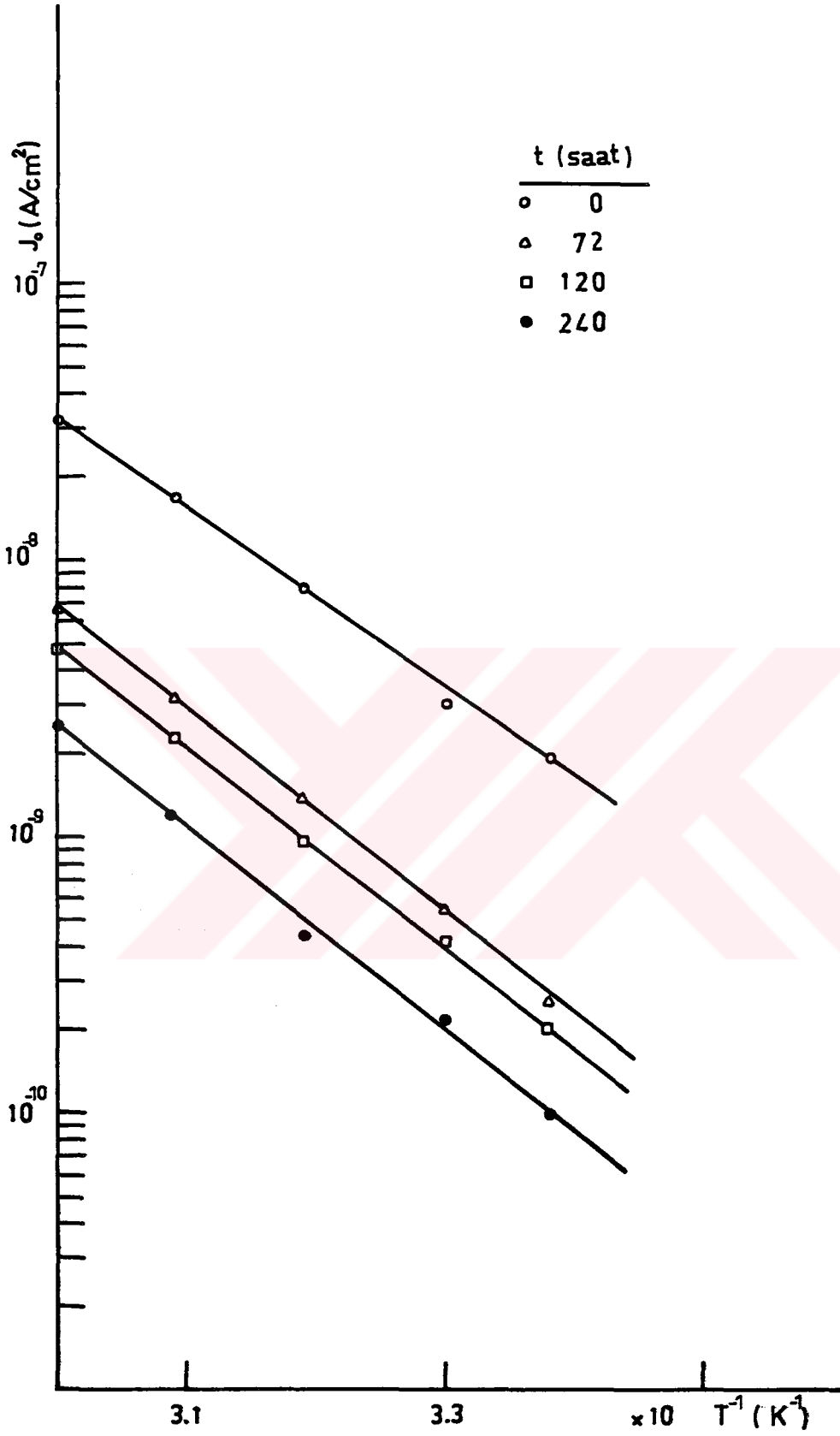
Şekil 5.28. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında değişik sıcaklıklarda diyot ideallik faktörünün zamana karşı değişimi

Değişik zamanlardaki ϕ_{Bn} engel yükseklikleri, düz beslem $\ln J-V$ eğrilerinin ekstrapolasyonundan elde edilen J_0 değerleri kullanılarak çizilen $\ln J_0 T^{-1}$ grafiklerinden (Şekil 5.29), Kesim 5.3.1'deki yol izlenerek, bulunmuştur. ϕ_{Bn} engel yüksekliğinin zamanla artarak doymaya gittiği anlaşılmaktadır (Şekil 5.30). Yapının engel yüksekliği (3.21) bağıntısından görüldüğü gibi metalin iş fonksiyonu ve yüzey durumları tarafından belirtilir, o halde yapının engel yüksekliğinin zamanla artması yapıdaki yüzey durumlarının zamanla azaldığını gösterir.

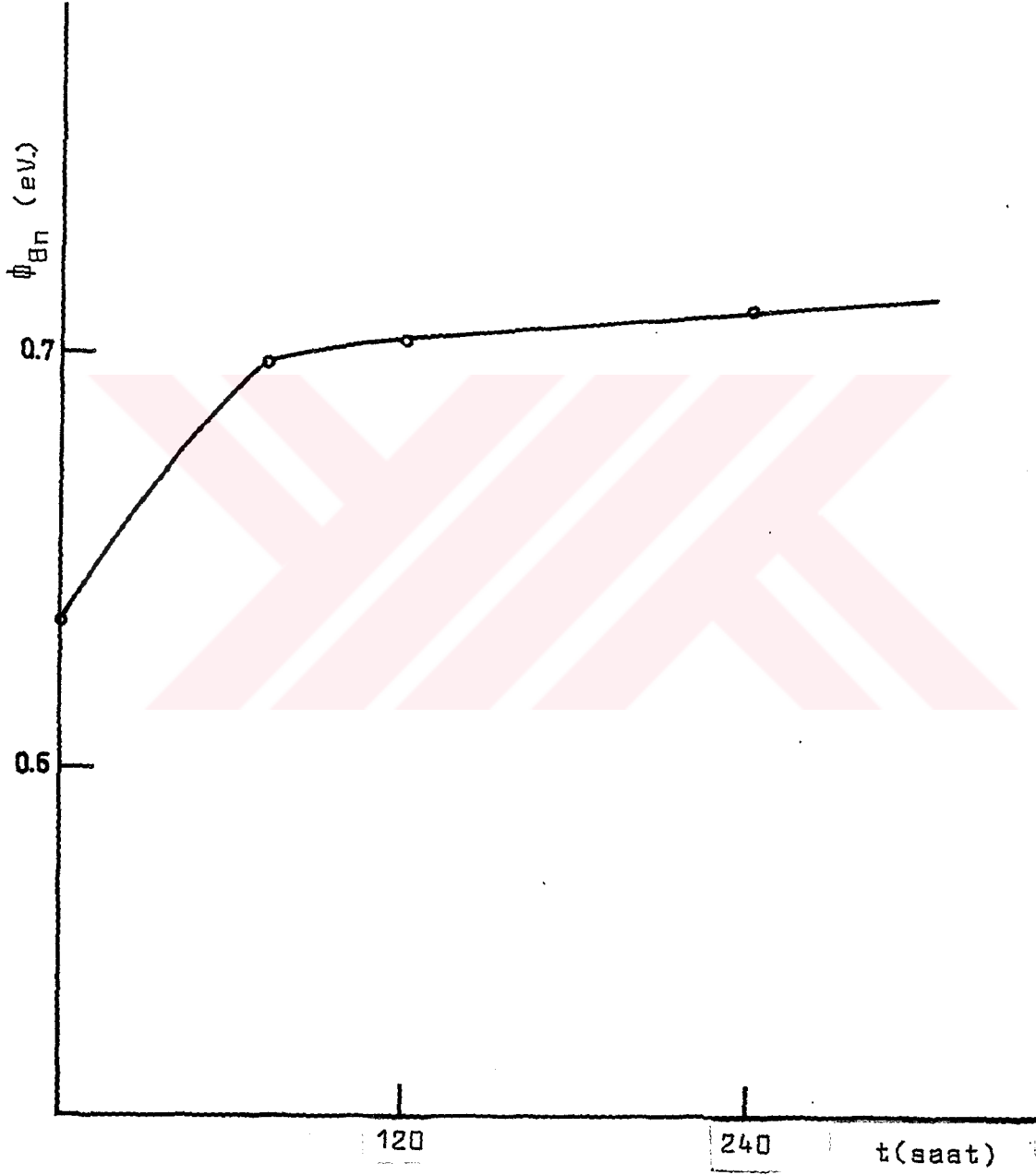
5.3.3. Tavlama sıcaklığının Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısına etkisi

Diyodun kalitesine doğrudan etkisi olduğu için Au ve a-Si:H arasındaki arayüz durumlarının etkisini incelemek üzere Schottky elektriksel ölçmelerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısı 70°C, 100°C, 125°C, 150°C ve 200°C sıcaklık değerlerinde 10 dakika tavllanmış, yapılar oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar beklenildikten sonra her tavlama sonrasında yapının karanlık akım-gerilim belirtgenleri ölçülmüştür. Ters beslemdeki akımın tavlama sıcaklığıyla azaldığı, düz beslemde 150°C'lik tavlama sıcaklığına kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmüştür (Şekil 5.31). Yapının doğrultma oranının tavlama sıcaklığıyla artarak doymaya gittiği (Şekil 5.32) ve diyot ideallik faktörünün artan tavlama sıcaklığıyla azalarak doymaya gittiği gözlenmiştir (Şekil 5.33). Bu gözlemlerin, diyot özelliklerinde gelişme olduğunu belirttiği söylenebilir.

