

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

139837

FeSi₂/Si EKLEMLERİN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİ

139837

Fizikçi Beyhan TATAR

FBE Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Tayyar CAFEROV

Prof.Dr. Fatma TEPEHAN

Prof.Dr. Hasan Tatlıpınar

[Handwritten signatures]

İSTANBUL, 2003

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Silisyumun Kristal Yapısı ve Özellikleri.....	2
1.3 FeSi ₂ Kristal Yapısı ve Özellikleri	4
1.4 β-FeSi ₂ / Si Heteroeklemler (Literatür Özeti)	6
1.5 p-n Eklemler	10
1.6 Heteroeklemler	12
1.7 Eklemlerin Elektrik Özellikleri	15
1.8 Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristikleri	16
1.9 Omik Kontaklar	20
2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
2.1 β-FeSi ₂ Bulk Polikristallerin Büyütülmesi	24
2.2 β-FeSi ₂ / Si Heteroeklemlerin Hazırlanması	25
2.2.1 Silisyum Altlıkların Hazırlanması	25
2.2.2 Fe/Si ve β-FeSi ₂ /Si eklemlerin Hazırlanması	25
2.3 DSC Ölçümleri	27
2.4 FeSi ₂ Örneklerin X-Işınları Kırınım analizi	28
2.5 FeSi ₂ 'nin Elektrik Karakteristiklerinin Ölçülmesi	29
2.5.1 İletkenlik Tipi	29
2.5.2 Öz direnç.....	30
2.6 Akım-Gerilim Karakteristikleri	32
2.7 Eklemlerin Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi	33
3. BULGULAR	35
3.1 FeSi ₂ Bulk Örneklerin X-ışınları ve DSC Analizi	35
3.2 FeSi ₂ Yarıiletkenin Elektriksel Özellikleri	36
3.3 Fe / Si Eklemlerin Elektrik Karakteristikleri	37
3.4 FeSi ₂ / Si Heteroeklemlerin Elektrik ve Fotovoltaik Özellikleri	42
3.5 FeWSi ₂ / Si Heteroeklemlerin Elektrik ve Fotovoltaik Karakteristikleri	46
4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	50
KAYNAKLAR.....	52

ÖZGEÇMİŞ.....	55
---------------	----



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Elmas kristal yapısı2
Şekil 1.2	Fe-Si alaşımların faz diyagramı4
Şekil 1.3	FeSi ₂ kristal yapısı (Imai,2001) ve enerji band diyagramı (Lange,2001).....4
Şekil 1.4	(a) β -FeSi ₂ /n-Si heteroeklem (b) ince tabaka kompozit (c) nano parçacıklı kompozit (d) β -FeSi ₂ /n-Si heteroeklemin denge durumundaki enerji band diyagramı (Okajima,2001)9
Şekil 1.5	n-ve p-tipi yarıiletkenin temas hali11
Şekil 1.6	p-n eklem enerji band diyagramı12
Şekil 1.7	(a) n-ve p-tipi yarıiletkenlerin ve (b) heteroeklemin enerji band diyagramları (Green,1982)13
Şekil 1.8	Farklı örgü sabitlerine sahip yapılar arasındaki dislokasyonlar (Green,1982)14
Şekil 1.9	Diyodun (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği (Green,1982)16
Şekil 1.10	Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi (Oral,1979)17
Şekil 1.11	Tipik bir güneş pilinin a) üstten ve b) yandan şematik gösterimi (Sze,1981)18
Şekil 1.12	Temastan önce metal ve n-tipi yarıiletkenin band diyagramı ($\phi_s > \phi_m$)20
Şekil 1.13	Temas halinde metal ve n-tipi yarıiletkenin band diyagramı ($\phi_s > \phi_m$)20
Şekil 1.14	Temastan önce metal ve p-tipi yarıiletkenin band diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)21
Şekil 1.15	Temastan halinde metal ve p-tipi yarıiletkenin band diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)21
Şekil 1.16	Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri (a) küçük doğrultuya sahip omik kontak (b) dirençli gerilime bağlı olan omik kontak (Caferov,1998)23
Şekil 2.1	β -FeSi ₂ ve Fe(W)Si ₂ bulk örneklerin sentezinde uygulanan Sıcaklık-tavlama süresi rejimi Fe/n-Si ve Fe/p-Si eklemler24
Şekil 2.2	Elektron-beam buharlaştırma setinin şematik gösterimi26
Şekil 2.3	1.tür Fe/n-Si ve 2.tür Fe/p-Si eklemler.....26
Şekil 2.4	1.tip FeSi ₂ /n-Si ve 2.tip FeSi ₂ /p-Si heteroeklemler27
Şekil 2.5	β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemler27
Şekil 2.6	Difraktometrenin diyagramı (Caferov,1998)28
Şekil 2.7	TEMK yöntemiyle a) n-tipi, b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik Tipi ölçüm devresi (Caferov,1998)30
Şekil 2.8	Örneklerde kontakların yerleşimi30
Şekil 2.9	Van der Pauw ölçüm devresi a) R ₁ b) R ₂ dirençlerinin bulunması31
Şekil 2.10	Van der Pauw yöntemi için düzeltme fonksiyonunun R ₁ /R ₂ 'ye göre değişimi31
Şekil 2.11	β -FeSi ₂ - n-Si heteroeklemlerden kontakların alınması32
Şekil 2.12	Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi32
Şekil 2.13	Fotoduyarlılığın spektral ölçüm devresi33
Şekil 3.1	FeSi ₂ bulk Örneğin X-Işını Kırınım Deseni.....35
Şekil 3.2	FeSi ₂ Örneğin DSC Analizi36
Şekil 3.3a	Fe/n-Si eklemının akım-gerim karakteristikleri(T _{alt} =25 ⁰ C) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından37
Şekil 3.3b	Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri(T _{alt} =25 ⁰ C) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....38

Şekil 3.4	Fe/n-Si eklemin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği Aydınlatmalar (1) film tarafından (2) altlık tarafından.....	38
Şekil 3.5a	Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	39
Şekil 3.5b	Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	39
Şekil 3.6a	Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	40
Şekil 3.6b	Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	40
Şekil 3.7a	Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	41
Şekil 3.7b	Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	41
Şekil 3.8	FeSi ₂ /n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	42
Şekil 3.9	FeSi ₂ /n-Si heteroeklemler için fotoakım yoğunluğunu-gerilim karakteristiği...	43
Şekil 3.10a	FeSi ₂ /p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	43
Şekil 3.10b	FeSi ₂ /p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	44
Şekil 3.11a	FeSi ₂ /n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	44
Şekil 3.11b	FeSi ₂ /n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	45
Şekil 3.12a	FeSi ₂ /p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	45
Şekil 3.12b	FeSi ₂ /p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	46
Şekil 3.13a	β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından.....	47
Şekil 3.13b	β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T=25^{\circ}C$) (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından.....	48
Şekil 3.14	β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemlerin fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrisi.....	48
Şekil 3.15	β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemlerin fotoduyarlılık spektral dağılımı.....	49

ÇİZİLGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Silisyumun parametreleri (Caferov 2000)	3
Çizelge 1.2 β -FeSi ₂ 'nin bazı parametreleri	5
Çizelge 3.1 Fe/Si eklemlerin fotovoltaiik parametreleri	39
Çizelge 3.2 β -FeWSi ₂ /n-Si heteroeklemlerin fotovoltaiik parametreleri	49



ÖNSÖZ

Bu çalışmada FeSi_2/Si eklemlerin elektriksel karakteristikleri incelendi. Bu konuyu belirleyip çalışmamı yönlendiren ve bilgisinden her aşamada faydalandığım danışmanım Sayın Prof.Dr Tayyar caferov'a, uygun bir çalışma ortamı sağlayan dekanımız Sayın Prof.Dr Durul ören'e ve bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr Emel çingir'ya çok teşekkür ederim.

Bu tezin tamamlanmasında benim için çok değerli katkıları bulunan Katıhal Elektroniği çalışma grubundaki arkadaşlarıma özellikle Arş.Gör. Serço serkis yeşilkaya'ya, yazım aşamasında bana destek olan Fizik Bölümündeki araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tezi kısa bir süre önce kaybettiğim babama ithaf ediyorum...



ÖZET

Bu çalışmada üç farklı yöntemle elde edilen FeSi_2/Si eklemlerin elektrik ve fotovoltatik özellikleri incelendi. İlk olarak farklı altlık sıcaklıklarında n- tipi ve p- tipi Silisyum üzerine elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile $\text{Fe}/\text{n-Si}$ ve $\text{Fe}/\text{p-Si}$ eklemler elde edildi. Karanlıkta ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri incelenmesinden, eklemlerin doğrultma özelliklerine ve fotoduyarlılığa sahip olduğu gözlemlendi. Fe/Si eklemler içerisinde oda sıcaklığında elde edilen $\text{Fe}/\text{n-Si}$ eklemlerin en yüksek fotovoltatik parametrelere sahip olduğu tespit edildi ($V_{oc}=210$ mV, $J_{sc}=33,6$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Diğer bir yöntemde ise toz demir ve Silisyum stokiometrik oranda karıştırılarak hazırlanan tavlamanamış FeSi_2 tabletlerin ve vakumda sentezlenmiş bulk polikristal $\beta\text{-FeSi}_2$ parçacıkların, $T_{alt}=250^\circ\text{C}$ 'de n- tipi ve p- tipi Si altlıklar üzerine elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile FeSi_2/Si heteroeiklemler elde edildi. Bu eklemlerde de yapılan akım-gerilim ölçümleri neticesinde $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ heteroeiklemler en yüksek fotovoltatik parametrelere sahip olduğu tespit edildi ($V_{oc}=105$ mV, $J_{sc}=1,1$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Büyütülen bulk örneklerin kristal yapısı, fazı ve elektriksel özellikleri sırasıyla X-ışınları kırınımı, Taramalı diferansiyel kalorimetri ve Özdirenç ölçümlerinden belirlendi. Elde edilen bulk polikristal $\beta\text{-FeSi}_2$ örnekler ortorombik yapıya ve p-tipi iletkenliğe sahip olduğu görüldü.

Son yöntemde ise Fe(W)Si_2 bulk polikristalinin cam ve n-Si üzerine buharlaştırılmasıyla $\text{FeWSi}_2/\text{cam}$ ve $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroeiklemler elde edildi. Elde edilen tüm heteroeiklemler arasında p- $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ en yüksek fotovoltatik parametreler ($V_{oc}=275$ mV, $J_{sc}=180$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $\text{FF}=0,23$) gösterdi. Cam üzerindeki $\beta\text{-FeWSi}_2$ filmin p-tipi ve öz direnci $\rho=2,7 \cdot 10^{-3}$ $\Omega\text{-cm}$ olduğu ölçüldü. Ayrıca p- $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroeiklemin $\lambda=350\text{-}1500$ nm aralığında foto duyarlılık gösterdiği görüldü. Bu heteroeiklemlerin başka bir dikkat çeken özelliği ve doğrultma katsayısının ($I_{dogru}/I_{ters}=1194$) ve ters yöndeki aydınlıkta akımın, karanlıktaki akıma oranının (yani fotoduyarlılığın) yüksek olmasıdır ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}=1790$). Bu özellik p- $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroeiklemleri fotodiyod gibi kullanılmasına imkan sağlar.

Anahtar Kelimeler: $\beta\text{-FeSi}_2$, Fe/Si eklemler, FeSi_2/Si heteroeiklemler, Elektrik, Fotovoltatik

ABSTRACT

In this work electrical and photovoltaic properties of FeSi_2/Si junctions, which obtained in 3 different methods, are investigated. First of all $\text{Fe}/\text{n-Si}$ and $\text{Fe}/\text{p-Si}$ junctions are obtained on n-type and p-type silicon by e-beam evaporation at different substrate temperatures. It was seen, from the investigation of dark and illuminated current-voltage characteristics, that junctions have rectifying properties and photosensitivity. It is determined that $\text{Fe}/\text{n-Si}$ junctions which obtained at room temperature have the highest photovoltaic parameters ($V_{oc}=210 \text{ mV}$, $J_{sc}=33,6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

In other method FeSi_2 tablets, obtained by the stoichiometric powder mixture of iron and silicon, and $\beta\text{-FeSi}_2$ which synthesized in vacuum are evaporated by e-beam onto n-type and p-type Si substrates at $T=250^\circ\text{C}$ and FeSi_2/Si heterojunctions are obtained. From the current-voltage measurements of these junctions, photovoltaic parameters of $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ heterojunctions are found as the highest ($V_{oc}=105 \text{ mV}$, $J_{sc}=1,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Crystal structure, phase and electrical properties of the grown bulk samples are determined from the X-ray diffractions, DSC and resistivity measurements respectively. $\beta\text{-FeSi}_2$ samples have orthorhombic structure and p-type conductivity.

In last method, $\text{Fe(W)Si}_2/\text{glass}$ and $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heterojunctions are obtained by the evaporation of Fe(W)Si_2 bulk polycrystalline on to glass and n-Si. $\text{p-Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ junctions have the highest photovoltaic parameters ($V_{oc}=275 \text{ mV}$, $J_{sc}=180 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ and $\text{FF}=0,23$) of all heterojunctions. Fe(W)Si_2 film on the glass has p-type conductivity and resistivity of film was $\rho=2,7 \cdot 10^{-3} \Omega\text{-cm}$. Besides it was seen that $\text{p-Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heterojunction has photosensitivity in $\lambda=350\text{-}1800 \text{ nm}$. Another important point for these heterojunctions is the high rectifying coefficient ($I_{\text{direct}}/I_{\text{reverse}}=1194$), and the ratio of illuminated current to the dark current (i.e. photosensitivity) under the reverse bias ($I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}=1790$). Referring to these properties, $\text{p-Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heterojunctions can be used as photodiodes.

Keywords: $\beta\text{-FeSi}_2$, Fe/Si junctions, FeSi_2/Si heterojunctions, Electric, Photovoltaic

1. GENEL BİLGİLER

1.1 GİRİŞ

Tabiatta diğer enerji kaynaklarının tükenmesi ve enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla güneş pilleri daha fazla önem kazanmıştır. Bu amaçla üretilen fotovoltaik güneş pilleri güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken yapılardır.

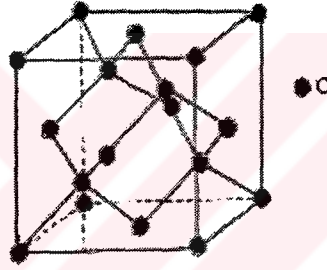
Gelecekte fotovoltaik aletlerin toptan üretimi düşünüldüğünde mevcut olan materyaller çok önemli bir yer kaplar. In (indiyum) yüksek verimli ince film güneş pili üretiminde InP ve CuIn(Ga)Se₂ gibi çok önemli bir elementtir. Fotovoltaik aletlerin madde üretiminde elementin bozulma zamanı kadar onun dünya kabuğunda bol miktarda bulunması, tüketim oranı ve yeniden kullanılabilirliğiyle de direkt ilgilidir. Bazı kimyasal elementler çevreyle uyumlu olmaları, doğada bol bulunmaları ve yeniden kullanılabilirmeleri ile diğer elementlere göre daha avantajlıdır. Bunlardan bazıları atmosferde bulunan N (nitrojen) ve O (oksijen), dünyanın kabuğunda zengin olarak bulunan Si, Ca, Sr, Ba ve yeniden kullanımı çok yaygın olan Fe(demir), Al(alüminyum) ve Cu(bakır) gibi metaller. Gelecekte üretilecek ince film güneş pilleri için kullanılacak malzemenin tabiatta bol bulunmasının yanında zehirli olmamaları ve çevreyle dost olmaları da önemlidir (Makita,1997). β -FeSi₂ minerali hem tabiatta çok bol bulunan hem de zehirli olmayan bir malzemedir ve bu malzeme ilerisi için bu özellikleriyle umut vericidir.

Goss'un keşfinden beri Fe-Si temelli malzemeler biliniyordu ve günümüze kadar çeşitli yapısal fazlar bulundu, örneğin Fe₃Si, Fe₅Si₃, ϵ -FeSi, β -FeSi₂, γ -FeSi₂ ve α -Fe₂Si₅ (Kakemoto). Bunlar içerisinde özellikle son yıllarda β -FeSi₂ malzeme ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu da bu malzemenin optiksel duyarlılığı ile ilgilidir. β -faz demir disilicade (β -FeSi₂) silikon teknolojisi ile uyumlu yeni bir çeşit yarıiletkendir ve dikkate değer bir çekiciliğe sahiptir. Silisyum bazlı yarıiletkenler arasında, β -FeSi₂ optoelektronik, termoelektronik ve fotovoltaik aletler arasında onun mümkün olabilen kullanımından dolayı çok yoğun çalışılan bir materyaldir. Bunun yanında, β -FeSi₂ ışığı güçlü emiciliği ile yeni bir güneş pili malzemesi için ümit vericidir. Dünya üzerinde bol oranda silisyum ve demir bulunması fotovoltaik malzemeler içerisinde demir disilicade (β -FeSi₂) kullanımını ön plana çıkartmıştır.

Bu çalışmada $\beta\text{-FeSi}_2$ / Si heteroeklemlerinin hazırlanması, elektrik ve fotoelektrik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Silisyumun Kristal Yapısı ve Özellikleri

Peryodik tablonun IV. Grubunun elementlerinden silisyum katıhal fiziğinde çok önemli bir yapı olan, elmas ve çinko blendi yapısında kristalleşir. Bu yapıda her bir silisyum atomu şekil 1.1’ de olduğu gibi düzenli bir dörtyüzlünün köşelerinde olan, dört tane en yakın komşusuyla kovalent bağlıdır. Şekilde gösterilen elmas yapıda, (000) ve $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$ konumlarında iki atom bulunmaktadır. Elmas yapıda tek atomlu bir ilkel hücre oluşturma olanağı yoktur ve birim hücresinde 8 atom bulunur.



Şekil 1.1 : Elmas yapı

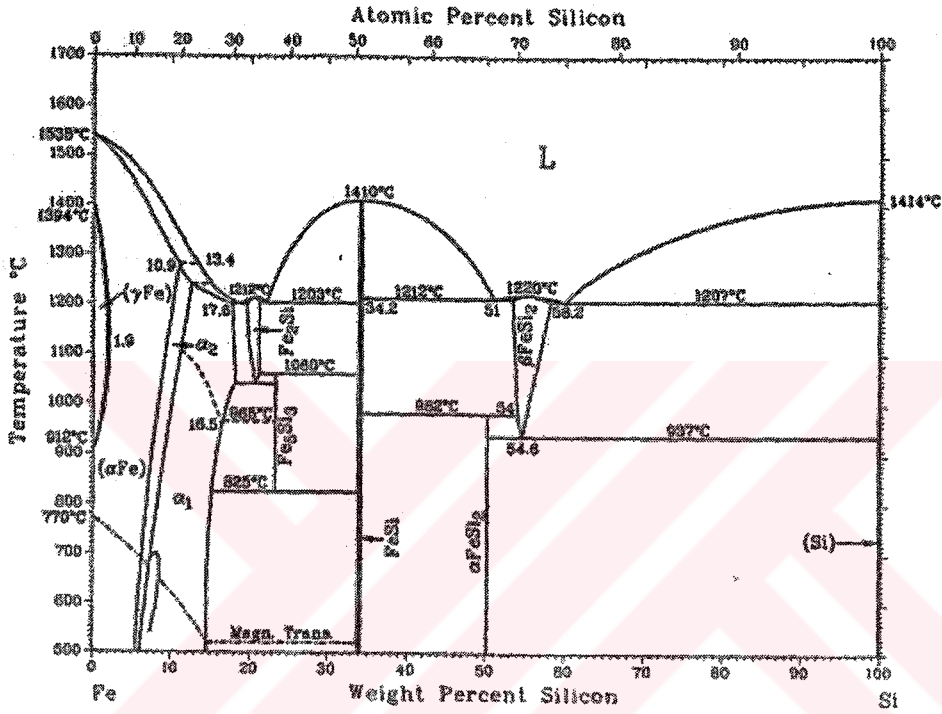
Yapının primitif hücresinde hacim köşegeninin dörtte biri kadar birbirinin içine girmiş silisyuma ait iki tane yüzey merkezli kübik örgü (fcc) bulunmaktadır. Bu yapının elmas yapıdan tek farkı, elmas yapıda karbon atomları bulunmakta, bu yapıda ise yerlerine silisyum atomları bulunmaktadır. Tablo 1.1’ de silisyum yarıiletkenine ait bazı özellikler verilmektedir.

Çizelge 1.1 Silisyumun parametreleri (Caferov 2000)

Mekanik, termal ve dielektrik özellikler	Değeri
Atom numarası	14
Atomik kütle	28.1
Örgü parametresi	0.5431 nm
Kristal Yoğunluğu	2.33 g / cm ³
Erime Sıcaklığı	1420 °C
Dielektrik katsayısı	11.9
Yasak band genişliği	0 K 1.21 eV 300 K 1.12 eV
Özden yük taşıyıcıların konsantrasyonu	1.45x10 ¹⁰ cm ⁻³
Özdirenç (300 K)	2.30x 10 ⁵ Ωcm
Mobilite :	
Elektronların (300 K)	1500 cm ² / Vs
Deliklerin (300 K)	480 cm ² / Vs
Difüzyon Katsayısı	
Elektronların (300 K)	34 cm ² / s
Deliklerin (300 K)	14 cm ² / s
Kırılma indisi	3.9
Elektron alınganlığı (afinitesi)	4.01 eV
İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu	2.8x10 ¹⁹ cm ⁻³
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu	1.02x10 ¹⁹ cm ⁻³
Elektronların etkin kütlesi	$m_n^* = 0.98/0.19 m_0$
Deliklerin etkin kütlesi	$m_p^* = 0.5/0.16 m_0$
Termal genleşme katsayısı	2.6x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Isı iletkenliği (300 K)	1.45 W/ cm K
Isı sığası	0.7 J/gK
Yük taşıyıcıların Debay uzunluğu	24 µm
Isıl iletkenlik katsayısı	0.9 W/cm ² K
Azınlık yük taşıyıcıların yaşama süresi	2.5 ns
Optik fononun enerjisi	0.063 eV
Fe' nin Si' da enerji düzeyleri	E _c -0,55 eV (D) ; E _v +0,40 eV (D)

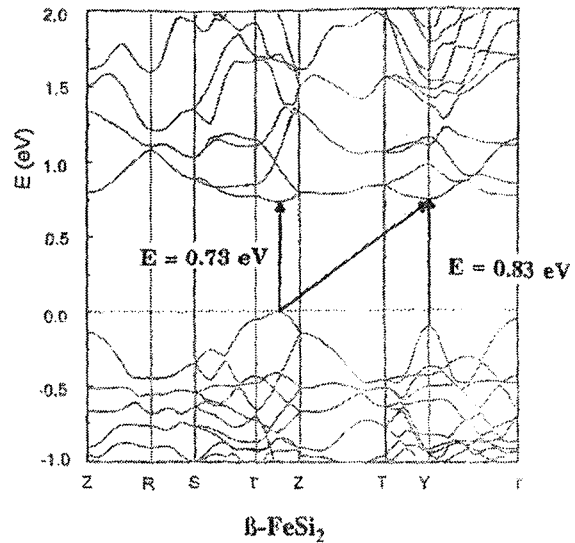
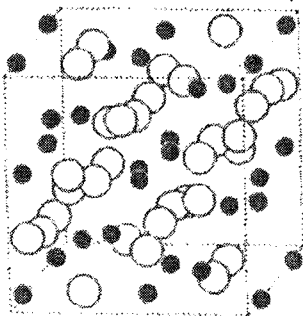
1.3 FeSi₂ Kristal Yapısı ve Özellikleri

Demir disilicade yüksek sıcaklık fazı α -FeSi₂ ve düşük sıcaklık fazı β -FeSi₂ durumunda iki fazda bulunabilir. α -FeSi₂ ve β -FeSi₂ arasında 937 °C denge şartı altında faz geçişleri oluşur. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi Fe-Si malzeme çeşitli oranlarda ve değişik sıcaklıklarda farklı yapısal fazlarda bulunur.



Şekil 1.2 Fe-Si Alaşımların Faz Diyagramı

β -FeSi₂ (Fe₁₆Si₃₂)



Şekil 1.3 Kristal yapısı(Imai 2001) ve enerji band diyagramı (Lange 2001)

Metalik yüksek sıcaklık α -fazı ara geçişler için kullanışlı olmasına rağmen, yarıiletken β -fazı çok daha ilgi çekicidir. Bu çeşit fazların temel kristal parametreleri çok zengin değildir.

β -FeSi₂ faz bir stoichiometric bileşimdir ve şekil 1.3'de görüldüğü gibide β -FeSi₂'nin hücresinde 16 demir atomu ve 32 silisyum atomu bulunmaktadır. β -FeSi₂ faz örgü parametreleri sırasıyla $a=0.9863$ nm, $b=0.7791$ nm, $c=0.7833$ nm' dir ve kristal orthorombic yapıdadır. Tablo 1.2' de β -FeSi₂ yarıiletkenine ait bazı özellikler bulunmaktadır.

Çizelge 1.2 β -FeSi₂'nin bazı parametreleri (H. Lange1997,Y. Maeda)

Moleküler ağırlığı	112 g
Malzemedeki % silisyum yoğunluğu	53.4 ~ 58.2
Kristal Yoğunluğu	4.93 g/cm ³
β -fazı geçiş sıcaklığı	~800 °C
Erime sıcaklığı	<1220 °C
Örgü parametreleri	$a=0.9865$ nm, $b=0.7791$ nm, $c=0.7833$ nm
Isıl genleşme katsayısı	a eksen $1.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ b ve c eksen $\sim 5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
Isıl iletkenlik	0.685 W/cm K (70 K) 0.122 W/cm K (300K)
Özgül ısı kapasitesi	66.15 (J/mol K) (300K)
Seebeck sabiti	-150 - -450 $\mu\text{V/K}$
Debye sıcaklığı	587-613 K
Statik dielektrik sabiti	22.9-61.6
Optiksel dielektrik sabiti	9.89-31
Elektron alınganlığı	4.33 eV
Özdirenç	2-3 Ωcm
Mobilite :	
Elektronlar	4 cm^2 / Vs
Boşluklar	0.3 cm^2 / Vs
Yasak band genişliği	0.87 eV
Yasak bandın sıcaklıkla değişim hızı sabiti	$3.1 \times 10^{-4} \text{ eV/ K}$

1.4 β -FeSi₂ / Si Heteroeklemler (Literatür Özeti)

Epitaksiyel β -FeSi₂ ince filmlerin tek kristal Si altlık üzerinde büyütülmesi bir çok çalışmada incelenmiştir. Aşağıda β -FeSi₂ / Si heteroeklemlerle ilgili son yıllardaki çalışmalara ait literatür özeti yer almaktadır.

Maeda vd (1999) ilk olarak polikristal p-tipi β -FeSi₂ / n-Si (100) heteroeklemlerden iyon demeti sentezlenmesi (Ion Beam Synthesis, IBS) ile belli bir fotovoltaiik sonuç almışlardır. 800°C altlık sıcaklığında iyon naklini üç kat arttırarak polikristal sürekli tabakalar elde etmişlerdir. Yüksek sıcaklık ve uzun tavlama sürelerinin heteroeklemlerinin fotovoltaiik sonuçlarını çok etkili bir şekilde arttırdığını gösterdiler. Şiddeti 5 mW/ cm² olan beyaz ışık aydınlatması altında maksimum açık devre gerilimini 340 mV elde etmişlerdir. Bununla birlikte 500 °C tavlama rejiminin psuedomorphic metalik γ fazın oluşmasına ve bu fazın p-n eklemlerin fotovoltaiik gerilimine ve düzenine zarar verdiğini saptamışlardır.

Katsumata vd. (1996) Si(100) ve Si(111) altlıklara sırasıyla iki aşamalı tavlama sıcaklığında Fe iyonlarının difüzyonu ile β -FeSi₂ tabakalarını iyon demeti sentezi ile elde etmişlerdir. 600 °C'de ilk tavlama sıcaklığı sabit tutularak ikinci adım tavlama sıcaklığının (T_a) bir fonksiyonu gibi fiziksel özelliklerini tanımlamışlardır. X-ışınları kırınım ölçümleri yalnızca 930 °C altında T_a için Si(100) altlıklarda elde edilen β -fazla ilgilidir. $T_a=875$ ve 915 °C'de Si(111) altlıklar üzerinde elde edilen β -FeSi₂'nin öz direnci 0,1-0,3 Ω cm arasında bulmuşlardır. T_a 'nın arttırılması ile band genişliği 0,83'den 0,7 eV' a düştüğünü optiksel soğurma ölçümleri ile göstermişlerdir. $T_a=875$ °C'de bu iki örneğin 2K içerisindeki photoluminescence spektrumunda yalnızca 0,8 eV' da çok belirgin bir emisyon piki gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, $T_a=915$ °C de Si(111) örneğinde 0,837 eV'da çok keskin bir emisyon çizgisi gözlemlenmiştir. Bunu β -FeSi₂ yarıiletkeninin optiksel ara geçişlerinden kaynaklandığını açıklamışlardır.

Shibata vd. (1996) Yatay eksen donma (Horizontal Gradient Freeze, HGF) metodu ile bulk demir silisidin büyütülmesinde farklı tavlama şartları ile farklı büyütme yöntemleri kullanmışlardır. İn-situ tavlama ve ex-situ tavlama olmak üzere iki çeşit tavlama yöntemi incelemişlerdir. Üç çeşit örnekler hazırlamışlardır ve incelemişlerdir; (i) Örneklerde hiçbir tavlama metodu kullanılmadı (ii) Örneklerde in-situ tavlama metodu kullanıldı (iii) Örneklerde in-situ ve ex-

situ tavlama metotlarının her ikisi de kullanıldı. Malzemenin kalitesi üzerinde büyütme şartlarının ve tavlamanın etkilerini incelemiş ve tartışmışlardır. X-ışınlarının kırınım sonuçlarında in-situ tavlama metodunun α - ϵ eutectic den β -faza peritectic reaksiyonlar için yalnız yeterli olmadığını göstermişlerdir. Bununla birlikte, eğer in-situ tavlama metodundan sonra ex-situ tavlama metodu kullanıldığında, 900°C de 200 saat tavlama şartları daima tek β -faz elde edilmesi için yeterli olmuştur. β -FeSi₂ yarıiletkenin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için 900°C de 300 saat ex-situ tavlama şartları uygundur. Bu şartlar altında hazırlanan örnek p-tipi iletkenlik göstermiştir ve örneğin delik konsantrasyonunu $5,6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak mobilitesini de $1,36 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak bulmuşlardır.

Kakemoto vd (1997) β -FeSi₂ yarıiletkenler çeşitli elektronik,optoelektronik ve enerji aletlerinin kullanımında gelecek vadeden bir materyaldir. Laser buharlaştırma metodu ile Si(100) altlık üzerine β -FeSi₂ filmleri yarıiletken özelliklerini incelemek için hazırlamışlardır. Temelde büyütme için gradyentli yatay donma metodu ile hazırlanan bulk β -FeSi₂ polikristaller kullanmışlardır. Örneği büyütme esnasında fluorescence spektroskopisi ile incelemişlerdir ve aynı anda örneğin yüzey morfolojisini de (RHEED) yüksek enerjili elektron demeti kırınımından gelen yansımalarla incelemişlerdir. Filmlerin karakterizasyonunu X-ışınları kırınımı ile $\beta(220)$ yönelimli olduğunu sunmuşlardır. Oda sıcaklığında optiksel soğurma spektrumu ile band genişliği $\sim 1,2 \text{ eV}$ 'dan büyükken soğurma katsayısının 10^5 cm^{-1} den daha büyük olduğunu göstermişlerdir.

Clark vd (1998) hesaplamalarında, Si(001) üzerine β -FeSi₂(100) heteroepitaksiyel sistemde iki çeşit örgü olduğunu $[A:\beta\text{-FeSi}_2(010) \parallel \text{Si}\langle 110 \rangle$ ve $B:\beta\text{-FeSi}_2(010) \parallel \text{Si}\langle 001 \rangle]$ buldular. Bunlardan A tipi örgü direkt bant yapısına sahipken, B tipi bir indirekt yapıya sahip olduğunu göstermişlerdir. β -FeSi₂'nin optoelektronik özellikler içerisinde direkt bantlı yapı önemli rol aldığı düşünülür, bu da göstermiştir ki β -FeSi₂ film içerisinde düzgün miktarda ayarlama ile Si (001) alt tabakası üzerine heteroepitaksiyel büyütme uygun olarak yapılabilir. Örneğin, Si-Ge tampon tabakaları ile bunun başarılabilceğini göstermişlerdir.

Sugiyama (1999) β -FeSi₂, faz Si (111) ve Si (100) altlıklar üzerine başlıca iyon demeti sentezi (IBS), ışınla epitaksiyel büyütme (reactive deposition epitaxy, RDE), ve moleküler epitaksiyel büyütme (molecular beam epitaxy, MBE) yöntemleriyle hazırlamışlardır. RDE yöntemi ile hazırlanan β -FeSi₂ tabakalar tek kristaldir ve tavlama ile (100) yönelimli

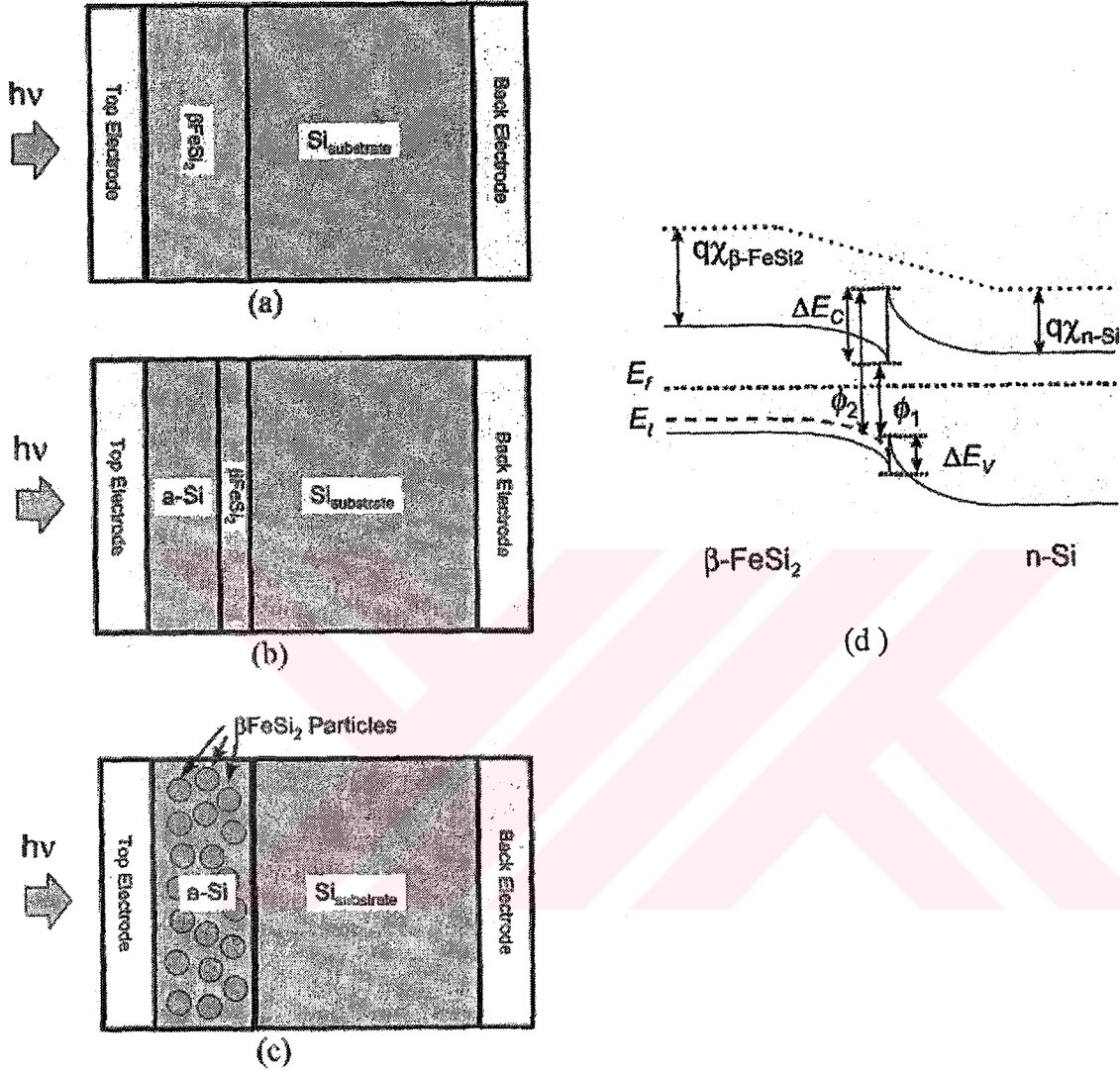
epitaksiyel polikristale dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, MBE Si p-n eklemlerde yalnızca IBS β -FeSi₂ iyi çökeltilerek hazırlanması, 1.5 μ m dalga boylu emisyonu sahip LED'lerin yapılmasında uygulamışlardır, bunların günümüzün optiksel ulaşım sistemi ile uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kakemoto vd. (2000) Magnetik ve fotoemisyon spektroskopisi ölçümleri ile β -FeSi₂ kristalini incelemişlerdir. Minimum 90°C'de β -FeSi₂'nin magnetik alınganlık gösterdiğini görmüşlerdir. Fotoemisyon spektroskopisi ile β -FeSi₂'nin elektronik yapısını çalışmışlardır. Valans band bölgesinde güçlü bir foto enerji bağımlılığı gözlemlemişlerdir. Elektron-elektron etkileşimlerini deneysel datalarla ve ab initio band hesaplamalarını karşılaştırarak tartışmışlardır.

Liu vd.(2000) 600 °C ısıtmada n-tipi Si (100) altlık üzerine demirin odaklamalı lazer büyütme yöntemiyle FeSi₂/Si heteroeklemler ürettir ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiğinin doğrultma gözlemlemişlerdir. 800°C' de üretilen heteroeklemler için doğrultma yönünün değiştiğini görmüşlerdir. 300 nm ile 1100 nm arasındaki yapılan ölçümlerde foto duyarlılığı 800 °C' de üretilenlerde 600°C' de üretilen heteroeklemlerden daha yüksek bulmuşlardır. Aynı zamanda, foto duyarlılığı silisyum tarafından yapılan aydınlatmada film tarafındaki daha yüksek elde etmişlerdir. Burada 1000 nm dalga boyu yakınlarında bir pik gözlemlemişlerdir. Özellikle, 800°C' de üretilen FeSi₂/Si heteroeklemler silisyum tarafından aydınlatma altında 400 nm ile 1100 nm spektrum genişliğinde çok daha duyarlıdır. 100mW/cm² aydınlatma altında açık devre gerilimi ve kısa devre akım yoğunluğunu ölçmüşlerdir.

Okajima vd (2001) fotovoltaiik hücreler referans alındığında, β -FeSi₂ – Si alaşım filmleri silisyumun band bölgesindeki düşük enerjili ışıkla meydana gelmiş taşıyıcıların artması göz önüne alınarak üretilmişlerdir. β -FeSi₂ – Si alaşım sistemi iki çeşit yöntemle hazırlanmıştır. Bunlardan ilki Si altlık ve Si ince film arasında sandwich şeklinde ince tabaka β -FeSi₂ kompozit koyularak hazırlanmış ve onun foto verimliliğini ölçmüşlerdir. Diğer film püskürtme metodu ile Si ve β -FeSi₂ nano parçacıklardan oluşturulmuş bir alaşımdır ve onun ışığa duyarlılığını ölçmüşlerdir. β -FeSi₂' deki taşıyıcıların hareketliliğini kuantum etkisi ile kolaylaştırarak bariyer yüksekliğini düşürerek kontrol altına almayı başarmışlardır. İnce-tabaka alaşım filmleri üzerindeki fotoelektrik verim ölçümlerinde β -FeSi₂ tabakanın

kalınlığının değiştirilmesi ile $\Delta\phi$ bariyer yüksekliğinin azaltılabileceğini göstermişlerdir. 5 nm kalınlığında β -FeSi₂'de $\Delta\phi$ bariyer yüksekliğini 0.12 eV'a düşürmüşlerdir. Aşağıda β -FeSi₂/Si heteroeklemlerin birkaç şekli ve band yapısı yer almaktadır.



Şekil 1.4 (a) β -FeSi₂/n-Si heteroeklem, (b) ince tabaka kompozit, (c) nano parçacıklı kompozit, (d) β -FeSi₂/n-Si heteroeklemin denge durumundaki enerji band diyagramı (Okajima 2001)

Kakemeto vd. (2001) β -FeSi₂ polikristallerini yatay gradyentli donma metodu ile sentezlemişlerdir ve β -FeSi₂ tek kristalini kimyasal buhar taşıma ile büyötmüşlerdir. β -FeSi₂ polikristalini ve tek kristalini optiksel ölçümlerle tanımlamışlardır. Optiksel fononların Raman ve infrared aktivitelerini Raman saçılmaları ve optiksel yansıma ölçümleri ile gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra, di elektrik sabitlerini optiksel yansıma spektrumununun

Kramers-Kronig geçişi ile hesaplamışlardır. β -FeSi₂'nin LO fononunun küçük kutuplu yansımaları di elektrik sabitinin bulunmasında kullanılmasını Fröhlich'in modeli ile tartışmışlardır.

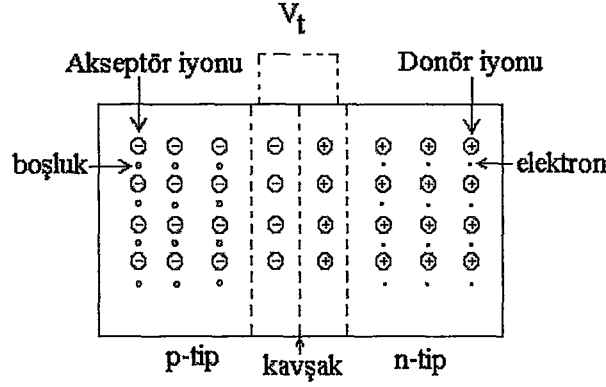
Lourenço vd (2001) 1.5 μ m dalga boyunda çalışan ışık saçan diyotun (light emission diodes, LED) IBS yöntemli ilk başarılı çalışmasından sonra β -FeSi₂/Si (LED)' ler çok daha büyük ilgi çekmeye başlamışlardır. Epitaksiyel silisyum tabaka içerisine demir katkılama ile üretilen aletlerin elektrik,elektronik ve optiksel çalışmalarına burada yer vermişlerdir. Bu aletlerin akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), derin seviyeli düzeylerde geçiş spektroskopisi (Deep level transition spectroscopy, DLTS) ve elektroluminescence (EL) lmlerinin karakteristliklerini incelemişlerdir. 250 ± 25 meV bir aktivasyon enerjisi ile tuzak merkezlerinde çoğunluk taşıyıcıların bulunduğunu DLTS ile göstermişlerdir. Oda sıcaklığında β -FeSi₂/Si 'den elektroluminescence gözlemlemişlerdir. EL sonuçlarının ilk analizinde aletin yapısına bağlı olarak luminescence da belli bir oranda snme olduğunu öne sürmüşlerdir ve sönümün yüzey recombinyonlarıyla ilgili olduğunu düşünmüşlerdir.

Schuller vd (2002) TEM ve fotoluminescence ile karakterize ederek silisyum içerisine yarıiletken FeSi₂' yi IBS yöntemiyle keltirerek β -FeSi₂/Si heteroeklemler üretmişlerdir. 1.55 μ m dalga boyunda snme zamanı ölçüldüğünde 10 K de 10 μ s olarak bulmuşlardır. Fotoluminescence lmlerinin cevaplama sresinde direkt geçiş bulunabilir ki bu hız için bir kanıt değildir. Bununla birlikte, FeSi₂-Si ışık yayan aygıtın (LED) bir gösteriminde elektroluminescence snme zamanını ölçmeyi başarmışlardır. Burada tepki zamanı 30ns' nin altında bir hız göstermiştir.

1.5 p-n Eklemler

Bir p-n ekleminin özellikleri p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin birbirlerine temas ettirildiği düşünülerek açıklanabilir(Süngü, B.2000). Bu durumda temas bölgesinin yakınındaki hareketli yükler yük yoğunluklarının kk olduğu bölgeye doğru hareket ederler. Yani, n-tipi bölgenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar p-tipi bölgeye; p-tipi bölgenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşluklar n-tipi bölgeye geçerler ve eklemin her iki tarafı iyonlaşır. Eklemin n-tipi bölgesindeki atomlar pozitif, p-tipi bölgesindeki atomlar negatif iyonize olur, böylece yk geçişi tamamlanır (şekil 1.5). Eklemin her iki tarafında iyonize olmuş atomlar yönü n-tipi

bölgeden p-tipi bölgeye doğru elektrik alan meydana getirir. İyonize atomlar kristal yapısı içinde sabit yük merkezleridirler ve bölge serbest yüklerden yoksundur. Bu bölgeye *geçiş bölgesi* denir.



Şekil 1.5 n-ve p-tipi yarıiletkenin temas hali (Oral,1979)

Eklemden meydana gelen potansiyel farkı, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçecek boşluklar ve n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçecek elektronlar için bir potansiyel duvarı meydana getirir. Eklemden bu temas potansiyel farkı, her iki bölgenin çoğunluk yük taşıyıcılarının eklemi aşmalarına bir engel oluşturacak durumda olduğu halde, azınlık yük taşıyıcılarının karşı bölgeye geçişlerini kolaylaştıracak yöndedir. Kavşağın bir tarafından diğer tarafına geçen yük taşıyıcılarının meydana getirdiği elektrik alan daha fazla yük taşıyıcılarının geçişine engel teşkil edecek durumda olduğu zaman eklem dengededir.

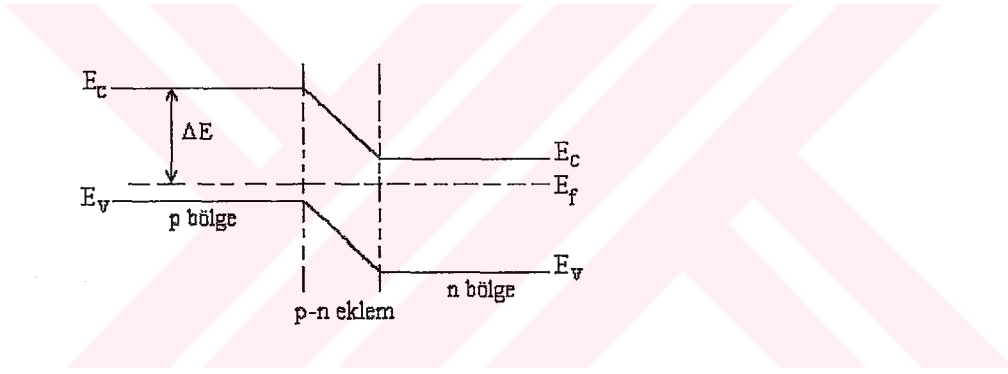
Herhangi bir yol ile eklem civarında elektron-boşluk çifti meydana getirilirse, eklemden mevcut olan elektrik alan, p-tipi bölgenin azınlık yük taşıyıcısı olan elektronun n-tipi bölgeye, n-tipi bölgenin azınlık yük taşıyıcısı olan boşluğun da p-tipi bölgeye geçmesini sağlar; eklemden elektrik alan, eklem civarında meydana gelmiş olan elektron-boşluk çiftini ayırır.

Eklemden elektrik alan hareketli yüklerin yeniden tertibi sonucu meydana gelmiştir, maddenin toplam yükü değişmemiştir. Temas potansiyel farkı V_t , p-n kavşağından bir akım geçmesini sağlayamaz. p-n kavşağında mevcut potansiyel farkının bir akım meydana getirmeyeceği şöyle açıklanabilir: eğer p-n kavşağındaki temas potansiyel farkı bir gerilim kaynağı olsaydı, bunun yarıiletkende meydana getireceği akım, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru olurdu. Fakat böyle bir hal çoğunluk yük taşıyıcılarının eklemden potansiyel duvarını aşmaları demek olduğundan, daha önce sözü edilen denge haline ters düşer. p-n kavşağının

kısa devre yapılması, yük taşıyıcılarına enerji sağlamadığından, eklem dengede kalır ve böylece yarıiletkenlerden akım geçmez.

Böyle bir temas yüzeyinin bulunması halinde, dengeye ulaşıldığı zaman fermi seviyesi her iki bölgede aynı olmalıdır. Eğer aynı olmazsa, eklem bir tarafındaki elektronlar, diğer tarafta bulunanlardan daha yüksek enerjiye sahip olurlardı ve her iki taraftaki maddelere ait fermi seviyeleri aynı olucaya kadar bir taraftan diğer tarafa elektron geçişi olurdu.

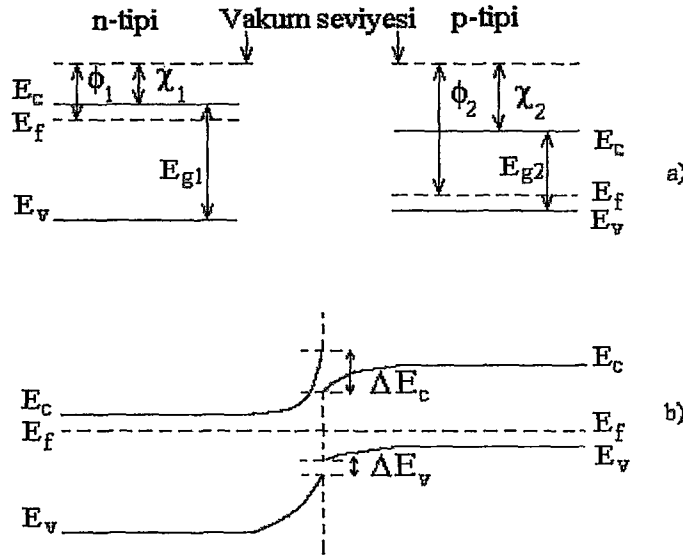
E_f Fermi seviyesi n-tipi yarıiletkende E_c iletkenlik bandına, p-tipi yarıiletkende E_v valans bandına daha yakındır. p-tipi yarıiletkene ait E_c iletkenlik bandı dibi n-tipi yarıiletkene ait iletkenlik bandı dibinin aynı zamanda, n-tipi yarıiletkene ait E_v valans bandı tavanıyla p-tipi yarıiletkene ait valans bandı kenarının aynı seviyede olmayacağı açıktır, bu nedenle bir p-n eklem enerjisi band diyagramı Şekil 1.6'deki gibi olur.



Şekil 1.6 p-n eklem enerjisi band diyagramı

1.6 Heteroeklemler

Homoelemler katkı tipleri farklı olan aynı yarıiletken malzemeler kullanılarak; heteroeklemler ise farklı enerji band aralıklarına sahip farklı iki yarıiletken malzeme kullanılarak elde edilir.

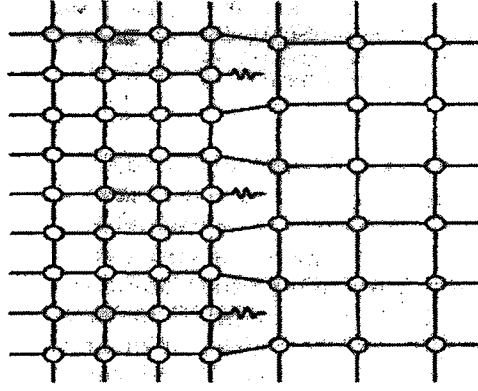


Şekil 1.7 (a) n ve p-tipi yarıiletkenlerin ve (b) n-p heteroeklemin enerji band diyagramları (Green,1982)

Farklı iki yarıiletken malzeme farklı enerji aralığına (E_g), termodinamik iş fonksiyonuna (ϕ), elektron afinitesine (χ) sahiptir. İş fonksiyonu ve elektron afinitesi sırasıyla Fermi seviyesinden ve iletkenlik seviyesinden elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir (Şekil 1.7). Termodinamik iş fonksiyonu yarıiletkenin katkılanma derecesine bağlıdır fakat elektron afinitesi her zaman sabittir, katkılama derecesine veya diğer parametrelere bağlı değildir (Süngü, B.2000). n-tipi ve p-tipi yarıiletken temasa getirildiğinde yasak enerji aralıklarının farklı olması dolayısıyla sınırda bir süreksizlik oluşur. Eğer $\phi_2 > \phi_1$ ise elektronlar n-tipinden p-tipine doğru geçerler, p-tipinde elektron sayısı ve potansiyel enerji artar, işareti ters orantılı olduğundan enerji seviyeleri aşağıya doğru kayar. n-tipinde ise elektron sayısı azaldığından potansiyel enerji azalır, enerji seviyeleri yukarı doğru kayar. Sistem dengeye ulaştığı zaman eklemin her iki tarafındaki Fermi düzeyi çakışıktır ve vakum düzeyi her yerde band kenarlarına paralel ve süreklidir.

$$\Delta E_C = \chi_2 - \chi_1 \quad (1.1)$$

$$\Delta E_V = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_C \quad (1.2)$$



Şekil 1.8 Farklı örgü sabitlerine sahip yapılar arasındaki dislokasyonlar (Green, 1982)

Heteroeklemlerde kullanılan iki yarıiletken arasında örgü sabitlerinin ve termik genleşme katsayılarının kusursuz olarak eşleşmesi pratikte mümkün değildir. Aynı yapı fakat örgü uzayındaki farklılıktan dolayı örgüde kusurlar oluşur. Bu kusurlar ara yüzey dislokasyonları şeklindedir ve yoğunlukları örgüler arasındaki uygunluk derecesine bağlıdır (Şekil 1.8). Kristal örgüdeki kusurlar yasak bantta izinli enerji düzeylerinin artışına neden olur. Bu seviyeler eklem bölgesindedir ve rekombinasyon merkezi gibi davranırlar. Bu bölgenin dar olmasından dolayı akım kuantum mekaniksel tünelleme olayına göre kavşağın bir tarafından diğer tarafına akar. Bu durum güneş pilinin verimini azaltır. Heteroeklemin özelliklerini idealleştirebilmek için mümkün olduğu kadar örgü yapıları benzer yarıiletkenler kullanılmalıdır.

Bir heteroeklem değişik metodlarla elde edilebilir. Bunlar arasında

- İki yarıiletkenin erime noktaları arasındaki fark kullanılarak, eritip tekrar büyütürken yapılan arayüzey-alayım (interface-alloy) tekniği
- Tek kristal yarıiletken altlığın üzerine tek kristal yarıiletken filmin kristalografik doğrultularının üst üste gelmesi ile yapılan epitaksiyel büyütme tekniği
- Bir materyelin diğeri üzerine vakumda çökeltme tekniği vb. yöntemler kullanılır.

Bunlardan epitaksiyel büyütme yöntemi son yıllarda çok sık kullanılmaktadır. Bu yöntemle büyütülmüş filmlere *epitaksiyel filmler* denir. Örneğin, [100] doğrultulu tek kristal GaAs'un yüzeyinde [100] doğrultulu kristal AlGaAs ince filmin yapılması. Bu yöntemle heteroeklem büyütüldüğünde farklı tipte katkılar ve altlıklar kullanarak p-n, n-p, p-p, n-n heteroeklemler elde edilebilir. Bu yapıları *epitaksiyel heteroeklemler* denir. Epitaksiyel yöntemle tek kristal heteroeklemlerin büyütülmesinin şartları şunlardır:

- Büyütülen kristalin ve altlığın kristal örgüleri aynı yapıda olmalıdır (kübik- kübik vb.).

b) Büyütülen filmin ve altlığın örgü parametrelerinin değerleri (a_1, a_2) çok yakın olmalıdır. Örgü parametrelerinin farkları uygunsuzluk parametresi (ε) ile karakterize edilmektedir

$$\varepsilon = \frac{a_1 - a_2}{\bar{a}} 100 = 2 \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 + a_2)} 100 \quad (1.3)$$

Epitaksiyel yöntemle tek kristalik filmi tek kristal altlığın üstünde büyütmek için $\varepsilon \leq 3\%$ olmalıdır, aksi taktirde film- altlık sınırında deformasyon ve dislokasyonlar oluşur ve bu nedenle polikristal yapıya sahip filmler büyütülmektedir.

c) Filmin ve altlığın genleşme katsayılarının değerleri çok yakın olmalıdır, $\alpha_1 \approx \alpha_2$

1.7 Eklemlerin Elektrik Özellikleri

Bölüm 1.6'da açıklandığı gibi, p-tipli ve n tipli iki yarıiletken temas haline getirildiğinde çok kısa bir zamanda p bölgesinde negatif, n bölgesinde pozitif yük fazlalığı olur ve yük geçişi tamamlanır[Süngü,B.200]. Yük taşıyıcılarının gradyantından dolayı eklemden daha fazla yük taşıyıcısının geçişine engel olacak şekilde ΔE enerjisine sahip bir temas potansiyel farkı meydana gelir (Şekil 1.6). Bu fark enerji seviyelerinin, n tipi bölgede aşağıya p tipi bölgede yukarıya doğru kaymasına ve termik dengede fermi enerji seviyelerinin bütün sistem boyunca sabit olmasına neden olur.

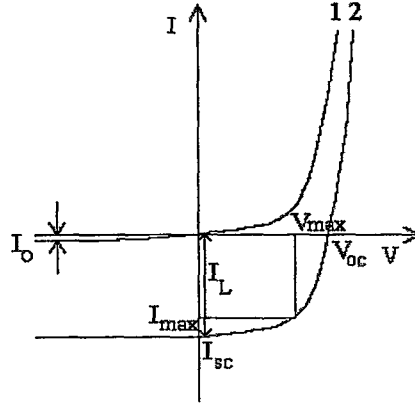
p-n eklemlerin karanlıktaki akım-gerilim karakteristikleri teorik olarak şu şekilde verilmektedir (Şekil 1.9 (1) eğrisi).

$$I = I_o (e^{eV/kT} - 1) \quad (1.4)$$

Gerçekte diyodun akım-gerilim karakteristiği

$$I = I_o (e^{eV/AkT} - 1) \quad (1.5)$$

ile verilir. Burada A ideallik faktörüdür, sıcaklığa, gerilime ve eklemdaki rekombinasyon merkezlerine bağlıdır.



Şekil 1.9 Diyodun (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği (Green,1982)

1.8 Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristikleri

Uygun frekansta ışık yarıiletken üzerine düştüğü zaman malzemenin elektriksel iletkenliğinin değişmesine *fotoiletkenlik* denir. Işığın dalgaboyu yarıiletkenin yasak band genişliğine eşit veya daha küçük olduğu zaman fotoiletkenlik gözlenebilir(Süngü,B.2000).

Yeterli enerjiye sahip ($h\nu > E_g$) bir ışık demeti p-n eklemi üzerine düştüğü zaman bir foton, bir serbest elektron veya bir valans elektronu veya bir boşlukla karşılaşabilir. Bir elektronla karşılaşan foton ona enerjisini verir. Bir foton bir valans elektronu ile karşılaşır ve ona yasak band genişliği E_g 'ye eşit veya ondan daha büyük enerji verirse valans bandından sökülen elektron arkasında bir boşluk bırakarak iletkenlik bandına geçer.

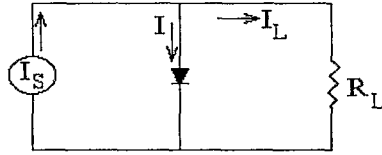
Bu olay p-n eklemde çeşitli noktalarında meydana gelebilir. Eğer bir elektron-boşluk çifti eklem bölgesinde meydana gelirse, burada yüksek bir potansiyel gradyanı vardır, elektrik alan elektronu n bölgesine boşluğu da p bölgesine yani; yük taşıyıcılarının çoğunlukta oldukları bölgelere doğru hızlandırır. Bu yük hareketi n bölgeden p bölgeye pozitif yük geçişine denktir, n-tipi bölge negatif, p-tipi bölge pozitif olarak yüklenmektedir.

Elektron-boşluk çifti n-tipi bölgede meydana gelirse, azınlık yük taşıyıcıları olan boşluklar eklemeye doğru gider ve onu aşarak p-tipi bölgeye geçer. Bu durumda yine n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye pozitif yük geçişi vardır. Çoğunlukta olan yük taşıyıcılarının hareket yönü pek önemli değildir, bunların enerjileri potansiyel duvarını aşmak için yeterli değildir.

Elektron-boşluk çifti p tipi bölgede meydana gelirse, elektron eklemeye doğru hareket eder ve onu aşarak n tipi bölgeye ulaşır. Bu durumda yine n tipi bölgeden p tipi bölgeye pozitif bir yük geçişi vardır. Eklemiden daha uzakta meydana gelen elektronlar ve boşluklar tekrar birleşirler ve elektron-boşluk çifti kaybolur. Fotonlar tarafından meydana getirilen akımdan yararlanabilmek için önce eklemiden ışık alması sağlanmalı ve sonra elde edilen akım bir dış devreye bağlanmalıdır.

Fotovoltaik güç dönüşümü en iyi, paralel bağlanmış sabit akım kaynaklı ideal bir p-n eklemi ile açıklanabilir (Şekil 1.10). Devrede diyod güneş ışığı tarafından aydınlatılmaktadır. Asıl olarak, kaynağın cinsi önemli değildir. Kaynak, foton kaynağı (güneş enerjisi, γ ışınımı, X-ışını, vs), yüksek enerjili parçacık kaynağı (elektron tabancası, β radyoaktif elementler, α parçacıkları, protonlar, nötronlar,vs) veya ideal kaynağın özelliğini değiştirmeden elektron-boşluk çifti meydana getiren diğer kaynaklar da olabilir.

Foton soğurulması ile meydana gelen yük taşıyıcılar çoğunlukta oldukları bölgelere doğru sürüklenirler. Bu durumda eklemiden bir I_S akımı geçer. Böylece p-tip bölge pozitif, n-tip bölge negatif olarak yüklenir.



Şekil 1.10 Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi (Oral,1979)

I_S akımının geçişi p-n eklemiden ileri yönde kutuplanmasına neden olur ve bu durumda eklemideki potansiyel duvarı alçalır. Eklemiden bir dış bağlantısı yoksa bu ileri yöndeki kutuplanmadan dolayı ileri yönde (p den n ye doğru) bir I akımı geçer. Bu I akımının geçişi n tipi bölgeyi pozitif olarak yükleyeceğinden çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel olan

potansiyel duvarı yükselmeye başlar. p den n ye doğru olan bu akım, potansiyel duvarı (temas potansiyel farkı) çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel teşkil edecek duruma gelinceye kadar devam eder. Yeniden foton soğurulması olur. Eklemde mevcut olan elektrik alan, meydana gelmiş olan elektron-boşluk çiftini ayırarak bunların eklemi aşmalarını sağlar.

p-n kavşağı dışarıdan bir R_L yük direnci ile birleştirilirse I_S akımının I_L kadar kısmı dış devreden akar, böylece p-n eklem ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirmiş olur. I_S akımı

$$I_S = I + I_L \quad (1.6)$$

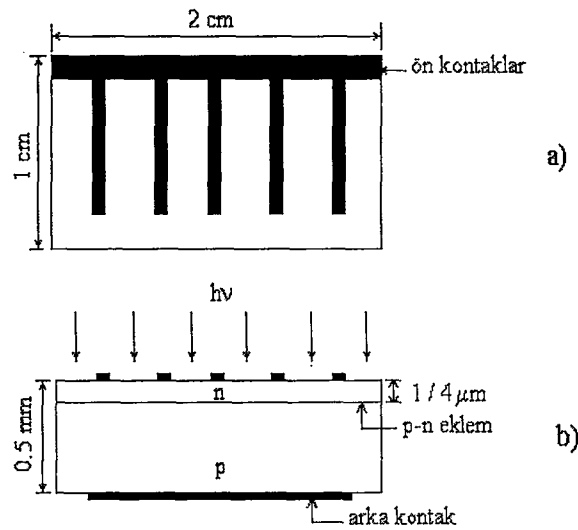
bağıntısı ile verilir. Burada I_L fotoakım yani ışık etkisiyle oluşan akımdır. İleri yöndeki akımın (1.8) değeri I_S yi veren eşitlikte yerine konulursa

$$I = I_o (e^{eV/kT} - 1) - I_L \quad (1.7)$$

bağıntısı elde edilir.

Bu durumda devreden geçen akım-gerilim karakteristiği Şekil 1.9'daki (2) eğrisi ile verilir. Buna göre aydınlık eğrisi karanlık eğrisinin şekil değiştirmeden I_L kadar ötelenmesidir. Bu eğride V_{max} maksimum güç noktası gerilimi, I_{max} maksimum güç noktası akımıdır.

Şekil 1.11'de tipik bir güneş pilinin gösterimi verilmiştir. Işık altında güneş pilinin akım-



Şekil 1.11 Tipik bir güneş pilinin a) üstten ve b) yandan şematik gösterimi (Sze, 1981)

gerilim karakteristiği Şekil 1.9 'de (2) eğrisi ile verilmiştir.

Güneş pillerini karakterize eden üç parametre vardır. Birincisi (I_{sc}) kısa devre akımı pile uygulanan direnç sıfır olduğunda okunan akım; ikinci parametre (V_{oc}) kısa devre gerilimi devre açıkken yani direnç sonsuzken okunan gerilimdir, (1.7) denklemi sıfıra eşitlenerek

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (1.8)$$

ile verilir.

Üçüncü parametre fill faktörü (doluluk faktörü) FF, Şekil 1.9 (2) eğrisinin dördüncü bölgesine çizilen maksimum alanlı dörtgenden

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.9)$$

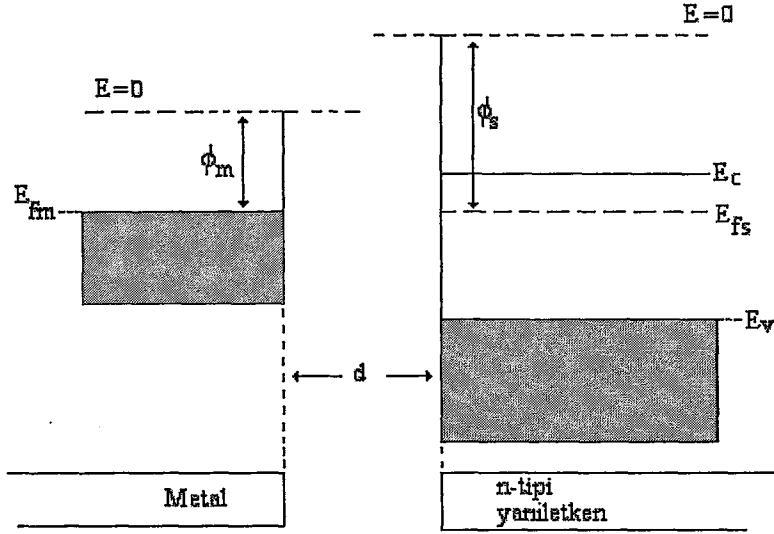
olarak bulunur. Güneş pilinin verimi η , yani harcanan ışık başına üretilen elektrik miktarı

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} FF = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (1.10)$$

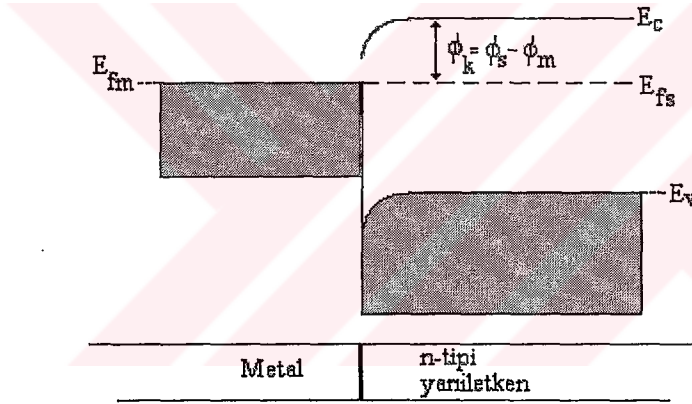
ile verilir. Burada P_{in} pil üzerine düşen ışığın toplam şiddetidir.

1.9. Omik Kontaklar

Metal-n-tipi omik kontakın bant diyagramını inceleyelim. Aralarında d mesafesi bulunan ve temas ettirilen n-tipi yarıiletken ile metalin ($\phi_s > \phi_m$) bant diyagramları Şekil 1.12 ve Şekil 1.13 deki gibidir(Çalışkan,M.2002).



Şekil 1.12 Temasta olmayan metal ve n-tipi yarıiletkenin bant diyagramı ($\phi_s > \phi_m$)



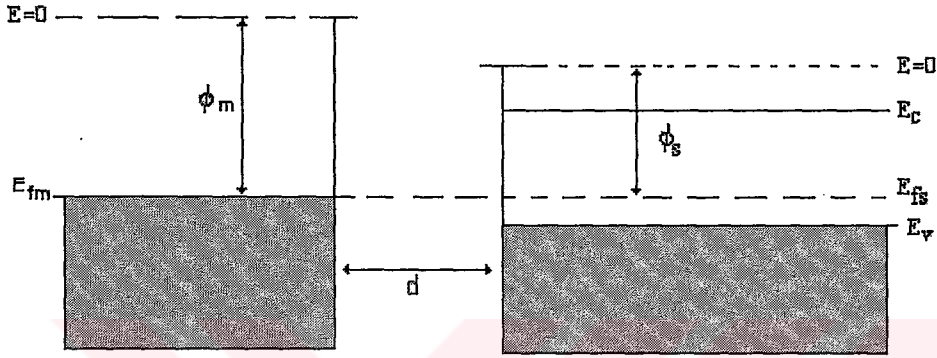
Şekil 1.13 Temas halinde metal – n tipi yarıiletkenin bant diyagramı ($\phi_s > \phi_m$)

Metalin çıkış işi n-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olduğu durumlarda ($\phi_s > \phi_m$) yarıiletkenin kontak bölgesinde (yarıiletkenden metale doğru gidildikçe) enerji bandı aşağıya eğilmektedir (Şekil 1.12). Bu durumda yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu daha büyük, direnci ise iç bölgelere nazaran daha küçük olur. Yarıiletkenin yüzey bölgesinde meydana gelen bu küçük dirençli tabaka anti-engel tabakası olarak adlandırılır. Bu tür tabakalar omik kontakların temelini oluşturmaktadır.

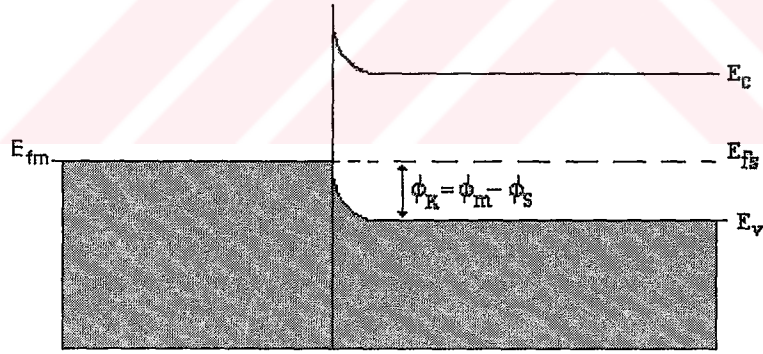
Metal ve p-tipi yarıiletkeni göz önüne alırsak metalin çıkış işi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha büyük olduğu durumda ($\phi_m > \phi_s$), elektronlar p-tipi yarıiletkenden metale

geçerler bu durumda yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artar (Şekil 1.14) ve bu bölgenin direnci azalır. Böylece metal ve p-tipi yarıiletken için ($\phi_m > \phi_s$) şartında da bu bölgede omik kontak davranışı gösterir.

P-tipi yarıiletken ve metalin çıkış işinin yarıiletkenin çıkış işinden küçük olduğu durumda bant diyagramı Şekil 1.15 deki gibidir.



Şekil 1.14 Temastan önce Metal ve p-tipi yarıiletkenin bant diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)



Şekil 1.15 Temas halinde metal ve p-tipi yarıiletkenin bant diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)

Yarıiletken devre elemanlarını elektronik devreye bağlamak yada onların karakteristiklerini ölçebilmek için bu elemanlara akım-gerilim karakteristiği lineer olan omik kontaklar yapılır.

Bir omik kontak aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır. (Caferov 1998)

- Kontakların akım-gerilim karakteristiği lineer olmalı yani doğrultucu özellik göstermemelidir diğer bir ifade ile kontak direnci akım yönüne bağlı olmamalıdır.

- b. Kontak direnci akımla orantılı olarak değişmemelidir.
- c. Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük (en az bir kat) olmalıdır.
- d. Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.
- e. Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir, yani yapışkanlığı yüksek olmalıdır.
- f. Kontak malzemesinin yarıiletken içine azınlık taşıyıcıları salmaması (injeksiyon özelliği göstermemesi) gerekir.

Bunun yanında kontak için metalin seçiminde aşağıdaki şartlar da gerçekleştirilmelidir.

a) n-tipi yarıiletkende kullanılan metalin çıkış işi, yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olmalıdır. P-tipi yarıiletken için, metalin çıkış işi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha büyük olmalıdır.

b) n-tipi yarıiletken için kullanılan metal, bu yarıiletkende donör özelliği göstermelidir. P-tipi yarıiletken için metal akseptör özelliği göstermelidir.

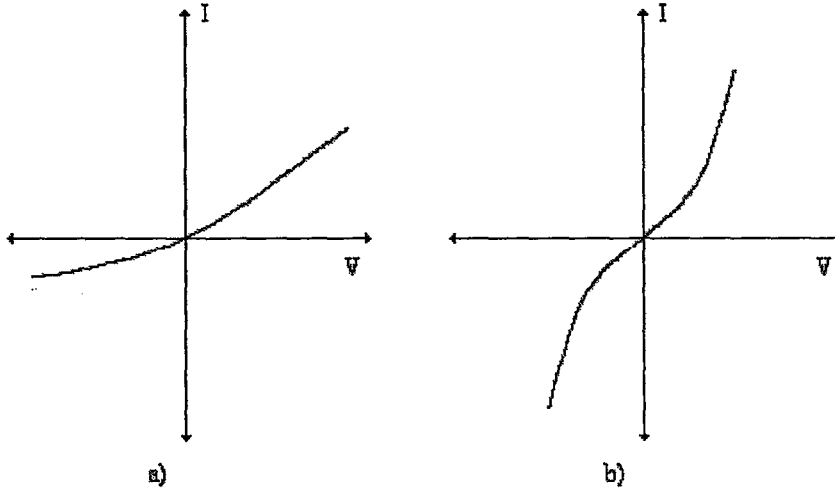
Kontaklar yapıldıktan sonra yarıiletkenin elektrik özellikleri incelenebilir, metal-yarıiletken kontağın akım-gerilim karakteristiği kontağın omikliğinin göstergesidir.

Denklem (1.11)'de verildiği gibi kontağa düşen gerilimin kontakta geçen akıma oranı omik kontağın direncini verir

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.11)$$

Kontağın direnci ne kadar az ise kontak o kadar iyi omik kontaklıdır. Omik kontağın direnci onun alanına bağlıdır bu nedenle farklı alanlı omik kontakların dirençlerini karşılaştırmada bu kontakları öz dirençleri kullanılmalıdır. Bu da kontağa düşen gerilimin kontakta geçen akım yoğunluğuna oranı ile verilir yani, $\rho = \frac{V}{J}$ ve birimi (ohm.cm²)'dir. Deneysel çalışmalarda tam lineer akım-gerilim karakteristikli metal-yarıiletken kontak yapmak zordur. Kontakın akım-gerilim karakteristiği lineer olmadığı takdirde kontakın doğrultma derecesi akımın doğru ve ters yönlerdeki değerlerinin oranı ile belirlenmektedir ve bu akımların

oranı kontağın doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. İdeal omik kontağın doğrultma katsayısı birdir.



Şekil 1.16 Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri. a) Küçük doğrultuya sahip omik kontak. b) direnci gerilime bağlı olan omik kontak.(Caferov 1998).

Simetrik akım-gerilim karakteristikli omik kontağın lineerlikten sapması lineer olmayan katsayı ile belirlenir (Şekil 1.16 b) buda statik direncin diferansiyel dirence oranı (sabit bir akım değeri için) şeklinde omik kontağın lineer olmayan katsayısı olarak tanımlanır.

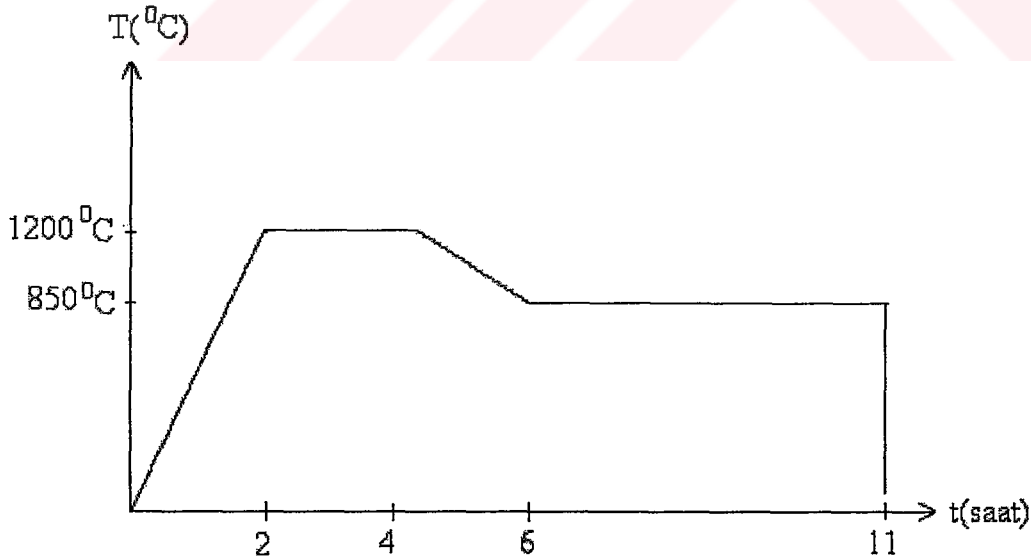
2. Deneysel Çalışmalar

2.1 β -FeSi₂ Bulk Polikristallerin Büyütülmesi

Bu çalışmada FeSi₂ ve tungstenle katkılanmış FeWSi₂ bileşikler, %99.9 saflıkta elementler Fe ve W, n-tipi Si ($\rho \approx 10\text{-}20 \Omega\text{-cm}$) ve p-tipi Si ($\rho \approx 0,4 \Omega\text{-cm}$) kullanarak hazırlandı. Bunun için Fe-Si (%50 Fe: %50 Si) ve Fe-W-Si (%45 Fe: %5 W: %50 Si) toz şeklindeki karışımından mekanik basınç altında 2-3 nm kalınlığında tabletler hazırlandı (Tavlanmamış FeSi₂ ve FeWSi₂ tabletler). Tavlanmamış FeSi₂ örneklerin bir kısmı FeSi₂/Si heteroeklemin buharlaştırma yöntemiyle hazırlanmasında kullanıldı.

FeSi₂ ve FeWSi₂ karışımından, β -FeSi₂ ve Fe(W)Si₂ bulk polikristal örneklerin elde edilmesi için, kuvars ampullerde vakumda yüksek sıcaklıklarda sentez işlemi yapıldı.

Ampulleme işlemi için hazırlanacak olan bir tarafı kapalı olan kuvarslar HF ve HNO₃ çözelti içerisinde temizlendikten sonra saf su ile yıkandı. Daha sonra ampuller tavlama işlemi uygulanarak kurutuldu. Bu işlemten sonra hazırlanan farklı grup tabletler bir ucu kapalı kuvars ampullere yerleştirildi ve sonra kuvars içindeki vakum $\sim 10^{-2}$ torr'luk basınca düşürüldü. Ampuller vakumdayken açık uç oksijen kaynağı ile kapatıldı.



Şekil 2.1 β -FeSi₂ ve Fe(W)Si₂ bulk örneklerin sentezinde uygulanan sıcaklık-tavlama süresi rejimi

Hazırlanan kuvars ampuller fırına yerleştirildi. Fırın Şekil 2.1’de verilen tavlama rejimine uygun olarak, 2 saat süreyle 1200 °C’ye kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra 2 saat süreyle 850 °C’ ye düşürüldü. Daha sonra 850 °C sıcaklıkta 5 saat bekletildi. Sonra ampuller birdenbire oda sıcaklığına çıkarıldı ve soğutuldu. Bu sentez sonucunda elde edilen bulk polikristal β -FeSi₂ ve Fe(W)Si₂ alaşımların tipi, özdirenci, X-ışınları kırınımı ve taramalı diferansiyel kalorimetre analizi yapıldı.

2.2 β -FeSi₂ / Si Heteroeklemlerin Hazırlanması

2.2.1 Silisyum Altlıkların Hazırlanması

Altlık olarak kullanılacak n-tipi ve p-tipi Si (sırasıyla $\rho \approx 10-20 \Omega\text{-cm}$ ve $\rho \approx 0,4 \Omega\text{-cm}$) buharlaştırma yapılmak için 5mm × 5mm × 0,3mm boyutta kesilerek hazırlandı. Daha sonra yüzey bölgesindeki kusurları ortadan kaldırmak için cam diskin üzerinde elmas tozu ile M5 zımparlama yapıldı. Alkolle yüzeyler temizlendikten sonra düz bir diskin üzerinde elmas macun kullanılarak yüzey parlatma işlemi yapıldı. Parlatma işlemi bitiminde alkolle temizlenen altlıklar temizleme işlemi için HF asit içine bırakıldı. Daha sonra asit içerisinden çıkarılan altlıklar saf su ile yıkanıp yüzey sabunla temizlendi ve tekrar saf su ile yıkandı. Bu işlemlerin sonucunda altlıklar tekrar alkolle yıkanıp buharlaştırma için hazır hale getirilir.

2.2.2 Fe/Si ve β -FeSi₂ / Si Eklemlerin Hazırlanması

Bu çalışmada Fe/Si ve β -FeSi₂ / Si eklemleri incelendi.

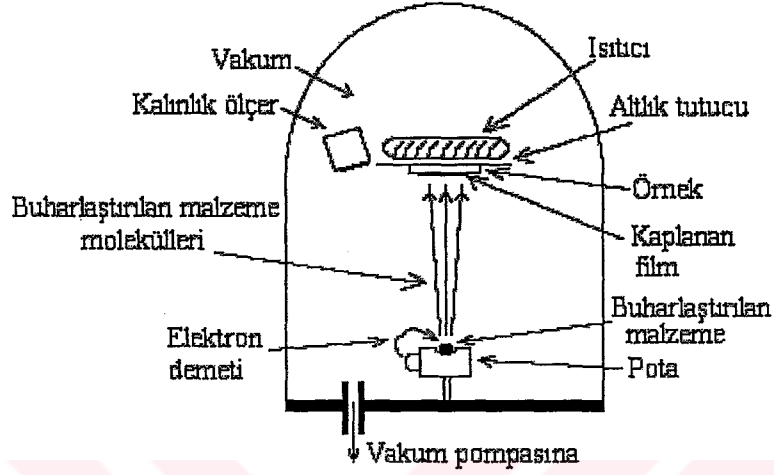
Fe/Si eklemlerin elde edilmesi için 2 yöntem kullanıldı :

1. Oda sıcaklığındaki ($T=25^\circ\text{C}$) n-tipi ve p-tipi Si altlığın üzerine Fe filmin buharlaştırılması (sırasıyla 1. tür Fe/n-Si ve 2. tür Fe/p-Si eklemler)
2. 750 °C sıcaklığındaki n-tipi ve p-tipi Si altlığın üzerine Fe filmin buharlaştırılması (sırasıyla 3.tür Fe/n-Si ve 4. tür Fe/p-Si eklemler)

β -FeSi₂ / Si heteroeklemler hazırlanması için 2 yöntem kullanıldı :

1. Oda sıcaklığındaki ($T=25^\circ\text{C}$) n-tipi ve p-tipi Si altlığın üzerine tavlannmamış FeSi₂ kompozisyonlu tozun buharlaştırılması (sırasıyla 1. tip FeSi₂/n-Si ve 2. tip FeSi₂/p-Si Heteroeklemler)
2. Oda sıcaklığındaki ($T=25^\circ\text{C}$) n-tipi ve p-tipi Si altlığın üzerine vakumda sentez edilen β -FeSi₂ veya FeWSi₂ alaışının buharlaştırılması (sırasıyla 3. tip FeSi₂/n-Si ve 4. tip FeSi₂/p-Si Heteroeklemler)

İlk olarak toz Fe'den mekanik basınçla tabletler elde edildi. Bu tabletler n-tipi ve p-tipi Si altlıklar üzerine elektron demeti ile $\sim 10^{-5}$ torr vakum ortamında Şekil 2.2'de gösterildiği gibi buharlaştırılarak Fe/n-Si ve Fe/p-Si eklemler hazırlandı. Daha sonra oda sıcaklığında n ve p-Si üzerine kaplama yapılarak Şekil 2.3'deki eklemler hazırlandı. Aynı şekilde 750 °C altlık sıcaklığında da eklemler elde edildi.



Şekil 2.2 Elektron-beam buharlaştırma setinin şematik gösterimi



Şekil 2.3 (a) 1. tür Fe / n-Si ve (b) 2. tür Fe / p-Si eklemler ($T_{alt}=25^{\circ}C$)

İkinci bir yöntemle toz haldeki silisyum ve demiri stokiyometrik oranda karıştırarak mekanik basınçla tabletler elde edildi. Bu hazırlanan ve tavlınmamış $FeSi_2$ tabletler vakum ortamında (10^{-5} torr) ve oda sıcaklığında n-tipi ve p-tipi Si altlıklar üzerine buharlaştırıldı. Buradan sırasıyla 1. tip $FeSi_2$ / n Si ve 2. tip $FeSi_2$ / p -Si heteroeklemler elde edildi. Benzer şekilde, yüksek sıcaklıkta sentez yöntemiyle hazırlanan bulk polikristal β - $FeSi_2$ parçacıkların n-tipi ve p-tipi Si altlıkların ($T=25^{\circ}C$) üzerine buharlaştırılarak, β - $FeSi_2$ – n-tipi Si (1. tip $FeSi_2$ /n-Si heteroeklemler) β - $FeSi_2$ – p-tipi Si (2. tip $FeSi_2$ /p-Si heteroeklemler) elde edildi (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 1. tip FeSi_2 / n-Si ve 2. tip FeSi_2 / p-Si Heteroeklemler ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

Aynı şekilde sentezleme işlemi ile hazırlanan $\beta\text{-Fe(W)Si}_2$ bulk polikristalinin n-tipi Si altlıklar üzerine $\sim 10^{-5}$ torr vakum ortamında ve oda sıcaklığında elektron demetiyle buharlaştırılarak Şekil 2.5'deki heteroeklemler hazırlandı. Bu yöntemle hazırlanan $\beta\text{-FeWSi}_2/\text{n-Si}$ heteroeklemlerde bulk polikristallerin p tipi olduğu görüldü.



Şekil 2.5 $\beta\text{-FeWSi}_2$ / n-Si Heteroeklemler

Bu yöntemlerle elde edilen tüm heteroeklemlerin elektrik ve fotovoltaiik özellikleri incelendi

2.3 DSC Ölçümleri

$\beta\text{-FeSi}_2$ malzemenin taramalı diferansiyel kalorimetre (DSC-Diferansiyel Scanning Calorimetry) ölçümlerinde Seteram marka DTA-TG cihazı kullanıldı. Malzemeler 100mg'lık platin krozelere konularak ortama azot (N_2) gazı verildi (40ml/dk) ve 10°C/dk ısıtma hızında $25^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ aralığında ölçümler alındı. Bunun sonucunda elde edilen grafiklerden endotermik ve egzotermik reaksiyonların hangi sıcaklıklarda oluştuğunu ve faz geçiş sıcaklıkları elde edildi

* DSC ölçümleri Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya mühendisliği bölümünde yapılmıştır.

2.4 X- Işınları Kırınım Analizi

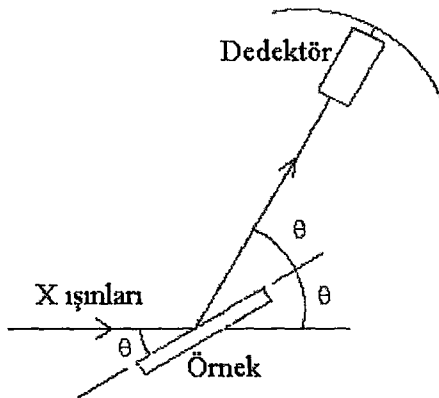
Elektrik alanda hızlanmış elektronların ($E=20-80$ keV) cismin atomları ile çarpışması neticesinde atomun iç kabuğunda bulunan elektron dışarı atılır, yerine daha üst kabukta bulunan elektron geçer ve böylece x-ışınları oluşur. X-ışınlarının dalgaboyu $10^{-2}-10$ nm arasında değişir, katıların örgü parametrelerine yakın olması nedeniyle x-ışınları kırınım olayı kristali yapıya sahip katının örgü parametresini ölçmek için kullanılır. Bragg kanununa göre, örgünün atomik tabakalarından yansıyan ışınlar arasında

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

koşulu sağlandığında x-ışınları spektrumunda maksimum pikler oluşmaktadır. Burada λ kristal örgüsüne düşen x-ışınlarının dalgaboyu, θ örgüye düşen x-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı, d kristaldeki atomlararası mesafe ve n yansıma derecesidir.

β -FeSi₂ yapıların x-ışınları kırınım analizinde “Rigaku D/Max-III C” difraktometresi kullanıldı.* Şekil 2.6’de difraktometrenin basit diyagramı görülmektedir. Bu difraktometrede CuK _{α} ışını ($\lambda=1,5418$ Å) kullanıldı ve ölçümler $2\theta=3-70^\circ$ aralığında yapıldı. β -FeSi₂ örgü parametresini bulmak için x-ışını kırınım desenleri incelendi.

Örneğin birbirine paralel düzlemlerinden yansıyan ve sonra üst üste gelen ışınların şiddetleri dedektör ile ölçüldü. Örnek θ açısı kadar dönerken dedektör 2θ kadar dönmektedir. Açıya bağlı olarak yansıyan ışınların şiddeti taranarak x-ışınlarının kırınım desenleri bulundu.



Şekil 2.6 Difraktometrenin diyagramı (Caferov,1998)

Elde edilen kırınım desenlerinden (h,k,l) indisleri bulunduğundan sonra a,b,c örgü sabitleri orthorombik kristal yapısına sahip olan β -FeSi₂ için a=0,96nm, b=0,76nm ve c=0,75nm olarak

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.2)$$

denklemini kullanılarak hesaplandı. Burada d atom düzlemleri arasındaki uzaklıktır, β -FeSi₂ kristali için a≠b≠c alınmıştır

2.5 FeSi₂'nin Elektrik Karakteristiklerinin Ölçülmesi

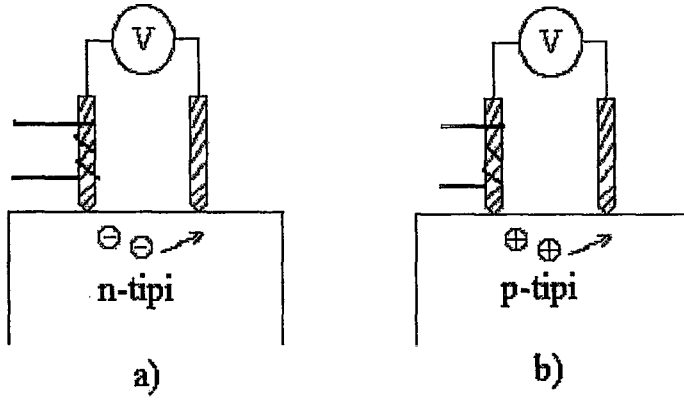
2.5.1 İletkenlik Tipi

β -FeSi₂ örneklerin iletkenlik tiplerini belirlemek için *termal elektro-motor kuvveti (TEMK)* yöntemi kullanıldı. Şekil 2.7 termal elektro-motor kuvveti yöntemiyle yarıiletkenin yük taşıyıcılarının tipini bulmak için kullanılan devreleri göstermektedir. Bu yöntemde iki prob kullanılır. Proben biri (T₁) yaklaşık 200-300°C kadar ısıtılır, ikinci probun sıcaklığı (T₂) oda sıcaklığında tutulmaktadır. n-tipi yarıiletkende elektronlar daha sıcak probun civarından oda sıcaklığında tutulan probun yönünde hareketlenmektedirler. Neticede daha sıcak probun civarındaki yarıiletken bölgesinin elektrik kutbu pozitifdir ve bu işaret devredeki voltmetre ile kaydedilmektedir. p-tipi yarıiletkende ise tersine, daha sıcak probun elektrik kutbu negatif olmaktadır.

Deneysel ölçümlerde yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini bulmak için öncelikle belirli tipe sahip yarıiletkenin TEMK ölçümü ile devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve sonra incelenen örneğin tipi belirlenir.

Bu çalışmada iletkenlik tipi ölçümleri TEMK yöntemiyle yapıldı. Sıcak prob yaklaşık 200°C, soğuk prob oda sıcaklığında tutuldu ve TEMK işaretini ölçmek için “Thurlby 1503 Digital Multimeter” voltmetre kullanıldı β -FeSi₂'nin p-tipi olduğu görüldü.

*X-ışınları difraksiyon ölçümleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 2.7 TEMK yöntemiyle (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik tipi ölçüm devresi (Caferov,1998)

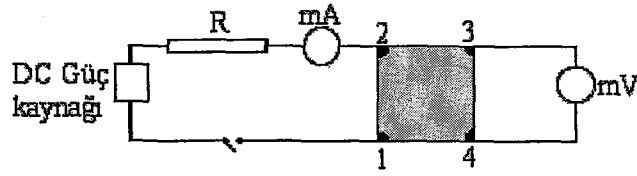
2.5.2 Özdirenç

Yarıiletken malzemelerin özdirenç ölçümleri için en çok iki prob, dört prob ve Wan der Pauw yöntemleri kullanılmaktadır. Örnekten akım geçen bir bölgede elektrik potansiyel farkı ölçümleri bu yöntemlerin temelidir. Bu çalışmada Van der Pauw yöntemi kullanıldı. Kare şeklindeki 5mmx5mmx0,4mm β -FeSi₂ alaşımının köşelerine eşit mesafede küçük alanlı noktasal omik kontaklar yapıldı.(Şekil 2.7)

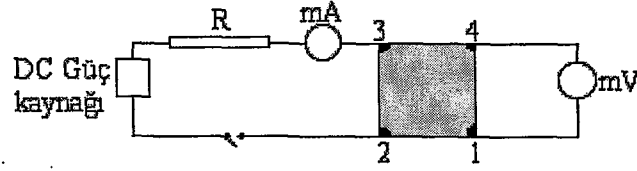


Şekil 2.8 Örneklerde kontakların yerleşimi

Şekil 2.8’de dört prob yöntemle özdirenç ölçümünde kullanılan devre görülmektedir. Elektrik güç kaynağından akım önce 1 ve 2 kontaklarından geçirildi, 3 ve 4 kontakları arasındaki gerilim voltmetre ile ölçüldü (Şekil 2.9a). Ohm kanunu kullanılarak R_1 hesaplandı. Daha sonra 2 ve 3 kontaklarından akım geçirildi, 1 ve 4 kontakları arasındaki gerilim voltmetre ile ölçülerek R_2 hesaplandı (Şekil 2.9b). Deneyde “Thurlby Thandar PL 320” güç kaynağı, akımı ve gerilimi ölçmek için “Thurlby 1503 Digital Multimeter” kullanıldı.



a)



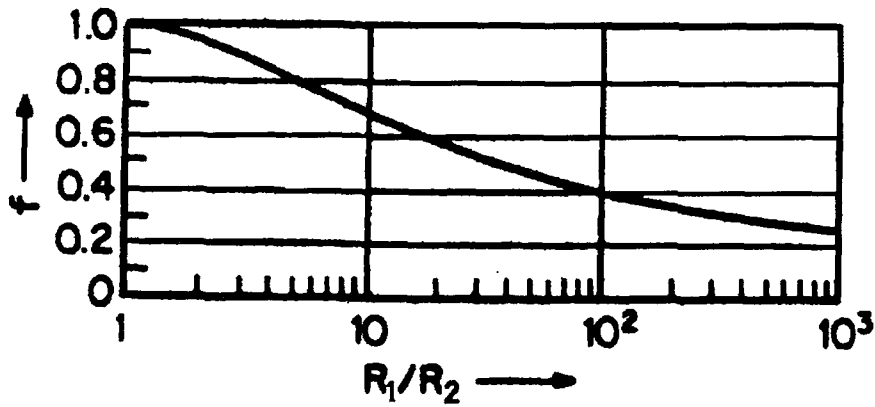
b)

Şekil 2.9 Van der Pauw ölçüm devresi (a) R_1 ve (b) R_2 dirençlerinin bulunması (Caferov,1998)

Direncin bu iki değeri

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.3)$$

denkleminde kullanılarak d örneğin kalınlığı (cm), R_1 ve R_2 dirençleri (Ω) biriminde alınarak örneğin öz direnci hesaplandı.

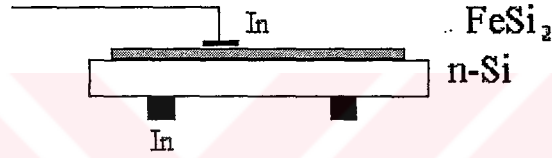


Şekil 2.10 Van der Pauw yöntemi için düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 'ye göre değişimi (Caferov,1998)

(2.3) denkleminde $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ düzeltme fonksiyonudur, R_1 ve R_2 dirençlerinin oranı ile bağlı olan düzeltme fonksiyonunun grafiği Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Bu ölçümler neticesinde $R_1=1148\Omega$, $R_2=560\Omega$ ve $\rho=2,7.10^{-3}$ bulundu.

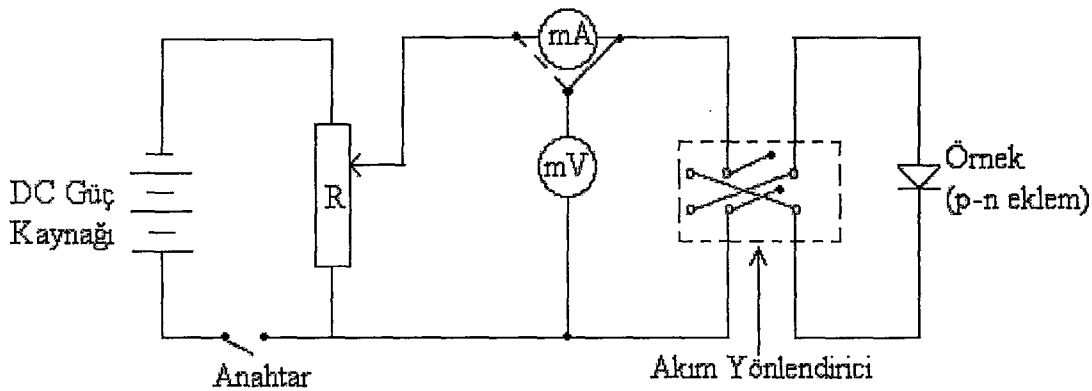
2.6 Akım-Gerilim Karakteristikleri

Elde edilen Fe/Si ve $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ yapıların elektriksel ölçümlerinde alt yüzeye In eritilerek simit şeklinde kontak yapıldı. Üst yüzeylere de çeşitli kontaklar (In, InGa ve Ag-macunu gibi) yapıldıktan sonra örnek. Üst kontakt üzerine sabit bir fosfor bronz metali ile bastırıldı(Şekil 2.11).



Şekil 2.11 $\text{FeSi}_2 / \text{n-Si}$ heteroeklemlerin gösterimi

Bu iki kontak arasındaki akım-gerilim karakteristikleri oda sıcaklığında, karanlıkta ve 50Watt'lık tungsten lamba ile (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti $P=100\text{mW/cm}^2$) aydınlıkta ölçüldü. Işınlama hem film, hemde Si altlık tarafından yapıldı. Akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şeması Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Bu ölçümlerde "Thurlby 1503 Digital Multimeter" kullanıldı.



Şekil 2.12 Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi

2.5 Eklemlerin Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi

Ölçülen akım-gerilim karakteristiklerinden Bölüm 1.7’de verildiği gibi aydınlık eğrisinin gerilim eksenini kestiği nokta pilin açık devre gerilimi V_{oc} parametresini

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2.4)$$

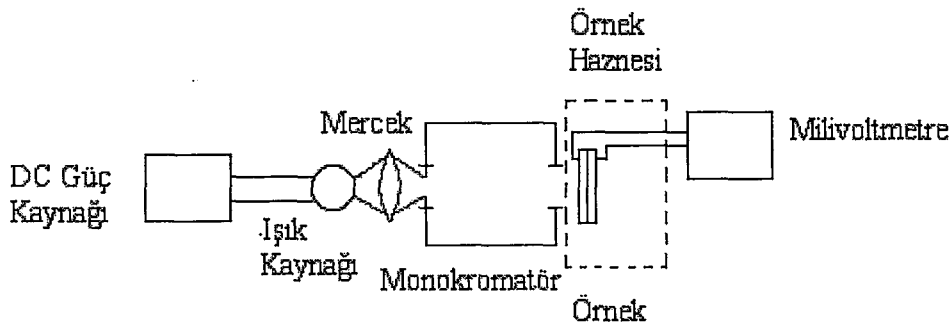
akım eksenini kestiği nokta kısa devre akımı I_{sc} parametresini vermektedir. Eğri altında kalan dördüncü bölgede çizilen maksimum alandan fill faktörü FF

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.5)$$

pile düşen ışık şiddetinin gücü P olmak üzere pilin verimi η

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P} FF = \frac{V_m I_m}{P} \quad (2.6)$$

ifadeleri ile bulunur. Bu denklemler kullanılarak FeSi₂/n-Si örneklerin fotovoltaik parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 2.13 Fotoduyarlılığın spektral ölçüm devresi

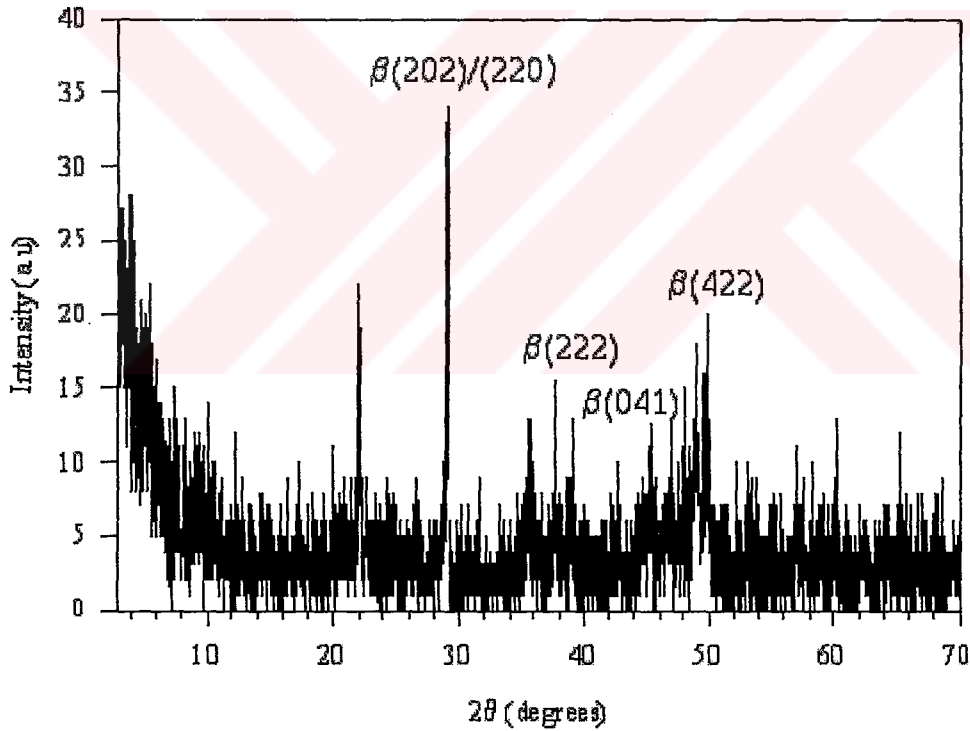
Eklemlerin fotoduyarlılığının spektral dağılım ölçümleri ($V_{oc} - \lambda$) oda sıcaklığında $\lambda = 300-2000$ nm dalga boyu aralığında incelendi. Şekil 2.13 ölçüm devresi göstermektedir. Devrede “Oriel” marka monokromatör kullanıldı. “Osram” lambasından saçılan ışık mercekle monokromatörün girişine odaklanmakta ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneklerin $FeSi_2$ ince film olan veya Si altlık yüzeylerine düşürülmektedir. Işığın etkisiyle oluşan fotogerilim milivoltmetre ile ölçüldü. Bu ölçümlerden örneğin fotogerilim-dalga boyu spektrumları elde edildi.



3. BULGULAR

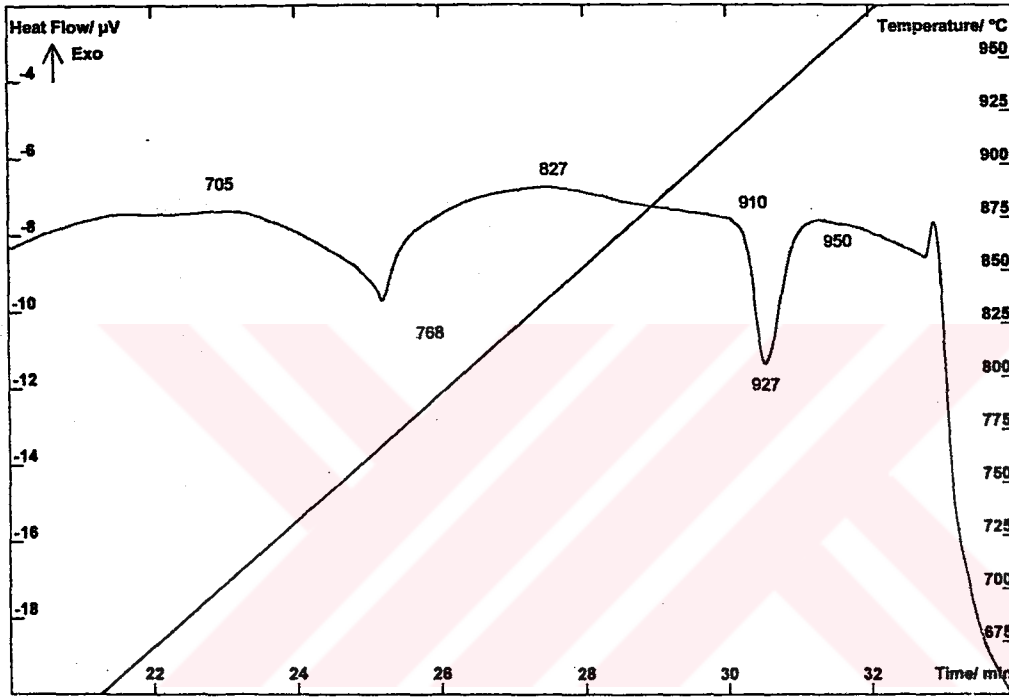
3.1 FeSi₂ Bulk Örneklerin X-Işımları ve DSC Analizi

X-ışınları kırınım ölçümleri vakumda sentezlenmiş bulk FeSi₂ alaşımlarda yapıldı. $\lambda=1,5418$ Å dalga boyundaki X-ışını demetiyle $3^\circ < 2\theta < 70^\circ$ aralığında $3^\circ/\text{dak.}$ tarama hızında spektrum ölçüldü. Şekil 3.1’de FeSi₂ bulk örneğe ait X-ışınları kırınım deseni görülmektedir. Burada görüldüğü gibi ortorombik yapıya sahip β -FeSi₂ fazının (202)/(220) ($2\theta= 28^\circ-30^\circ$), (222) ($2\theta= 36^\circ-38^\circ$), (041) ($2\theta= 44^\circ-46^\circ$) ve (422) ($2\theta= 48^\circ-50^\circ$) pikleri görülmektedir. FeSi₂ bulk örnek için (2.2) formülü kullanılarak örgü parametreleri $a= 0,96\text{nm}$, $b= 0,76\text{nm}$ ve $c= 0,75\text{nm}$ şeklinde hesaplandı.



Şekil 3.1 FeSi₂ bulk Örneğin X-Işını Kırınım Deseni

Taramalı diferensiyel kalorimetre (DSC) ölçümü yapılması için 100 mg'lık vakumda sentezlenmiş FeSi_2 alaşımı platin klozelere sığacak şekilde Seteram marka DTA-TG cihazına yerleştirildi. 25°C - 1000°C aralığında $10^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında DSC analizi alındı. Şekil 3.2'de FeSi_2 bulk örneğin DSC grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 768°C ve 927°C sıcaklıklarında egzotermik reaksiyonu ifade eden iki pik oluşmuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda elde ettiğimiz FeSi_2 örneklerin 768°C 'de ısı alışverişiyle Fe_5Si_3 fazına ve 927°C 'de ise β -faza geçtiği şeklinde yorumlandı.



Şekil 3.2 FeSi_2 Örneğin DSC Analizi

3.2 FeSi_2 Örneklerin Elektriksel Özellikleri

Vakumda sentez yöntemiyle hazırlanan FeSi_2 bulk polikristal örneklerin elektrik özelliklerini incelemek için tipi, öz direnç ve yük taşıyıcıların konsantrasyonu ölçümleri yapıldı. Altlık olarak kullanılan Silisyum örnekler p-tipi ve n-tipi seçilerek FeSi_2 filmler buharlaştırıldı. β - FeSi_2 filmlerin ise p-tipi iletkenliğe sahip oldukları bulundu. Fe(W)Si_2 filimlerin elektrik özelliklerini belirlemek için cam üzerine filmler kaplandı ve filmin dört köşesine In-Ga omik kontak yapıldı. Fe(W)Si_2 filmlerin Van der Pauw yöntemiyle öz direnci $\rho = 2,7 \cdot 10^{-3} \Omega\text{-cm}^{-1}$ olarak bulundu.

3.3 Fe/Si Eklemlerin Elektrik Karakteristikleri

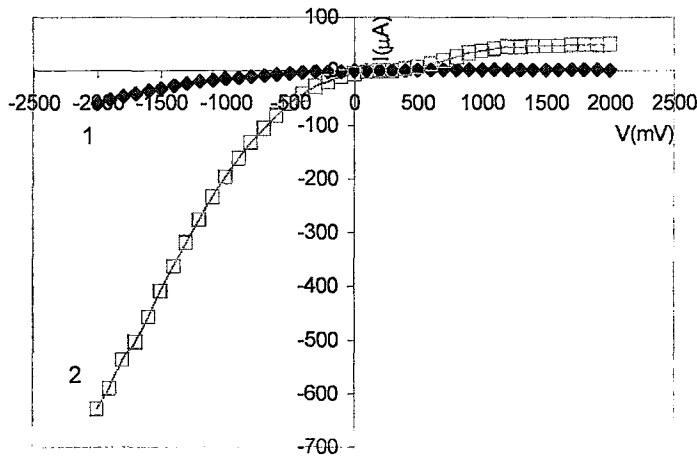
2.2.2 bölümünde bahsettiğimiz gibi n-Si ve p-Si altlıklar üzerine $T=25^{\circ}\text{C}$ ve $T=750^{\circ}\text{C}$ 'de Fe filmleri buharlaştırarak Fe/Si eklemler elde edildi. Bu eklemler üzerinde omik kontakları hazırlanarak, karanlık ve aydınlıkta I-V karakteristikleri ölçümleri alındı. Şekil 3.3a ve şekil 3.3b'de oda sıcaklığında 1. tür Fe/n-Si eklemin I-V karakteristiği yer almaktadır. Fe/Si eklemlerin akım-gerilim grafiklerini incelediğimizde ölçülen en büyük açık devre geriliminin (V_{oc}) Fe/n-Si eklemlerde oluştuğunu gözlemledik. Dört farklı tür Fe/Si eklemler için açık devre gerilim ve kısa devre akım değerleri Tablo 3.1 de yer almaktadır.

Çizelge 3.1 Fe/Si eklemlerin fotovoltaiik parametreler

Eklemin türü	Altlığın sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Fotovoltaiik parametresi			
		Aydınlatma Fe tarafından		Aydınlatma Si tarafından	
		$V_{oc}(\text{mV})$	$J_{sc}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{mV})$	$J_{sc}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
1. Fe/n-Si	25	210	33,6	178	20,5
2. Fe/p-Si	25	0,19	1,05	0	0
3. Fe/n-Si	750	51	2	18	0,9
4. Fe/p-Si	750	56	0,1	16	0

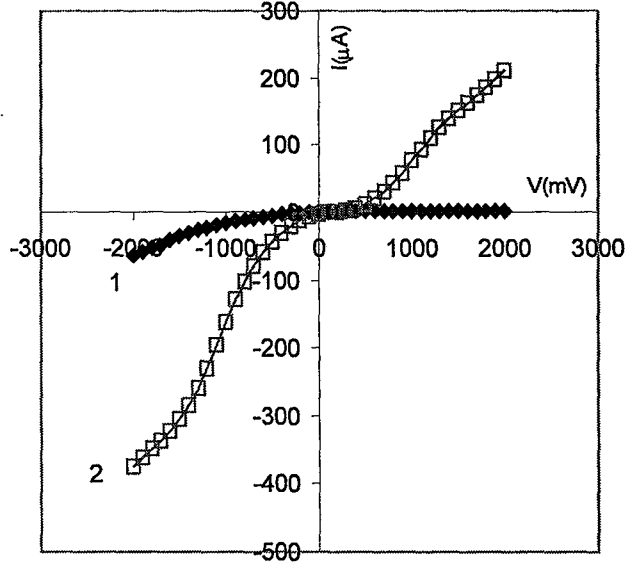
Fe/Si eklemlerin hem film hemde altlık tarafından yapılan ölçümlerle 4 tür olarak sırasıyla akım-gerilim grafikleri verilmiştir.

1. Tür Fe/n-Si eklemler



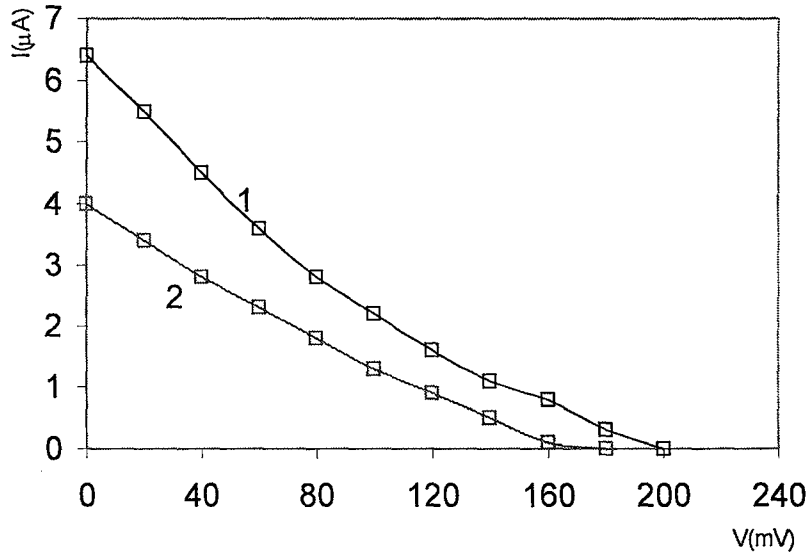
Şekil 3.3a 1. tür Fe/n-Si eklemin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}\text{C}$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



Şekil 3.3b 1. tür Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^{\circ}\text{C}$)
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

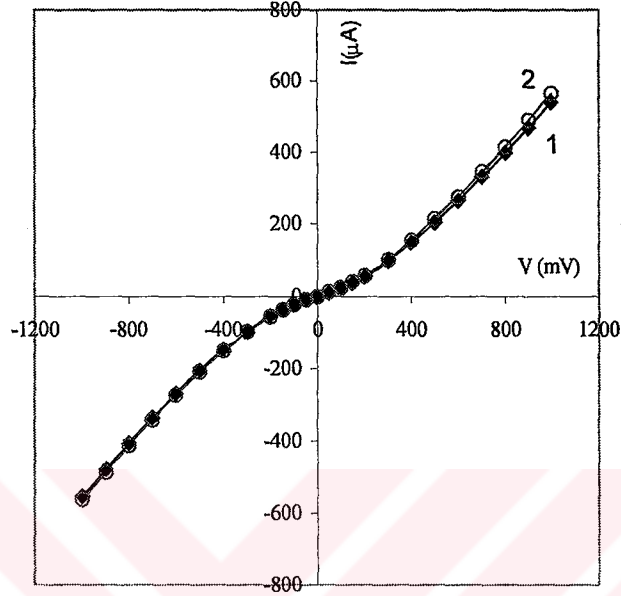
Fe/n-Si eklemlerin I-V karakteristiklerine bakıldığında film tarafından ve silisyum tarafından yapılan ölçümlerin her ikisinde de ışığa duyarlılık görülmektedir. Şekil 3.4 de ise bu iki ölçümün karşılaştırmalı grafiği verilmektedir. Grafikten de görüleceği gibi film tarafından yapılan ölçümlerde elde edilen parametreler altlık tarafından yapılan ölçümlere göre daha yüksektir.



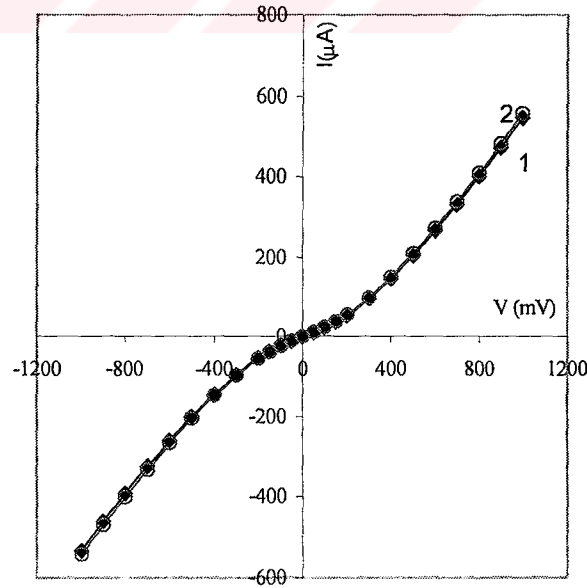
Şekil 3.4 1. tür Fe/n-Si eklemin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği
Aydınlatmalar (1) film tarafından (2) altlık tarafından

2. Tür Fe/p-Si eklemler

Bu tür Fe/p-Si eklemler, Fe/n-Si eklemlerin aksine, doğrultma derecesi çok küçüktür ve ışığa duyarlılık gözlenmemiştir. Fe/p-Si eklemlerin akım gerilim karakteristikleri Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b de verilmiştir ve 2. tür eklemler omik kontak özelliklerini gösterirler.



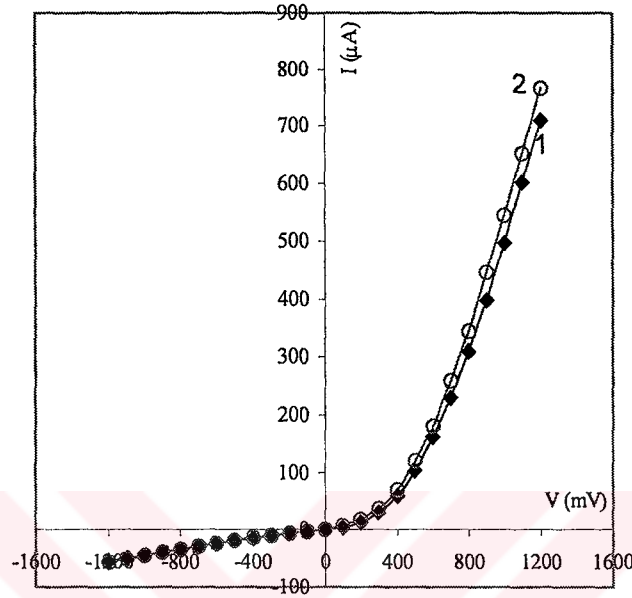
Şekil 3.5a 2. tür Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}\text{C}$)
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



Şekil 3.5b 2. tür Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}\text{C}$)
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

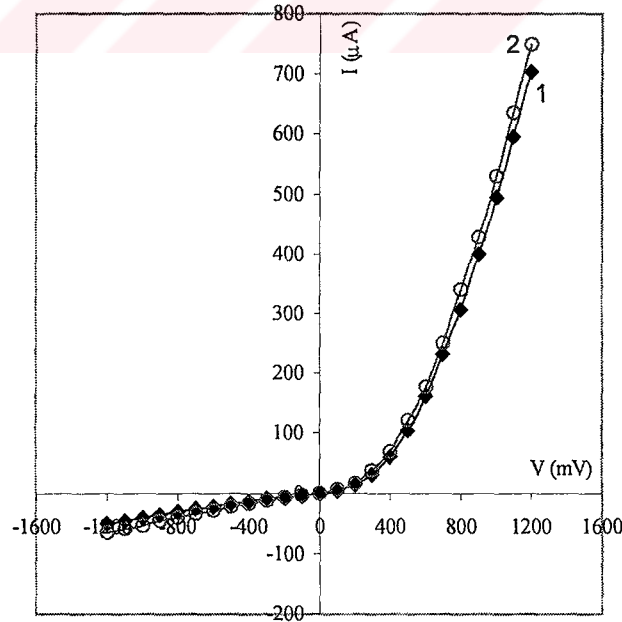
3. Tür Fe/n-Si eklemler

750⁰C lik altlık sıcaklığında elde edilen Fe/n-Si eklemlerde doğrultma özelliği bulunmasına rağmen ışığa duyarlı değildirler. Bu eklemlere ait I-V karakteristikleri Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b de verilmektedir.



Şekil 3.6a 3. tür Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^0C$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından

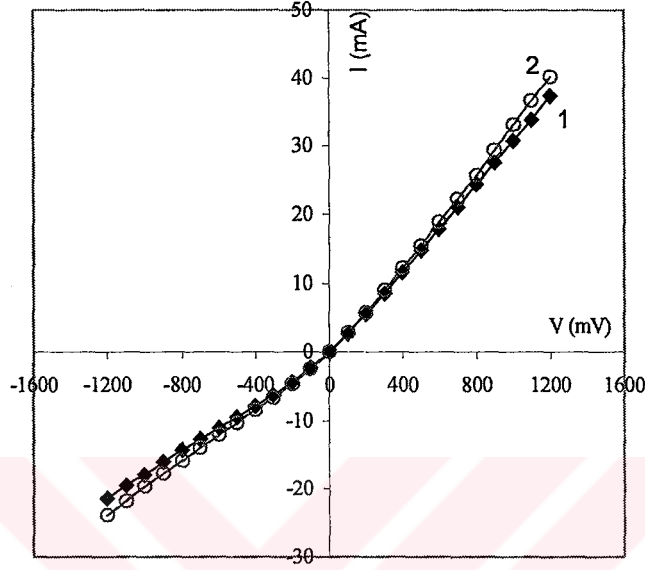


Şekil 3.6b 3. tür Fe/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^0C$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, Aydınlatma altlık tarafından

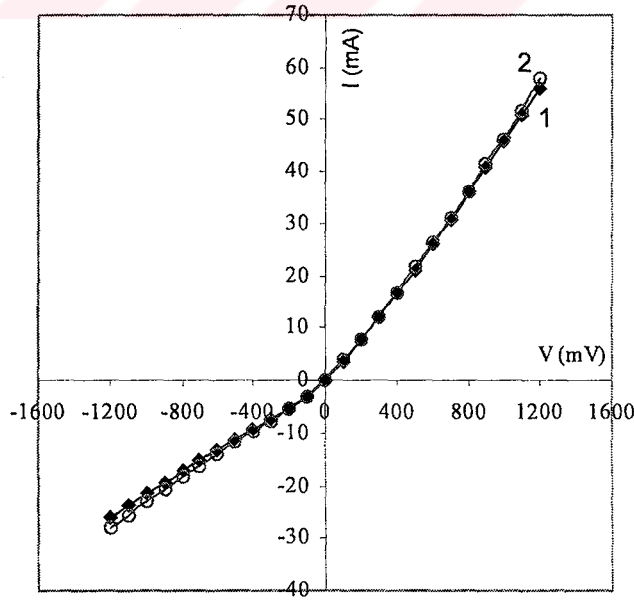
4. Tür Fe/p-Si eklemler

750⁰C lik altlık sıcaklığında elde edilen Fe/p-Si eklemlerin I-V karakteristikleri 25⁰C lik altlık sıcaklığında elde edilenler gibi, omiklik davranışı ve ışığa duyarsızlık göstermektedir. Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b de bu eklemlerin I-V karakteristikleri yer almaktadır.



Şekil 3.7a 4. tür Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^0C$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



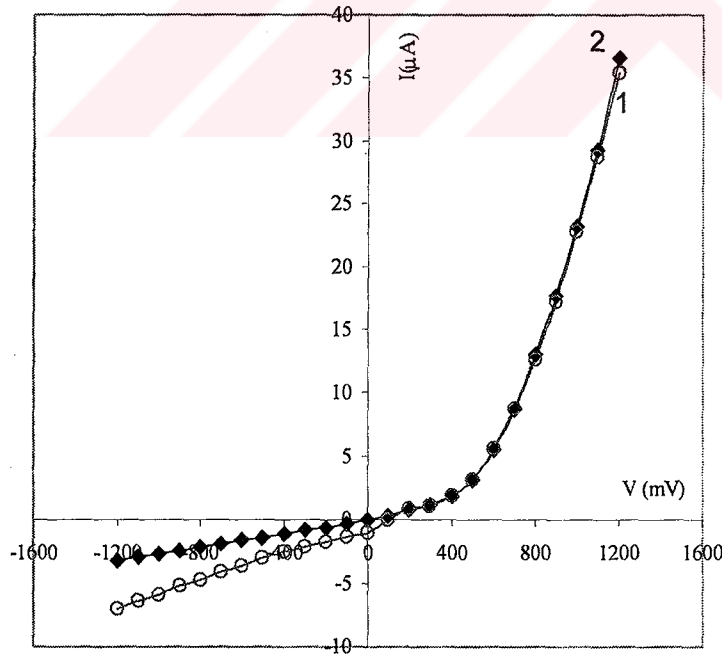
Şekil 3.7b 4. tür Fe/p-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=750^0C$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

3.4 FeSi₂/Si Eklemlerin Elektrik ve Fotovoltaik Özellikleri

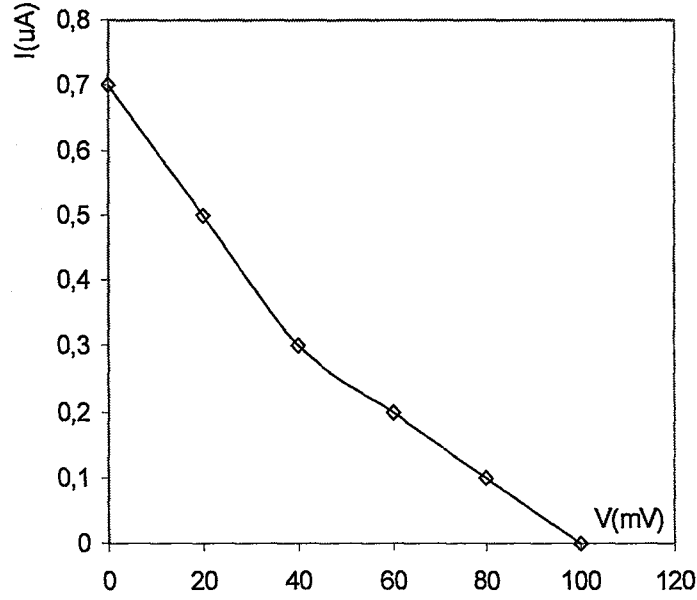
Bu çalışmamızda toz haldeki silisyum ve demiri stokiometrik oranda karıştırarak mekanik basınçla FeSi₂ tabletler elde ettik. Elde edilen tabletlerden bazıları ampulleme işlemi yapılarak bulk FeSi₂ parçacıklar yapıldı. Bu toz tabletler ve bulk parçacıklar oda sıcaklığında n-Si ve p-Si altlıklar üzerine kaplanarak FeSi₂/Si heteroelemler elde edildi. Hazırlanan bu eklemlerin film ve altlık tarafından karanlıkta ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristiklerini inceledik. FeSi₂/Si eklemlerde en büyük açık devre gerilimini (V_{oc}) FeSi₂/n-Si eklemlerde elde ettik ($V_{oc} \approx 110$ mV). FeSi₂/Si eklemlere ait incelenen I-V karakteristikleri grafikleri aşağıda gösterilmiştir. FeSi₂/Si heteroelemlerde yine 4 tipte incelenmişlerdir.

1. Tip FeSi₂/n-Si heteroelemler, tavlınmamış FeSi₂ kompozit tabletin oda sıcaklığındaki n-Si üzerine buharlaştırılmasıyla elde edilmişlerdir. Bu eklemlerin I-V karakteristikleri incelendiğinde Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da görüldüğü gibi eklemlerin ışığa duyarlılığında ve doğrultma özelliğinden bahsedebiliriz. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, 1. tip heteroelemin fotovoltaik parametreler $V_{oc}=105$ mV, $I_{sc}=0,7$ μ A dir.



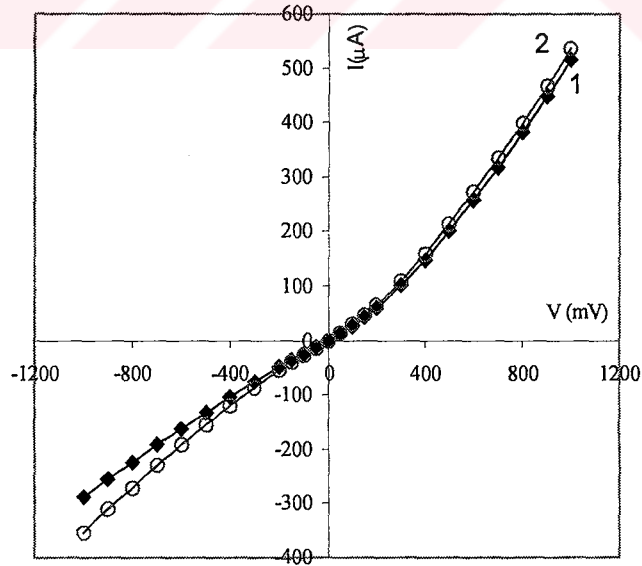
Şekil 3.8 1. tip FeSi₂/n-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{alt}=25^{\circ}\text{C}$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



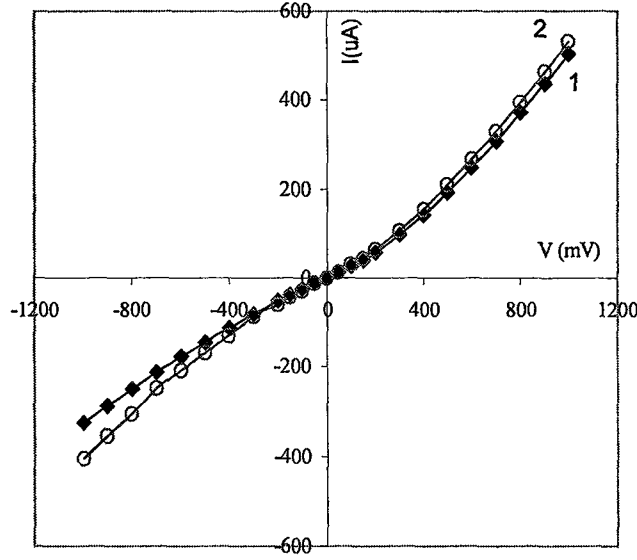
Şekil 3.9 1. tip $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ heteroeklemler için fotoakım yoğunluğunu-gerilim karakteristiği

2. Tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ heteroeklemler, birinci tipe benzer şekilde, bu kez FeSi_2 filmi p-Si altlık üzerinde $T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$ 'de elde edilmişlerdir. 2. tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ heteroeklemlerin I-V karakteristikleri (Şekil 3.10a ve Şekil 3.10b), 2. tür Fe/p-Si karakteristiklerine benzer şekilde, omiklik ve ışığa duyarlılık davranışı gösterirler.



Şekil 3.10a 2. tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

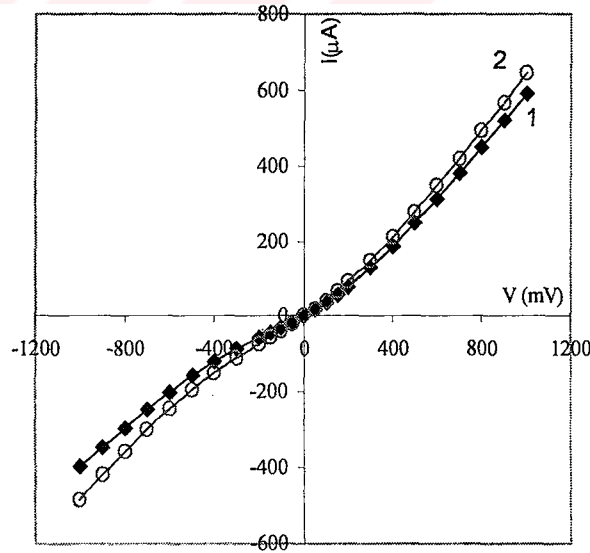
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta ,aydınlatma film tarafından



Şekil 3.10b 2. tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

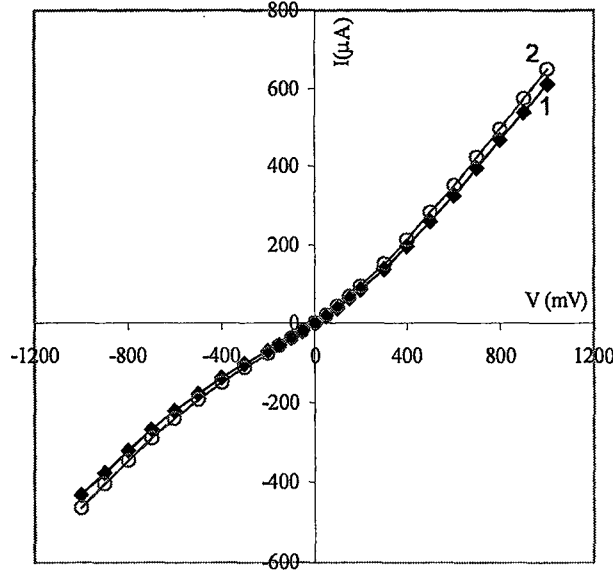
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

3. Tip $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ heteroelekmler, vakum ortamında ampulde sentez edilmiş FeSi_2 parçacıkların n-Si altlık üzerine oda sıcaklığında buharlaştırılmasıyla hazırlanmışlardır. Şekil 3.11a ve 3.11b'den görüldüğü gibi, 3. tip heteroelekmlerin doğrultma ve ışığa duyarlılık özellikleri zayıftır.



Şekil 3.11a 3. tip $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

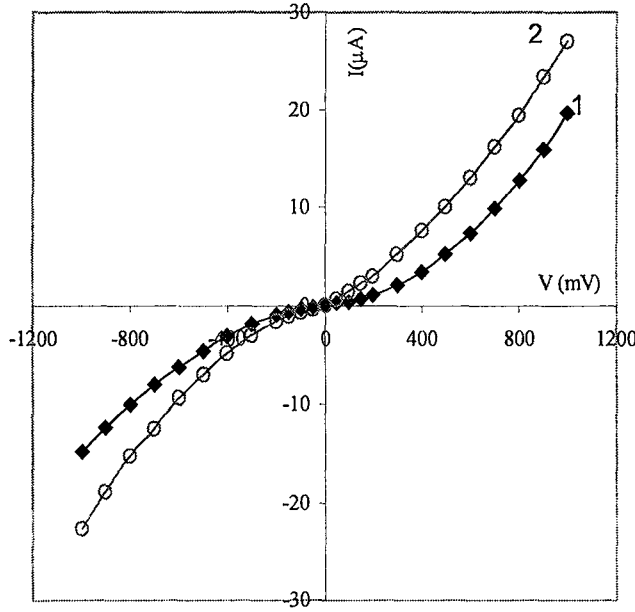
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



Şekil 3.11b 3. tip $\text{FeSi}_2/\text{n-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

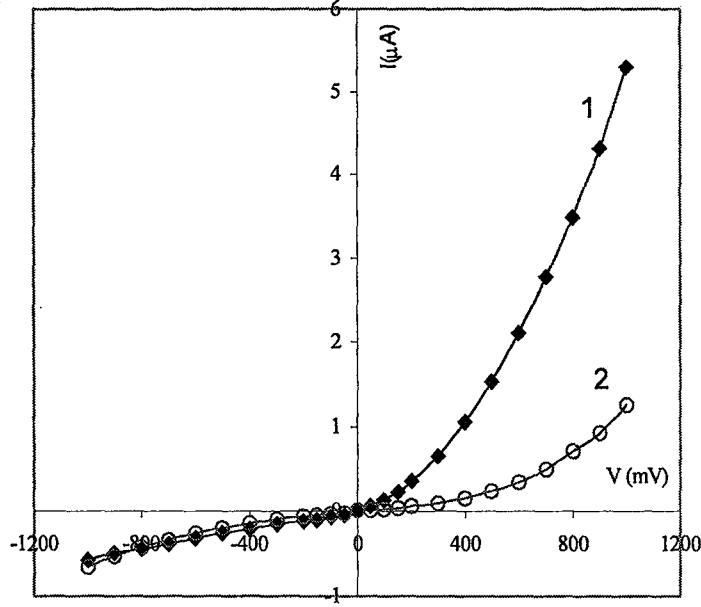
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

4. Tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ heteroelektrikler, üçüncü tip eklemlerin hazırlanma şartlarında, ancak p-Si altlık üzerinde elde edilmişlerdir. Eklemlerin I-V karakteristiği ölçümleri aydınlatma film tarafında yapıldığında eklemden her iki yönde ışığa duyarlılık var (Şekil 3.12a). Si altlık tarafından yapılan aydınlatmada ise doğru akım azalmaktadır (Şekil 3.12b).



Şekil 3.12a 4. tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T_{\text{alt}}=25^\circ\text{C}$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından



Şekil 3.12a 4. tip $\text{FeSi}_2/\text{p-Si}$ eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ($T=25^\circ\text{C}$)

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından

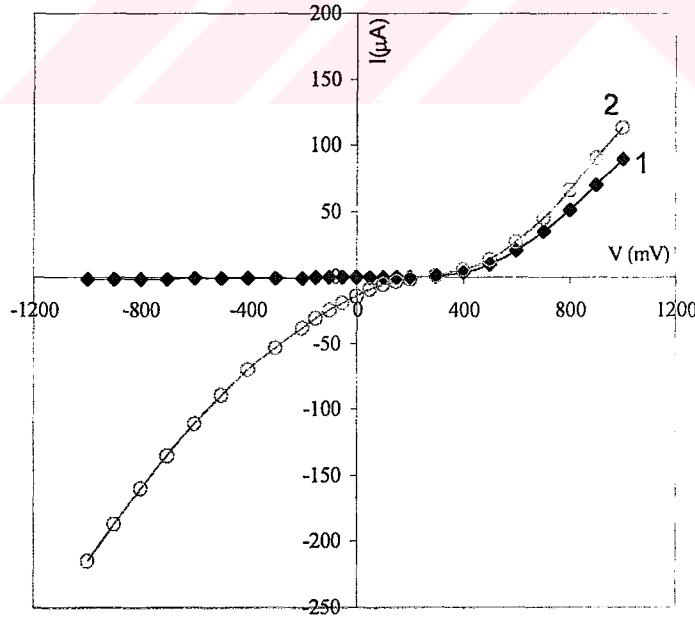
3.5 FeWSi/Si Heteroelekmlerin Elektrik ve Fotovoltaik Karakteristikleri

Bölüm 2.1’de anlatılan yöntemle sentezlenmiş Fe(W)Si_2 bulk polikristali n-Si üzerine oda sıcaklığında buharlaştırılarak $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroelekmler elde edildi. Elde edilen filmin TEMK yöntemiyle ölçülen iletkenliği p-tipi dir. Dolayısıyla $\beta\text{-FeWSi}_2/\text{n-Si}$ heteroelekmler p-n eklemdir. Hazırlanan bu eklemlerin karanlıkta ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri incelenmiştir (Şekil 3.13 ve Şekil 3.14). Ayrıca $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroelekmlerin bazı fotovoltaik parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu eklemlerde açık devre gerilimi yaklaşık $V_{oc}=280\text{ mV}$ elde edilmiştir. $\text{Fe(W)Si}_2/\text{n-Si}$ heteroelekmlerin fotoduyarlılık katsayıları da $I_{aydınlık}/I_{karanlık}$ ($V=1\text{ V}$ için) en verimlisinde yaklaşık 1800 kat bulunmuştur. Aynı zamanda en yüksek kısa devre akımı yoğunluğu $J_{sc}=160\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak bu tür eklemlerde elde edilmiştir. Bu eklemlerde hem fotoduyarlılık hemde doğrultma katsayısı film tarafından alınan ölçümlerde altlık tarafından alınan ölçümlerden daha büyük çıkmıştır.

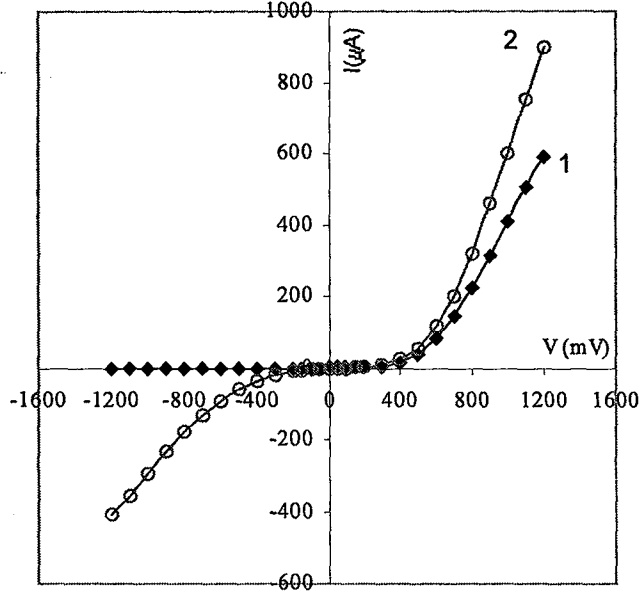
Çizelge 3.2 Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemlerin fotovoltaiik parametreleri

Eklem parametreleri	Ölçme şartları	Değerler
Doğrultma katsayısı $I_{\text{doğru}}/I_{\text{ters}}$	Karanlık $V = \pm 1 \text{ V}$ için	1194
Foto duyarlılık $I_{\text{aydınlık}}/I_{\text{karanlık}}$	Film tarafı Si tarafı	1790 259
V_{oc} (mV) J_{sc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Film tarafından aydınlatma Si tarafından aydınlatma	275 mV ; $160 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 116 mV ; $7,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

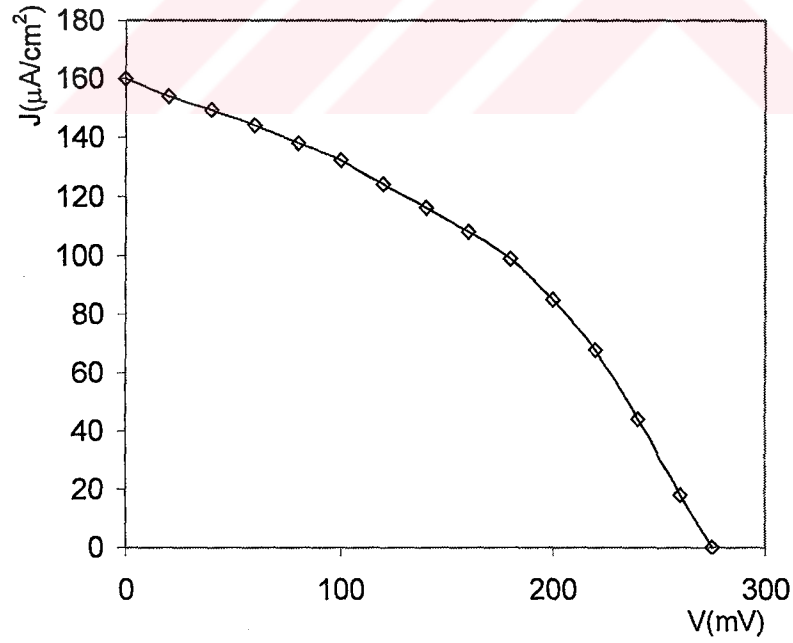
Görüldüğü gibi eklem her iki tarafından da yapılan ölçümler neticesinde iki tarafta yüksek doğrultma özelliği ve ışığa duyarlılık göstermiştir. Şekil 3.13a'daki aydınlık akım-gerilim karakteristiğinin koordinat sisteminin dördüncü bölgesi Şekil 3.15'de verilmiştir. Şekilde görülen eklem parametreleri $V_{\text{oc}}=275 \text{ mV}$, $J=160 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $\text{ff}=0,405$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.13a Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristikleri

(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma film tarafından

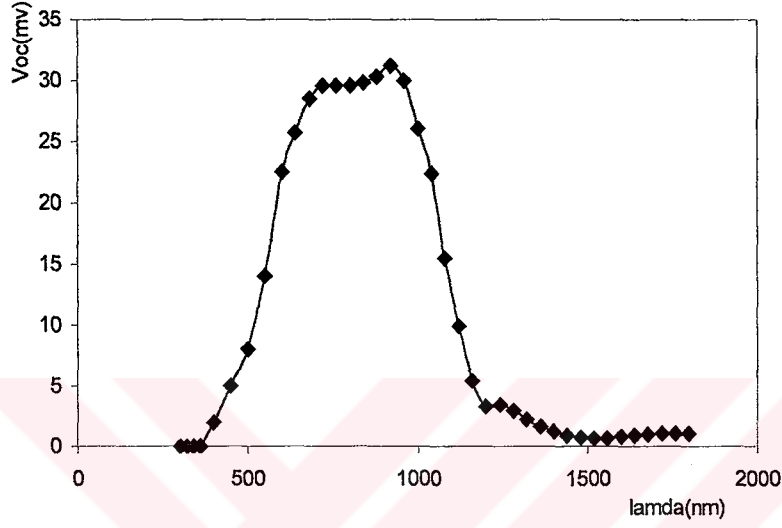


Şekil 3.13b Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristikleri
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta, aydınlatma altlık tarafından



Şekil 3.14 Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemlerin fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrisi

Eklemlerin fotoduyarlılık spektrumları $\lambda=300-2000$ nm dalga boyu aralığında incelendi ve bu bölgede Şekil 3.15’de görüldüğü gibi duyarlılık gözlendi. Fotoduyarlılık spektrumunda Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemler Şekil 3.15’de görüldüğü gibi 350-1500 nm aralığında geniş bölgede ışığa duyarlıdır.



Şekil 3.15 Fe(W)Si₂/n-Si heteroeklemlerin fotoduyarlılık spektral dağılımı

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı üç yöntem kullanarak elde ettiğimiz FeSi₂/Si eklemlerin elektrik ve fotovoltaiik karakteristikleri incelendi. Sonuçları şu şekilde ifade edebiliriz;

1. n-tipi ve p-tipi silisyum altlıklar üzerine T=25⁰C ve T=750⁰C altlık sıcaklıklarında elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile Fe/n-Si ve Fe/p-Si eklemler elde edildi. Eklemlerin karanlıkda ve aydınlıkdaaki akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesinden, onların doğrultma özelliğine ve fotoduyarlılığa sahip olduğu gözlemlendi. Çalışmalarımız sonucunda Fe/Si eklemler içerisinde oda sıcaklığında (T=25⁰C) elde edilen Fe/n-Si eklemler en yüksek fotovoltaiik parametrelere sahip olduğu tespit edildi (V_{oc}=210 mV, J_{sc}=33,6 µA/cm²).

Demir filmin Si altlığın üzerine buharlaştırıldığı sırada, demirin Si altlığa tepkimesel difüzyonu neticesinde Fe/Si sınır bölgesinde β-FeSi₂ ince filmin oluşması tahmin edilmektedir.

2. FeSi₂ ve tungstenle katkılanmış Fe(W)Si₂ bulk örnekler vakum ortamında 1250-850⁰C aralık sıcaklığında sentezlendi. Büyütülen bulk örneklerin kristal yapısı, fazı ve elektriksel özellikleri sırasıyla X-ışınları kırınımı, taramalı diferansiyel kalorimetri ve öz direnç ölçümlerinden belirlendi. Elde edilen bulk β-FeSi₂ örnekler ortorombik yapıya ve p- tipi iletkenliğe sahip olduğu görüldü.
3. β-FeSi₂ filmin Si altlıkların üzerine (T=25⁰C) elektron demeti buharlaştırma yöntemiyle β-FeSi₂/n-Si ve β-FeSi₂/p-Si heteroeiklemler elde edildi. Bu heteroeiklemler arasında p-βFeSi₂/n-Si en yüksek fotovoltaiik parametreler (V_{oc}=105 mV, J_{sc}=1,1 µA/cm²) gösterdi.
4. Fe(W)Si₂ bulk örneğin cam ve Si altlıklar üzerine buharlaştırılması ile Fe(W)Si₂/Cam ve Fe(W)Si₂/n-Si heteroeiklemler hazırlandı. Cam üzerindeki Fe(W)Si₂ filmin p-tipi ve öz direnci (ρ=2,7.10⁻³ Ω-cm) olduğu ölçüldü.
5. Elde edilen Fe(W)Si₂/n-Si heteroeiklemlerin elektrik ve fotovoltaiik özellikleri incelendi. Sonuç olarak p-FeWSi₂/n-Si heteroeiklemler λ= 350-1500 nm aralığında fotoduyarlılık gösterdiği görüldü. Fotoduyarlılık spektrumunun kızıl ötesi sınırı (λ=1500 nm) β-FeSi₂ yarıiletkenin yasak band genişliğine uymaktadır (E_g=0,87 eV, Tablo1.2). p-Fe(W)Si₂/n-Si heteroeiklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinden elde

edilen parametreler tablo 3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada incelenen tüm heteroeklemler arasında p-FeWSi₂/n-Si heteroeklemler fotovoltaiik parametreleri en büyüktür: $V_{oc}=275$ mV, $J_{sc}=160$ μ A/cm², FF= 0,405. p-FeWSi₂/n-Si heteroeklemlerin başka bir dikkat çeken özelliğı doğrultma katsayısının ($I_{dogru}/I_{ters}=1194$) ve ters yöndeki aydınlıktaki akımın, karanlıktaki akıma oranının (yani fotoduyarlılığın) yüksek olmasıdır($I_{aydınlık}/I_{karanlık}=1790$ Tablo 3.2). Bu özellik p-FeWSi₂/n-Si heteroeklemleri fotodiyod gibi kullanılmasına imkan sağlar.

KAYNAKLAR

B.Schuller, R.Carius, S.Lenk, S.Monti "Optical Properties of β -FeSi₂ Precipitate Layers in Silicon" Optical Materials 17 (2001) 121-124.

Caferov, T., (1998) Yarıiletken Fiziği 1, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Caferov, T., (2000) Katıhal Elektronığı, Yıldız Teknik Üniversitesi Vakfı Yayınları, İstanbul.

Çalışkan, M. (2002) Metal-CuInSe₂ Eklemlerin Elektrik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fizik Bölümü.

Green, M.A.,(1982) Solar Cells, Englewood Cliffs, New Jersey.

Hiroshi Katsumata, Yunosuke Makita, Naoto Kabayashi, Masataka Hasegawa, Hajime Shibata, Shin-ichiro Uekusa " Syenthesis of β -feSi₂ for Optical Applications by Fe Triple-energy Ion İmplantation into Si(100) and Si(111) Substrates" Thin Solid Films 281-282 (1996) 252-255.

Hirofumi Kakemoto "Growth of β -feSi₂ Crystals and Thin Films and Their Physical Properties" Department of Applied Physics, Faculty of Science, University of Tokyo.

H.Kakemoto, Y.Makita, A.Obara, Y.Tsai, S.Sakuragi, S.Ando and T.Tsukamoto "Structural and Optical Properties of β -feSi₂ / Si(100) Prepared by Laser Ablation Method" Mat. Res. Soc. Symp.Proc.Vol.478 (1997) Materials Research Society

H.Kakemoto, T.Higuchi, Y.Makita, S.Sakuragi, Y.Kino, T.Tsukamoto, S.Shin "Magnetic Property and Electronic Structure of β -feSi₂" Physica B 281-282 (2000) 638-640.

H.Kakemoto, Y.Makita, Y.Kiro, S.Sakuragi, T.Tsukamota " Small Polaron of β -FeSi₂ Obtained from Optical Measurements" Thin Solid Films 381(2001) 251-255.

H. Lange "Electronic Structure and Interband Optical Properties of B-FeSi₂" Thin Solid Films 381 (2001) 171-175.

H. Lange, Physics State Solid (b) 201 (1997) 3.

H.Shibata, Y.Makita, H.Kakemoto, Y.Tsai, S.Sakuragi, H.Katsumata, A.Obara, N.Kabayashi, S.Uekusa, T.Tsukanato, and Y.Imai " Electrical Properties of β -feSi₂ Bulk Crystal Grown by Horizontal Gradient Freeze Method" 15th International Conference on Thermoelectrics (1996).

J.R. Hook, H.E. Hall, Katıhal Fiziği, Birinci Basım: Mart 1999 İstanbul Literatür Yayınları: 28.

K.Okajima, H.Yamatsugu, C.Wen, M.Sudoh, K.Yamada "Spectral Sensitivity Enhanced by Thin Film of β -FeSi₂ – Si Composite Prepared by RF-Sputtering Deposition" Thin Solid Films 381(2001) 267-275.

K.P. Homewood, K.J. Reeson, R. M. G. William, A.K. Kewell, M.A. Lourenso, G. Shao, Y.L. Chen, J. S. Sharpe, C.N. McKintey, T. Butler, "Ion Beam Synthesized Silicides : Growth, Characterization and Devices" Thin Solid Films 381 (2001) 188-193.

Masaaki Sugiyama, Yoshihito Maeda "Microstructure Characterization of Ion-Beam Synthesized β -FeSi₂ Phase by Transmission Electron Microscopy" Thin Solid Films (2001) 225-230.

M.A.Lourenço, T.M.Butler, A.K.Kewell, R.M.Guilliam, K.J. Kirkby, K.P.Homewood "Electrical, Electronic and Optical Characterisation of Ion-Beam Synthesized β -FeSi₂ Light Emitting Devices" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 175-177(2001) 153-163.

N. P. Goss, Trans. Am. Soc. Metals, 23 (1935) 515.

O. Kubaschewski : Iron-Binary Phase Diagram (Spinger-Verlag, New York, 1982).

S.J. Clark, H.M. Al-Allok, S.Brand, R.A. Abram, Phys.Rev. B58(1998) 10389.

Süngü, B. (2000) CuInSe₂-GaAs Eklemlerin Elektriksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fizik Bölümü.

Shur, M., (1987), GaAs Devices and Circuits, Plenum Press, New York.

Sze, S.M., (1981), Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, New York.

T. Higaski, T. Nagase, I. Yamauchi "Long Period Structure of β -FeSi₂" Journal of Alloys and Compounds 1 (2001) 000-000.

Yeşilkaya, S. X-Işınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Elektriksel Karakteristiklerine Etkisi, (1999) Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fizik Bölümü.

Yofi Imai, Mesakazu Muka, Tatsuo Tsunoda "Calculation of Electronic Energy and Density of State of Iron-disilicides using a Total-energy Pseudopotential Method, CASTEP" Thin Solid Films 381 (2001) 176-182.

Yoshito Maeda, Kenj Umezawa, Yoshikazu Hayshi, Kiyoshi Miyake, Kenya Ohashi "Photovoltaic Properties of Ion-beam Synthesized β -FeSi₂ /n-Si Heterojunctions" Thin Solid Films 381 (2001) 256-261.

Yunosuke Makita " Materials Availabilty for Thin Film Solar Cells" 1997 The American Institute of Physics 1-56396-704-9/97/.

Zhensxin Liu, Motoki Watanabe, Mitsugu Hanabusa (2000) "Electrical and Photovoltaic Properties of Iron-Silicide/ Silicon Heterostructures Formed by Pulsed Laser Deposition" Thin Solid Films 381(2001) 262-266.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	22.11.1977	
Doğum yeri	Elazığ	
Lise	1991-1994	Ahmet Rasim Lisesi
Lisans	1994-1998	Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
Çalıştığı Kurum	1999-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi