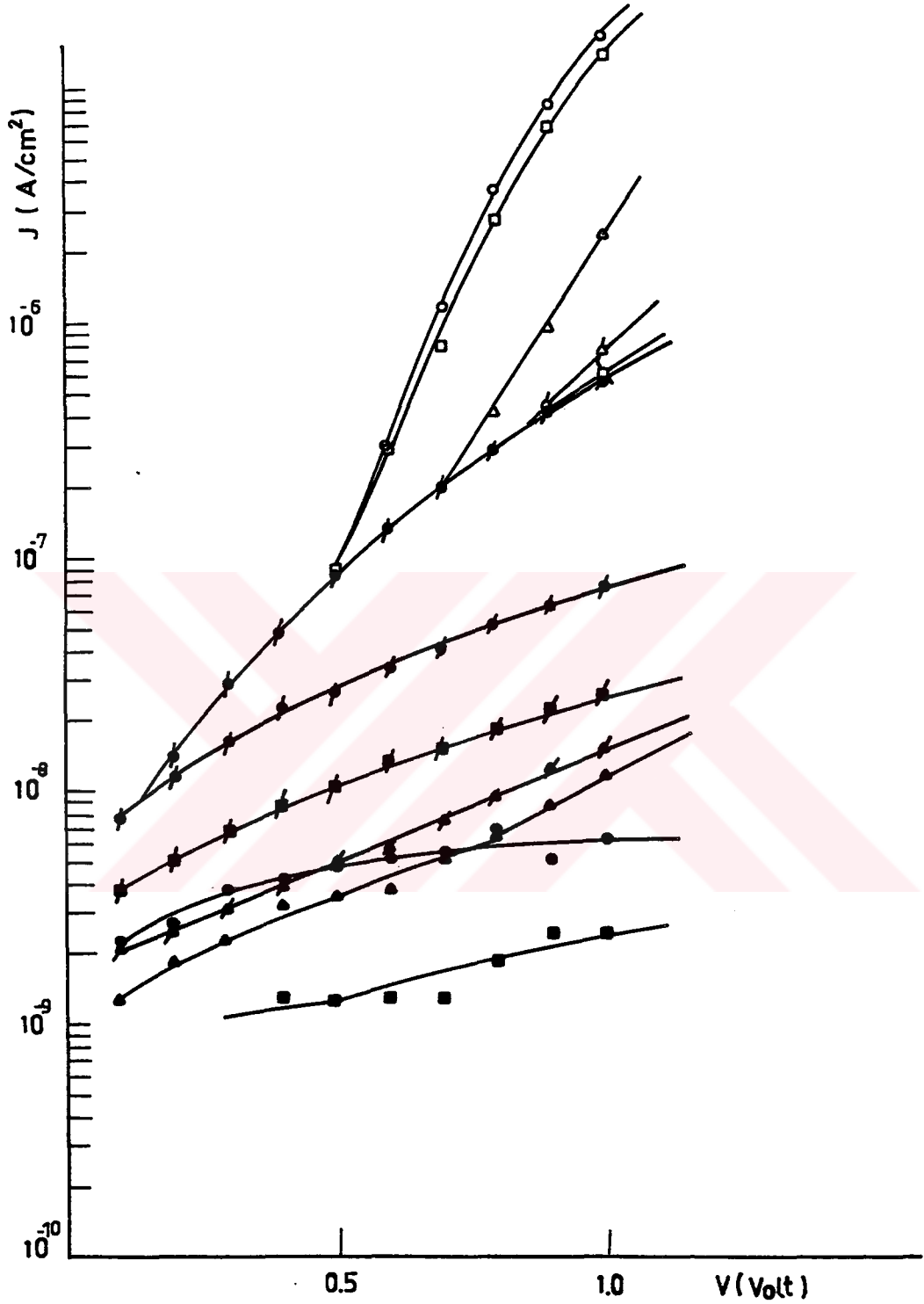
ϕ_{Bn} 'nin tavlama sıcaklığıyla değişimini incelemek üzere, tavlanaacak numune ile aynı fiziksel şartlarda hazırlanmış bir başka numunede, 20°C-50°C arasında akım-gerilim ölçmeleri yapılarak çizilen düz beslem $\ln J-V$ eğrilerinin, $\ln J$ eksenini kestiği noktalardan bulunan $\ln J_0$ 'ın T^{-1} 'e karşı çizilmesinden elde edilen doğrunun $\ln J$ eksenini kestiği noktadan $qN_C \mu E = 9.54 \times 10^2$ Amp/cm² olarak bulunmuştur. Bu değer ve her tavlama sıcaklığı için akım-gerilim eğrisinden bulunan J_0 değerleri



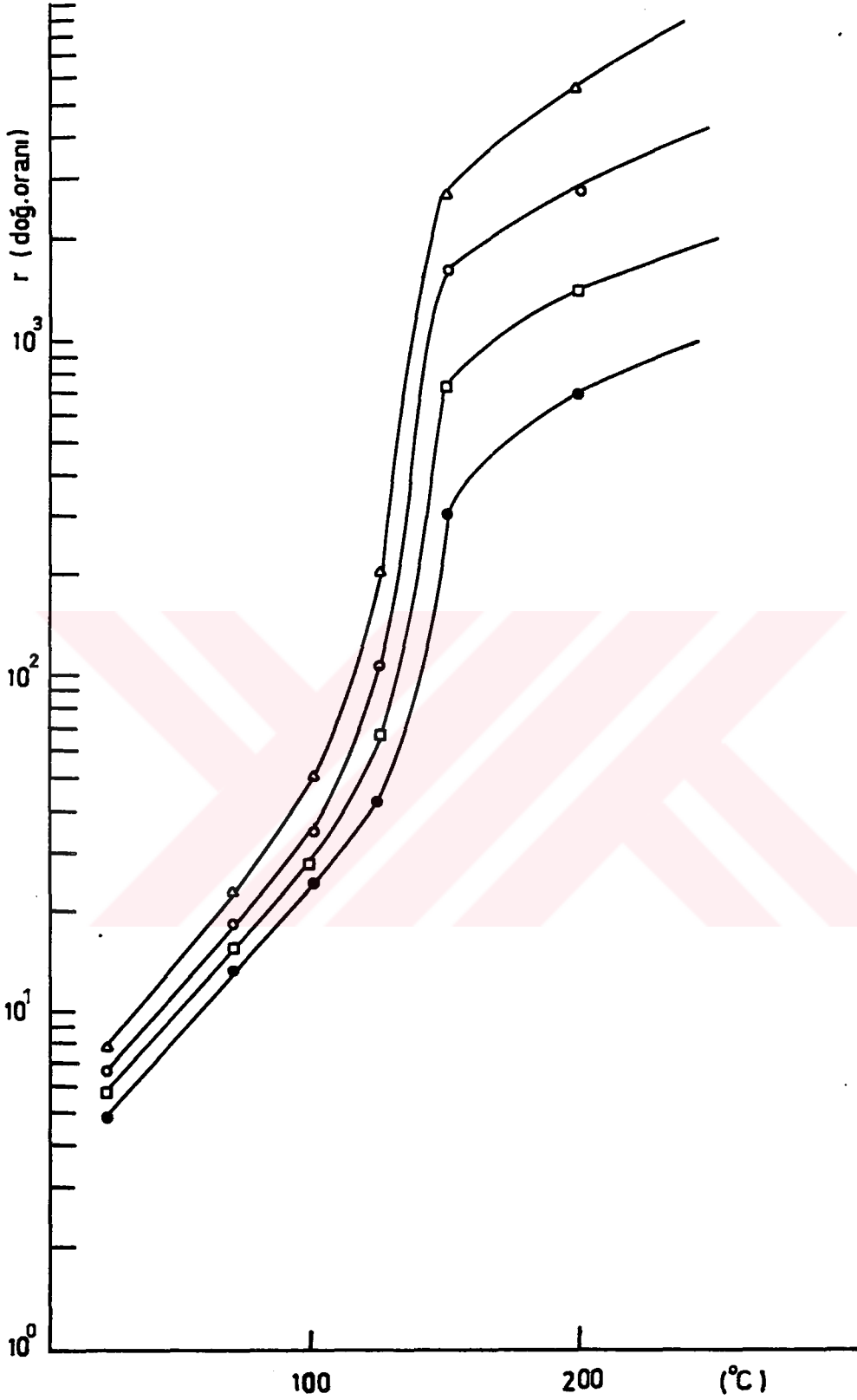
Şekil 5.29. Farklı zamanlarda Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında $\ln J_0$ 'ın T^{-1} 'e karşı değişimi



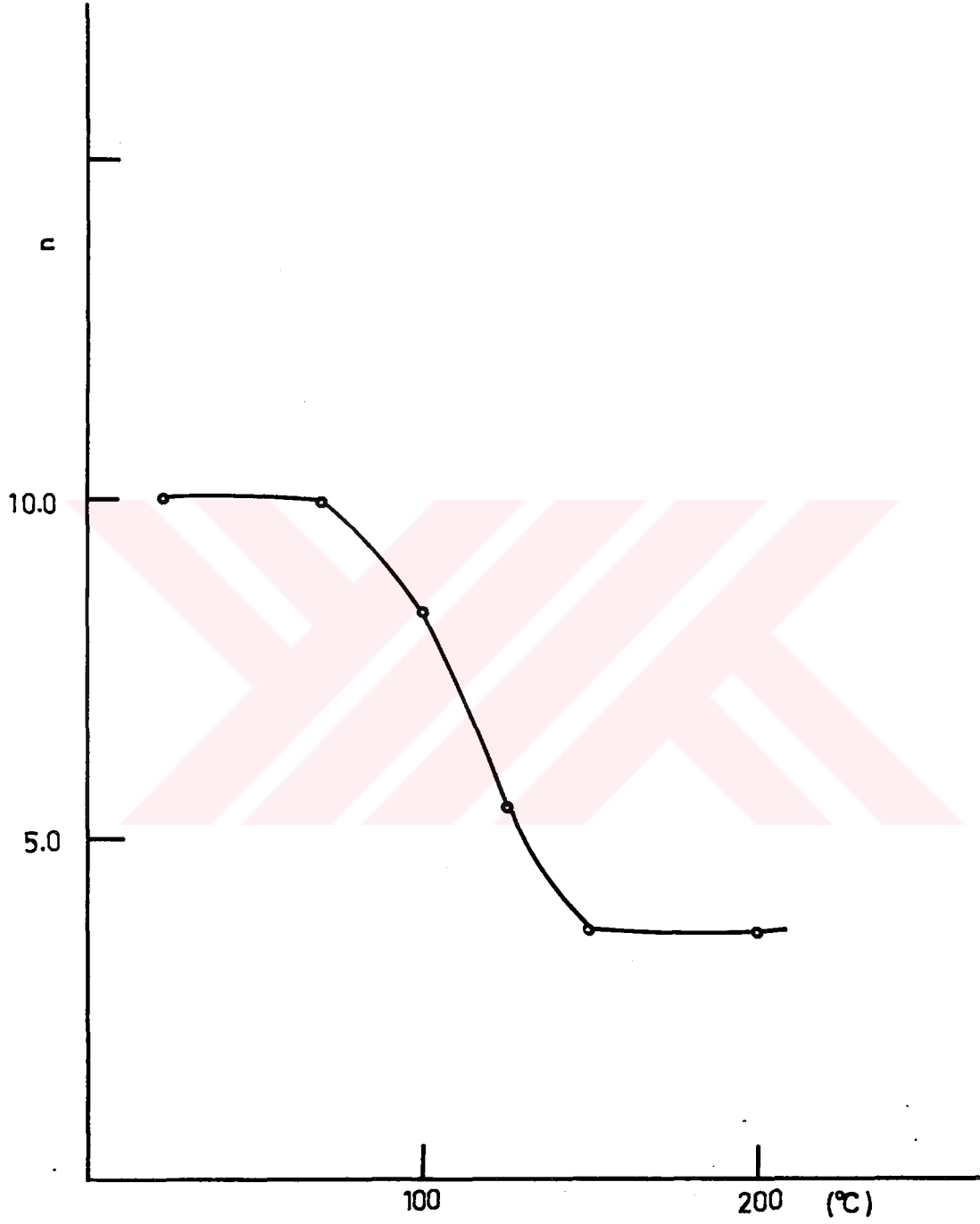
Şekil 5.30. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında ϕ_{Bn} engel yüksekliğinin zamana karşı değişimi



Şekil 5.31. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında farklı tavlama sıcaklıklarından sonra elde edilmiş akım-gerilim belirtgenleri 200°C (■), 150°C (●), 125°C (▲), 100°C (♠), 70°C (♣), (-) Au/a-Si:H/a-Si:H(n)/Cr(+) ve 200°C (□), 150°C (○), 125°C (△), 100°C (♢), 70°C (♣) (+)Au/a-Si:H/a-Si:H(n)/Cr(-) ve 23°C de tavlamadan önce (♠)



Şekil 5.32. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında doğrultma oranının 1,0 V (▲), 0,9 V (●), 0,8 V (◻), 0,7 V (●) değerlerinde tavlama sıcaklığıyla değişimi



Şekil 5.33. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında diyot ideallik faktörünün tavlama sıcaklığına karşı değişimi

$$\phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{qN_c \mu E}{J_o} \right) \quad (5.4)$$

denkleminde kullanılarak değişik tavlama sıcaklıklarında ϕ_{Bn} engel yükseklikleri elde edilmiştir (Çizelge 5.1). Artan tavlama sıcaklığıyla ϕ_{Bn} 'lerin arttığı bulunmuş, bu nedenle yüzey durumlarının azalacağı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.1. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısının çeşitli tavlama sıcaklıkları için hesaplanmış engel yükseklikleri

Sıcaklık (°C)	23	70	100	125	150	200
ϕ_{Bn} (eV)	0,641	0,644	0,655	0,687	0,726	0,726

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

6.1. Tartışma ve Sonuç

ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapılarında ön kontak olarak kullanılan ITO, ışığa karşı saydam, geçirme katsayısı büyük, buna karşılık yansıtma soğurma katsayısı ve elektriksel direnci küçük çok iyi bir iletken film olduğu için tercih edilmiştir. Bununla beraber bu oksidin birçok asit içersinde çözülmesi ve içersindeki oksijenin alttabaka ısıtması sırasında a-Si:H'la etkileşerek verimi düşürmesi gibi olumsuz yanları da vardır (Seki vd 1984). Yapıda p tipi yarıiletken olarak kullanılan a-SiC optik band aralığı CH₄ oranı arttırıldıkça artan, a-Si:H'a göre daha iyi katkılama (doping) verimine, daha yüksek iletkenliğe ve daha büyük fotoiletkenliğe sahip olması nedeniyle (Tawada vd 1982) güneş pilleri yapımında son yıllarda gözde olan bir amorf madde çeşididir. p⁺ tipi tabakası alevli boşalma, i ve n⁺ tabakası RF magnetron püskürtme yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak hazırlanan ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapısının güneş pili özelliği gösterdiği, veriminin $\eta \approx \%4$, doldurma faktörünün $ff = 0,52$ olduğu belirlenmiştir. Aydınlatmanın güneş yerine quartz halojen ampullu bir sistemle yapılması, bu lambanın spektrumunun güneş spektrumundan farklı olması, ayar için kullanılan standart tek kristalli Si güneş pilinin kırmızı dalga boyuna daha fazla duyarlı olması gibi nedenlerle, tez kapsamında ele alınan p/i/n yapıları için kesin bir güneş pili verimi verilememiştir. Ancak elde edilen değerlerin farklı yöntem kullanılarak, farklı kalınlıklarda hazırlanan aynı tip yapılar için literatürde verilen değerlere uygun olduğu görülmüştür (Tsuda vd 1983, $\eta = \%5$, Kennedy ve Haneman 1983 $\eta = \%3,6-4,9$). Elde edilen verimin daha büyük olmamasının ve Şekil 5.6'da görüldüğü gibi sıcaklıkla azalmasının pek çok fiziksel nedeni vardır. Bunlardan en önemlisi güneş pilinin seri ve paralel direncidir ve her ikisi de doldurma çarpanını belirleyen büyüklüklerdir. Yapılan güneş pillerinin aydınlık akım-gerilim eğrilerinden grafik yöntemlerle seri dirençleri $R_s = 700\Omega - 1000\Omega$, paralel dirençleri ise $R_p = 17-32 k\Omega$ olarak elde edilmiştir. Yeniden birleşme merkezleri, tuzaklar, p⁺, i, n⁺ ve metal kontaklar arası yüzey durumları, akımın kusursuz bir p/n ekleme olduğu gibi ters beslemede doymaya gitmesini engeller. Akımın, gerilime ve sıcaklığa bağlı olmasına,

verimin sıcaklıkla azalmasına sebep olur. ITO içersindeki indiyumun, püskürtme sırasında yarıiletken içersine sızarak p^+/i eklemeni bozması (Kitagawa vd 1983, Hamakawa ve Okamoto 1983), filim içersinde ışık ve sıcaklık yüzünden hidrat, SiO_2 , H_2O oluşumu ve zayıf hidrojen bağlarının kırılması da (Tsuda vd 1983) verimi etkiler. Çok kesin olmamakla beraber yüzey durumlarının yaratılmasında en önemli katkının ITO'dan geldiği söylenebilir. Örneğin, üzerine a-Si:H'un kaplanması sırasında bazı silisyum atomlarının ITO'daki oksijenle birleşerek SiO_2 tabakası oluşturmaları, yapının seri direncinin 1000Ω gibi yüksek kabul edilebilecek (Thomas 1983, Kuboi 1983) değerlere çıkması ve verimin azalmasına neden olmaktadır. p,i,n tipi filimlerin aynı odacıkta hazırlanması nedeniyle i tabakasındaki boron ve fosfor kirliliği de (Möller vd 1982, Maruska vd 1983) verimin daha fazla olmasını engellemiştir.

ITO/a-SiC:H(p^+)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Al yapılarına ait engel yüksekliği Anderson (1962) tarafından kristal heteroyapılar için elde edilen (3.5) bağıntısından yararlanılarak hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklardaki ters beslem karanlık akım-gerilim ölçüleri kullanılarak küçük sıcaklık bölgesinde $V_{bi} = 0,526$ eV olarak bulunmuştur. Bulunan bu engel yüksekliği Nonomura vd'nin (1983) alevli boşalma yöntemi kullanarak hazırladıkları ITO/ μ C-Si(n)/a-Si:H(i)/a-SiC:H(p)/SS (paslanmaz çelik) ve SnO_2 /a-SiC:H(p)/a-Si:H(i)/ μ C-Si(n)/Al p/i/n heteroyapıları için geri-yüzey-yansımali-elektro-soğurum (BASREA) yöntemiyle buldukları engel yükseklikleri ile aynı büyüklük basamağındadır. Yukarıda ulaşılan ve büyüklük basamağı mantıklı görünen değerler veren bu yöntemin, amorf heteroyapılarda da tutarlı olacağı böylece ortaya konulmaktadır.

ITO/a-SiC:H(p^+)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Al yapılarında uzun süreli aydınlatma ve zamanla, aydınlık, karanlık akım-gerilim belirtgenlerinde, diyot özelliklerinde ve güneş pili parametrelerinde değişmeler olduğu belirtilmişti (Bkz. 5.2.4). Yapılarda Kesim 5.2.4'de değinilen değişikliklere sebep olabilecek kaynaklar şunlar olabilir:

- Aydınlanma ile deşik difüzyon uzunluğunun değişmesi (Kennedy ve Haneman 1983)
- i tabakasında ışıkla meydana getirilmiş tuzaklar (Staebler vd 1981)

- Diyot ideallik faktöründeki artma dolayısıyla yeniden birleşme akımının artması, eklem özelliklerindeki değişme (Tsuda vd 1983)
- p tabakasında ve p/i ara-yüzeyinde bor atomlarından kaynaklanan elektron tuzakları (Mishima vd 1985)
- Yarı kararlı kusurlar (Crandall ve Staebler 1983)
- Seri dirençte değişmeler (Hanak ve Korsun 1982)
- Film özelliklerinde meydana gelen değişmeler (örneğin, zayıf hidrojen bağlarının kırılması)(Tsuda vd 1983).

Film hazırlanmasında alevli boşalma ve RF magnetron püskürtme yönteminin birlikte kullanılması ve p tipi tabaka olarak a-SiC:H kaplanması nedeniyle, yapıların heteroyapı özelliğinde olması buna karşılık diğer araştırmacıların film hazırlamada alevli boşalma yöntemini kullanmaları ve yapıların aynı yarıiletken (Homojunction) yapılmaları gibi farklılıklar olmasına rağmen

- aydınlatmayla kısa dalgaboyu bölgesinde toplam verimin genel görünümünün Staebler vd'nin (1981) deneysel sonuçlarına dikkate değer şekilde uyduğu
- diyot ideallik faktörü ile doğrultma oranındaki değişmelerden eklem özelliklerinin değiştiği, yeniden birleşme oranında ve tuzaklarda artma olduğu ve bu hususun Tsuda vd'nin (1983) sonuçları ile tutarlılık içersinde bulunduğu söylenebilir.

Diğer taraftan dalgaboyuna göre incelenmiş olan kısa devre akımının uzun dalga boyu kısmında aydınlanma ile Kennedy ve Hanemann'ın (1983) önerdiği gibi bir değişiklik bu çalışmada gözlenmemiştir (Bkz. Kesim 5.23). Bu yüzden deşik difüzyon uzunluğunda önemli bir değişimin olmadığı anlaşılmıştır. Yani uzun süreli aydınlanma ve zaman içersinde pil veriminde meydana gelen değişmeye i tabakasında, p/i arayüzeyinde meydana gelen tuzakların ve eklemdeki küçük değişmelerin sebep olduğu anlaşılmaktadır ve bu farklı sonucun Kennedy ve Hanemann'ın (1983) film tabaka kalınlıklarında ve yapıdaki farklılığından kaynaklandığı sonucuna varılabilir.

Aydınlanma ve zamanla meydana gelen değişmelerin yok edilmesi için yapılan tavlama deneylerinde pil belirtgenlerinin tamamıyla eski durumlarına dönmediği ve bunun Kennedy ve Hanemann'ın (1983)

gözlemleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür. Ters beslemede 2 V'ta 130°C de yapılan tavlamanın, 200°C de açık devre şartlarında yapılan tavlama ile kısa devre akımında ve verimde artış olması, Swartz'ın (1984) sonuçlarına uymakta ise de V_{oc} 'nin ve ff 'nin azalması gibi farklılıklar göze çarpmaktadır. I_{sc} 'deki artış μr 'nin, dolayısıyla difüzyon uzunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır. Diyot ideallik faktörünün aydınlatma yapılmadan önceki duruma dönmesinin ışıkla oluşturulmuş tuzakların tavlama ile ortadan kaldırılması sonucu ile kendini gösterdiği söylenebilir. Diğer taraftan doğrultma oranı ile V_{oc} 'deki değişim ise pilin engel yüksekliğindeki değişime bağlanabilir. Çünkü, açık devre gerilimi engel yüksekliği ile orantılıdır (Hack ve Shur 1983).

Metal/yarıiletken eklem kavramına göre Ag, Au ve Cu'nun iş fonksiyonu a-Si:H'un iş fonksiyonundan büyüktür. Bu yüzden eklem yapılan yarıiletkenin n tipi oluşu nedeniyle Au/a-Si:H, Ag/a-Si:H ve Cu/a-Si:H eklemlerinde potansiyel engeli oluşmasını ve doğrultucu eklem meydana gelmesini gerektirmiştir. Yapıya düz beslem uygulandığında potansiyel engeli küçülüp elektronların yarıiletkenden metale geçmeleri kolaylaştığından akım, gerilimle üstel olarak artacaktır. Ters beslemede potansiyel engeli büyüyeceğinden yarıiletken tarafındaki elektronların metale geçmesi güçleşecektir. Akımın, gerilimle değişimi Kesim 5.3.1'de değinilen nedenlerle tam bir doymaya erişmez ve gerilimle kademeli olarak artar. Bu her üç yapı içinde gözlenmiştir. Bu davranış Serin (1983), Tsai vd'le (1981) uyumludur.

$Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr$, $Ag/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr$ ve $Cu/a-Si:H(i)/a-Si:H(n^+)/Cr$ yapılarından geçen akımın ve doğrultma oranınının küçük olması, aradaki i tabakasının çok kalın, öz direncinin çok büyük olmasına, metal/a-Si:H(i) ve a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺) filmler arasındaki yüzey durumlarına, filmler içerisindeki tuzak durumlarına bağlıdır. Şekil 5.16, 5.17, 5.18'deki düz beslem eğrilerinden yararlanarak $V > \frac{3kT}{q}$ değerleri için diyot ideallik faktörü $n_{Au} = 3,8$, $n_{Ag} = 3,7$ ve $n_{Cu} = 4,1$ olarak bulunmuştur. Bakırlı yapılarda ideallik faktörünün daha büyük olması, $Cu/a-Si:H$ arayüzeyinde daha fazla yüzey durumu olduğunu göstermektedir. Yapıların, sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçmelerinden yapıdan geçen akımın hem ters, hem de düz

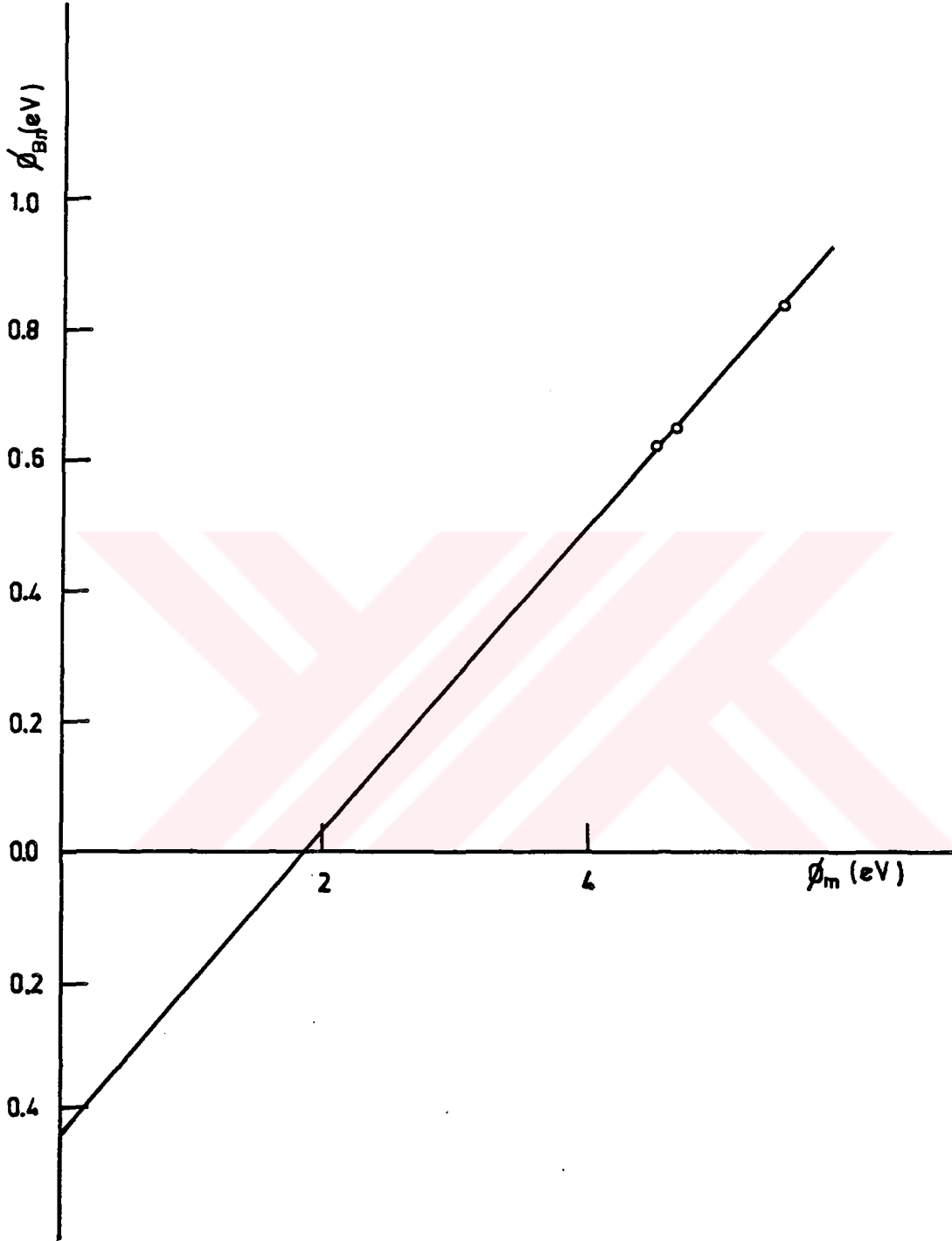
beslemde sıcaklıkla arttığı gözlenmiştir. a-Si:H'un elektron mobilitesi yaklaşık $2 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ arasında olduğundan akım akışı difüzyonla sınırlıdır, bu yüzden yapıların yukarıda değinilen sıcaklığa bağlı J-V ölçümlerine dayanan ϕ_{Bn} engel yüksekliği hesaplanırken, difüzyon teorisi kullanılmıştır. Au'lu yapılar için engel yüksekliği $\phi_{Bn} = 0,78 \text{ eV}$, Cu'lu yapılar için $\phi_{Bn} = 0,65 \text{ eV}$ ve Ag'li yapılar için $\phi_{Bn} = 0,55 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin Vieux-Rochaz vd'nin (1979) $\phi_{Bn} = 0,850 \text{ eV}$ (Au'lu yapılar için) ve Serin'in (1984) $\phi_{Bn} = 0,735 \text{ eV}$ (Cu'lu yapılar için) değerleriyle tutarlı bir yaklaşıklıkta olduğu söylenebilir. Bulunan engel yüksekliklerinin metallerin iş fonksiyonuna karşı değişimi çizilmiş (Şekil 6.1) ve (2.21) bağıntısına uyan bir doğru bulunmuştur. Şekil 6.1'den, yapıların beklendiği gibi kusursuz durumdan farklı olduğu, yapının engel yüksekliğinin (ϕ_{Bn}), metalin iş fonksiyonu (ϕ_M) ve yüzey durumları (D_s) tarafından etkilendiği görülmektedir. Şekil 6.1'deki doğruyu veren bağıntı

$$\phi_{Bn} = 0,23 \phi_M - 0,43 \quad (6.1)$$

olarak bulunmuştur. Elde edilen bu deneysel sonuç Wronski ve Carlson'un (1977) alevli boşalma yöntemi ile elde ettikleri deneysel sonuçlarla uyum içindedir.

Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapılarında sabit oda sıcaklığında zamana göre ve farklı sıcaklık değerlerinde zamana göre alınan ölçümlerin ikisinde de hem ters hem düz beslemde akımda azalma görülmüştür. Farklı sıcaklık değerlerinde zamana göre alınan ölçümlerden hesaplanan ϕ_{Bn} değerlerinin Şekil 5.3.4'de zamanla artarak doymaya gittiği anlaşılmaktadır. Yapıların engel yüksekliğini metalin iş fonksiyonu ve yüzey durumlarına bağlayan (6.1) bağıntısındaki $C_3 = 0,43$ değerini sabit alarak ve bu değeri (3.21) bağıntısında kullanarak ϕ_{Bn} değerleri için C_2 değerleri bulunmuştur. Bulunan C_2 değerleri (3.24)'de yerine konularak yüzey durum yoğunlukları hesaplanmıştır. Çizelge 6.1'den görüldüğü gibi yüzey durum yoğunlukları zamanla azalmaktadır. Diyot ideallik faktörü de zamanla azalmaktadır.

Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapılarında yapılan tavlama deneylerinde alınan ölçümlerden yapının akım gerilim belirtgenlerinde çok büyük değişimler gözlenmiş, yapının doğrultma faktörünün



Şekil 6.1. Au, Ag ve Cu'lı Schottky diyodlarının engel yüksekliklerinin (ϕ_{Bn}) metallerin iş fonksiyonuna göre değişimi

Çizelge 6.1. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında farklı zamanlarda hesaplanmış durum yoğunlukları

Zaman (saat)	0	72	120	240
$D_s \left(\frac{\text{Durum eV}}{\text{cm}^2} \right)$	$4.41 \cdot 10^{13}$	$4.04 \cdot 10^{13}$	$4.02 \cdot 10^{13}$	$3.98 \cdot 10^{13}$

tavlama sıcaklığıyla artarak doymaya gittiği (Şekil 5.32), diyod ideallik faktörünün ise azalarak doymaya gittiği gözlenmiştir. Yapının engel yüksekliği her tavlama sıcaklığından sonra hesaplanmış ve artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin arttığı görülmüştür (Çizelge 5.1). Bu engel yükseklikleri kullanılarak yapının yüzey durum yoğunlukları yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanmış ve yüzey durum yoğunluklarının artan tavlama sıcaklığıyla azaldığı görülmüştür (Çizelge 6.2).

Buna göre Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n)/Cr yapısının artan tavlama sıcaklığıyla ve zamanla Schottky diyodu özelliklerinin iyileştiği ve kararlılık kazandığı, yani numune özelliklerinin pozitif yönde geliştiği söylenebilir. Bu değişmelere sebep olabilecek kaynakları şöyle sıralayabiliriz:

- Kristalleşme (Thompson 1983)
- a-Si:H film üzerine metal kontak yapılmadan yüzeyinde oluşabilecek oksit tabakası
- a-Si:H'un elektriksel iletkenliğindeki değişimler (Tsai 1983)
- Au/a-Si:H(i) arasındaki yüzey durumları
- a-Si:H(n⁺)/Cr arasındaki yüzey durumları.

Çizelge 6.2. Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr yapısında çeşitli tavlama sıcaklıkları için hesaplanmış yüzey durum yoğunlukları

Sıcaklık (°C)	23	70	100	125	150	200
$D_s \left(\frac{\text{Durum eV}}{\text{cm}^2} \right)$	$4.4 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{13}$	$4.3 \cdot 10^{13}$	$4.2 \cdot 10^{13}$	$4.0 \cdot 10^{13}$	$4.0 \cdot 10^{13}$

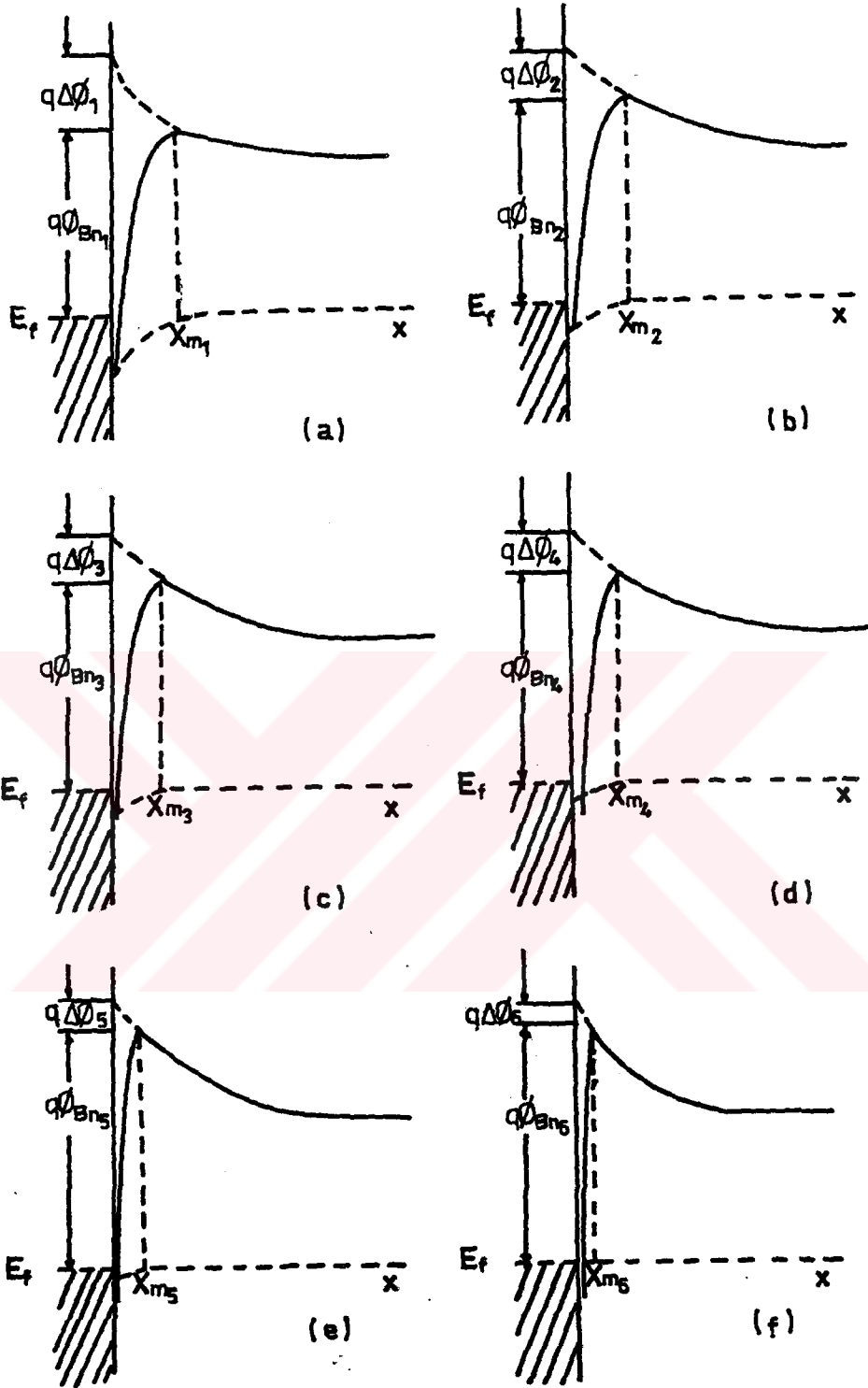
Bunların birini diğerinden ayırt etmek güç bir problemdir. Raman saçılması, TEM, Scanning Auger mikroprobe ve Schottky elektriksel ölçmeleri, Au ve a-Si:H film arasında kristalleşme ve altın-silisyum karışımı olduğunu göstermiştir. Tavlama ile ilgili bulgularımızı Thompson vd (1983), Wronski ve Carlson (1977), Derrien vd (1981) ve Tsai vd'nin (1981, 1982) bulguları ile karşılaştırdığımızda film hazırlama ve deney şartlarındaki değişmelere karşın hemen hemen aynı olduğu anlaşılmaktadır. Tavlama ile diyot belirtgenlerinin gelişmesi, diyot ideallik faktörünün azalması doğrultma oranının artması diğer araştırmacılarla benzer olan gözlemlerdir. Film hazırlama yöntemleri farklıdır. Thompson vd (1983), Wronski ve Carlson (1977), Derrien vd (1981) ve Tsai vd'i (1981, 1982) film hazırlanmasında, alevli boşalma yöntemini kullanmışlardır, diyot ideallik faktörü 1'e yakındır. Bu çalışmada ise numuneler, film kalitesi diğer tekniklere göre düşük olan RF magnetron püskürtme yöntemi ile hazırlanmış, i ve n⁺ tipi filmlerin aynı odacıkta hazırlanması yapıların diyot ideallik faktörünün çok büyük olmasına neden olmuştur. Deneysel şartlar farklıdır, diğer araştırmacıların tavlama deneyini 200°C de boşlukta 15 dakika süreyle yapmalarına karşı bu çalışmada daha önce Kesim 5.3.3'de bahsedildiği gibi deney hava ortamında farklı sıcaklıklarda yapılmıştır. Bütün bu değinilen farklılıklara rağmen yukarıda değinilen diyot özelliklerinde tavlama ile meydana gelen gelişmelerin film hazırlama yönteminden ve tavlamanın yapıldığı ortamdan etkilenmediği sonucu çıkarılabilir.

Au/a-Si:H arayüzeyinde en etkili parametre, yüzey durumlarıdır. Yüzey durumları, Au'un a-Si:H üzerine kaplanması sırasında oluşmaya başlamıştır. Au'ın buharlaşması sırasında, buharlaşma için gereken 2600°C'ye erişilmiş, Au atomları a-Si:H yüzeyine ulaştıklarında a-Si:H içindeki birkaç atomik tabakadaki termodinamik dengeyi bozarak, bu tabakaların a-Si:H'un kristalleşmesi için gerekli 650°C'ye (Tsai 1977) yükselmesine sebep olmuştur. Bu yüzden kristalleşmenin, Si atomlarının Au içine sızmasının, Au-Si karışımı yaratılmasının ve bazı kompleks bileşiklerin oluşmasının buharlaşmayla başladığı düşünülmüştür. Zamana karşı incelenen numunelerde ve tavlanan numunelerde görülen aynı gelişmeler, bunu doğrulamaktadır. Arayüzeyde meydana gelen bu tür reaksiyonların tavlama sıcaklığıyla hızlanarak yapının akım-gerilim belirtgenlerinde değişiklik meydana getirmeleri ile saptanmaları mümkün olmaktadır.

Au/a-Si:H yapısında yüzey durumlarının Fermi düzeyine etkisine bakarak, problemi anlamak mümkündür. Arayüz bölgesinde yüzey durumları nedeniyle Fermi düzeyi düz olmayıp bu bölgede aşağı doğru kıvrılmıştır (Şekil 6.2). Kıvrılma miktarı kabaca yüzey durum sayısı ile orantılıdır. Kristalleşme hızı ve Au içerisine sızan Si atomlarının sayısının, tavlama sıcaklığıyla artmakta olduğu, yüzey durumlarının sayısının azaldığı, deneysel olarak gözlenmiştir. Bu durum yüzey durumlarında tuzaklanmış olan elektronların ısıl olarak iletim bandına uyarıldıklarını ve tekrar eski yerlerine dönmediklerini gösterir. Böylece metal/yarıiletken arayüzeyinde aşağı doğru kıvrılmış olan Fermi düzeyi, yüzey durumları tavlama ile azaldıkça yukarıya doğru kayacak ve kusursuz duruma ulaşacaktır. Sonuçta engel yüksekliği ϕ_{Bn} ve difüzyon potansiyeli V_{bi} artan tavlama sıcaklığıyla artacak; $\Delta\phi_n$ engel alçalma değeri ve x_M , artan tavlama sıcaklığıyla azalacaktır (Şekil 6.2). Artan tavlama sıcaklığıyla yüzey durumları azaldığı için diyod ideallik faktörü azalacak, doğrultma oranı ise artacaktır (Serin vd 1987).

6.2. Öneriler

Bu çalışmada ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapılarında yaklaşık %4 verim elde edilmiştir. Verimin bu düşük değerine, i ve n⁺ tabakasının aynı odacıkta kaplanması yüzünden i tabakasında fosfor kirlenmesi; a-Si'un kaplanması sırasında ITO'daki oksijenle silisyumun birleşerek SiO₂ oluşturmasıyla seri direncin büyümesi; ITO'daki indiyumun engele sızarak p/i engelini bozması neden olmaktadır. Daha yüksek verimli piller elde etmek için ince film tabakaları ayrı odacıklarda hazırlanmalı, ön kontak olarak ITO yerine indiyum ve oksijen bulundurmayan, öz direnci çok küçük, ışık geçirme katsayısı büyük, yansıma ve soğurma katsayısı küçük iletken alt tabakalar geliştirilmelidir. Işıkla aydınlanma altında pil verimlerinde azalma görülmüştür. Bu, ışıkla tuzakların arttığını gösterir. i tipi filmlerin kalitesi arttırılarak, ışıkla verim azalması belli bir ölçüde azaltılabilir. Aydınlanmış piller 130°C'de 2 V ters beslemede tavlansın, verimin ilk değerine göre yaklaşık iki kat arttığı gözlenmiştir, daha değişik ters beslem gerilimi ve



Şekil 6.2. Metal-yarıiletken engelinde tavlama yönteminden önce ve sonra uzaklığa göre potansiyel enerji dağılımının değişimi a) 23°C (önce); b) 70°C, c) 100°C, d) 125°C, e) 150°C, f) 200°C (tavlama sonrası)

sıcaklıklarda yapılacak tavlamanın verim üzerindeki etkisi araştırılabilir. Ayrıca bu tavlama işlemleri değişik vakum altında yapılarak, oksijen, su buharı ve benzeri safsızlıkların verime etkisi her iki tavlama sonuçları karşılaştırılarak incelenebilir. ITO/a-SiC:H(p⁺)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Al yapılarında engel yüksekliğinin bulunmasında 20°C-60°C karanlık akım-gerilim belirtgenlerinden yararlanılmış ve kristaller için çıkarılmış bir kuram ilk defa böyle bir amorf yapıya uygulanmıştır. Daha yetenekli düzenekler kullanılmasıyla sıcaklık aralığı büyütülerek geniş bir bölgede inceleme yapılabilir.

Au/a-Si:H(i)/a-Si:H(n⁺)/Cr Schottky diyodlarında zamanla ve tavlama sıcaklığıyla meydana gelen değişimler incelenerek bu değişmelerin Au/a-Si:H arayüzeyinde oluşan yüzey durumlarındaki değişmeden kaynaklandığı belirtilmiş ve ileri sürülen bir modelle açıklanmıştır. Değişik metallere yapılmış Schottky diyodlarında aynı incelemeler yapılarak Schottky diyodlarındaki bu tür değişmelerin kaynağı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- ADAMS, W.G. ve DAY, R.E., 1877 . The action of light on selenium. Proc. R. Soc. London. A. 25: 113-115.
- AGARWALA, A., TEWARY, V.K., AGARWAL, S.K. ve JAIN, S.C., 1980. Temperature effects in silicon solar cells. Solid-State Electron. 23: 1021-1028.
- ANDERSON, R.L., 1962. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. Solid-State Elect. 5: 341-351.
- ANDERSON, D.A. ve SPEAR, W.E., 1977. Electrical and optical properties of amorphous silicon carbide, silicon nitride and germanium carbide prepared by the glow discharge technique. Phil. Mag. 35: 1-16.
- BARDEEN, J., 1947. Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. Phys. Rev. 71 (10): 717-727.
- BEQUEREL, E., 1839. On electric effects under the influence of solar radiation. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci. 9: 561-563.
- CARLSON, D.E., 1977. Amorf silicon solar cells. IEEE Trans. Electron Devices ED. 24 (4): 449-453.
- CARLSON, D.E., 1980. Recent developments in amorphous silicon solar cells. Sol. Energy. Mater. 3: 503-518.
- CARLSON, D.E. ve WRONSKI, C.R., 1976. Amorphous silicon solar cell. Appl. Phys. Lett. 28 (11): 671-673.
- CARLSON, D.E., SMITH, R.W., ZANZUCCHI, P.J. ve FRENCHU, W.R., 1982. Investigation of microcrystalline films produced by a dc glow discharge in silane and hydrogen. Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 1372-1375.
- CHAPIN, D.M., FULLER, C.S. ve PEARSON, G.L., 1954. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J. Appl. Phys. 25: 676-677.
- CHITTICK, R.C., ALEXANDER, J.H. ve STERLING, H.F., 1969. Preparation and properties of amorphous silicon. J. Elektrochem. Soc. 116 (1): 77-81.
- COWLEY, A.M. ve SZE, S.M., 1965. Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. J. Appl. Phys. 36 (10): 3212-3220.
- CRANDALL, R.S. ve STAEBLER, D.L., 1983. Properties of the defect causing solar cell degradation. Solar Cells. 9: 63-74.

- CROWELL, C.R., SHORE, H.B. ve LABATE, E.E., 1965 . Surface-state and interface effects in Schottky barriers at n-type silicon surfaces. J. Appl. Phys. 36 (12): 3843-3850.
- DERRIEN, J., COHEN, C., CROS, A., LAYET, J.M., SALVAN, F., ABEL, F., BOULLIARD, J.C., DOMANGE, J.L. ve SOTTO, M., 1981. Au on Si(111): A study of the interface under UHV conditions and its modifications in air by surface techniques and MeV ion scattering. Appl. Phys. Lett. 39 (11): 915-917.
- DERSCH, H., STUKE, J. ve BEICHLER, J., 1981. Light-induced dangling bonds in hydrogenated amorphous silicon. Appl. Phys. Lett. 38 (6): 456-458.
- DRESNER, J., SZOSTAK, D.J. ve GOLDSTEIN, B., 1981. Diffusion length of holes in a-Si:H by the surface photovoltage method. Appl. Phys. Lett. 38 (12): 998-999.
- FAHRENBRUCH, A.L. ve BUBE, H.R., 1983. Fundamentals of Solar Cells Academic Press, Newyork.
- GUHA, S., 1984. Failure of reciprocity in light-induced changes in hydrogenated amorphous silicon alloys. Appl. Phys. Lett. 45 (5): 569-570.
- GREEN, M.A. ve GODFREY, R.B., 1976. MIS solar cell-General theory and new experimental results for silicon. Appl. Phys. Lett. 29 (9): 610-612.
- GRIMSHAW, J.A. ve TOWNSEND, W.G., 1980. Photon induced degradation in crystalline silicon Schottky barrier solar cells. Solar Cells. 2: 55-63.
- HACK, M. ve SHUR, M., 1983. Theoretical modeling of amorphous silicon-based alloy p/i/n solar cells. J. Appl. Phys. 54 (10): 5858-5863.
- HACK, M. ve SHUR, M., 1985. Analysis of light-induced degradation in amorphous silicon alloy p/i/n solar cells. Proc. 11th International Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors. Rome, 1985. North-Holland, Amsterdam, 1481-1483.
- HAMAKAWA, Y. ve OKAMOTO, H., 1983. Amorphous semiconductor: Technologies and devices. North-Holland, Amsterdam.
- HANAK, J.J. ve KORSUN, V., 1982. Optical stability studies of a-Si:H solar cells. Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 1381-1383.
- HIRABAYASKI, I., MORIGAKI, K. ve NITTA, S., 1980. New evidence for defect creation by high optical excitation in glow discharge amorphous silicon. Jpn. J. Appl. 19 (2): L357-L360.

- JAN, Z.S., BUBE, R.H. ve KNIGHTS, J.C., 1979. Field effect and thermoelectric power on arsenic-doped amorphous silicon. *J. Elect. Mater.* 8 (1): 47-56.
- JAN, Z.S., BUBE, R.H. ve KNIGHTS, J.C., 1980. Field effect and thermoelectric power on boron doped amorphous silicon. *J. Appl. Phys.* 51: 3278-3281.
- KENNEDY, D.F. ve HANEMAN, D., 1983. Degradation and regeneration of amorphous silicon solar cells. *J. Appl. Phys.* 55 (4): 1168-1173.
- KITAGAWA, M., MORI, K., ISHIHARA, S., HIRAO, T., YOSHIOKA, Y. ve KOHIKI, S., 1983. Interaction of hydrogenated amorphous silicon films with transparent conductive films. *J. Appl. Phys.* 54 (6): 3269-3271.
- KONAGAI, M., MIYAMOTO, H. ve TAKAHASHI, K., 1980. Minority carrier diffusion length in amorphous Si Schottky barrier solar cells. *Jpn. J. Appl. Phys.* 19 (10): 1923-1928.
- KUBOI, O., 1981. Degradation of ITO film in glow discharge plasma. *Jpn. J. Appl. Phys.* 20: L783-L786.
- KUWANO, Y., TSUDA, S. ve OHNISHI, M., 1981. Energy conversion process of p/i/n amorphous Si solar cells. *Jpn. J. Appl. Phys.* 21 (2): 235-241.
- LANG, D.V., COHEN, J.D., HARBISON, J.P. ve SERGENT, A.M., 1982. Observation of photoinduced changes in the bulk density of gap states in hydrogenated amorphous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 40 (6): 474-476.
- LeCOMBER, P.G. ve SPEAR, W.E., 1970. Electronic transport in amorphous silicon films. *Phys. Rev. Lett.* 25: 509-511.
- LOFERSKI, J.J., 1956. Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. *J. Appl. Phys.* 27 (7): 777-784.
- LOVELAND, R.J., SPEAR, W.E. ve AL-SHARBOTY, A., 1973/1974. Photoconductivity and absorption in amorphous Si. *J. Non-Cryst. Solids.* 13: 55-68.
- MARUSKA, H.P., MOUSTAKAS, T.D. ve HICKS, M.C., 1983. Effects of optical stress on the properties of sputtered amorphous silicon solar cells and thin films. *Solar Cells.* 9 (1-2): 37-51.
- MISHIMA, Y., SEDA, S., YANAGISAWA, S. ve ASAMA, K., 1985. Photocurrent spectroscopy in a-Si:H diodes. Proc. 11th International Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors. Rome, 1985. North-Holland, Amsterdam, 1425-1428.

- MOLHOTRA, A.K. ve NEUDECK, G.W., 1976. Effects of hydrogen contamination on the localized states in amorphous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 28 (1): 47-49.
- MORIGAKI, K., HIRABAYASKI, I. ve NAKAYAMA, M., 1980. Fatigue effect in luminescence of glow discharge amorphous silicon at low temperatures. *Solid State Commun.* 33: 851-856.
- MÖLLER, N., RAUSCHER, B., KRÜHLER, W., PLATTNER, R. ve PFLEIDERER, H., 1982. Boron contamination of a-Si solar cells. *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* 1376-1379.
- NAKAMURA, N., WATANABE, K., NISHIKUNI, M., HISHIKAWA, Y., TSUDA, S., NISHIWAKI, H., OHNISHI, M. ve KUWANO, Y., 1983. Influence of excess carriers on the Staebler and Wronski effect of a-Si solar cells. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 59&60: 1139-1142.
- NONOMURA, S., OKAMOTO, H., FUKUMOTO, K., KASHIMA, Y. ve HAMAKAWA, Y., 1983. Analysis of junction and film properties in high efficiency amorphous silicon solar cells. *Solar Cells.* 11: 97-104.
- OHSAWA, M., HAMA, T., ICHIMURA, T., AKASAKA, T., SAKAI, H., ISHIDA, S., ve UCHIDA, Y., 1985. Effects of deposition temperature and hydrogen evolution on light induced defects in a-Si:H. *Proc. 11th International Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductor.* Rome, 1985, North-Holland, Amsterdam, 401-404.
- PALZ, W., 1978. *Solar Electricity.* Butterworth, London.
- PANKOVE, J.I. ve BERKEYHEISER, J.E., 1980. Light-induced radiative recombination centers in hydrogenated amorphous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 37 (8): 705-706.
- RHODERICK, E.H., 1980. *Metal-semiconductor contacts.* Clarendon Press, Oxford.
- SEKI, K., YAMAMOTO, H., SASANO, A. ve TSUKADA, T., 1984. Semitransparent silicide electrodes utilizing interaction between hydrogenated amorphous silicon and metals. *Appl. Phys. Lett.* 44 (7): 682-683.
- SERİN, N., 1983. Foto-elektrik yöntemle amorf silisyum Schottky diyodlarında engel yüksekliği tayini. *Doğa Bilim dergisi A.* 7 (3): 412-415.
- SERİN, N., 1984. Cu/a-Si:H/a-Si:H(n-type)/Cr Schottky diodes prepared by a RF magnetron sputter technique. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 17: 1485-1492.

- SERİN, T., AYDINURAZ, A. ve SERİN, N., 1987. The annealing effect on the Au/a-Si:H/a-Si:H(n-type)/Cr Schottky diodes prepared by a RF magnetron sputtering technique. *Semiconductor Science and Technology* (baskıda).
- SHARMA, B.L., 1984. *Metal-semiconductor Schottky Barrier Junctions and their application*. Plenum Pub. London.
- SPEAR, W.E. ve LeCOMBER, P.G., 1975. Substitutional doping of amorphous silicon. *Solid State Commun.* 17: 1193-1196.
- SPEAR, W.E., LeCOMBER, P.G., KINMOND, S. ve BRODSKY, M.H., 1976. Amorphous silicon p/n junction. *Appl. Phys. Lett.* 28 (2): 105-107.
- STAEBLER, D.L. ve WRONSKI, C.R., 1977. Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Si. *Appl. Phys. Lett.* 31 (4): 292-295.
- STAEBLER, D.L. ve WRONSKI, C.R., 1980. Optically induced conductivity changes in discharge-produced hydrogenated amorphous silicon. *J. Appl. Phys.* 51 (6): 3262-3268.
- STAEBLER, D.L., CRANDALL, R.S. ve WILLIAMS, R., 1981. Stability of n/i/p amorphous silicon solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 39 (9): 733-735.
- STOICA, T., 1981. Light-induced changes in a-Si:H analysed by field effect measurements. *J. Phys. Colloq.* C4.42 (10 Suppl.): 407-410.
- SWARTZ, G.A., 1984. Reverse bias and heat treatment to improve performance of a-Si solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 44 (7): 697-699.
- TANIELLIAN, M., 1981. Adsorbate effects on the electrical conductance of a-Si:H. *Phil. Mag.* 45 (4): 435-462.
- TAWADA, Y., KONDO, M., OKAMOTO, H. ve HAMAKAWA, Y., 1982. Properties and structure of alpha SiC-H for high efficiency alpha-Si Solar Cell. *J. Appl. Phys.* 53 (7): 5273-5281.
- THOMAS III, J.H., 1983. X-ray photoelectron spectroscopy study of hydrogen plasma interactions with a thin oxide surface. *Appl. Phys. Lett.* 42 (9): 794-796.
- THOMPSON, M.J., JOHNSON, N.M., NEMANICH, R.J. ve TSAI, C.C., 1981. Silicide formation in Pd-a-Si:H Schottky barriers. *Appl. Phys. Lett.* 39 (3): 274-276.
- THOMPSON, M.J., NEMANICH, R.J. ve TSAI, C.C., 1983. Schottky barrier amorphous-crystalline interface formation. *Surface Science.* 132: 250-263.

- TSAI, C.C., FRITZSCHE, H., TANIELIAN, P.J., GACZI, P.J., PERSANS, P.D., VESAGHI, M.A., 1977. in Amorphous and Liquid Semiconductors, edited by W.E. Spear Univ. Edinburg, Centre for Indust. Consultancy 8 Liaison.
- TSAI, C.C., THOMPSON, M.J. ve NEMANICH, R.J., 1981. Structural and electrical properties of noble metal-hydrogenated amorphous silicon interfaces. J. Phys. Colloq. C4.42 (10 suppl.) 1077-1080.
- TSAI, C.C., NEMANICH, R.J. ve THOMPSON, M.J., 1982. Interfacial reactions between Au and hydrogenated amorphous Si. J. Vac. Sci. Technol. 21 (2): 632-636.
- TSUDA, S., NAKAMURA, N., WATANABE, K., TAKAHAMA, T., NISHIWAKI, H., OHNISHI, M. ve KUWANO, Y., 1983. Light induced instability of amorphous silicon photovoltaic cells. Solar Cells. 9(1-2): 25-36.
- TURNER, M.J. ve RHODERICK, E.H., 1968. Metal-silicon Schottky barriers. Solid. St. Electron. 11: 291-300.
- WARASHINA, M. ve USHIROKAWA, A., 1982. Difference of characteristics of a-Si:H solar cells between under illumination and dark Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 21 (2): 247-250.
- VIEUX-ROCHAZ, L., CHENEVAS-PAULE, A., JOUSSE, D. ve VIKTOROVITCH, P., 1979. Schottky barriers on sputtered hydrogenated amorphous silicon: photovoltaic properties and capacitance-voltage characteristics. Proc. Photovoltaic Energy Conf. (Berlin) 295-302.
- WRONSKI, C.R., 1977. Electron properties of amorphous silicon in solar cell operation. IEEE Trans. Electron Devices ED. 24 (4): 351-357.
- WRONSKI, C.R., 1978. Photovoltaic properties of undoped discharge-produced amorphous silicon. Jpn. J. Appl. Phys. IV. Suppl. 17 (1): 299-305.
- WRONSKI, C.R., CARLSON, D.E. ve DANIEL, R.E., 1976. Schottky barrier characteristics of metal amorphous silicon diodes. Appl. Phys. Lett. 29 (9): 602-605.
- WRONSKI, C.R. ve CARLSON, D.E., 1977. Surface states and barrier heights of metal-amorphous silicon Schottky barriers. Solid State Commun. 23: 421-424.

EK p/i/n yapılarında akım-gerilim ölçümlerinde kullanılan bilgisayar programı

```

10  OPTION BASE 1
20  DIM D(3),Ud(3)
30  COM A(2,41)
40  ASSIGN %Volt TO 710
50  ASSIGN %Amp TO 724
60  ON KEY 9 LABEL "END" GOTO Leave
70  ON KEY 8 LABEL "STOP" GOTO 380
80  !
90 Begin:  PRINT CHR$(12)
100  GCLEAR
110  ALPHA ON
120  GRAPHICS OFF
130  INPUT "MAX. VOLTAGE (POSITIVE)",U
140  IF U>40 THEN
150  PRINT "HIGH VOLTAGE; REDUCED TO 40V"
160  U=40
170  END IF
180  INPUT "MULTIPLICATOR",Mu1
190  J=1
200  R1=0
210  R2=0
220  U1=U+1.E-3
230  FOR I=-U TO U1 STEP U/20
240  Vol=I
250  IF ABS(Vol)<1.E-3 THEN
260  Vol=0
270  END IF
280  CALL Spannung(0,Vol)
290  WAIT 1
300  A(1,J)=Vol
310  A(2,J)=FNStrom(Mu1)
320  PRINT A(1,J),A(2,J)
330  IF A(2,J)>R1 THEN R1=A(2,J)
340  IF A(2,J)<R2 THEN R2=A(2,J)
350  J=J+1
360  NEXT I
370  J=J-1
380  CALL Spannung(0,0)
390  FOR I=1 TO 3
400  D(I)=FNDist((R1),(-R2),I)
410  Ud(I)=FNDist((U),(U),I)
420  NEXT I
430  ON KEY 0 LABEL "RE-START" GOTO Begin
440  ON KEY 1 LABEL "GRAPH" GOTO Graph
450  ON KEY 2 LABEL "PLOT" GOTO Plotten
460  ON KEY 7 LABEL "LIST" GOTO Printer
470  !
480 Spin:  GOTO Spin
490  !
500 Graph: PRINT CHR$(12)

```

```

510  GINIT
520  GRAPHICS ON
530  PLOTTER IS 3, "INTERNAL"
540  CSIZE 5,.6
550  CALL Plott(J,R1,R2,D(1),D(2),D(3),U,Ud(1),Ud(2),Ud(3))
560  GOTO Spin
570  !
580  Printer:ALPHA ON
590  GRAPHICS OFF
600  PRINTER IS 701
610  PRINT "Voltage","Current"
620  FOR I=1 TO J
630  PRINT A(1,I),A(2,I)
640  NEXT I
650  PRINTER IS 1
660  GOTO Spin
670  Plotten: GINIT
680  GRAPHICS ON
690  PLOTTER IS 705,"HPGL"
700  CSIZE 3,.6
710  CALL Plott(J,R1,R2,D(1),D(2),D(3),U,Ud(1),Ud(2),Ud(3))
720  CSIZE 4,.6
730  MOVE U,0
740  LORG 7
750  LABEL "U ΔVÜ"
760  MOVE 0,R1
770  DEG
780  LDIR 90
790  LORG 9
800  LABEL "I ΔmAÜ"
810  LDIR 0
820  FRAME
830  PENUP
840  WINDOW 0,100,0,100
850  LORG 1
860  CSIZE 5,.6
870  MOVE 5,90
880  ON KEY 4 LABEL "COMMENT" GOTO Comment
890  GOTO Spin
900  !
910  Comment:INPUT A$
920  LABEL A$
930  PENUP
940  CSIZE 2,.6
950  GOTO Spin
960  !
970  Leave: MOVE 100,100
980  GCLEAR
990  PRINT CHR$(12)
1000 ALPHA ON
1010 GRAPHICS OFF
1020 PLOTTER IS 3, "INTERNAL"
1030 END
1040 !
1050 !
1060 SUB Spannung (U1,U2)

```

```

1070 ASSIGN sVolt TO 710
1080 B%A1,3U="UAL"
1090 C%A1,3U="UBL"
1100 IF U2>15 THEN C%A1,3U="UBH"
1110 B%A4,10U=VAL$(U1)
1120 C%A4,10U=VAL$(U2)
1130 OUTPUT sVolt;B#,C#
1140 SEND 7;LISTEN 10 DATA UNL
1150 SUBEND
1160 !
1170 DEF FNStrom(Mulpli)
1180 ASSIGN sAmp TO 724
1190 ENTER sAmp;Strom
1200 Strom=Strom*Mulpli
1210 RETURN Strom
1220 FNEND
1230 !
1240 DEF FNDist(B,C,J)
1250 DIM Dis(3)
1260 INTEGER I
1270 IF C>B THEN B=C
1280 I=0
1290 WHILE B<10
1300 B=B*10
1310 I=I+1
1320 END WHILE
1330 IF B<20 THEN
1340 Dis(1)=1
1350 Dis(2)=5
1360 Dis(3)=5
1370 ELSE
1380 Dis(1)=5
1390 Dis(2)=10
1400 Dis(3)=2
1410 END IF
1420 IF B>40 THEN
1430 Dis(1)=10
1440 Dis(2)=20
1450 Dis(3)=1
1460 END IF
1470 FOR K=1 TO I
1480 Dis(1)=Dis(1)/10
1490 Dis(2)=Dis(2)/10
1500 NEXT K
1510 Dist=Dis(J)
1520 RETURN Dist
1530 FNEND
1540 !
1550 SUB Plott(Anz,Omax,Umax,Y1,Y2,Y3,Xmax,X1,X2,X3)
1560 OPTION BASE 1
1570 COM A(2,41)
1580 Xmax=DROUND(Xmax,2)+X1
1590 X=Xmax*1.1
1600 Omax=DROUND(Omax,2)+Y1
1610 O=Omax*1.1

```

```
1620 Umax=DROUND(Umax,2)-Y1
1630 U=Umax*1.1
1640 WINDOW -X,X,U,0
1650 AXES X1,Y1,0,0,X3,Y3
1660 MOVE A(1,1),A(2,1)
1670 FOR I=2 TO Anz
1680 DRAW A(1,I),A(2,I)
1690 NEXT I
1700 LORG 6
1710 FOR X=0 TO Xmax STEP X2
1720 MOVE X,0
1730 LABEL X
1740 NEXT X
1750 FOR X=-X2 TO -Xmax STEP -X2
1760 MOVE X,0
1770 LABEL X
1780 NEXT X
1790 LORG 8
1800 FOR Y=-Y2 TO Umax STEP -Y2
1810 MOVE 0,Y
1820 LABEL Y
1830 NEXT Y
1840 FOR Y=Y2 TO Omax STEP Y2
1850 MOVE 0,Y
1860 LABEL Y
1870 NEXT Y
1880 PENUP
1890 SUBEND
```

Y. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi