

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ni/Si EKLEMLERİN ELEKTRİK VE OPTİK
KARAKTERİSTİKLERİ**

Fizikçi Ayşegül ÇELİK

**F.B.E. Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Tayyar CAFEROV (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Silisyumun Yapısal Özellikleri	3
2.2 Silisyumun Optik, Elektrik ve Fotoelektrik özellikleri	4
2.3 Ni/Si Eklemlerin Özellikleri	9
2.4 Metal Yarıiletken Schottky Diyodların Elektrik Karakteristikleri	21
2.5 Metal Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitansı	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
3.1 Silisyumun iletkenlik tipinin, öz direncinin, yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun ve mobilitesinin belirlenmesi	26
3.1.1 İletkenlik tipinin belirlenmesi	26
3.1.2 Wan der Pauw Yöntemiyle Öz direnç Ölçümü	26
3.1.3 Yük Taşıyıcı Konsantrasyonunun ve Mobilitesinin Belirlenmesi	27
3.2 Silisyumun Optik Geçirgenlik Spektrumunun Ölçümü	29
3.3 Ni/Si Eklemlerin Hazırlanması	29
3.3.1 Ni/Si Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri Ölçümü ve Parametrelerinin Bulunması	30
3.4 Ni/Si Eklemlerin Kapasitans - Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümü ve Katkı Konsantrasyonunun Bulunması	31
3.5 Ni/Si Eklemlerin XRF ve XRD Yöntemleri İle Analizi	31
4. BULGULAR	33
4.1 Silisyumun Elektrik ve Optik Parametreleri	33
4.2 Ni/ Si Eklemlerinde Nikel Difüzyonunun XRF Yöntemiyle İncelenmesi	34

4.3	Ni /Si Eklemlerde Oluşan Fazların XRD yöntemiyle incelenmesi	36
4.4	Ni /nSi Diyodların Elektrik Karakteristikleri	40
4.4.1	Ni/nSi Diyodların Akım-Gerilim Karakteristikleri	40
4.4.2	Ni/ nSi Diyodların C-V Karakteristikleri	42
4.5	Tavlamanın Ni /nSi Diyodların Elektrik Karakteristiklerine Etkisi	44
4.6	Ni/ nSi Diyodların Fotovoltaik Karakteristikleri.....	50
4.7	Ni/pSi Diyodların I-V ve C-V Karakteristikleri	51
4.8	Tavlamanın Ni/pSi Diyodların Elektrik Parametrelerine Etkisi.....	54
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	56
KAYNAKLAR.....		58
ÖZGEÇMİŞ.....		59

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
b, d	Kalınlık
B	Magnetik Alan
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yüğü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donor Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Band Genişliğı
E _H	Hidrojenin İyonlaşma Enerjisi, Hall Alanının şiddeti
$\vec{F}$	Kuvvet
h	Planck Sabiti (6.62x10 ⁻³⁴ J.s), Yükseklik
I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
k	Dalga Vektörü
m _e [*] , m _h [*]	Elektronun ve Deliğın Etkin Kütlesi
m _i [*]	İletkenlik Bandında Elektronların Etkin Kütlesi
m _v [*]	Valans Bandında Elektronların Etkin Kütlesi
n	Kırılma İndisi, Elektronların Konsantrasyonu
p	Deliklerin Konsantrasyonu
q	Yük
R	Direnç
R _H	Hall Sabiti
t	Zaman
T	Geçirgenlik, Mutlak Sıcaklık
$\vec{v}$	Hız
V	Gerilim
V _H	Hall Gerilimi
α	Soğurma Katsayısı
ϵ	Dielektrik sabiti
λ	Dalga Boyu
ρ	Özdirenç
μ	Mobilite
σ	İletkenlik
v	Frekans

KISALTIMA LİSTESİ

XRD	X Ray Difraction
XRF	X Ray Flourance
UV	Ultraviolet
FWHM	Full-Width Half-Maximum

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Elmas yapı	3
Şekil 2.2 Silisyum atomunun yapısı	5
Şekil 2.3 Özden yarıiletkenin enerji band diyagramı	5
Şekil 2.4 Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü	7
Şekil 2.5 (a) Donör (b) akseptör tipli yarıiletkenlerin band diyagramları	7
Şekil 2.6 (a) Direkt, (b) İndirekt yarıiletkenlerde band yapısı	8
Şekil 2.7 Ni/Si faz diyagramı	9
Şekil 2.8 X ışını kırınım deseni ($\text{CuK}_{\alpha 1}$) (a) Tavlamadan önce (b) 62 saat 1173 K tavlama sonrası (S.Rey, 2000)	11
Şekil 2.9 Nikel filmin tabaka direncinin tavlama sıcaklığı ile değişimi (W.S.Yoo, 2003)	12
Şekil 2.10 Nikel iyonları kullanılarak 2.10^{17} iyon/ cm^2 ’lik doz ile bombardıman edilen silisyumun XRD analizi (a) $8.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu, (b) $17.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu (K.Y.Gao, 1999)	13
Şekil 2.11 Elektrokaplama ile elde edilen Ni-Si kontakların J-V eğrileri (M.E.Kiziroglu, 2005)	15
Şekil 2.12 Tavlama sıcaklığı ile tabaka direncinin değişimi (a) n tipi silisyum altlık (b) p tipi silisyum altlık (E.N. Mgbenu, 1981)	18
Şekil 2.13 425°C ’de n tipi altlık üzerinde Ni_2Si oluşum kinetiği (E.N.Mgbenu, 1981)	19
Şekil 2.14 Ni_2Si oluşum hızının Arrhenius grafiği (a) n tipi silisyum altlık (b) p tipi altlık (E.N. Mgbenu, 1981)	19
Şekil 2.15 Metal/n-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m > \phi_s$)	22
Şekil 2.16 Metal/n-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m < \phi_s$)	22
Şekil 2.17 Metal/p-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m > \phi_s$)	23
Şekil 2.18 Metal/p-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m < \phi_s$)	23
Şekil 2.19 p-n eklemde keskin konsantrasyon dağılımı	24
Şekil 2.20 p-n eklemde sürekli konsantrasyon dağılımı	25
Şekil 3.1 Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi ve (b) p tipi yarıiletkenin iletkenlik tipini ölçme devresi (Caferov, 1998)	26
Şekil 3.2 Van der Pauw yöntemiyle öz direnç ölçümünde kontakların yerleşimi (Caferov, 1998)	26
Şekil 3.3 Manyetik alandaki (B) pozitif yüklü parçacığın hızını v ve Lorentz kuvvetinin F_L yönlerinin gösterimi (Caferov, 1998)	27
Şekil 3.4 (a) p-tipi ve (b) n-tipi yarıiletkende Hall olayı (Caferov, 1998)	28
Şekil 3.6 Ni/Si yapıların elektrik karakteristiklerinin ölçümü için örneğe yapılan kontaklar	30
Şekil 3.7 X ışınlarının örnek ile etkileşmesi sırasında atom kabuklarında oluşan proseslerin gösterilmesi (a) X ışını enerjisinin soğurulması, (b) serbest elektronun dışarıya atılması, (c) karakteristik K_{α} ışınının oluşması	32
Şekil 3.8 Bir kristal tarafından oluşturulan X ışınları kırınımı	32
Şekil 4.1 Soğurma katsayısının gelen fotonun enerjisine bağlı grafiği (a) n tipi silisyum (b) p tipi silisyum	33
Şekil 4.2 Ni $K_{\alpha 1}$ pik şiddetinin silisyumda dağılımı ($T=500^\circ\text{C}$, 15 saat)	35
Şekil 4.3 Nikelin silisyumdaki konsantrasyon dağılımı ($T=500^\circ\text{C}$, 15 saat)	35
Şekil 4.4 Ni/pSi yapının XRD spektrumu (500°C , 1.5 saat)	37
Şekil 4.5 Ni/pSi yapının XRD spektrumu (500°C , 15 saat)	38
Şekil 4.6 Ni-nSi diyodun tavlamadan önceki I-V karakteristikleri (a) nikel tarafından aydınlıkta, (b) In tarafından aydınlıkta	40
Şekil 4.7 Ni-nSi diyodun tavlamadan önceki (a) ln J-V grafiği, (b) ln(J /Js)-V grafiği	40
Şekil 4.8 Ni /nSi diyodun tavlamadan önceki C-V karakteristiği ($f=1 \text{ MHz}$)	42

Şekil 4.9 Ni /nSi Diyodun tavlama öncesi eklem kalınlığına bağlı donör konsantrasyon dağılımlı.	43
Şekil 4.10 Ni /nSi diyodun 500°C’de 10 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.	44
Şekil 4.11 Ni /nSi diyodun 500°C’de 10 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği (f=1 MHz).	45
Şekil 4.12 Ni /nSi diyodun 500°C’de 10 dakika tavlama sonrası eklem kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu.	45
Şekil 4.13 Ni /nSi diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.	46
Şekil 4.14 Ni /nSi diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği (f=1 MHz).	46
Şekil 4.15 Ni /nSi Diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası eklem kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu dağılımlı.	47
Şekil 4.16 Ni /nSi diyodun 500°C’de 30 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.	47
Şekil 4.17 Ni /nSi diyodun 500°C’de 30 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği (f=1 MHz).	48
Şekil 4.18 Ni /nSi Diyodun 500°C’de 30 dakika vakumda tavlama sonrası eklem kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu dağılımlı.	48
Şekil 4.19 Ni /nSi eklem (1) tavlama dan önce ve 500 °C, (2) 10 dakika, (3) 20 dakika, (4) 30 dakika tavlama dan sonraki I-V karakteristiği.	49
Şekil 4.20 500°C’de (1) 20 dakika ve (2) 30 dakika tavlamlı Ni/nSi diyodun aydınlıktaki (I=100 W/cm ²) fotovoltaiik karakteristikleri.	50
Şekil 4.21 Ni/pSi eklem I-V karakteristiği (tavlama öncesi).	51
Şekil 4.22 Ni/pSi eklem doğru yön J-V karakteristiği (tavlama öncesi).	51
Şekil 4.23 Ni/pSi eklem aydınlıktaki fotovoltaiik karakteristiği (Tavlama öncesi).	52
Şekil 4.24 Ni/pSi diyodun C-V karakteristiği (1 MHz).	53
Şekil 4.25 Ni/pSi eklem I-V karakteristiği (500°C, 90 dakika).	54
Şekil 4.26 Ni/pSi eklem C-V karakteristiği (500°C, 90 dakika).	55

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkeninin özellikleri (T.Caferov, 2000).	4
Çizelge 2.2 Nikel silikatlar üzerinde elmasın büyütülmesi ile ilgili yapısal ve kimyasal parametreler (S.Rey, 2000).	10
Çizelge 4.1a Ni $K_{\alpha 1}$ pik şiddetinin silisyumdaki dağılımı.....	34
Çizelge 4.1b Ni konsantrasyonunun silisyumda dağılımı	34
Çizelge 4.2 Ni/pSi yapının (500°C, 1.5 saat) XRD spektrumundan elde edilen parametreler.	37
Çizelge 4.3 Ni/pSi yapının (500°C, 15 saat) XRD spektrumundan elde edilen parametreler.	39
Çizelge 4.4 Ni/nSi için I-V karakteristiklerinden elde edilen parametreler.	49
Çizelge 4.5 Ni/pSi için I-V karakteristiklerinden hesaplanan parametreler.	54

ÖNSÖZ

Bitirme tezimin hazırlanmasında bilgi, tecrübe ve önerileriyle beni yönlendiren, manevi desteğini esirgemeyen ve tezimin sonuçlandırılmasında büyük emeği olan hocam Sayın Prof. Dr. Tayyar CAFEROV'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tezimin her aşamasında vaktini ve desteğini esirgemeyen, tecrübesiyle bana yol gösterip çalışmalarımda yardımcı olan, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan arkadaşım Arş. Gör. Süreyya AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteğini her zaman hissettiğim ve bana her konuda yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. Emel ÇINGİ'ya çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Katihal grubundaki hocalarım; Yrd. Doç. Dr. Serkis YEŞİLKAYA, Yrd. Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ LUŞ, Arş.Gör.Murat ÇALIŞKAN'a ve arkadaşım Arş.Gör. Fatih ONGÜL'e çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve üzerimde büyük emeği olan aileme,

Maddi ve manevi desteğini esirgemeyip her zaman yanımda olan arkadaşım Arş.Gör. Altan BOZDOĞAN'a,

Bana her konuda destek olup motive eden arkadaşlarım Arş.Gör. Asuman AŞIKOĞLU ile Arş.Gör. Ali Veysel TUNÇ'a ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma,

ÇOK TEŞEKKÜR EDERİM.

Arş. Gör. Ayşegül ÇELİK

Haziran,2006

ÖZET

Metal-yarıiletken eklemler, mikroelektronik cihazların temelini oluşturmaktadır. Eklemlerin karakteristikleri ile ilgili yapılan araştırmalarda geçiş metalleri ile elde edilen silikatların elektriksel iletkenliği ve oksitlenmeye karşı yüksek direnç özellikleri dikkat çekmiştir. Fakat, geçiş metal/Si ve silikat/Si eklemlerin özellikleri az incelenmiştir.

Bu çalışmada, kristal silisyum üzerine nikel kaplanarak elde edilen Ni/Si eklemlerin karakteristiklerine tavlamanın etkisi incelenmiştir. Tavlama öncesi ve sonrası ölçülen akım-gerilim karakteristiklerinden; ışığa duyarlılık, engel yüksekliği ve ideallik faktörü, kapasitans-gerilim karakteristiklerinden donör konsantrasyonu ve eklemin genişliği, XRD analizlerinden ise NiSi₂ ve NiSi fazlarının oluştuğu görülmüş ve bu fazların tanecik boyutları hesaplanmıştır. Ayrıca XRF ölçümlerinden nikelin silisyumda konsantrasyon dağılımı ve nikelin difüzyon katsayısı bulunmuştur. Bu çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Hazırlanan Ni/pSi ve Ni/nSi eklemleri Schottky diyonu özellikleri göstermiştir. 500°C tavlama ile bu eklemlerin doğrultma ve fotoduyarlılık özelliklerinin azaldığı görülmüştür. Tavlama ile eklemlerin karakteristiklerinin değişimi Ni-Si sınır bölgesinde yeni fazların oluşumu ile yorumlanmıştır.

Tavlama süresinin artması ile (1.5 saatten 15 saate kadar) XRD spektrumunda NiSi ve NiSi₂ polikristal fazlarına ait pik şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Oluşan bu piklerin yarım şiddetlerinden, tane boyutları hesaplanmış ve 90 dakika tavlama sonunda NiSi₂ fazı için ortalama tane boyutları $d(\text{NiSi}_2)=465\text{\AA}$ ve NiSi fazı için ise $d(\text{NiSi})=971\text{\AA}$ olarak hesaplanmıştır. 15 saatlik tavlama sonunda ise NiSi fazının tane boyutu $d(\text{NiSi})=796\text{\AA}$ 'ya azalırken, NiSi₂ fazının tane boyutu $d(\text{NiSi}_2)=580\text{\AA}$ 'ya yükselmiştir.

Ni/pSi yapı vakumda (500°C, 15 saat) tavlansak XRF ölçümü yapılmış ve buradan nikelin silisyumda oluşan konsantrasyon dağılımı için iki difüzyon katsayısı hesaplanmıştır. Yüzeye yakın bölgede ($x<1\mu\text{m}$) $D_y \approx 5.10^{-14}\text{ cm}^2/\text{sn}$, iç bölgede ise $D_i \approx 10^{-8}\text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak bulunmuştur. Nikelin yüzeye yakın bölgesindeki daha yavaş difüzyonu buradaki Ni/Si fazlarının oluşumu ile yorumlanmıştır. Nikelin örneğin iç bölgelerindeki daha hızlı hareketi, arayer pozisyonlarla difüzyonu ile ilgilidir.

Böylece, Ni/Si eklemlerin Schottky diyon özelliği gösterdiği, Ni/pSi eklemlerin diyon parametrelerinin, Ni/nSi eklemlere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. 500°C'de tavlama neticesinde, Ni/Si eklemlerin sınır bölgesinde yeni NiSi ve NiSi₂ fazların oluşumu nedeniyle diyon özellikleri bozulmaktadır.

Anahtar Kelime: Ni/Si eklemler, Ni₂Si, NiSi, NiSi₂, Difüzyon.

ABSTRACT

Metal-semiconductor junctions base on microelectronic devices. Hence, various investigations were made about characteristics of these junctions. In these investigations, properties of electrical conductivity and high resistivity against to oxidation of silicides prepared by transition metals attracted. But , properties of transition metal/Si and silicide/Si junctions have rarely examined.

In this study, Ni/Si junctions were obtained by Ni evaporation on crystal silicon and annealing effect on characteristics of these junctions was investigated. Photosensitivity, barrier height and ideality factor calculated from measured current-voltage characteristics after and before annealing processes, it has seen occurring of NiSi₂ and NiSi phases from XRD analysis and grain sizes of polycrystalline nickel silicide phase calculated. XRF measurement made add calculated Ni concentration distribution in silicon. We obtained the results as follows:

Prepared Ni/pSi and Ni/nSi junctions shows properties of Schottky diodes. Properties of rectification and photosensitivity of these junctions decrease by annealing at 500°C. Change of junction characteristics by annealing attributed to form new phases at Ni-Si boundary zone.

We have seen composition of NiSi and NiSi₂ polycrystalline phases by annealing of Ni/Si structures in vacuum and peak intensities of these phases have increased with increasing annealing times (from 1.5 to 15 hours) in XRD spectrums. Grain sizes calculated from a half intensity of composed peaks and after 90 minutes annealing, grain sizes for NiSi₂ and NiSi have found $d(\text{NiSi}_2) = 465 \text{ \AA}$, $d(\text{NiSi}) = 971 \text{ \AA}$, respectively. After 15 hours annealing, grain size for NiSi decreased to $d(\text{NiSi}) = 796 \text{ \AA}$. On the contrary, grain size for NiSi₂ increased to $d(\text{NiSi}_2) = 580 \text{ \AA}$.

Ni/pSi structures annealed in vacuum (at 500°C for 15 hours) and then made XRF measurements. Two diffusion coefficients calculated from XRF for concentration distribution of nickel silicon. It is found $D_y \approx 5.10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sn}$ and $D_i \approx 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$ for near to surface and interior zone, respectively.

Slower diffusion on near the surface attributed to composition of NiSi phases on there. Fast activity of nickel in interior zone concerned on diffusion with interstitial positions. Ni films were deposited by evaporation on silicon substrates and thus composed Ni/Si junctions show Schottky diode properties. It is also shown that diode parameters of Ni/pSi junctions are higher than of Ni/nSi junctions. After annealing at 500°C, diode properties of Ni/Si junctions are decomposed due to composition of new Ni/Si and NiSi₂ phases on boundary zone.

Keywords: Ni/Si junctions, Ni₂Si, NiSi, NiSi₂, Diffusion.

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken arayüzleri modern elektronikte ve mikroelektronik cihazlarda çok önemli rol oynamaktadır. n ve p tipi silisyum kullanılarak yapılan metal/ silikat kontaklar endüstriyel öneme sahip olmaları nedeniyle büyük ilgi görmektedirler. Isıya dayanıklı, yüksek kimyasal ve ısısal kararlılığa sahip olduğu görülen silisyum üzerine metal kaplanması ile elde edilen silikatların elektrik ve yapısal özellikleri birçok bilimsel grup tarafından incelenmiştir. Geçiş metalleri ile elde edilen silikatların; yüksek erime noktası, düşük yoğunluk, mükemmel elektriksel iletkenlik ve oksitlenmeye karşı yüksek direnç gibi özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olduğu görülmüştür.

Düşük reaksiyon sıcaklığı, daha az silisyuma ihtiyaç duyulması ve öz direnci ile kontak direncinin küçük olması nedeniyle nikel silikatlar dikkat çekmektedirler. Silikat filmler 500°C'nin üzerinde daha düşük morfolojik ve ısısal kararlılığa sahiptirler. Nikel silikatın, altı kararlı fazı (Ni_3Si , $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$, Ni_2Si , Ni_3Si_2 , NiSi , NiSi_2) vardır. İzotermal veya hızlı ısısal tavlama kullanılarak oluşturulan nikel silikat çalışmalarında 200-700°C arasında yoğunlukla ardışık olarak Ni_2Si , NiSi , ve NiSi_2 faz geçişlerinin olduğu görülmüştür. Her bir faz farklı kristalografik ve elektrik özelliklere sahip olduğu için, altlık ısısının kontrolü ile homojen fazlı nikel silikat filmler elde edilebilmektedir.

Metal/Si arayüzlerinde düşük kontak öz dirençli çok ince eklemlerin oluşumu, silisyumun çok geniş teknolojik uygulamaları için en önemli anahtar noktadır. Nikel monosilikat (NiSi), 100 nm'den küçük metal oksit yarıiletken cihazlarında kontak malzemesi olarak kullanıma uygundur. NiSi , ısısal kararlılığı nedeniyle kontak teknolojisinde önemli rol oynamaktadır. Isısal kararlılığın artması NiSi tabanlı kontakların gerçekleştirilmesi için önemlidir.

Ayrıca metal/yarıiletken arayüzündeki Schottky engellerinin nasıl oluştuğu sorusu da yıllar boyu yapılan çalışmalara rağmen çözülememiştir. 1942'de Schottky, yarıiletkende metal iş fonksiyonu ve elektron afinitesi arasındaki farklılıkla ilgili Schottky engel yüksekliği modelini önermiştir. Fakat Schottky'nin modeli deneysel kanıtlarla çelişmiştir. 1965'de Heine, özden yüzey durumlarının metal/yarıiletken arayüzünde oluşmadığını söylemiş ve bunun metal tarafından oluşturulan yasak band nedeniyle oluşan Fermi seviyelerinin sıkıştırılmasından kaynaklandığını ileri sürmüştür. 1976'da, Al/Si(111) arayüzünü hesaplamak için yerel-yoğunluk formalizmini kullanarak Louie ve Cohen ilk kez metal ile

oluşturulan yasak bandın yüksek yoğunluğunun, yarıiletkenin yasak bandında oluştuğunu göstermişlerdir. Bugün bu model daha da geliştirilmiş ve kovalent yarıiletkenin Schottky engel oluşumu açıklanmış görünmektedir.

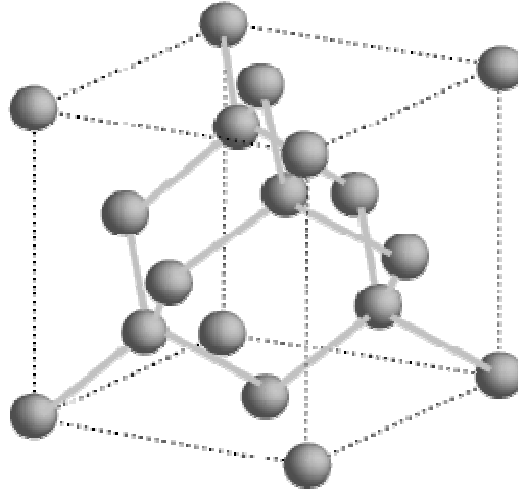
Schottky engelinin nasıl oluştuğunun belirlenmesindeki en büyük problem, metal/yarıiletken arayüzünün atomik yapısının yeterince anlaşılamamış olmasıdır. İyi tanımlı bir arayüz, Schottky engel yüksekliği ve diğer fiziksel parametreler arasındaki ilişkinin aydınlığa kavuşturulması için gereklidir. Metal silikat/silisyum arayüzleri bunu açıklamak için oldukça uygundur.

Nikelin silisyumda amfoter katkı olduğu, yani nikelin hem donör ($E_c - 0,35$ eV) hem de akseptör ($E_v + 0,22$ eV) özelliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, nikel hem n-tipi hem de p-tipi silisyumla Schottky kontağı oluşturabilir. Fakat literatürde, Ni/nSi ve Ni/pSi diyodların karakteristikleri incelenip karşılaştırılmamıştır. Ayrıca; nikel, silisyumda yüksek difüzyon katsayısına sahip olduğundan, Ni/Si eklemlerin tavlama işlemlerinde nikelin difüzyonu ve silisyum atomları ile karşılıklı etkileşimi neticesinde sınır bölgesinde yeni fazların oluşumu, eklemlerin elektrik karakteristiklerinin kararlılığını etkileyebilir. Bunları hesaba katarak, bu çalışmanın amaçları: 1) Ni/nSi ve Ni/pSi Schottky diyodlarının elektrik ve fotovoltaiik karakteristiklerinin incelenmesi ve karşılaştırılması, 2) Ni/Si eklemlerin tavlama sürecinde, nikelin silisyuma difüzyonunun ve yeni fazların oluşumunun eklemlerin parametrelerine etkisinin araştırılmasıdır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Silisyumun Yapısal Özellikleri

Silisyum atomu periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunmaktadır ve atom kabuklarında elektronların dağılımı şöyledir: $_{14}\text{Si}$ ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$). Silisyum atomunun dış (veya valans) kabuğunda dört elektron ($3s^2 3p^2$) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her silisyum atomunun dört valans elektronu ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçmektedir. Bu yapıda her silisyum atomunun dört valans elektronu komşu atomlarla kovalent bağla birleşirler. Silisyumun her kovalent bağında iki elektron bulunmaktadır. Silisyum örgüsünde her atom tetraedrin merkezinde yerleşmektedir ve etrafında dört komşu atom bulunmaktadır. Yarıiletken silisyumun yapısı elmas (C) kristalin yapısına benzemektedir. Elmas yapıya benzer tipteki kristal örgüsü kübik yapıya sahiptir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Elmas yapı

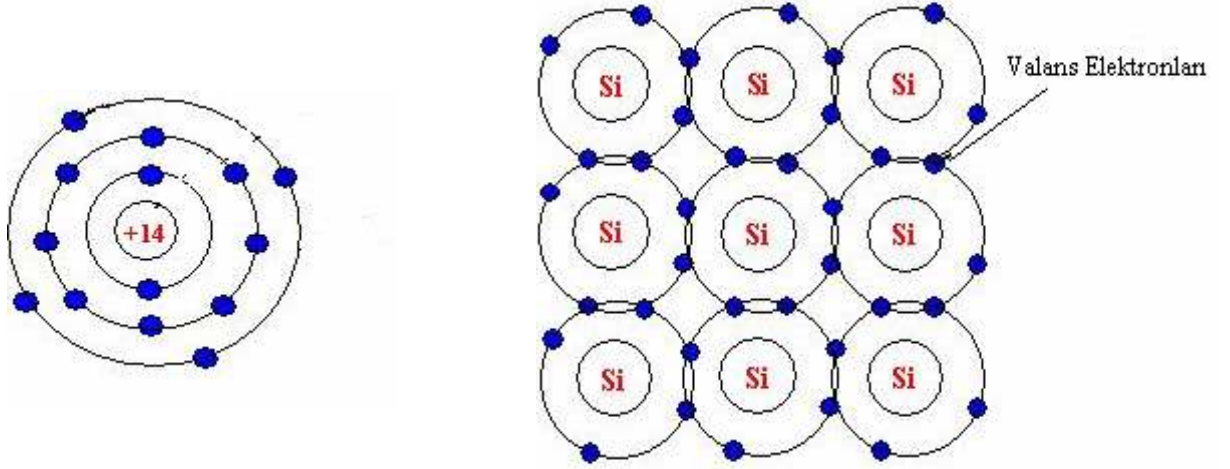
2.2 Silisyumun Optik, Elektrik ve Fotoelektrik özellikleri

Katı cisimler elektrik özelliklerine göre metaller, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Metallerin özdirenci sıcaklıkla lineer olarak artarken, özden yarıiletkenlerin özdirenci sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak küçülmektedir. Yarıiletkenlerin özdirenci oda sıcaklığında 10^{-10} - $10^4 \Omega\text{cm}^{-1}$ aralığında değişmektedir. Özdirencin katkılama veya dış etkilerle değişimi yarıiletkenin en önemli özelliğidir. Teknolojide en çok kullanılan yarıiletken silisyumdur (Si). Silisyum ile ilgili bazı parametreler Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkeninin özellikleri (T.Caferov, 2000).

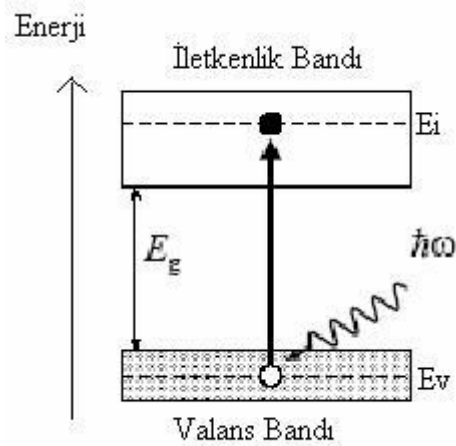
Parametre	Değeri
Atom numarası	14
Atomik kütle	28.1
Örgü parametresi (nm)	0.5431
Yoğunluk (g/ cm ³)	2.33
Erime sıcaklığı (°C)	1420
Dielektrik katsayısı	11.9
Yasak band genişliği, 0 K (eV)	1.21
Yasak band genişliği, 300 K (eV)	1.12
Özden yük taşıyıcıların konsantrasyonu, 300 K (cm ⁻³)	1.45×10^{10}
Özdirenç, 300 K (Wcm)	2.3×10^{10}
Elektronların mobilitesi, 300 K (cm ² /V.s)	1500
Deliklerin mobilitesi, 300 K (cm ² /V.s)	480
Elektronların difüzyon katsayısı, 300 K (cm ² /s)	34
Deliklerin difüzyon katsayısı, 300 K (cm ² /s)	14
Kırılma indisi	3.9
Elektron alınganlığı (eV)	4.01
İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu (cm ⁻³)	2.8×10^{19}
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu (cm ⁻³)	1.02×10^{19}
Elektronların etkin kütlesi (m_n^*/m_0)	0.98; 0.19
Deliklerin etkin kütlesi (m_n^*/m_0)	0.5; 0.16
Termal genleşme katsayısı (K ⁻¹)	2.6×10^{-6}
Isı iletkenliği, 300 K (W/ cm K)	1.45
Azınlık yük taşıyıcıların yaşama süresi (ns)	2.5
Isı Sığası (J/g.K)	0.7
Yük taşıyıcılarının Debay uzunluğu (mm)	24
Optik fononun enerjisi (eV)	0.063
Isıl iletkenlik katsayısı, 300 K (W/cm ² .K)	0.9

Son yörüngesinde 4 valans elektronu bulunan silisyum atomu, komşu silisyum atomlarıyla kovalent bağ yapmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Silisyum atomunun yapısı.

Atomlar birbirine çok yaklaştığında (yaklaşık 10^{-8} cm) yarıiletken malzeme oluşur. Komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi banda ayrılır. Valans elektronlarından oluşmuş enerji bandına valans bandı denir. Valans elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan band ise iletim bandı olarak adlandırılır. İletim ve valans bandlarının arasında yasak band bulunmaktadır. Özden yarıiletkenin enerji band diagramı Şekil 2.3’de görülmektedir.

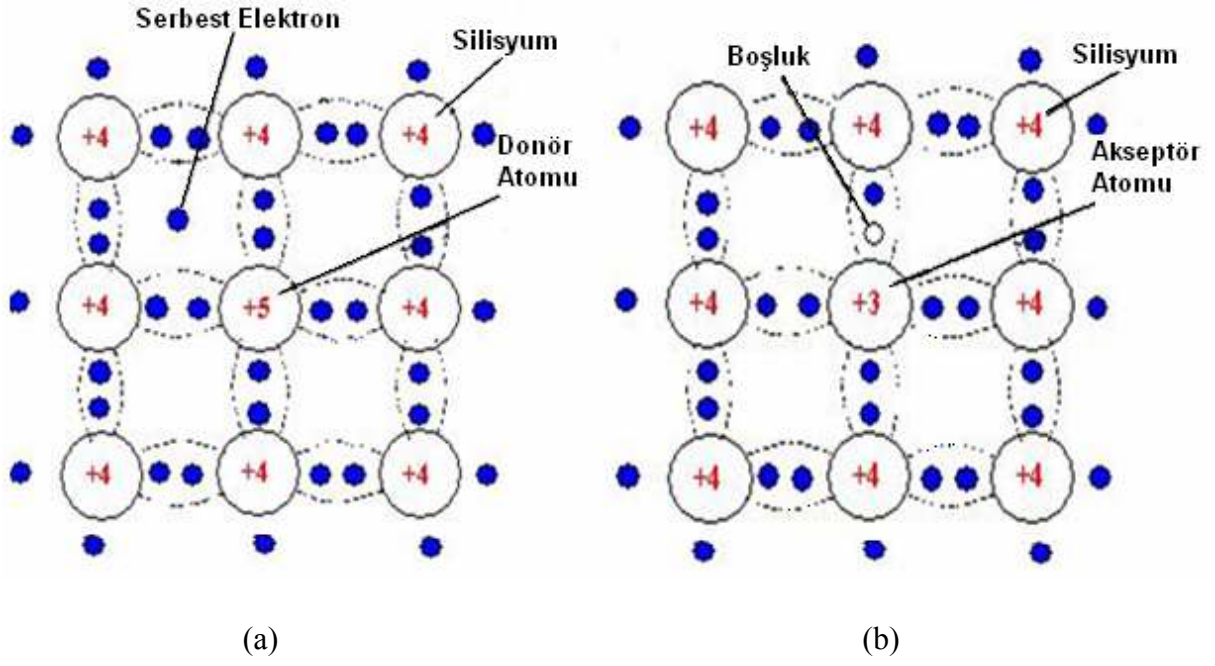


Şekil 2.3 Özden yarıiletkenin enerji band diyagramı.

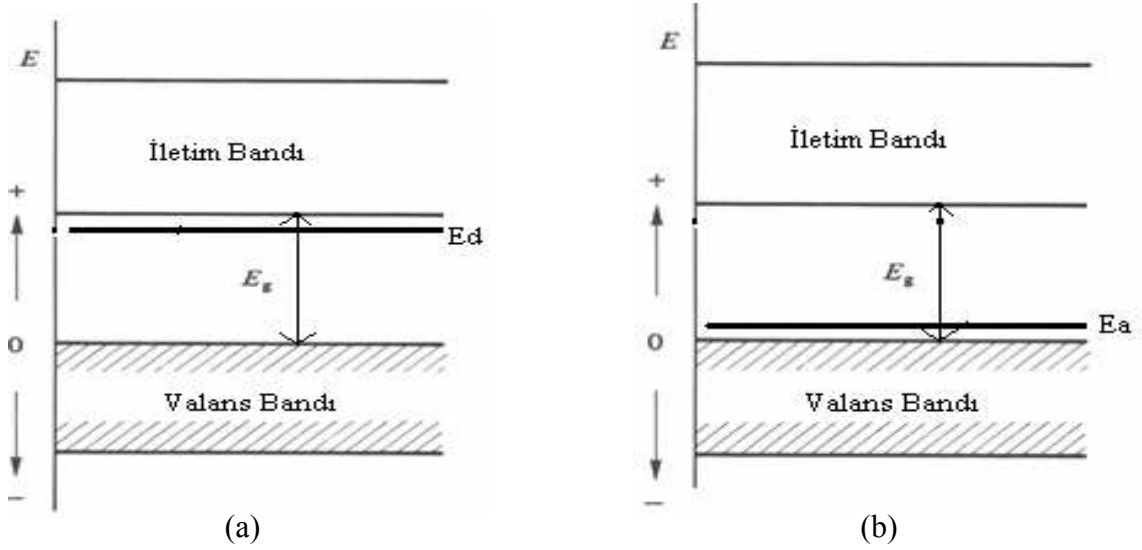
İletim bandının dip ve valans bandının tavan enerjilerinin farkı yarıiletkenin yasak enerji band genişliği olarak bilinmektedir. Yasak band genişliği, kristaldeki atomların ısısal titreşim genliği ile atomlararası uzaklığın sıcaklıkla değişimine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yarıiletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak band genişliği küçülmektedir.

Yarıiletken malzemelerin iletkenliği katkı atomları ile değiştirilebilmektedir. Si atomunun V. grup elementlerinden biri olan fosfor (P) atomu ile katkılanma mekanizması göz önüne alındığında, fosforun beş valans elektronundan dördü silisyum atomlarıyla kovalent bağ oluşturmaktadır. Kalan bir elektronun kovalent bağ yapma imkanı yoktur. Bu elektron komşu pozitif yüklü silisyum iyonlarının etkisi altındadır ve düşük sıcaklıklarda fosfor atomunun etrafında bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıkta ise iyonlaşma süreci nedeniyle fosfor atomu bir elektronunu vererek pozitif yüklü iyonla dönüşür. Yarıiletkende elektron veren katkı atomu donör olarak adlandırılır. İletkenliği donör katkısıyla karakterize edilen silisyum atomu ise n-tipi olur (Şekil 2.4a). n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar, azınlık yük taşıyıcıları ise boşluklardır. Donör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içerisinde (iletim bandının dibinde) izin verilmiş enerji düzeyi oluşturmaktadır.

Silisyum atomu; III. grup elementlerinden biri olan galyum (Ga) atomu ile katkıldığında ise galyumun valans bandındaki üç elektronu silisyum atomunun valans elektronları ile kovalent bağ yapar. Galyum atomunun dolmamış bir bağına komşu silisyum atomundan bir elektron geçer ve negatif yüklü galyum iyonu oluşur. Böylece silisyum bağlarıyla hareket eden serbest boşluk meydana gelir. Yarıiletkende elektronları alan katkı atomu akseptör olarak adlandırılır. İletkenliği akseptör katkısıyla karakterize edilen silisyum atomu ise p-tipi olur (Şekil 2.4b). p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar, azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır. Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içerisinde (valans bandının üzerinde) izin verilmiş enerji düzeyi oluşturmaktadır.

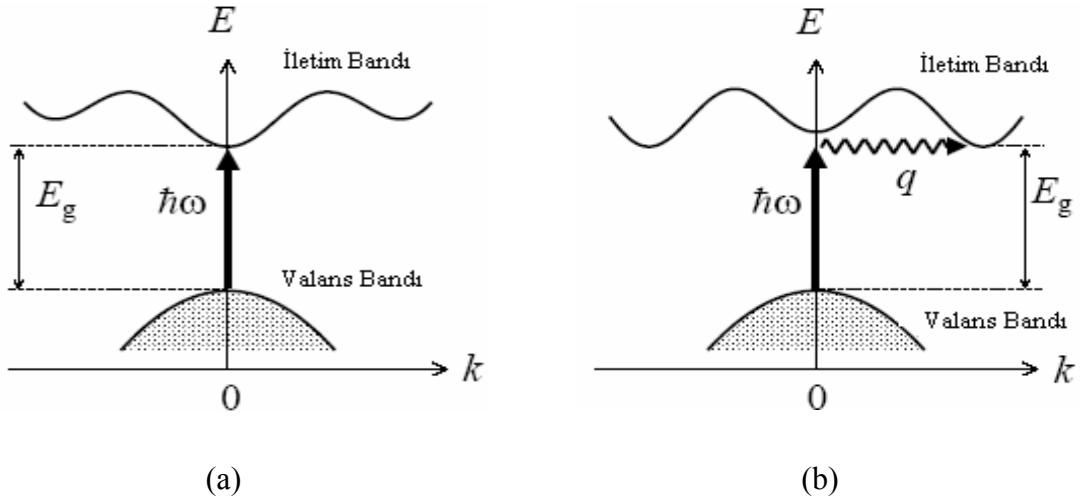


Şekil 2.4 Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü.



Şekil 2.5 (a) Donör (b) akseptör tipli yarıiletkenlerin band diyagramları.

Yarıiletkenlerde soğurma olayı birkaç mekanizma ile gerçekleşir. Bunlardan en önemlisi; yarıiletken malzeme üzerine düşen $h\nu$ enerjili bir fotonun valans bandındaki bir elektron tarafından soğrulması ile gerçekleşir. Elektron valans bandından iletim bandına geçer ve valans bandında bir boşluk oluşur. Bu olayın gerçekleşmesi için gelen fotonun enerjisinin malzemenin yasak band genişliğine eşit veya büyük olması gerekir. Valans bandından iletim bandına elektron geçişi direkt ve dolaylı olmak üzere iki şekilde gerçekleşir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 (a) Direkt, (b) İndirekt yarıiletkenlerde band yapısı.

Eğer iletim bandının en küçük enerjisi ve valans bandının en büyük enerjisi Brillouin bandının aynı noktalarında yerleşirse bu tür enerji band yapısına sahip malzemeler direkt band geçişli yarıiletken olarak adlandırılır.

Direkt band geçişinde elektron-delik etkileşmesi ihmal edildiğinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.1)$$

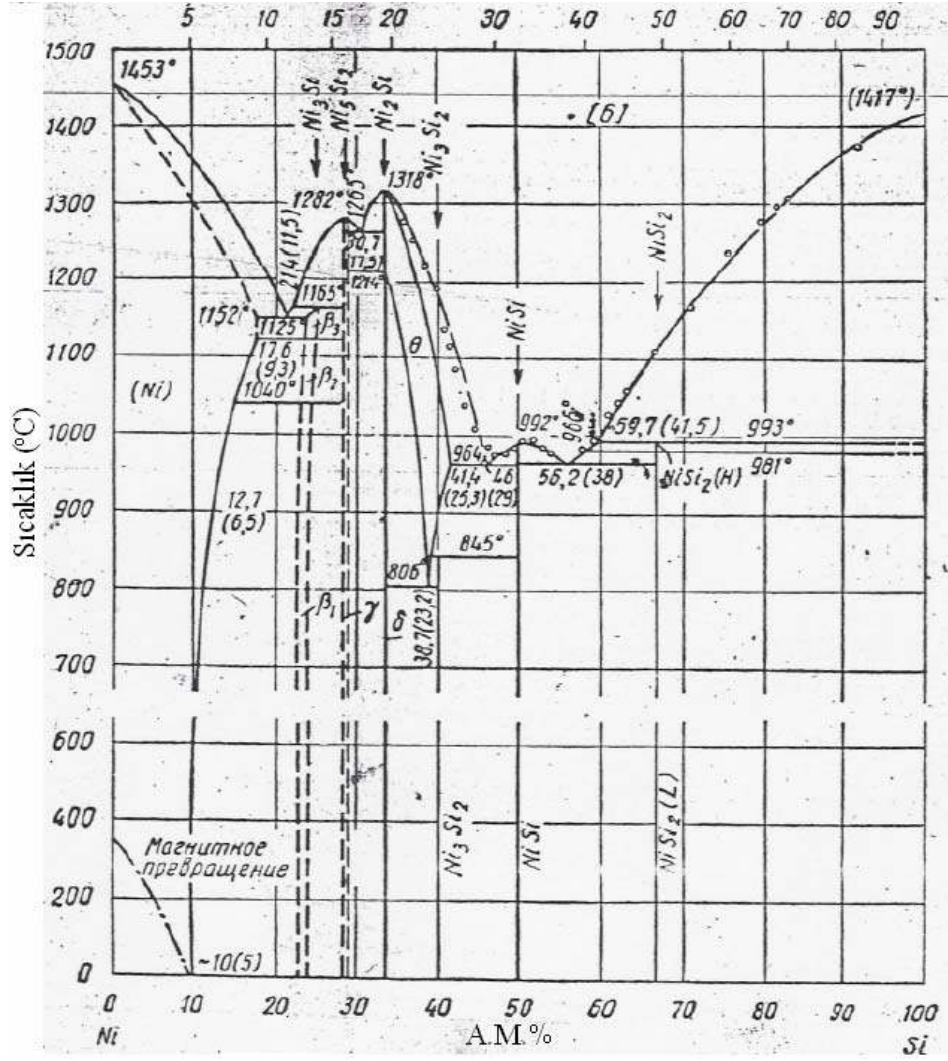
$(h\nu - E_g)^{1/2}$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğidir.

İndirekt bandlı geçişte ise iletim bandının en küçük enerjisi ve valans bandının en büyük enerjisi Brillouin bandının farklı noktalarında yerleşmektedir. Bu tür enerji band yapısına sahip malzemeler dolaylı band geçişli yarıiletken olarak adlandırılır. Tek kristal silisyum indirekt band yapısına sahiptir. İndirekt band geçişinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki bağıntı,

$$\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2 \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilir. Burada, E_{fn} fononun enerjisidir. $\pm$ fononun soğurulması ve saçılması ile ilişkilidir. $(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini vermektedir.

2.3 Ni/Si Eklemlerin Özellikleri



Şekil 2.7 Ni/Si faz diyagramı.

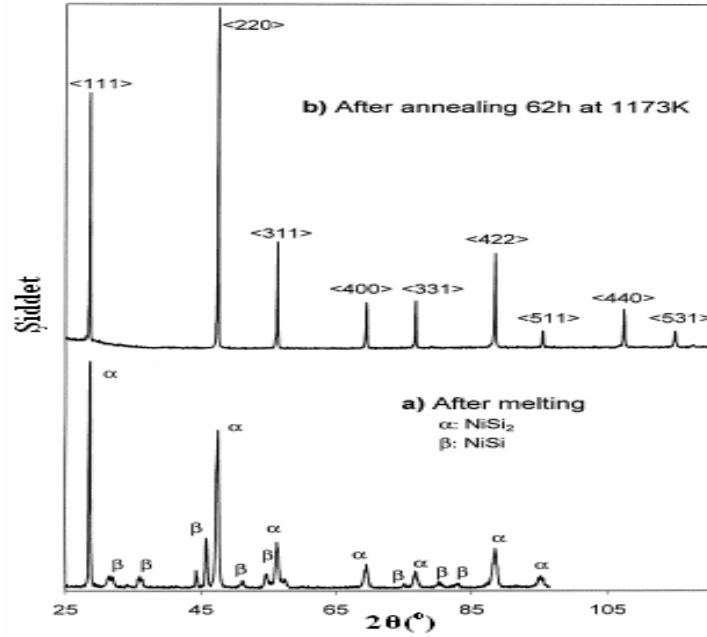
M. Seibt ve arkadaşları silisyum üzerine metal kaplanması ile elde edilen silikatların elektrik ve yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Metal olarak nikel kullanılması ile elde edilen nikel silikat tabakalardaki bağların yer değiştirmesi, onun hızlı büyümesinde ve elektrik özelliklerinin anlaşılmasında önemli rol oynamaktadır. Yaklaşık 300°C de nikel oldukça yüksek mobiliteye sahiptir ve kaplama için uygun olan bu sıcaklıkta oluşturulan doymuş çözeltilerin hızlı soğutulması ile nikel silikat elde edilmiştir. Bu nedenle, yapılan kaplama deneysel şartlara bağlıdır. Bu kaplama sonucunda en az altı kararlı fazdan biri olan NiSi_2 elde edilmiştir. NiSi_2 üç temel atoma sahip yüzey-merkezli Bravais örgüsünden oluşmuş kübik (fcc) CaF_2 yapısına sahiptir. Orijinde nikel atomu ve $\pm a/4 [111]$ uzaklıklarına yerleşmiş iki Si atomundan ibarettir. NiSi_2 , silisyumdan %0.4 daha küçük örgü parametresine sahip

olduğundan daha sıkı yapıdadır. Yüksek sıcaklıklardan hızlı soğutma ile tabakalar halinde NiSi_2 elde edilmiştir. Bu tabakaların kalınlığı başlangıç Ni konsantrasyonu ve soğutma derecesine bağlı olarak 7 ile 100 nm arasında değişmektedir.

S. Rey ve arkadaşları, saf argon ortamında arc melting yöntemini kullanarak polikristal NiSi_2 ve Ni_3Si sentezlemişlerdir. Belli oranlarda nikel ve silisyum karıştırılarak 1273 K sıcaklıkta NiSi_2 elde edilmiştir. NiSi_2 'nin yarısı kesilerek alınmış ve 1573 K'de Ni_3Si oluşturulmuştur. Elde edilen bu silikatların özelliklerini bilinen Ni ve Si polikristal örnekleriyle karşılaştırmışlardır. Ni altlıklar üzerinde büyütülen elmasın kalitesi ile karşılaştırılınca, Si altlıklardaki gibi NiSi_2 ve Ni_3Si üzerinde büyütülen elmas parçacıkların kalitesinin arttığını gözlemişlerdir. Farklı altlıklar üzerinde elmas büyütmek amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Elmas ile altlıklar arasındaki örgü uyumsuzluğu ve ısısal genleşme katsayıları büyütmede önemli olan parametrelerdir. Nikel silikat ailesinden olan NiSi_2 ve Ni_3Si bileşikleri istenilen bu yeterli özelliklere sahiptir. Ni_3Si ve Ni kübik yapıya sahiptirler ve bunların örgü sabitleri birbirine çok yakındır (Çizelge 2.2). Bu nedenle oda sıcaklığında elmasla olan örgü uyumsuzluğu oldukça küçüktür. Hazırlanan NiSi_2 ve Ni_3Si örneklerinin XRD ölçümleri yapılmıştır. Tavlama öncesinde zayıf şiddette NiSi pikleri gözlenirken, 1173 K sıcaklıkta 62 saat tavlama sonrasında NiSi piklerinin kaybolduğunu, buna karşılık NiSi_2 pik şiddetlerinin arttığını görmüşlerdir (Şekil 2.8). Bu durum NiSi fazından NiSi_2 fazına geçiş olduğunu göstermektedir. XRD analizi sonucunda NiSi_2 nin örgü sabiti 5,406 Å ve Ni_3Si 'nin ise 3,509 Å olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.2 Nikel silikatlar üzerinde elmasın büyütülmesi ile ilgili yapısal ve kimyasal parametreler (S.Rey, 2000).

Kristal Yapısı	Elmas	Ni	Ni_3Si	NiSi_2	Si
	ZnS	FCC	Au_3Cu	CaF_2	ZnS
Örgü Parametresi(nm)	0.3567	0.3524	0.3506	0.5406	0.5431
Lineer Isısal Genleşme Katsayısı (300 K) (10^{-6} K)	1.5	13	9	4.3	3
Yüzey Enerjisi(111)(J/m ²)	5.65	3.25	—	—	1.24
Yüzey Enerjisi(111)(J/m ²)	9.2	3.72	—	—	—

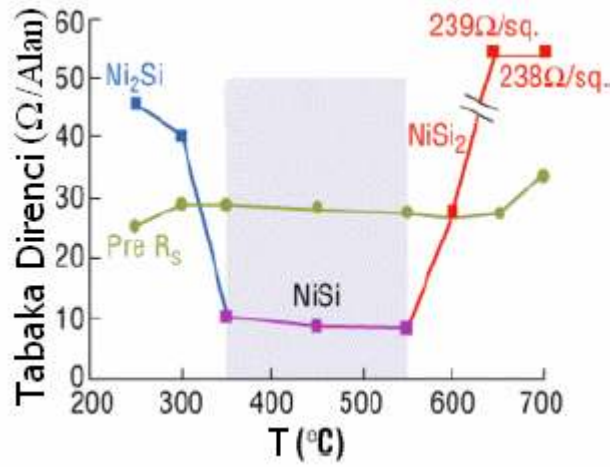


Şekil 2.8 X ışını kırınım deseni ($\text{CuK}_{\alpha 1}$) (a) Tavlamadan önce (b) 62 saat 1173 K tavlama sonrası (S.Rey, 2000)

G.Majni ve arkadaşları, silisyum üzerine nikel film kaplamışlar ve bunların etkileşimini incelemişlerdir. [111] ve [100] silisyum tek kristalleri üzerinde oluşan NiSi ' nin büyütülme sürecini araştırmışlardır. NiSi ' nin aktivasyon enerjileri [100] için 1,23 eV, [111] için 1,83 eV olarak bulunmuştur. Daha önceki çalışmalarda, yaklaşık 300°C civarında silisyum altlık üzerine nikel kaplanmış ve ilk oluşan fazın Ni_2Si olduğu gösterilmiştir (Coe ve Rhoderic, 1976; Olowolafe vd., 1976; Costato, 1981). Altlık üzerine kaplanan nikelin tamamı Ni_2Si ' ye dönüştükten sonra NiSi fazı oluşmaya başlamaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda, [100] yönelimli silisyum tek kristali üzerinde oluşan NiSi fazının oluşma hızının, [111] yönelimli olanından daha büyük olduğu anlaşılmıştır.

W. S. Yoo ve arkadaşları, püskürtme tekniği ile kaplama yöntemini kullanarak nikel silikat oluşturmuşlardır. Bunun için silisyum altlık üzerinde 9 nm kalınlığında nikel filmler hazırlanarak 200-550°C sıcaklık aralığında tavllanmış ve 200°C gibi düşük bir sıcaklıkta Ni_2Si fazının oluştuğu gözlenmiştir. Elde edilen nikel silikat yapının tavlamadan önce ve sonraki tabaka dirençleri ölçülmüş ve 5 dakikalık 200°C tavlama sonunda birim alandaki tabaka direncinin, oluşan Ni_2Si fazı nedeniyle 25,8 Ω ' dan 36 Ω ' a yükseldiği görülmüştür. Tavlama sıcaklığı 300°C nin üzerine çıkartıldığında, düşük dirençli NiSi fazı oluştuğu için birim alandaki direnç 10 Ω değerine düşmüştür. Sıcaklık 600°C ye ulaştığında ise yüksek dirençli

NiSi₂ fazı oluşmaya başlar ve film bozulur (Şekil 2.9).

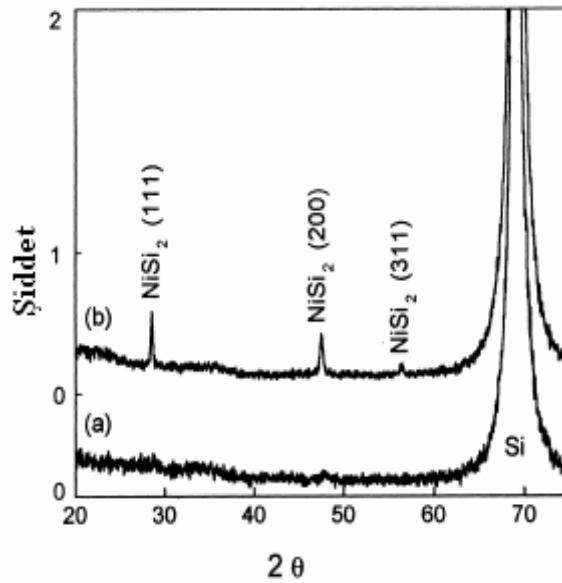


Şekil 2.9 Nikel filmin tabaka direncinin tavlama sıcaklığı ile değişimi (W.S.Yoo, 2003).

K.Y. Gao ve B.X. Liu, metali vakumda arc iyon katkılaması yöntemi ile buharlaştırarak Si(100) altlıklar üzerinde NiSi₂ tabakaları sentezlemişlerdir. İyon şiddetini $2 \cdot 10^{17}$ iyon/cm² lik doza ayarlamışlardır ve 45 kV gerilim ile çeşitli akım yoğunluklarında çalışmışlardır. Isısal genleşme hesabından, 380°C sıcaklıkta Si ve NiSi₂ örgüleri arasında uyum olduğunu bulmuşlar ve 35 μ A/cm² lik akım yoğunluğu ile silisyum altlığın bu uygun sıcaklığa ulaşabileceğini öngörmüşlerdir. Gerçektende seçilen akım yoğunluğunda elde edilen tek bir NiSi₂ tabakasının 14 ± 2 $\mu\Omega$ -cm kadar düşük özdirençli olduğu görülmüştür. Uygun oluşma şartından uzaklaşıldığında ise özdirencin sıcaklıkla doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir.

Isıya dayanıklı metal silikatlar yüksek kimyasal ve ısısal kararlılıkları nedeniyle dikkat çekicidir. 750°C gibi yüksek sıcaklıkta silisyum üzerinde oluşan nikel tabakasının katıhal reaksiyonu gözlenmiştir. Bunun özdirenci oda sıcaklığında 30-40 $\mu\Omega$ -cm aralığındadır. Bu bağlı yüksek özdirencin, oluşum ve daha sonraki soğutma süreci boyunca oluşan bozulmalara bağlı olduğu düşünülmüştür. Bu ise oluşan NiSi₂'nin silisyum ile örgü uyumsuzluğunun işaretidir. NiSi₂, CaF₂ yapısındadır. NiSi₂ örgüsü içindeki silisyumun atomik yoğunluğu silisyum kristaline yakındır. Nikel atomları silisyum örgüsü içine eklenebilir ve hiçbir hacim değişimi olmadan silisyum atomlarıyla yer değiştirerek NiSi₂ elde edilir. Bu dönüşüm düşük sıcaklıkta silisyum altlıklar içerisine nikel iyonlarının katılanması ile yapılır. Böyle bir silikat oluşumu dinamik bir süreç olup, silisyum üzerinde kalın nikel filmin oluşturulduğu katıhal reaksiyonu gibi 750°C sıcaklıkta tavlama gerektiren ısısal uyarma süreci değildir. Oda

sıcaklığında NiSi_2 'nin örgü sabiti silisyum kristalinden daha küçüktür ve ısısal genleşme katsayısı ($16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) silisyum kristalinden ($3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) daha büyüktür. Bu öngörü, 380°C civarında NiSi_2 ve silisyum yapıları arasında örgü uyumsuzluğunun olmadığını göstermiştir. Böylece kristalik ve elektrik özellikleri geliştirilebilir. $2 \cdot 10^{17}$ iyon/ cm^2 lik iyon şiddeti ile $8,8$ - $17,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluklarında nikel silikat örneklerin XRD analizleri yapılmıştır. $8,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'de örneğin sıcaklığının 160 - 180°C 'ye çıktığı ve tabaka direncinin çok yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan XRD analizi sonucunda, nikel atomlarının silisyum ile etkileşmediği ve bu sıcaklığın NiSi_2 oluşumu için düşük olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.10a). $17,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'lik akım yoğunluğu ise örneğin sıcaklığını 235 - 250°C 'ye çıkartmıştır ve bu sıcaklıkta NiSi_2 piklerinin olduğu görülmüştür (2.10b). Nikel kaplanmamış silisyum yüzeyin direnci $5,7 \Omega/\text{cm}^2$, 10 nm kalınlıklı nikel kaplanmış yüzeyin direnci ise $6,7 \Omega/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.10 Nikel iyonları kullanılarak $2 \cdot 10^{17}$ iyon/ cm^2 'lik doz ile bombardıman edilen silisyumun XRD analizi (a) $8,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu, (b) $17,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğu (K.Y.Gao, 1999).

Diğer bilinen yöntemlerde 235°C 'de NiSi_2 fazı oluşmamaktadır. Bu yöntemlerde silisyum örnekler 350 - 450°C 'de metal iyonları ile kaplanır, ikinci aşamada çok yüksek sıcaklıklarda (1000°C 'nin üzerinde) tavlama yapılır. Bu çalışmada ise silisyumun nikel iyonları ile bombardımanı sırasında eş zamanlı olarak ısınma işlemi gerçekleştiğinden doğrudan NiSi_2 fazı oluşmuştur.

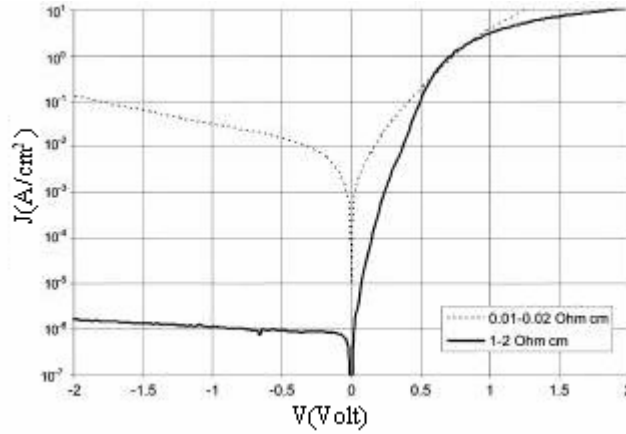
M.K. Data ve arkadaşları mekanik alaşım (MA) yöntemini kullanarak, nikel ve silisyumu çeşitli oranlarda karıştırmışlar ve oluşturulan Ni-Si faz sistemleri üzerinde çalışmışlardır. Nikel bakımından zengin katı solüsyon Ni(Si)' nin örgü parametresindeki artış kristal boyutuyla sağlanmıştır. Ni(Si), Ni(Si)+Ni₃₁Si₁₂, Ni₃₁Si₁₂+Ni₂Si, Ni₂Si+NiSi ve NiSi+Si nanokristal faz/faz karışımları sırasıyla 0-10, 10-28, 28-33, 33-50 ve >50 %Si katılarak MA yöntemiyle elde edilmiştir. Nanokristal halde uygun olmayan Ni₃Si, Ni₃Si₂ ve NiSi₂ erime fazları oluşmazken, sadece Ni₃₁Si₁₂, Ni₂Si ve NiSi uygun erime fazlarının olduğu anlaşılmıştır. Mekanik alaşım işlemi süresince olan faz oluşumu termodinamik olarak incelenmiş ve etkin serbest enerji hesaplamalarında öngörülen faz alanlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Mekanik alaşım oluşturma sürecinde, silisyum bulk halinde kalırken nikelin kristal boyutu nanometre boyutlarına (20-30 nm) düşer ve nikel silikatlar oluşmaya başlar. Kristal boyut bulk halinden nanometre boyutuna düştüğü zaman, % 1,6' lık örgü parametresi genişmesi (yaklaşık hacimce genişleme %5) Ni(Si)' nin fcc yapıda olduğunun kanıtıdır. Nanokristalite reaksiyon uygun erime fazı olmayan bileşikler yerine, nanokristal malzemelerde faz kararlılığında önemli rol oynayan düşük arayüz enerjisine sahip uygun erime fazlı bileşiklerin oluşumunu sağlar.

M.E. Kiziroglou ve arkadaşları, farklı öz dirençlere sahip n-tipi silisyum altlıklar üzerinde doğrudan silikat oluşturulmasında elektrokimyasal kaplama yöntemini kullanmışlardır. Ni-Si Schottky engeli karakterize edilmiş ve yüksek kalitedeki engellerin düşük öz dirence sahip silisyumun (1-2 Ωcm) kullanılmasıyla olduğu gözlenmiştir. Elektrokimyasal kaplama potansiyeli ve pürüzlülük, oluşturulan engelin kalitesiyle doğrudan ilişkilidir.

M.E. Kiziroglou'nun çalışmasında elektrokimyasal kaplama yöntemiyle, litografik olarak şekillenmiş silisyum altlıklar üzerinde nikel mikroyapılar doğrudan büyütülmüştür. Bu yöntemle elde edilen Schottky engellerin karakterizasyonunun, diğer yöntemlerle elde edilenlerden daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Oluşan filmin pürüzlülüğü kaplama koşulları ile kontrol edilebilmektedir. Deneysel olarak, silisyum üzerine nikel elektrokimyasal yöntemle kaplanmış ve iki farklı öz dirence sahip silisyum için Ni-Si kontağın elektriksel özellikleri ölçülmüştür. 0,01-0,02 Ωcm öz dirence sahip silisyumla oluşturulan Schottky engel kalitesinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Buna karşılık olarak, 1-2 Ωcm öz dirence sahip silisyumun kullanılmasıyla elde edilen engeller oldukça iyidir. Şekil 2.11'de her iki durum için Ni-Si

eklemlerin J-V eğrilerini gösterilmektedir. Yüksek dirençli Ni-Si Schottky engel karakterizasyonu, ileri yöndeki akımın extrapole edilmesiyle J_s doyma akım yoğunluğu $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak bulunmuştur. Schottky engel yüksekliği 0,71 V ve ideallik faktörü (η) düşük gerilimlerde yaklaşık 1,1 civarındadır.



Şekil 2.11 Elektrokaplama ile elde edilen Ni-Si kontakların J-V eğrileri (M.E.Kızıroglou, 2005).

D.J.Coe ve E.H. Rhoderick, Rutherford geri-saçılımı ($^4\text{He}^+$ iyonları) yöntemini kullanarak, azot-hidrojen ortamında (111) ve (100) silisyum yüzeyler üzerine buharlaştırılan ince nikel filmlerin ısıtılmasıyla oluşan silikat tabakaların kompozisyonu ve derinlik profili üzerinde çalışmışlardır. 297°C 'den 430°C 'ye kadar olan sıcaklık aralığında sırasıyla iki fazın oluştuğunu görmüşlerdir. İlk büyüme fazı Ni_2Si zamanla parabolik olarak büyümekte ve oran sabiti gösterimi 2.3 bağıntısı ile verilmektedir.

$$R_{\text{Ni}_2\text{Si}} \cong 10^{-2} \exp\left(-\frac{1.3eV}{kT}\right) \text{ cm}^2\text{s}^{-1} \quad (2.3)$$

İkinci faz NiSi ise zamanla doğrusal olarak büyümektedir ve oran sabiti aşağıdaki gösterimle verilmektedir.

$$R_{\text{NiSi}} \cong 10^3 \exp\left(-\frac{1.4eV}{kT}\right) \text{ cm}^2\text{s}^{-1} \quad (2.4)$$

Metal silikatlarının oluşumunda hem difüzyon hem de parabolik ve doğrusal büyütme sistemleri şimdiye kadar araştırılmamıştır.

Metalle kaplama ve ısı-uygulamasının eş zamanlı yapıldığı (geri saçılma analizi için kullanılan) büyük alanlı örneklerde Schottky engel diyotlarının elektriksel karakteristikleri araştırılmıştır ve ardışık iki fazın oluşmasına rağmen engel yüksekliğinde 0.7 eV'lık küçük bir değişim gözlenmiştir.

Nikel tabakalar ya doğrudan ya da bazı ısı uygulama çeşitlerinden sonra silisyuma omik veya doğrultucu kontak yapmak için kullanılır. Buharlaştırılmış veya elektroliz ile kaplanmış metalin tipik uygulamaları, yüksek-güç silisyum cihazlarında NiSi-Ni-Au kontak sistemlerinin oluşturulmasıdır. Örneğin Cr-Ni-Ag kontak sisteminde; difüzyon engeli, sinyal-seviyesi silisyum Schottky engel diyotları ve yüksek-güç için orta seviye-engel yüksekliği malzemesi olarak çalışmaktadır. Nikel-silisyum sistemi bağlı olarak düşük sıcaklıklarda katı-katı difüzyonu ile birleşen silikatlar olarak bilinmektedir. Böylelikle, Schottky eklemleriyle sonuçlanan elektriksel karakteristiklere sahip, hem silikat tabakalarının büyütülme kinetiği hem de bu tabakaların etkileriyle ilgili detaylı bilgiler teknolojik öneme sahiptir.

Nikel-silisyum sistemler üzerinde yapılan kapsamlı çalışmanın sonuçları Hansen (1958) tarafından özet olarak verilmiştir. Hansen'in faz diyagramı 6 fazın (Ni_3Si , Ni_5Si_2 , Ni_2Si , Ni_3Si_2 , NiSi ve NiSi_2) oluştuğunu göstermektedir.

Ni-nSi Schottky diyotlarının engel yüksekliği üzerinde Padovani (1967), Turner ve Rhoderick (1968) ve Itoh (1970) çalışmışlardır. Bu araştırmacıların ilk ikisi engel yüksekliğini 0.69 eV bulmuşlardır ve bu Ni/ p-Si diyotlar için Smith ve Rhoderick (1971) tarafından 0.5 eV olarak bulunan değerle uyushmaktadır.

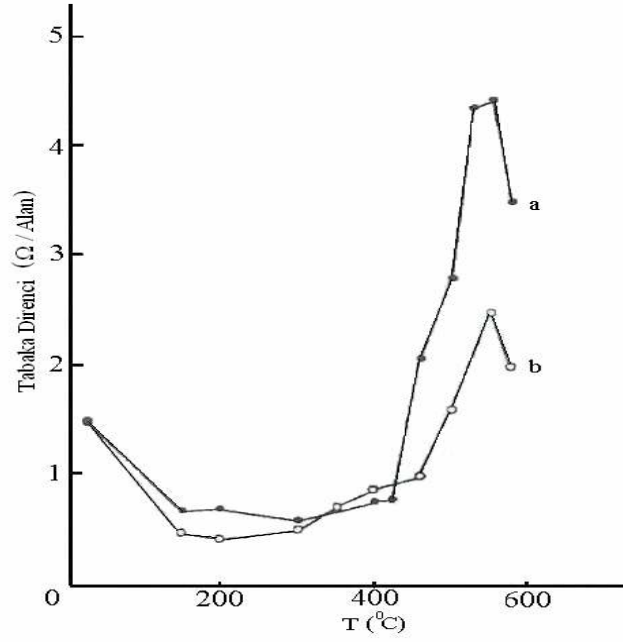
Silisyum altlıklar üzerindeki ince nikel filmlere, düşük sıcaklıkta ısı uygulanması sürecinde elde edilen Ni_2Si ve NiSi fazlarının oluşumu Andrevs ve Koch (1971) tarafından gerçekleştirilmiş ve bu araştırmacılar tarafından elde edilen Ni-Si eklemler için NiSi/Si Schottky engel diyotlarının engel yüksekliği esas kabul edilmiştir. Sundström vd. (1973) ve Tu vd. (1974) tarafından yapılan son çalışmalarda Ni_2Si ve NiSi fazlarının derinlik profilini belirlemek için Rutherford geri-saçılım tekniği kullanılmıştır ve ek epitaksiyel NiSi_2 fazı belirlenmiştir.

D.J.Coe ve E.H. Rhoderick bu çalışmasında, tek kristal (111) ve (100) Si yüzeyler üzerindeki ince nikel filmlerinde, gaz ortamındaki fazın ısı davranışı süresince ve Ni_2Si oluşumu için

reaksiyon kinetikleri çalışmalarında Rutherford gerisaçılımı (MeV'lik $^4\text{He}^+$ iyonları) yöntemi kullanılmıştır. Eş zamanlı olarak, kaplanan ve ısıtılma tabii tutulan Schottky engel diyotlarının elektriksel karakteristikleri, metal/yarıiletken arayüzünde oluştuğu düşünülen faz referans alınarak tartışılmıştır.

Entegre devre teknolojisinde; n veya p tipi silisyuma yapılan metal silikat kontaklar üzerine yaygın olarak çalışılmaktadır. Silikat oluşumu, Rutherford iyon geri-saçılımı (Mayer ve Tu 1974) veya tabaka direnci yöntemi (Mgbenu vd 1977) kullanılarak açıklanmıştır. Mgbenu çalışmasında Ni_2Si 'nin büyütme kinetiğinin araştırılması için tabaka direnci yöntemini kullanmıştır. Bu silikat üzerinde birçok araştırma yapılmasına rağmen yönelmenin ve altlık tipinin nikelin difüzyonunu nasıl etkilediğine dair eksiklikler vardır. Coe ve Rhoderick (1976) n-tipi altlık kullanarak hem (100) hem de (111) yönelimli silisyum altlıklar üzerinde reaksiyon için göze çarpan bir farklılık gözlemlemezken, Berning ve Levenson (1978) p-tipi altlık kullanarak (100) ve (111) yönelimli silisyum içine difüzyonu gerçekleştiren nikel için aktivasyon enerjilerini sırasıyla 0.27 ve 1.5 eV olarak belirlemişlerdir. Nikelin soy metale yakın olmasından kaynaklanan ana problemin, silisyum içine çok hızlı difüzyondan kaynaklandığı bilinmektedir.

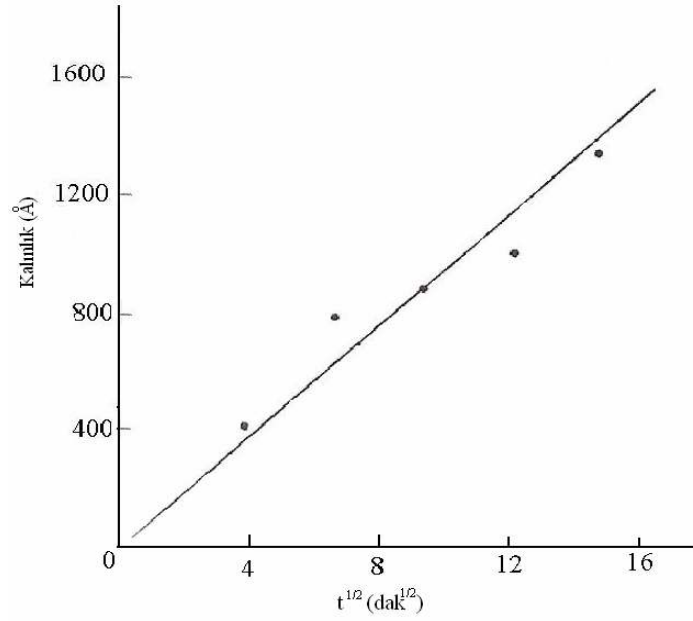
Şekil 2.12'de hem n hem de p-tipi altlıklar için tavlama sıcaklığıyla tabaka direncinin değişimi gösterilmektedir. Tüm haller için ısıtma zamanı 15 dakikadır. Tabaka direnci n-tipi altlıkta 300°C de ve p-tipi altlık için 200°C de minimuma düşmektedir. Bu bölgede, Ni-Si arayüzüne doğru olan difüzyon engellenir ve bu tavlama dirençte düşmeye sebep olan nikel içindeki boşlukları ve dislokasyonları azaltmaktadır (Mgbenu 1980). Bu ise muhtemelen arayüzdeki oksit tabaka nedeniyledir. Minimumdan sonra direnç, difüzyon ve silikat oluşumu sırasında artmaya başlamaktadır. Rutherford iyon geri-saçılımının kullanıldığı önceki çalışmalar, direnç artışı ve silikat oluşumu arasında bir ilişki olduğunu doğrulamaktadır (Petersson vd. 1976). Sıcaklık artarken daha fazla metal, silikat oluşumunda kullanılır. Piki maksimumunda, tüm metal Ni_2Si 'ye dönüşmektedir. Hem n hem de p-tipi altlıklar için bu dönüşüm 550°C 'de gerçekleşmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda, silikatın tanecik boyutunun artması nedeniyle tabaka direncinde yumuşak bir düşüş vardır.



Şekil 2.12 Tavlama sıcaklığı ile tabaka direncinin değişimi (a) n tipi silisyum altlık (b) p tipi silisyum altlık (E.N. Mgbenu, 1981).

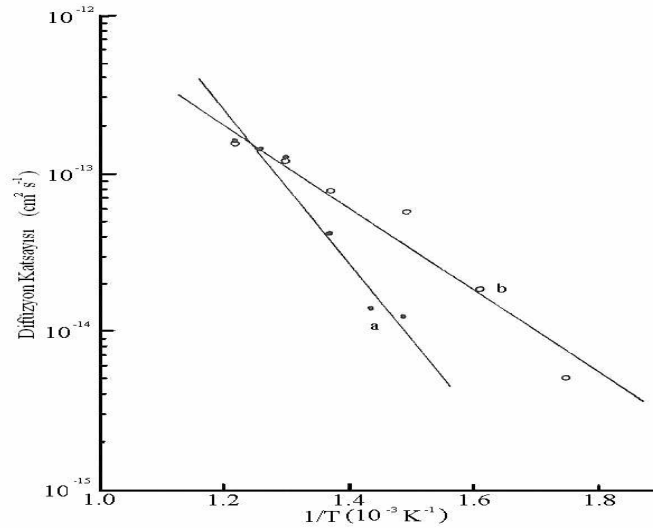
n-tipi altlığın tabaka direnci piki, p-tipinin yaklaşık iki katıdır. Böylelikle, n-tipi altlık üzerinde oluşan Ni_2Si 'nin direnci $\sim 60 \pm 3 \mu\Omega\text{cm}$ ve p-tipininki ise $\sim 32 \pm 2 \mu\Omega\text{cm}$ şeklinde elde edilmiştir. Bu nedenle, Ni_2Si fazının varlığı ile oluşan kontak direncinin altlık katkılmasına bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Silikat oluşumu süresince, bazı katkılar silikat tabakalar içinde kendi yollarını bulmaktadırlar. Piklerden görülen özdirenç farkları, silikat tabakalarında katkılarının özdirençlerindeki farklılıktan ileri gelmektedir. Arayüzler arası oksit tabakaların varlığı, silikat oluşum sıcaklıklarını birkaç yüz derece arttırmaktadır (Bower ve Mayer, 1972).

Belirli sıcaklıklarda farklı sürelerde bazı örnekler tavlantmıştır. Bu numunelerin tabaka dirençleri Ni_2Si tabakalarının kalınlığını hesaplamak için kullanılmıştır. Tipik örnek olarak Şekil 2.13'de Ni_2Si kalınlığının ısıtma süresiyle olan değişimi verilmiştir. Bu n-tipi altlık için yapılmıştır ve tavlama 425°C 'de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.13 425°C'de n tipi altlık üzerinde Ni₂Si oluşum kinetiği (E.N.Mgbenu,1981).

Silikat tabakasının kalınlığının zamanın kareköküne karşı olan grafiği çizilmiştir. Doğru çizgide olan noktalar silikat büyümesinin reaksiyon-değerini sınırlamaktan ziyade difüzyon şeklinde olduğunu göstermektedir. Bulunan sonuçlar diğer laboratuvarlarda bulunanlarla uyushmaktadır. Doğrunun eğiminden, 425°C'de $(x_2 - x_1)^2 = D(t_2^{1/2} - t_1^{1/2})^2$ ilişkisi kullanılarak difüzyon katsayısı hesaplandı. Burada sırasıyla t_1 ve t_2 tavlama sürelerine karşılık gelen x_1 ve x_2 silikat kalınlıklarıdır. 425°C'de elde edilen değer $D = 1.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 'dir.



Şekil 2.14 Ni₂Si oluşum hızının Arrhenius grafiği (a) n tipi silisyum altlık (b) p tipi altlık (E.N. Mgbenu,1981).

Hem n hem de p-tipi altlıklar üzerinde oluşan Ni_2Si için Şekil 2.14'te Arrhenius grafiklerinden aynı yolla diğer sıcaklıklardaki difüzyon katsayısı hesaplanmış ve elde edilen doğrular şu şekilde ifade edilmiştir:

$$D = 1.1 \times 10^{-7} \exp[-(1.0 \pm 0.1 \text{ eV}) / kT]$$

n-tipi altlık için

$$D = 2.7 \times 10^{-10} \exp[-(0.51 \pm 0.05 \text{ eV}) / kT]$$

p-tipi altlık için

Buradan aktivasyon enerjisi Ni_2Si oluşumunda n-tipi için $1.0 \pm 0.1 \text{ eV}$ ve p-tipi için $0.51 \pm 0.05 \text{ eV}$ şeklinde elde edilmiştir. n-tipi altlık için bulunan değerler Coe ve Rhoderick (1976) tarafından bulunan değerlerle uyuşmaktadır. Fakat Tu vd. (1975) ile Berning ve Levenson (1978)'un (100) yönelimli p-tipi altlık için yaptıkları çalışmalar arasında bir uyumsuzluk vardır. Berning ve Levenson ayrıca kendi p-tipi malzemeleriyle aktivasyon enerjisinin yönlenmeye bağlılığını da bulmuşlardır. Bu makalede altlık tipinde silikat büyümesindeki aktivasyon enerjisini etkilediği bulunmuştur. Her iki faktör silikatların silisyum engel yüksekliği etkisi olarak bilinmektedir (Cordes vd., 1975).

Ni_2Si oluşumu kontrollü bir difüzyondur. Bu nedenle, türlerden biri (Ni ve Si) baskın olarak hareketlidir. Tu ve arkadaşları çalışmalarında hareketli olan esas atomun nikel olduğunu görmüşlerdir. Ni_2Si tabakasının Si atomlarıyla reaksiyonu, $\text{Ni}_2\text{Si}/\text{Si}$ arayüzünde gerçekleşmektedir. Altlıkta kusurlar ve silisyum atomlarının doymamış bağları varsa reaksiyona yardım edilir. Ni/Si bağları, silisyum atomlarının silisyum örgüsünden ayırmak için küçük bir enerji gerektiği için kolaylıkla oluşturulabilir.

Altlık tipi, oluşan Ni_2Si fazının aktivasyon enerjisini önemli derecede etkilemektedir. Altlıklar arasındaki fark katkılama değildir. Katkılama elemanları Ni_2Si tabakası içerisine girerse, nikelin iletim parametresine farklı etkilerde bulunur. Daha ağır fosfor atomları muhtemelen difüzyon oluşumuna bordan daha fazla engel olmaktadır. Bu yüzden p-tipi altlıkla kıyaslanınca n-tipi altlık üzerinde Ni_2Si oluşumunda daha fazla aktivasyon enerjisi gerektiği gözlenmiştir.

2.4 Metal Yarıiletken Schottky Diyodların Elektrik Karakteristikleri

Metal veya yarıiletken içerisinde elektronlar Coulomb etkileşmesine maruz kaldığından potansiyel enerjileri serbest elektronların enerjisinden daha küçüktür. Bu nedenle elektronları kristal içinden vakuma atmak için, belirli bir miktarda enerji gerekmektedir. Elektronu malzeme içerisinde vakuma atmak için gereken minimum enerji, *iş fonksiyonu* veya *çıkış işi* olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerin büyük çoğunluğunun çıkış işi 1 ve 6 eV arasında değişmektedir ve malzemenin kristal yapısına bağlıdır.

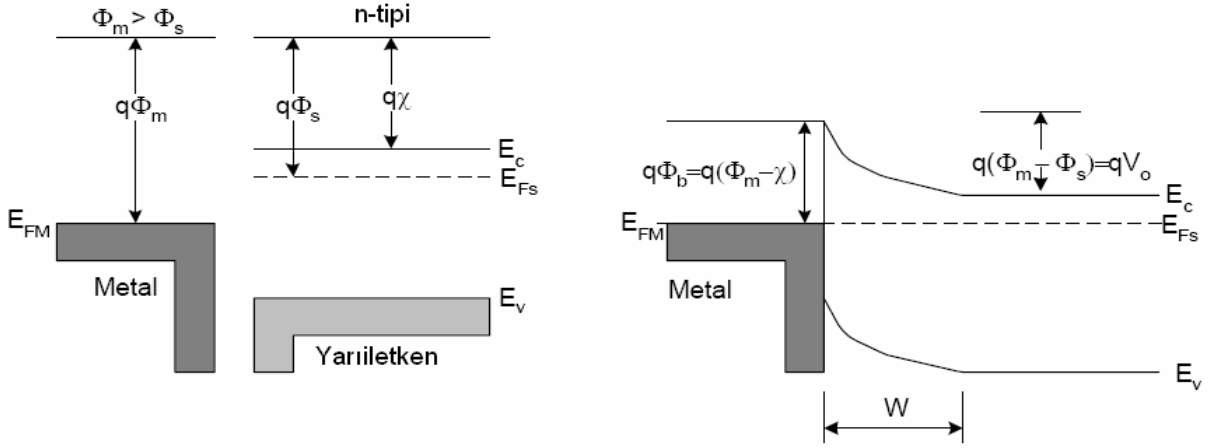
n tipi yarıiletkende, metalin çıkış işinin yarıiletkenin çıkış işinden büyük olduğu durum ($\phi_m > \phi_s$) Şekil 2.15’de gösterilmektedir. Metal n-tipi yarıiletken ile temasa getirildiğinde; elektronlar, çıkış işi küçük olan bölgeden çıkış işi daha büyük olan bölgeye doğru yani yarıiletkenden metale doğru hareket etmektedirler. Yük taşıyıcılarının hareketi, metal yarıiletken sistemin fermi seviyelerinin eşitlenmesine kadar devam etmektedir. Bu geçişlerin sonucunda metalde fazla negatif yük, yarıiletkenin yüzey bölgesinde ise fazla pozitif yüklü iyonlardan oluşmuş bölge meydana gelmektedir. Yarıiletkende elektronları kaybeden bölge arınma bölgesi olarak tanımlanır. Elektronlardan arınma bölgesinin kalınlığı,

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\varphi_K}{eN_d}} \quad (2.5)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada ε_0 elektrik sabiti, ε dielektrik katsayısı (indisi) , e elektron yükü, N_d donörlerin konsantrasyonu ve φ_K kontak potansiyellerinin farkıdır.

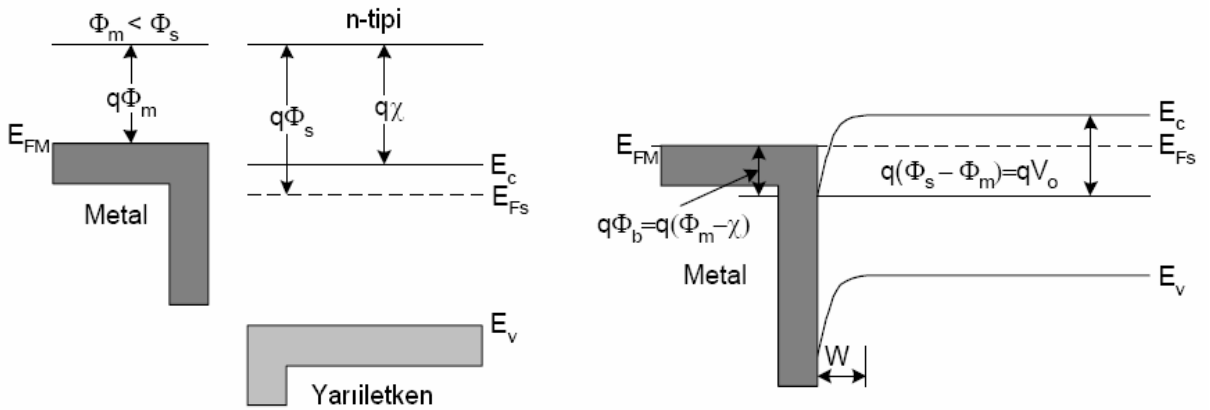
$$e\varphi_K = \phi_m - \phi_s \quad (2.6)$$

yarıiletkenin yüzey bölgesindeki bu tür tabaka *engel tabakası* olarak adlandırılır. Bandların yeteri kadar büyük eğimlerinde, engel tabakası doğrultucu kontakların temelini oluşturmaktadır. Metal-yarıiletken doğrultucu *kontaklar Schottky kontaklar* olarak adlandırılır.



Şekil 2.15 Metal/n-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m > \phi_s$).

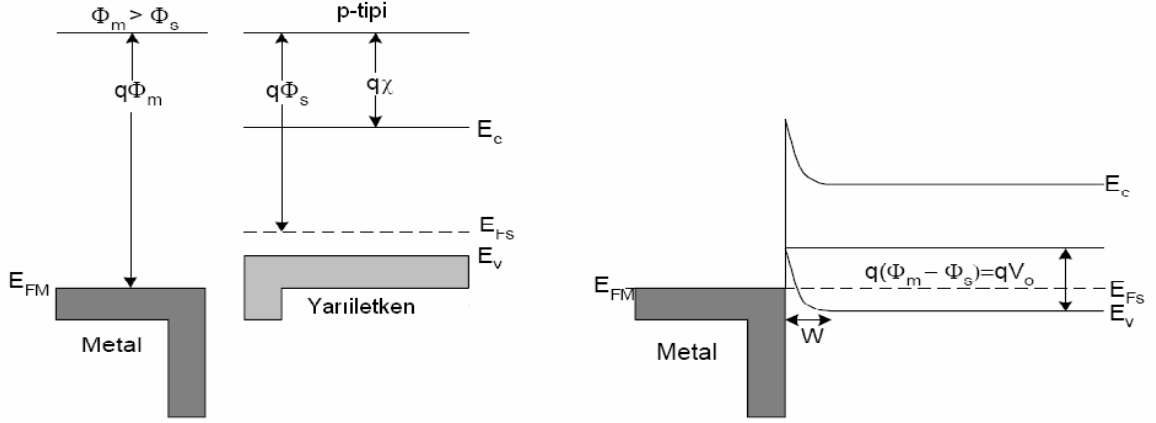
Metalin çıkış işinin n-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olduğu durumda ($\phi_m < \phi_s$) yarıiletkenin kontak bölgesinde enerji bandı aşağıya eğilmektedir (Şekil 2.16). Bu durumda elektronlar metalden yarıiletkenine doğru hareketleneceğinden yarıiletkenin yüzey bölgesindeki elektron konsantrasyonu daha büyük yani direnci daha küçük olur. Yarıiletkenin yüzey bölgesinde meydana gelen küçük dirençli tabaka antiengel tabakası olarak tanımlanır. Bu tür tabakalar omik kontakların temelini oluşturmaktadır. Schottky kontağı olduğu durumda, kontak potansiyelleri farkı ($\phi_K = \phi_m - \phi_s$) çok büyükse, kontak bölgesinde yarıiletken bandının eğimi de büyük olur.



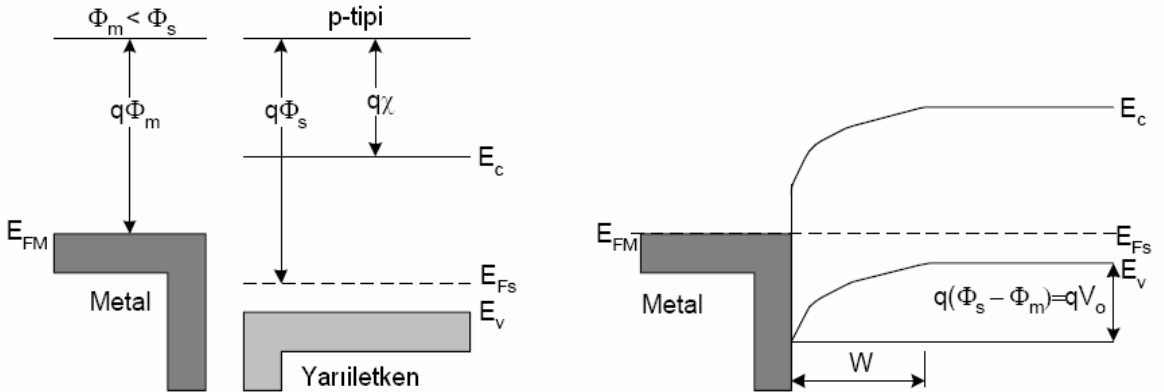
Şekil 2.16 Metal/n-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m < \phi_s$).

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise, metalin çıkış işi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha büyük olduğunda ($\phi_m > \phi_s$), elektronların p-tipi yarıiletkenden metale geçişleri neticesinde, yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artmakta ve direnç azalmaktadır (Şekil 2.17). Böylece metal/p-tipi yarıiletken eklemler doğrultucu olmayan ya da omik kontak özelliği göstermektedir.

Metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olduğu durumda ($\phi_m < \phi_s$), elektronların metalden yarıiletkene kolayca geçişleri neticesinde p-tipi yarıiletkenin kontak bölgesinde pozitif yüklü taşıyıcıların konsantrasyonu azalmakta ve bu tabakanın direnci büyümektedir (Şekil 2.18). Bu tür metal/p-tipi yarıiletken kontaklar doğrultucu özellik göstermekte ve Schottky diyodu olarak adlandırılmaktadırlar.



Şekil 2.17 Metal/p-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m > \phi_s$).



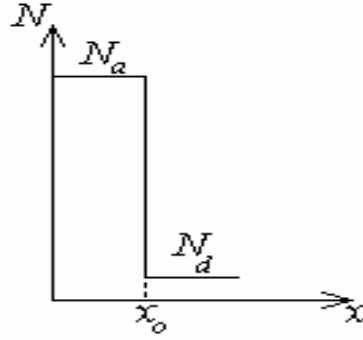
Şekil 2.18 Metal/p-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları ($\phi_m < \phi_s$).

2.5 Metal Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitansı

Engel kapasitansı hesaplamak için, eklemeye uygulanan gerilim (V) ve eklemdeki yükler (Q) ile (burada Q , eklemdeki Q_+ ve Q_- yüklerin mutlak değeridir) p - n eklemdeki potansiyel dağılımı Poisson denklemi ile ifade edilir. Tek boyutlu problem için (x -ekseni p - n eklem düzlemine diktir) Poisson denklemi şu şekilde yazılır.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon} \quad (2.7)$$

Burada $\psi = \psi(x)$ potansiyel, $\rho = \rho(x)$ hacimsel yük yoğunluğu, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$ elektrik sabiti ve ϵ dielektrik katsayısı.



Şekil 2.19 p-n eklemde keskin konsantrasyon dağılımı.

Keskin konsantrasyon dağılımlı p-n eklem için (Şekil 2.19) Poisson denkleminin çözümü katkının konsantrasyon dağılımı için aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$N(x_n) = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} = -\frac{C^3}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

$N(x_0)$, cm^{-3} biriminde, $C(pF = 10^{-12} F)$, $S(cm^2)$ ve $\frac{dC}{dV} \left(\frac{pF}{V} \right)$ biriminde olduğunda,

Denk.(2.8),

$$N(x_n) = \frac{1,4 \cdot 10^8}{\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} = -\frac{0,71 \cdot 10^8 C^3}{\epsilon\epsilon_0 S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir.

Denk.(2.8) ve (2.9)'dan elde edilen konsantrasyon, $x=\varepsilon\varepsilon_0S/C$ 'den hesaplanan koordinata (x :eklem kalınlığı) aittir.

Difüzyon yöntemiyle hazırlanmış eklemdeki katkı konsantrasyon dağılımı (Sürekli konsantrasyon dağılımlı p - n eklem):

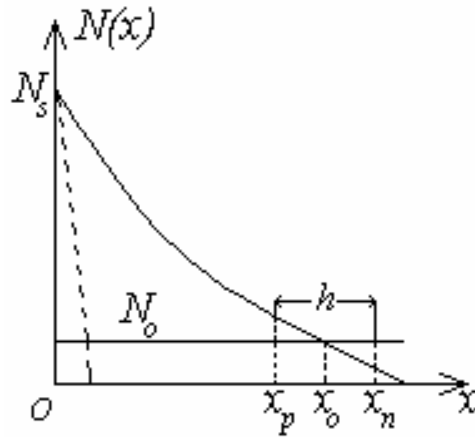
Sabit kaynaktan yapılan difüzyonda yarıiletkendeki konsantrasyon dağılımı şu şekilde verilir

$$N_1(x) = N_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (2.10)$$

Burada N_s örneğin yüzeyindeki katkı konsantrasyonu, x yüzeyden uzaklık, D katkının difüzyon katsayısı, t difüzyon zamanıdır.

n -tipi yarıiletkene, akseptör tipi katkının difüzyonu gözönüne alındığında, yarıiletkendeki ilk homojen yayılan konsantrasyonun N_o olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 2.20). Bu durumda katkıların konsantrasyon dağılımı şu şekilde verilir.

$$N(x) = N_d - N_a = N_o - N_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.11)$$



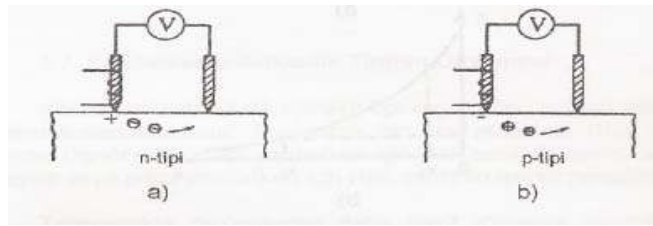
Şekil 2.20 p-n eklemde sürekli konsantrasyon dağılımı.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Silisyumun iletkenlik tipinin, öz direncinin, yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun belirlenmesi

3.1.1 İletkenlik tipinin belirlenmesi

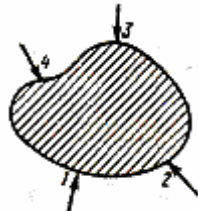
Silisyumun iletkenlik tipi termoelektrik ölçüm yöntemi kullanılarak belirlendi. Bu yöntemde T_1 (200-300°C) ve T_2 (oda sıcaklığı) sıcaklıklarında iki prob kullanıldı. Elektronların sıcak bölgeden soğuk bölgelere difüzyonu neticesinde, n tipi yarıiletkenin daha sıcak bölgesinde pozitif ükler oluşmuştur ve bu bölgenin elektrik kutbunun pozitif olduğu voltmetre ile kaydedilmiştir (Şekil 3.1a). p tipi yarıiletkende ise tersine, daha sıcak probun elektrik kutbu negatif olmaktadır (Şekil 3.1b).



Şekil 3.1 Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi ve (b) p tipi yarıiletkenin iletkenlik tipini ölçme devresi (Caferov, 1998).

3.1.2 Van der Pauw Yöntemiyle Öz direnç Ölçümü

Yarıiletken malzemelerin öz direnç ölçümleri için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Örnekten akım geçerken, belirli bir bölgesinde elektrik potansiyel farkı ölçümleri bu yöntemin temelidir (Caferov, 1998).



Şekil 3.2 Van der Pauw yöntemiyle öz direnç ölçümünde kontakların yerleşimi (Caferov, 1998).

Şekil 3.2' ye göre, ilk önce 1-4 kontakları arasından akım (I_{14}) geçirilir ve 2-3 kontakları arasından gerilim farkı okunur (V_{23}) ve R_1 direnci formül (3.1)' den hesaplanır.

$$R_1 = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (3.1)$$

Sonra, 1-2 kontakları arasından akım (I_{12}) geçirilerek 3-4 kontakları arası gerilim farkı (V_{34}) okunur ve R_2 direnci formül (3.2)' den hesaplanır.

$$R_2 = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (3.2)$$

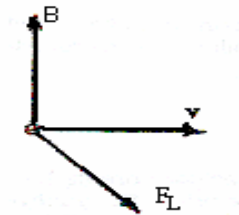
Van der Pauw teorisine göre, örneğin öz direnci

$$\rho = \frac{\pi b}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3.3)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

3.1.3 Yük Taşıyıcı Konsantrasyonunun Belirlenmesi

1879 yılında Hall, manyetik alan içerisine yerleştirilen altın bir örnekten elektrik akımı geçirmiş ve örneğin iki zıt kenar yüzeyi arasında bir gerilim oluştuğunu keşfetmiştir. Bu olay, Hall olayı olarak tanımlanır ve manyetik alanda hareket eden elektrik yüklerine Lorentz kuvvetinin etkisi ile ilgilidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Manyetik alandaki (B) pozitif yüklü parçacığın hızını v ve Lorentz kuvvetinin F_L yönlerinin gösterimi (Caferov, 1998).

Lorentz kuvveti

$$\vec{F} = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right) + q\vec{E} \quad (3.4)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

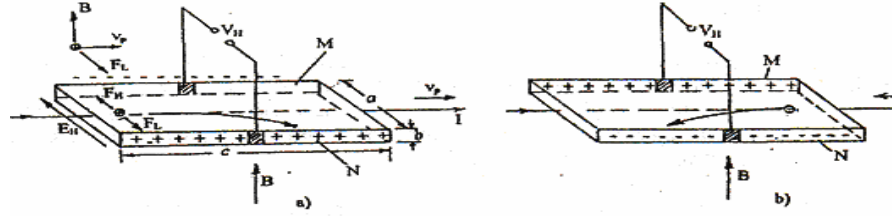
p-tipi yarıiletkende akım ve pozitif yüklü boşlukların hareket yönü aynı olduğundan (Şekil 3.3a) ve etki eden Lorentz kuvveti,

$$\vec{F} = +e\left(\vec{v} \times \vec{B}\right) + e\vec{E} \quad (3.5)$$

bağıntısı ile verilir. Burada(+e) boşlukların yüküdür. Boşlukların hızı (v), manyetik indüksiyon vektörüne $\left(\vec{B}\right)$ dik olması nedeniyle (3.5) denklemi

$$F_L = e v B + e E \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.4 (a) p-tipi ve (b) n-tipi yarıiletkenlerde Hall olayı (Caferov, 1998).

Manyetik alanda boşluklar ve negatif yüklü parçacıklar birbirlerine göre zıt yönlere doğru hareketlenirler. Bu sebeple yarıiletkenin N ve M yüzeylerinin yük dengesi bozulur ve bu yüzeyler arası Hall gerilimi (V_H) veya Hall elektrik alanı (E_H) oluşur. Pozitif yüklü boşluklara etki eden Hall alanının kuvveti F_H ile Lorentz kuvveti (F_L) birbirine zıt yöndedir (Şekil 3.4). Lorentz kuvveti ile Hall alanının kuvveti denge durumunda

$$F_L = F_H \quad (3.7)$$

$$e v B = e E_H \quad (3.8)$$

olur. Burada v boşlukların ortalama ısısal hızlarıdır. Hall alanı (E_H) ve Hall gerilimi (V_H) arasındaki ilişki denklem (3.9) ile belirlenir.

$$E_H = \frac{V_H}{a} \quad (3.9)$$

Burada a örneğin Hall alanı yönündeki boyutudur. Akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{ab} = pe\mathcal{G} \quad (3.10)$$

bağıntısı ile verilir. Burada p boşlukların konsantrasyonudur. (3.10) denkleminde boşlukların hızı çekilip (3.8) denkleminde yerine yazıldığında Hall gerilimi için,

$$V_H = \frac{1}{pe} \frac{IB}{b} \quad (3.11)$$

ifadesi elde edilir. Burada b örneğin manyetik alan yönündeki boyutu (kalınlığı)'dır. (3.11) denklemi,

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (3.12)$$

$$R_H = \frac{1}{pe} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada R_H Hall sabitidir.

3.2 Silisyumun Optik Geçirgenlik Spektrumunun Ölçümü

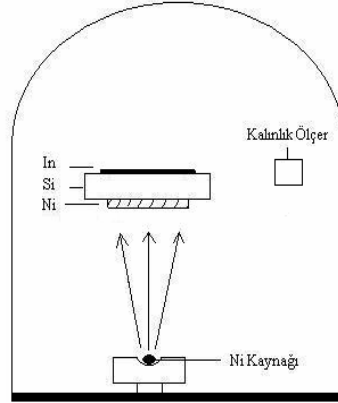
İki yüzeyide parlatılmış (elmas pasta ile) tek kristal silisyumun geçirgenlik spektrumu (UV) Perkin Elmer Lambda 2 Spektrometre cihazında alındı (300-1100 nm). Literatürden alınan $R=0,5$ değeri kullanılarak elde edilen $T=f(\lambda)$ grafiğinden α soğurma katsayısına geçildi. Silisyum dolaylı band yapısına sahip bir yarıiletken olduğu için $\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ grafiği çizildi ve $(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ ifadesini sıfır yapan değer bulunarak E_g belirlendi.

3.3 Ni/Si Eklemlerin Hazırlanması

Bu çalışmada, hazırlanan n tipi ($\rho = 7,5 \Omega\text{cm}$) ve p tipi ($\rho = 10,5 \Omega\text{cm}$) Si altlıkların arka yüzeyi üzerine iki nokta halinde direnç minimum olacak şekilde indiyum yerleştirilerek (200°C civarında) sıcak halka kontak (1) yapıldı (Şekil 3.6). Daha sonra silisyumun diğer yüzeyine elektron-demeti buharlaştırma tekniği ile vakum sisteminde nikel kaplandı (Şekil 3.5). Ni filmin kalınlığı “ Deposition Controller (Inficon, Leybold) ” cihazı ile buharlaştırma esnasında ölçüldü. Ayrıca kaplanan nikel (Ni) kalınlığı teorik olarak,

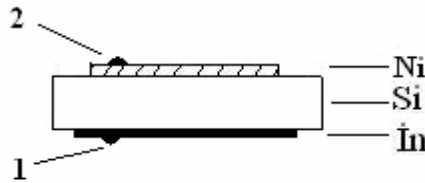
$$d = \frac{\Delta m}{2\pi h^2 \rho} \quad (3.14)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Burada; Δm : buharlaştırılan Ni kütlesi, ρ : Ni yoğunluğu, h : Ni kaynağın silisyum altlığı olan uzaklığıdır.



Şekil 3.5 Vakum sisteminde buharlaştırma tekniği ile Si üzerine Ni kaplanması.

Kaplama yapıldıktan sonra, gümüş (gümüş pasta) kullanılarak ince metal tel ile silisyum yüzey üzerine kaplanan nikel üzerinden soğuk kontak (2) alındı (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Ni/Si yapıların elektrik karakteristiklerinin ölçümü için örneğe yapılan kontaklar.

3.3.1 Ni/Si Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri Ölçümü ve Parametrelerinin Bulunması

Hazırlanan nikel silisyum yapıların; akım-gerilim karakteristikleri, önce karanlıkta daha sonra $P=100\text{W/cm}^2$ 'lik ışıık şiddetinde aydınlatılan ortamda nikel ve indiyum tarafından ölçüldü. $\ln(J)$ -V ile $\ln(J/J_s)$ -V grafikleri kullanılarak

$$\phi_b = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{A^* T^2}{J_s} \right) \quad (3.15)$$

bağıntısı ile engel yüksekliği,

$$\beta = \frac{e}{kT} \left(\frac{1}{\frac{d(\ln J/J_s)}{dV}} \right) \quad (3.16)$$

bağıntısından ise ideallik faktörü hesaplandı.

3.4 Ni/Si Eklemlerin Kapasitans - Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümü ve Katkı Konsantrasyonunun Bulunması

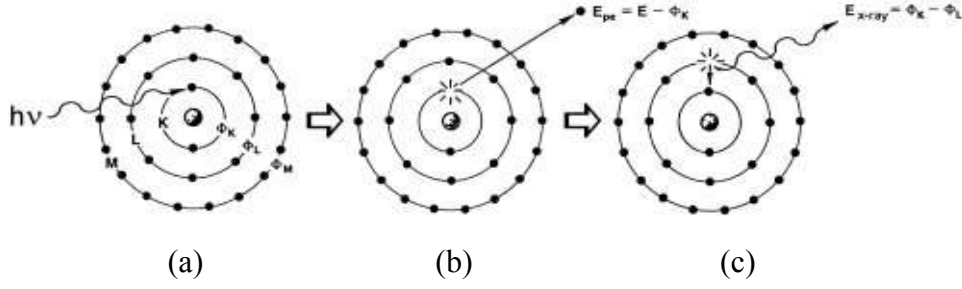
Hazırlanan Ni/Si ekleme dışarıdan gerilim uygulanarak kapasitans ölçümü yapıldı. Bu ölçümlerde LF Impedance Analizer (Hewlett Packard) aleti kullanıldı. Elde edilen sonuçlardan $1/C^2$ -V grafiği çizildi ve farklı gerilim değerleri için eğim alınarak $\frac{d(C^{-2})}{dV}$ değerleri bulundu. Buradan ,

$$N(x_n) = \frac{1,4 \cdot 10^8}{\varepsilon \varepsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C)^{-2}}{dV} \right]^{-1} \quad (3.17)$$

bağıntısı kullanılarak eklemdaki elektron konsantrasyonu hesaplandı. Burada $\varepsilon = 12$ silisyumun dielektrik sabiti, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m elektrik sabiti, S(cm²) kontağın alanıdır.

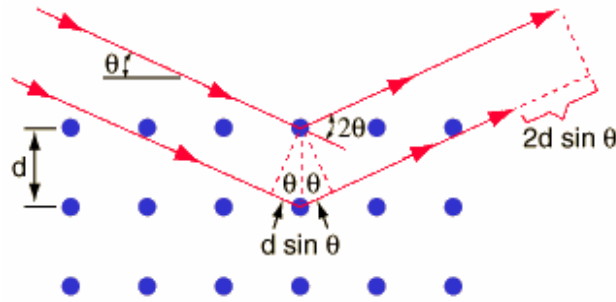
3.5 Ni/Si Eklemlerin XRF ve XRD Yöntemleri İle Analizi

XRF ölçümünün temeli, malzeme üzerine gönderilen çok küçük alanlı (0,1mm) X ışını demeti yardımıyla karakteristik X ışını elde etmektir. X ışınlarının absorpsiyonu, elektronik olarak uyarılmış iyonları oluşturur. Malzeme üzerine gönderilen x ışınları, atomlarla etkileşerek en iç yörüngeden bir elektron koparır. Elektronun yerinde oluşan boşluk bir üst yörüngedeki elektron tarafından doldurulurken X ışının floresansı gerçekleşir. Şekil 3.7’de X ışınlarının malzeme ile etkileşmesi ile oluşan süreçler gösterilmektedir. Yayınlanan X ışının enerjisi, en iç yörüngedeki elektronun bağlanma enerjisine bağlıdır. Her atomun bağlanma enerjisi farklı olduğundan, XRF ölçüm yöntemi kullanılarak malzemeden saçılan karakteristik X ışını spektrumları incelenip, örnek yüzeyinin küçük alanlı bölgelerinin (1-2 µm) kompozisyonu ve katkı atomlarının konsantrasyonu hakkında bilgi elde etmek mümkündür.



Şekil 3.7 X ışınlarının örnek ile etkileşmesi sırasında atom kabuklarında oluşan proseslerin gösterilmesi (a) X ışını enerjisinin soğrulması, (b) serbest elektronun dışarıya atılması, (c) karakteristik K_{α} ışınının oluşması

Diğer elektromanyetik ışın türlerinde olduğu gibi, X ışınının elektrik alan vektörüyle, ışının içinden geçtiği malzemenin atomları arasındaki etkileşme sonucu saçılma meydana gelir. Bir X ışını demeti, kristal yüzeye θ açısıyla çarptığında bir kısmı yüzeydeki atom tabakası tarafından saçılırken diğer bir kısmı ikinci atom tabakasına geçer. Bu tabakada yine bir kısmı saçılırken, geriye kalan ışın üçüncü tabakaya geçer (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Bir kristal tarafından oluşturulan X ışınları kırınımı

Kristalin düzenli örgü yapısı içinde yer alan merkezler tarafından yansıyan ışınların kırınımı gerçekleşir. Bu ışınların gözlenebilmesi için,

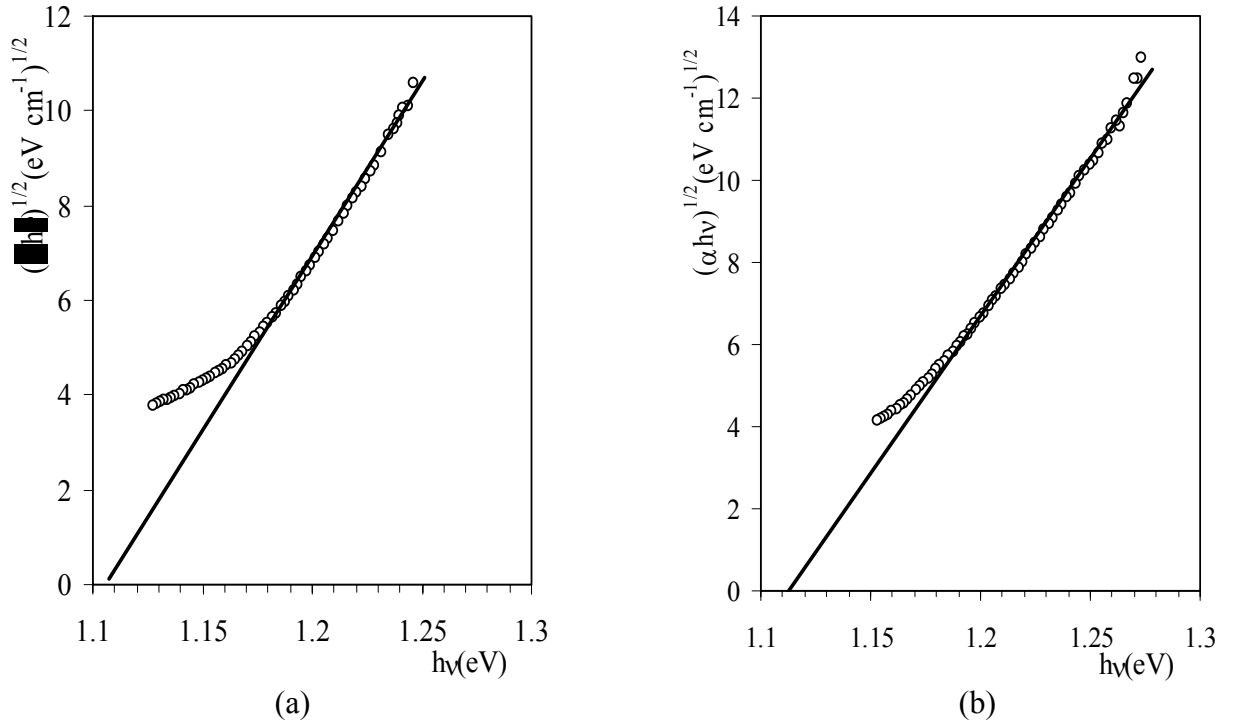
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.18)$$

güçlenme şartının yerine getirilmesi gerekir. Burada λ kristal örgüsüne düşen x ışınlarının dalga boyu, θ örgüye düşen x ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı, d kristaldeki atomlar arası mesafe ve n yansıma derecesidir. XRD ölçümlerinde örnekten yansıyan ışınların şiddeti, dönüş hareketi yapabilen bir dedektör ile kaydedilmektedir ve açığa bağlı olarak yansıyan ışınların şiddeti dedekte edilerek x ışınları kırınım deseni elde edilir. XRD ölçümleri malzemenin kristalografik yapısı, faz analizi ve örgü parametresi gibi karakteristik parametrelerini bulmamızı sağlar.

4. BULGULAR

4.1 Silisyumun Elektrik ve Optik Parametreleri

Silisyum için elektrik ve optik ölçümler yapıldı. Öncelikle tip ölçümü yapıldı. İletkenliği n-tipi ve p tipi olarak belirlenen iki ayrı örnek için yapılan Van Der Pauw ölçümlerinden n tipi silisyumun öz direnci $\rho = 9 \, \Omega\text{cm}$, p-tipi silisyumunki ise $\rho = 18 \, \Omega\text{cm}$ olarak belirlendi. Yük taşıyıcı konsantrasyonunu hesaplamak için Hall ölçümü yapıldı. n tipi silisyum için $n = 4,5 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$, p tipi silisyum için ise $n = 7,2 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplandı.



Şekil 4.1 Soğurma katsayısının gelen fotonun enerjisine bağlı grafiği (a) n tipi silisyum
(b) p tipi silisyum

n ve p tipi tek kristal silisyumun yasak band genişliğini bulmak için UV spektrumu alındı ve Şekil 4.1'deki grafikler çizildi. Eğrinin lineer kısmının uzantısının $h\nu$ eksenini kestiği nokta bulunarak yasak enerji aralığı hem n-tipi hem de p-tipi silisyum için $E_g = 1.11$ eV, olarak hesaplandı.

4.2 Ni/ Si Eklemlerinde Nikel Difüzyonunun XRF Yöntemiyle İncelenmesi

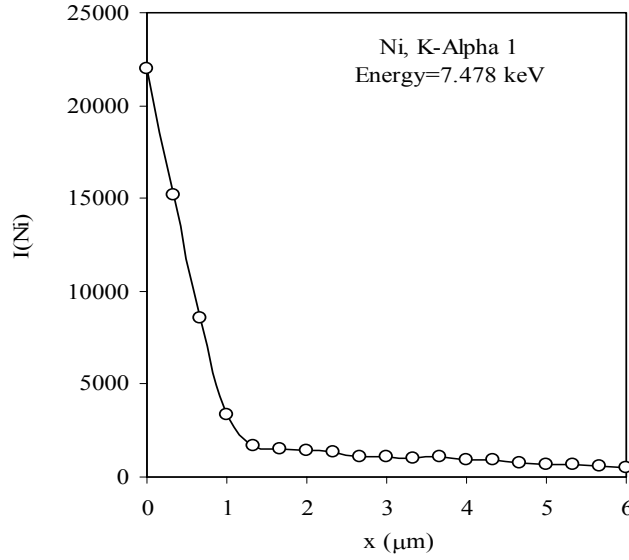
3.5 bölümünde bahsedildiği gibi, nikelin silisyumda konsantrasyon dağılımını XRF yöntemi ile elde etmek için, Ni filmi ($d_{Ni}=184$ nm, $S_{Ni}=0,36\text{cm}^2$) pSi altlık üzerine kaplandı. Oluşan Ni/pSi yapı vakumda 500°C de 15 saat tavlandı. Tavlamadan sonra örneğin yüzeyinden ardıcıl olarak ince filmler çıkarılarak (yaklaşık olarak $0,3\text{ }\mu\text{m}$) ve yüzeyden gelen XRF sinyalinin (pikin) Ni $K_{\alpha 1}$ (7,478 keV) şiddeti ölçülerek, nikelin XRF pikinin silisyumda dağılımı elde edildi (Çizelge 4.1a ve Şekil 4.2)

Çizelge 4.1a Ni $K_{\alpha 1}$ pik şiddetinin silisyumdaki dağılımı

$x(\mu\text{m})$	$I(\text{Ni})$
0	22004
0.33	15168
0.67	8541
1	3326
1.33	1647
1.67	1469
2	1458
2.33	1352
2.66	1114
3	1079
3.33	993
3.66	1104
4	937
4.33	921
4.66	752
5	643
5.33	691
5.66	564
6	497

Çizelge 4.1b Ni konsantrasyonunun silisyumda dağılımı

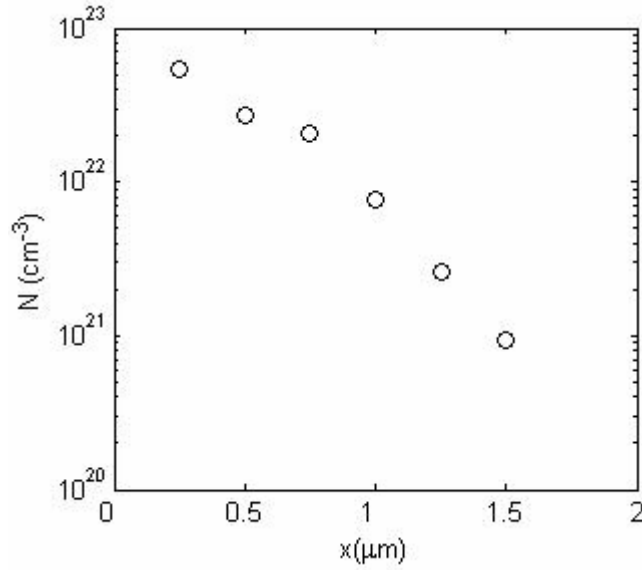
$x(\mu\text{m})$	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5
$N(\text{cm}^{-3})$	1.2×10^{23}	5.43×10^{22}	2.68×10^{22}	2.07×10^{22}	7.7×10^{21}	2.6×10^{21}	9.3×10^{20}



Şekil 4.2 Ni $K_{\alpha 1}$ pik şiddetinin silisyumda dağılımı ($T=500^{\circ}\text{C}$, 15 saat)

Daha sonra, Ni $K_{\alpha 1}$ pik şiddetinin aletle ölçülen (impuls/saniye) biriminden nikel atomlarının sayısına geçmek için; tavlama öncesi impuls sayısı ile, tavlama sonrası yüzeyde kalan nikel atomlarının atılması sonrasındaki impuls sayısı arasındaki fark hesaplandı. Hesaplamaların sonucu olarak Ni $K_{\alpha 1}$ için silisyumdaki kalibrasyon sayısı $\kappa = 1 \frac{\text{impuls}}{\text{saniye}} \rightarrow 1,7 \times 10^{16}$ atom

olarak bulundu. Bu kalibrasyon sayısını kullanarak, Ni/Si yapının 500°C de 15 saat tavlama neticesinde nikelin silisyumda oluşan konsantrasyon dağılımı hesaplandı (Çizelge 4.1b) ve (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Nikelin silisyumdaki konsantrasyon dağılımı ($T=500^{\circ}\text{C}$, 15 saat).

Şekil 4.2 den görüldüğü gibi, Ni konsantrasyonu silisyumun yüzey bölgesinde ($x=0-1\ \mu\text{m}$) önce keskin azalmakta ve daha sonra ($x>0-1\ \mu\text{m}$) konsantrasyon azalması yavaşlamaktadır. İki bölgeden oluşan nikelin silisyumda konsantrasyon dağılımını bu şekilde yorumlamak mümkündür. Şekil 4.3'ün birinci (yüzey) bölgesi ($x=0-1\ \mu\text{m}$) nikelin silisyumda yavaş difüzyonunu, ikinci bölge ise ($x>0-1\ \mu\text{m}$) nikelin daha hızlı difüzyonunu karakterize etmektedir. Bu difüzyon deneyinde, nikelin silisyuma difüzyonu sabit kaynaktan gerçekleşir ve bu nedenle nikelin konsantrasyon dağılımı şu şekilde ifade edilmektedir (T.Caferov).

$$N(x,t) = N_o \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4.1)$$

Burada N_o , numunenin yüzeyindeki ($x=0$) konsantrasyondur, D difüzyon katsayısıdır ve

$\operatorname{erf} 2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$ gauss fonksiyonudur. Nikelin, silisyumun yüzey bölgesi ve iç bölgesi için

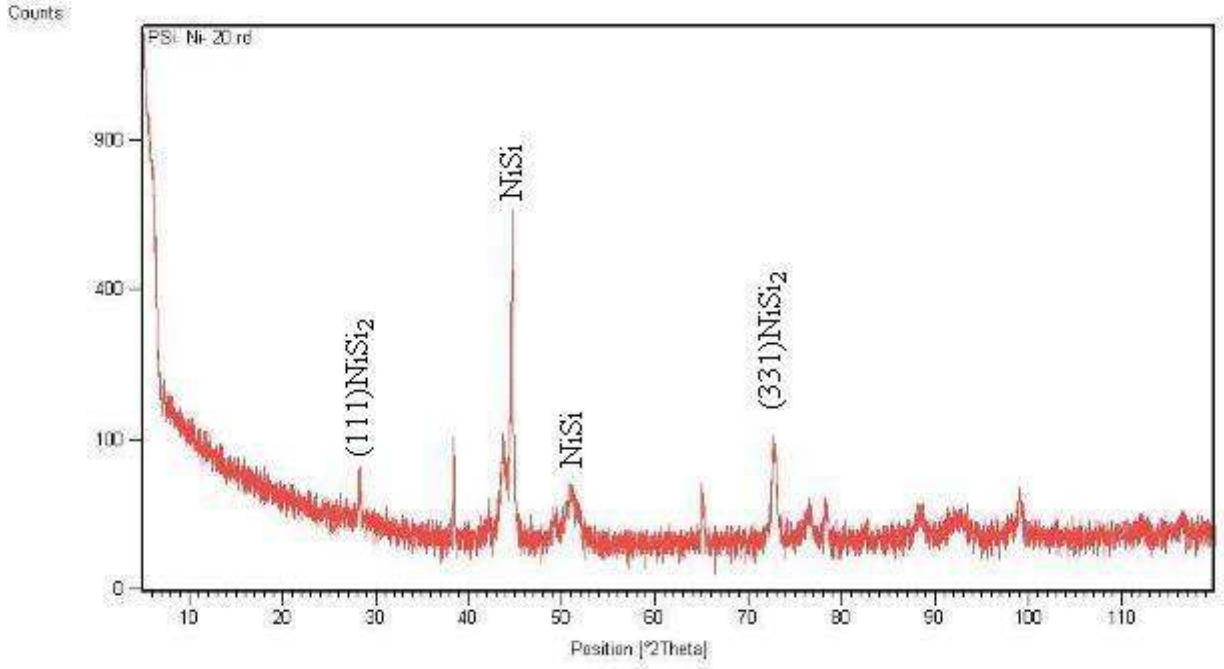
hesaplanan difüzyon katsayısı $D_y \approx 5.10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ve $D_i \approx 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak bulundu. Böylece nikelin silisyumda difüzyon akışı 1) Düşük difüzyon D_y katsayısı, 2) Yüksek difüzyon D_i katsayısı ile belirlenir. Nikelin silisyumdaki yavaş difüzyonu yüzey bölgesindeki yeni Ni/Si fazlarının oluşumu ile ve iç bölgedeki hızlı difüzyonunu arayer mekanizması ile yorumlamak mümkündür.

4.3 Ni /Si Eklemlerde Oluşan Fazların XRD yöntemiyle incelenmesi

Ni/Si sisteminde tavlama neticesinde nikel silikatların oluşumu (Ni_3Si , $\text{Ni}_3\text{Si}_{12}$, Ni_2Si , Ni_3Si_2 , NiSi , ve NiSi_2) bilinmektedir. Nikel silikat fazları arasında bulunan, düşük dirençli metalik özellikler gösteren NiSi ve NiSi_2 fazları, silisyum elektroniği için özel bir öneme sahiptir. NiSi ortorombik kristal yapısına sahiptir ($a=0,523\ \text{nm}$, $b=0,326\ \text{nm}$, $c=0,566\ \text{nm}$) ve 600°C 'den düşük sıcaklıklarda stabildir (F.F.Zhao vd, 2004). NiSi_2 fazı kübik yapıdadır ($a=0,5395\ \text{nm}$) ve yüksek sıcaklıklarda ($T>750^\circ\text{C}$) NiSi fazı NiSi_2 fazına dönüşür. Ni/Si sisteminde faz oluşumları ile ilgili literatürdeki araştırmalar esasen ince Ni filmleri ($d_{\text{Ni}}=5-20\ \text{\AA}$) Ni/Si yapılara aittir. Bu çalışmada kalın Ni filmleri ($d_{\text{Ni}}=184\ \text{nm}$) Ni/Si sisteminde 500°C vakumda tavlama neticesinde oluşan nikel silikat fazları XRD yöntemiyle incelenmiştir.

Ni/pSi ($d_{Ni}=184$ nm, $S_{Ni}=0,36$ cm², $d_{Si}=514$ μ m) yapılar vakumda 500°C de 1,5 saat ve 15 saat tavlama sonra XRD yöntemiyle incelendi.

Şekil 4.4’de Ni/pSi yapının 500°C’de 1,5 saat tavlama neticesinde oluşan XRD spektrumu gösterilmektedir. Çizelge 4.2’de, Şekil 4.4’den hesaplanan Ni/pSi yapının parametreleri verilmektedir.



Şekil 4.4 Ni/pSi yapının XRD spektrumu (500°C, 1.5 saat).

Çizelge 4.2 Ni/pSi yapının (500°C, 1.5 saat) XRD spektrumundan elde edilen parametreler.

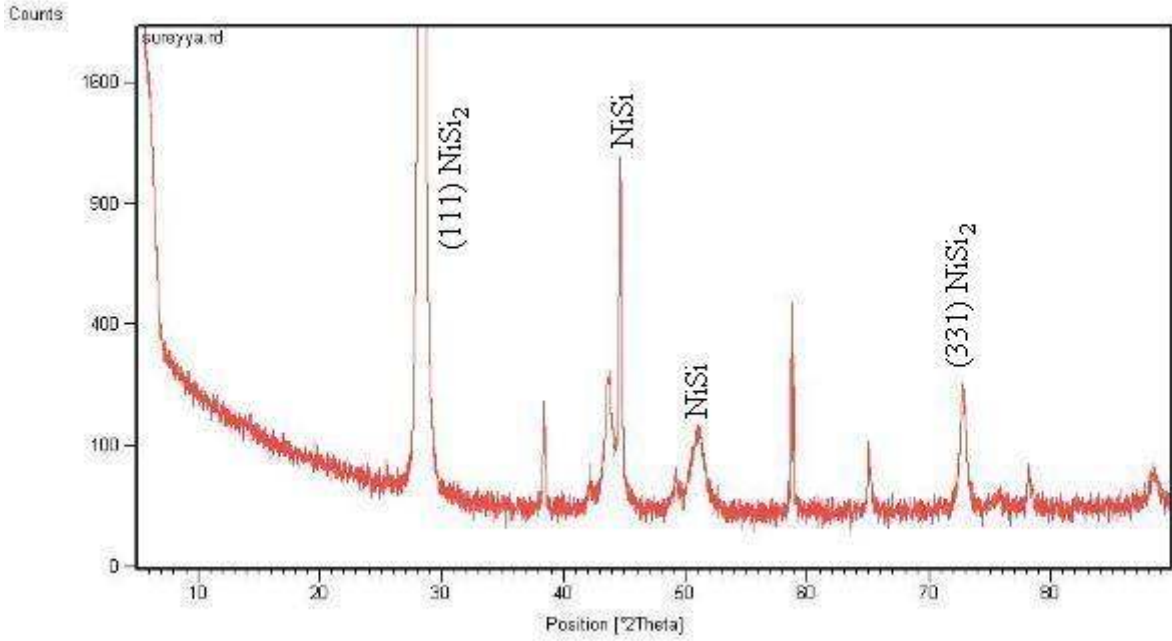
No.	d-spacing [Å]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Area [cts*°2Th.]	Tip width [°2Th.]	Pos. [°2Th.]
1	17.33674	1200.67	0.2362	100.00	279.71	0.2400	5.0974
2	14.07215	515.96	0.4723	42.97	240.40	0.4800	6.2810
3	3.15496	40.41	0.1968	3.37	7.85	0.2000	(111) NiSi ₂
4	2.34348	72.70	0.1574	6.05	11.29	0.1600	38.4127
5	2.07205	72.35	0.3936	6.03	28.09	0.4000	43.6860
6	2.02989	609.96	0.0984	50.80	59.21	0.1000	NiSi
7	1.78899	28.50	0.4723	2.37	13.28	0.4800	NiSi
8	1.43460	29.72	0.1574	2.48	4.62	0.1600	65.0119
9	1.30186	77.19	0.3149	6.43	23.98	0.3200	(331) NiSi ₂
10	1.24554	13.63	0.4723	1.14	6.35	0.4800	76.4805

$2\theta=28,2876^\circ$ ve $72,6238^\circ$ deki pikler $(111)\text{NiSi}_2$ ve $(331)\text{NiSi}_2$ fazına aittir. $2\theta=44,6417^\circ$ ve $51,0536^\circ$ deki pikler NiSi fazına aittir. Yeni oluşan polikristal yapıya sahip fazlardaki tane boyutlarını aşağıdaki formülle hesaplamak mümkündür.

$$d = \frac{\lambda}{D \cdot \cos \theta} \quad (4.2)$$

Burada $\text{CuK}\alpha 1$ için $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$, D difraksiyon pikinin yarım genişliğidir (FWHM-radyan biçiminde). Çizelge 4.2’de gösterilen NiSi_2 için ($2\theta=28,2876^\circ$, $\text{FWHM}=0,1968^\circ$) ve NiSi için ($2\theta=44,6417^\circ$, $\text{FWHM}=0,0984^\circ$) verileri kullanılarak tavlama neticesinde (500°C , 1.5 saat) oluşan NiSi_2 ve NiSi fazların ortalama tane boyutları $d(\text{NiSi}_2)=465 \text{ \AA}$ ve $d(\text{NiSi})=971 \text{ \AA}$ olarak hesaplandı.

Şekil 4.5’de ve Çizelge 4.3’de Ni/pSi yapının 500°C ’de 15 saat tavlama neticesinde oluşan XRD spektrumu ve parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Ni/pSi yapının XRD spektrumu (500°C , 15 saat).

Çizelge 4.3 Ni/pSi yapının (500°C, 15 saat) XRD spektrumundan elde edilen parametreler.

No.	d-spacing [Å]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Area [cts*°2Th.]	Tip width [°2Th.]	Pos. [°2Th.]
1	14.39614	1108.15	0.4723	0.17	516.31	0.4800	6.1395
2	3.17979	9762.33	0.0590	1.50	568.56	0.0600	28.0623
3	3.15404	649573.10	0.1574	100.00	100883.00	0.1600 (111) NiSi₂	28.2962
4	2.34502	162.21	0.0787	0.02	12.60	0.0800	38.3864
5	2.14463	26.42	0.2362	0.00	6.15	0.2400	42.1357
6	2.07098	218.37	0.3936	0.03	84.79	0.4000	43.7098
7	2.02872	1019.88	0.1200	0.16	163.18	0.1000 NiSi	44.6299
8	2.02770	671.70	0.0960	0.10	85.98	0.0800	44.7705
9	1.84953	31.56	0.2880	0.00	12.12	0.2400	49.2255
10	1.78614	93.53	0.7680	0.01	95.77	0.6400 NiSi	51.0958
11	1.57123	454.52	0.0960	0.07	58.18	0.0800	58.7143
12	1.57122	283.01	0.0720	0.04	27.17	0.0600	58.8750
13	1.43337	62.95	0.1440	0.01	12.09	0.1200	65.0142
14	1.29842	186.93	0.3840	0.03	95.71	0.3200 (331) NiSi₂	72.7773

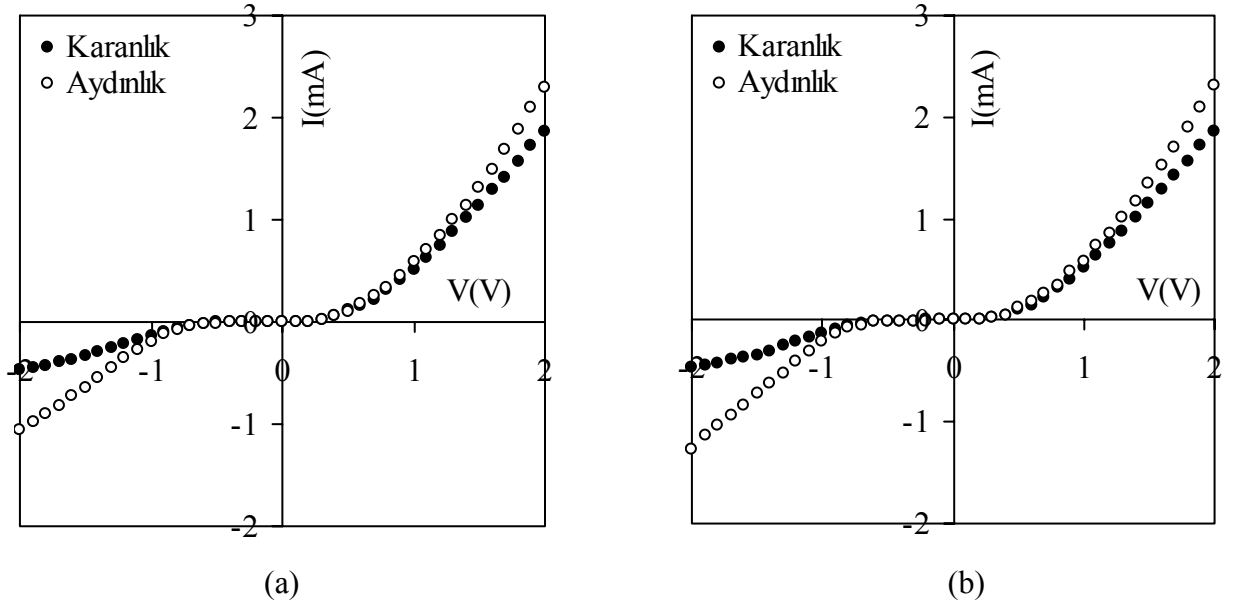
Şekil 4.5'ten görüldüğü gibi Ni/pSi yapı 500°C'de 15 saat tavlandığında NiSi₂ ve NiSi pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir (500 °C, 1.5 saat tavlama nazaran, Şekil 4.4). Ayrıca, yeni piklerin ($2\theta=58,7143^\circ$) oluşumunda görülmektedir. Çizelge 4.3'de gösterilen NiSi₂ için ($2\theta=28,2962^\circ$, FWHM=0,1574°) ve NiSi için ($2\theta=44,6299^\circ$, FWHM=0,1200°) verileri ve (4.2) formülü kullanılarak, 500°C'de 15 saat tavlama neticesinde ortalama tane boyutları d(NiSi₂)=580 Å ve d(NiSi)=796 Å olarak bulundu.

Bu değerler, Ni/pSi yapıların 500°C'de 1.5 saat tavlama sonrası NiSi₂ ve NiSi'deki tane boyutları ile karşılaştırıldığında; tavlama süresinin 1.5 saatten 15 saate kadar arttırılmasıyla NiSi₂ fazının tane boyutunun büyümekte , NiSi'ninkinin ise küçülmekte olduğu görülmüştür.

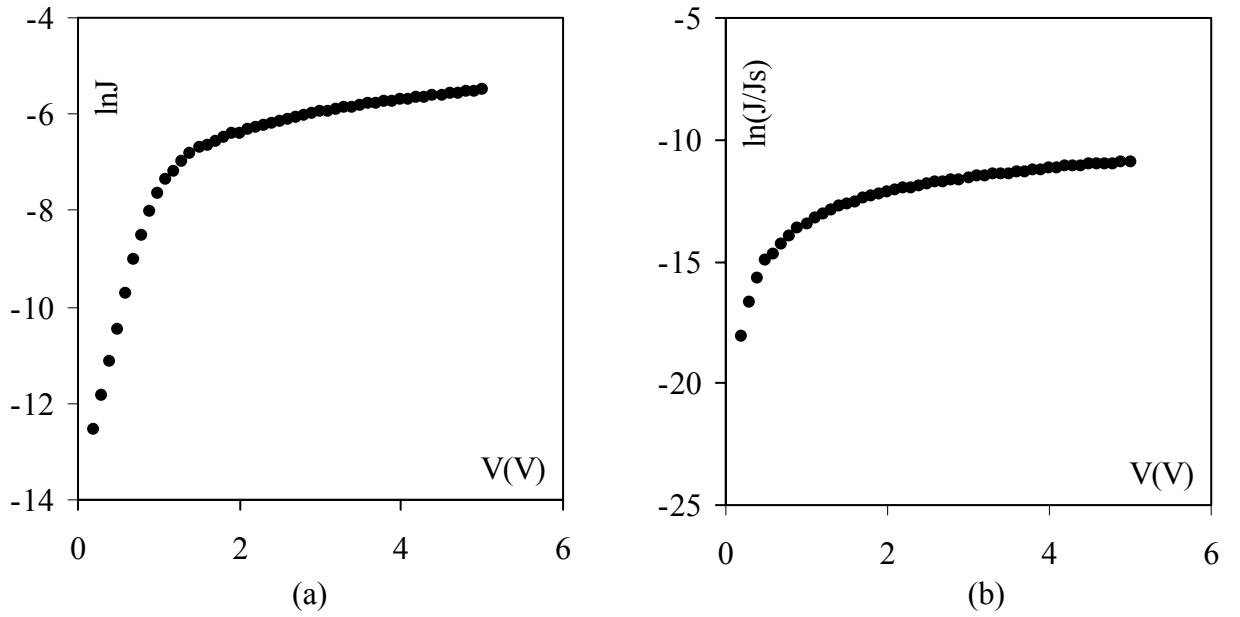
4.4 Ni /nSi Diyodların Elektrik Karakteristikleri

4.4.1 Ni/nSi Diyodların Akım-Gerilim Karakteristikleri

n tipi silisyum altlık üzerine $S=0,28 \text{ cm}^2$ alanlı, $d=50 \text{ nm}$ kalınlıklı nikel kaplandı ve elektrik ölçümler yapıldı. Ni/nSi eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri Şekil 4.6 ve 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Ni-nSi diyodun tavlamadan önceki I-V karakteristikleri (a) nikel tarafından aydınlıkta, (b) In tarafından aydınlıkta



Şekil 4.7 Ni-nSi diyodun tavlamadan önceki (a) $\ln(J)$ -V grafiği, (b) $\ln(J/J_s)$ -V grafiği

Schottky kontağın I-V karakteristiği şu şekilde verilir:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

burada doyma akım yoğunluğu

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (4.4)$$

Φ_b engel yüksekliği, β ideallik faktörü, A^* Richardson sabitidir.

I-V karakteristiğinin doğru yönü için, (4.3) formülü yaklaşık olarak şu şekilde yazılabilir.

$$J_f \approx J_s \exp\left(\frac{eV_f}{\beta kT}\right) \quad (4.5)$$

$$V_f=0 \text{ olduğunda, } J_f=J_s \text{ olur.} \quad (4.6)$$

Denklem (4.4)'den engel yüksekliği,

$$\phi_b = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_s}\right) \quad (4.7)$$

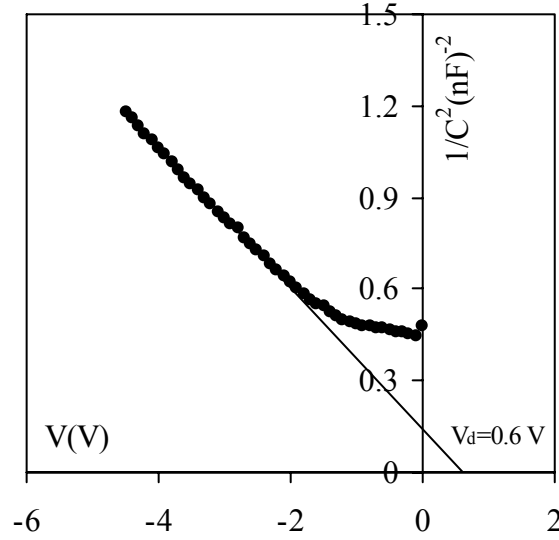
formülü ile hesaplanır. (4.6) denkleminde görüldüğü gibi, Φ_b 'yi hesaplamak için doyma akım yoğunluğunun değeri gerekmektedir. J_s değeri (4.6) şartından bulunabilir. Engelin ideallik faktörü (4.5) denkleminde hesaplanır.

$$\beta = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln J/J_s)} \quad (4.8)$$

(4.7) ve (4.8) denklemlerini kullanarak, Şekil 4.7a ve Şekil 4.7b'den hesaplanan engel yüksekliği $\Phi_b=0,76$ eV ve ideallik faktörü $\beta=3,0$ ve olarak bulundu.

4.4.2 Ni/ nSi Diyodların C-V Karakteristikleri

Tavlanmamış Ni/nSi eklemin C-V karakteristiği Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Ni /nSi diyodun tavlamadan önceki C-V karakteristiği (f=1 MHz)

Büyük ters gerilimlerde $|V| > 2V$, $(1/C^2)$ -V grafiği lineer şekilde değişmektedir. Küçük gerilimlerde $(0 < |V| < 2)$ ise deneysel sonuçlar lineer kuraldan saptanmaktadır. Eğrinin $(1/C^2)$ -V lineer kısmının voltaj eksenini ile kesişimi difüzyon potansiyelini vermektedir. Şekil 4.8’den hesaplanan difüzyon potansiyelinin değeri $V_d=0,6V$ yaklaşık olarak Ni/pSi eklemin engel yüksekliğine yakındır.

$(1/C^2)$ -V grafiğinden Si tarafındaki iyonlaşmış katkı atomlarının (donörlerin) konsantrasyonu aşağıdaki formülle hesaplandı.

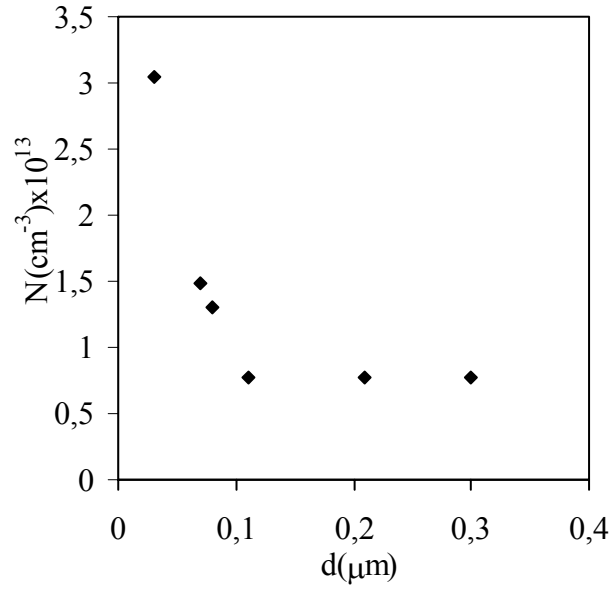
$$N(x_n) = \frac{1,4 \cdot 10^8}{\epsilon \epsilon_o S^2} \left[\frac{d(C)^{-2}}{dV} \right]^{-1} \quad (4.9)$$

Burada $N(\text{cm}^{-3})$ konsantrasyon, $\epsilon_o = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} = 8.85 \cdot 10^{-5} \frac{nF}{cm}$, $S(\text{cm}^2)$ kontak alanıdır.

Eklemin genişliği ise 4.10 denklemi ile bulundu.

$$d = \frac{\epsilon \epsilon_o S}{C} \quad (4.10)$$

Şekil 4.9'da Ni/nSi eklemin Si tarafındaki donörlerin konsantrasyon dağılımı gösterilmektedir.

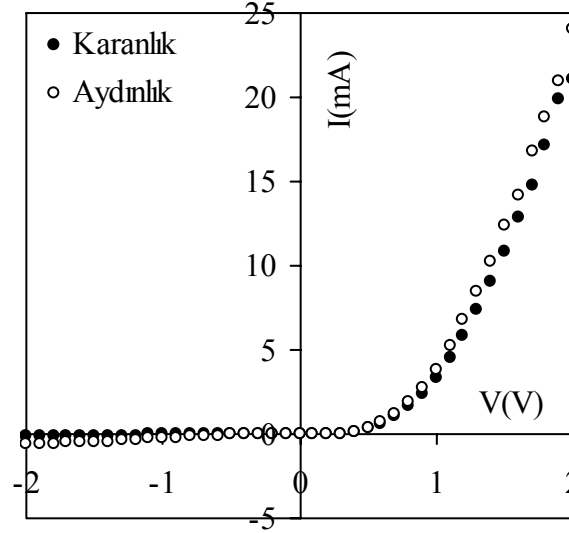


Şekil 4.9 Ni /nSi diyodun tavlama öncesi eklemin kalınlığına bağlı donör konsantrasyon dağılımı.

Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi, donörlerin konsantrasyonu silisyum yüzeyinden içeri (yaklaşık olarak 0,05µm) doğru azalmaktadır. Bunun sebebi nikel atomlarının difüzyonu ile ilgili olabilir.

4.5 Tavlamanın Ni /nSi Diyodların Elektrik Karakteristiklerine Etkisi

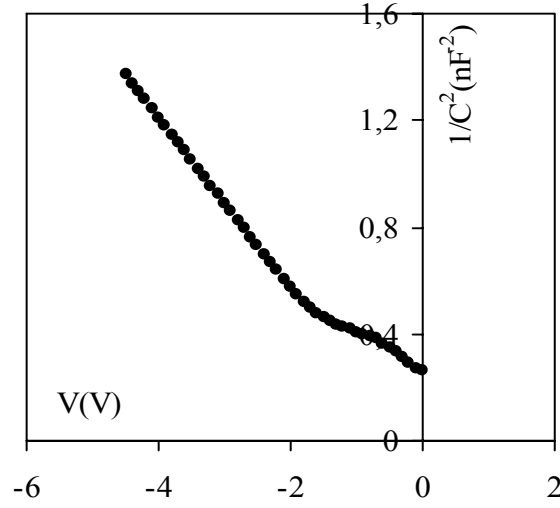
n tipi silisyum altlık üzerine $S=0,28 \text{ cm}^2$ alanlı, $d=50 \text{ nm}$ kalınlıklı nikel kaplandı ve tavlama sonrası (500°C , 10 dak.) elektrik ölçümler yapıldı. Şekil 4.10'da tavllanmış Ni/nSi eklemin I-V karakteristiği(karanlıkta ve aydınlıkta) verilmiştir.



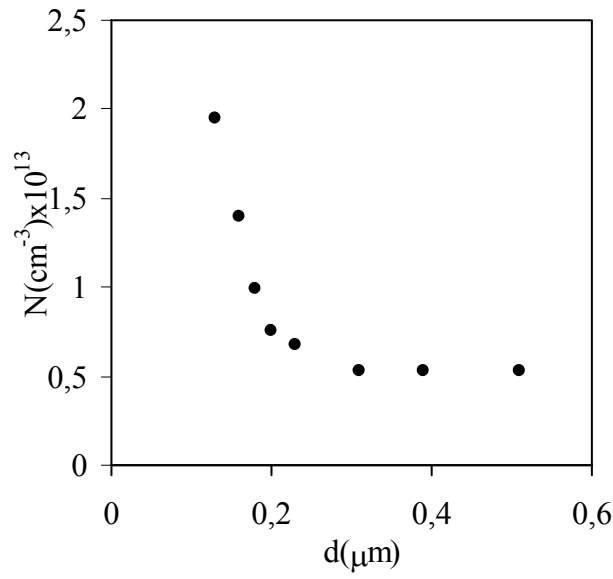
Şekil 4.10 Ni /nSi diyodun 500°C 'de 10 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.

Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi, tavlama neticesinde ışığa duyarlılık artmaktadır. Denklem (4.7) ve (4.8) kullanılarak yapılan hesaplamalar 500°C 'de 10 dakika tavlama neticesinde Ni/nSi eklemin engel yüksekliğinin $\phi_b = 0,73 \text{ eV}$ olduğunu gösterir. Tavlama sonrası engel yüksekliği, tavlamadan önceki $\phi_b = 0,76 \text{ eV}$ 'a göre çok az değişmektedir. Ancak ideallik faktörü keskin artmaktadır. Tavlamadan önce $\beta=3$ iken tavlamadan sonra $\beta=11,6$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.11'de 500°C 'de 10 dakika tavllanmış Ni/nSi eklemin C-V karakteristiği verilmektedir. Eklemin silisyum tarafındaki donörlerin konsantrasyon dağılımı şekil 4.12'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, donörlerin yayılma derinliği artmaktadır. Bu da nikelin difüzyonu ile ilgili olabilir.

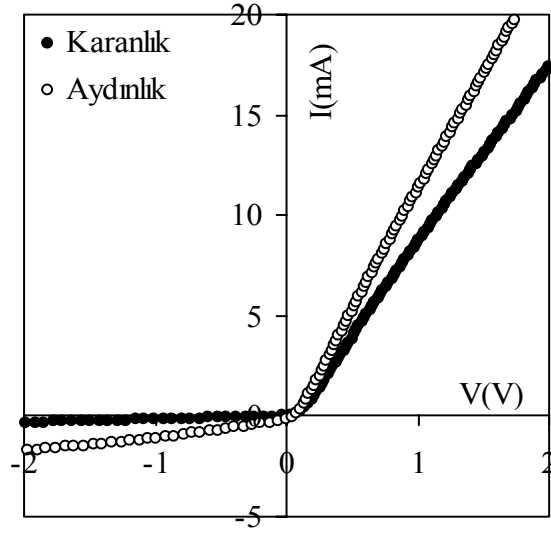


Şekil 4.11 Ni /nSi diyodun 500°C’de 10 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği ($f=1$ MHz).

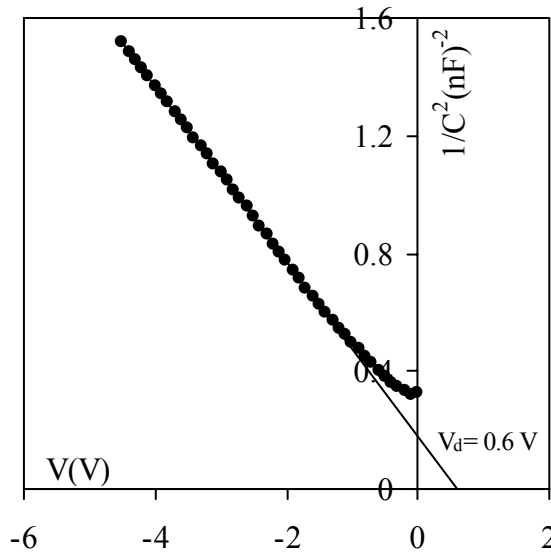


Şekil 4.12 Ni /nSi diyodun 500°C’de 10 dakika tavlama sonrası eklem kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu.

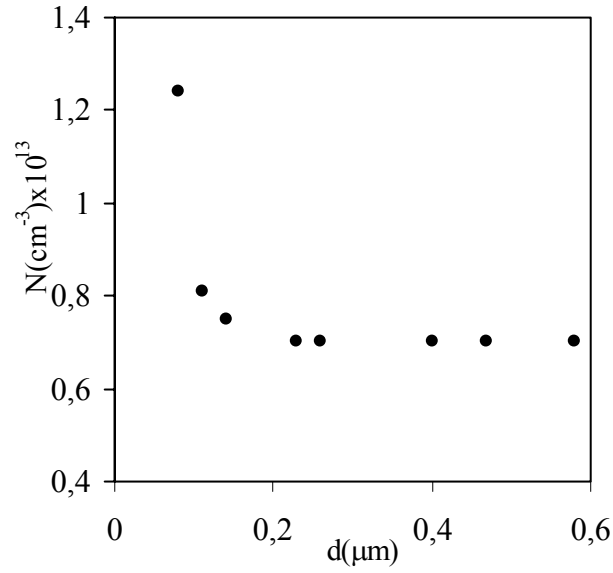
Şekil 4.13’de 500°C’de 20 dakika tavllanmış Ni/pSi diyodun I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Bu diyod için engel yüksekliği $\phi_b = 0,69$ eV ve ideallik faktörü $\beta=2,17$ ’dir. Bu denklemin C-V karakteristiği Şekil 4.14’te verilmiştir. C-V karakteristiklerinden hesaplanan donörlerin konsantrasyon dağılımı Şekil 4.15’de gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Ni /nSi diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.

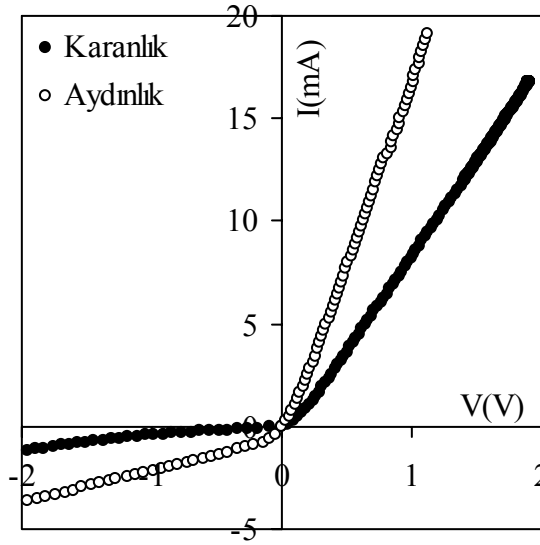


Şekil 4.14 Ni /nSi diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği (f=1 MHz).

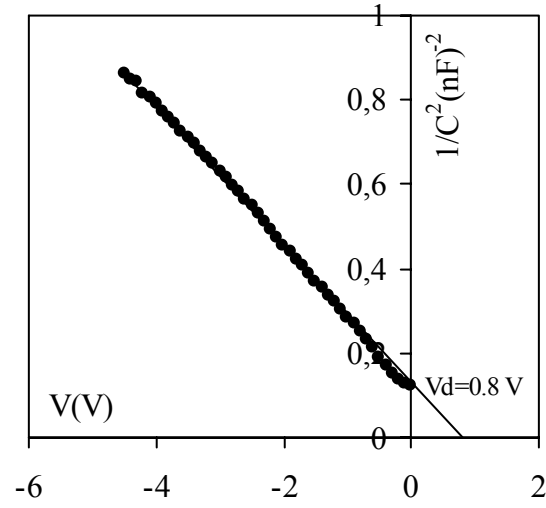


Şekil 4.15 Ni /nSi Diyodun 500°C’de 20 dakika vakumda tavlama sonrası eklemin kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu dağılımı

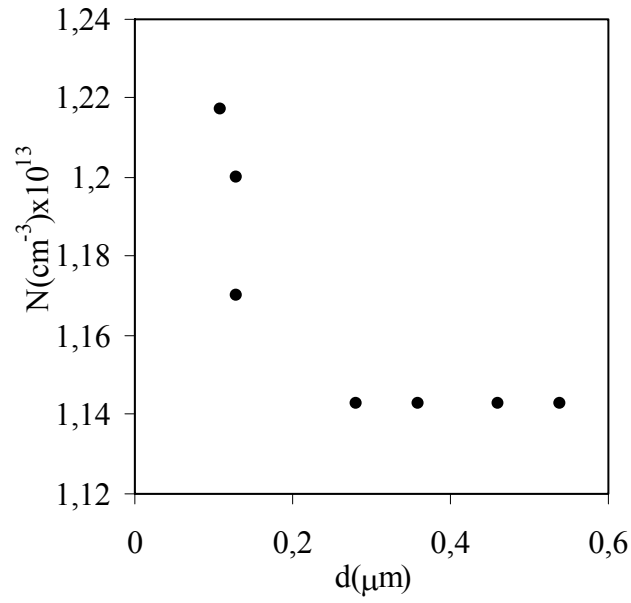
500°C’de 30 dakika tavllanmış Ni/nSi eklemin I-V ve C-V karakteristikleri Şekil 4.16 ve 4.17’de gösterilmektedir. C-V karakteristiklerinden elde edilen donörlerin konsantrasyon dağılımı Şekil 4.18’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, tavlama süresi arttıkça donörlerin konsantrasyon gradyanı azalmaktadır. Bu da nikelin silisyuma difüzyonu ile bağlı olabilir.



Şekil 4.16 Ni /nSi diyodun 500°C’de 30 dakika vakumda tavlama sonrası I-V karakteristiği.

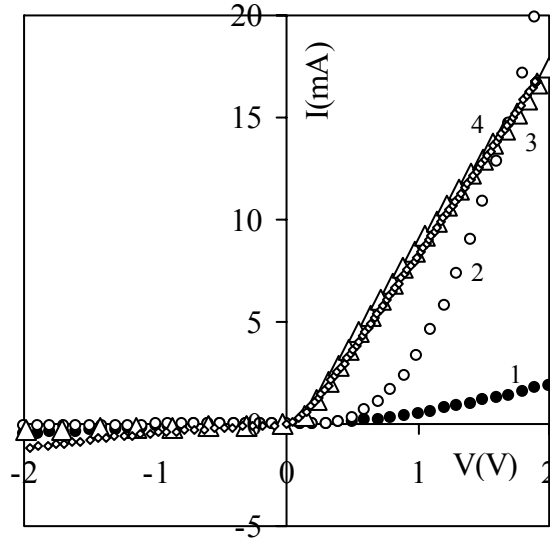


Şekil 4.17 Ni /nSi diyodun $500^{\circ}C$ 'de 30 dakika vakumda tavlama sonrası C-V karakteristiği ($f=1 MHz$).



Şekil 4.18 Ni /nSi Diyodun $500^{\circ}C$ 'de 30 dakika vakumda tavlama sonrası eklemin kalınlığına bağlı donör konsantrasyonu dağılımı.

Şekil 4.19’da tavlannmamış ve 500°C’de 10, 20 ve 30 dakika tavlannmış Ni/nSi eklemnin karanlıktaki I-V karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.19 Ni /nSi eklemnin (1) tavlamadan önce ve 500 °C, (2) 10 dakika, (3) 20 dakika, (4) 30 dakika tavlamadan sonraki I-V karakteristiği.

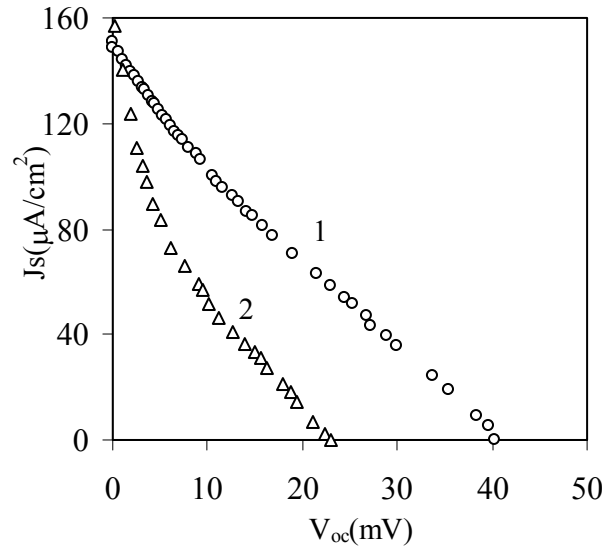
Şekilde görüldüğü gibi tavlama süresi arttıkça doğru akım artmaktadır. Çizelge 4.4’de Ni/nSi eklem için tavlamlar öncesi ve sonrası elektrik ve fotoelektrik parametreler verilmektedir.

Çizelge 4.4 Ni/nSi için I-V karakteristiklerinden elde edilen parametreler.

işlem	ϕ_b (eV)	J_s ($\mu A/cm^2$)	β	$I_d/I_{ters}(V=1V)$	$I_{ters}(ayd)/I_{ters}(kar)$	$V_{oc}(mV)$	$J_s(\mu A/cm^2)$
tav.önce	0.76	1.3	3	1.8	1.6	-	-
500°C,10' tavlama sonrası	0.73	5.7	11.6	15.4	6.3	-	-
500°C,20' tavlama sonrası	0.69	23.7	2.2	10	6.7	40.2	150.5
500°C,30' tavlama sonrası	0.68	36.2	0.9	7.4	5.1	23	182.1

4.6 Ni/ nSi Diyodların Fotovoltaik Karakteristikleri

Tavlanmamış Ni/nSi diyodların I-V karakteristiklerinden, bu eklemlerin ışığa duyarlılıklarının zayıf olduğu görülmektedir. Tavlama öncesinde ve üzeri açık olarak 500°C’de 10 dakika vakumda tavlama sonunda Ni/ nSi eklemine ışığa duyarlılık görülmemiştir. 500°C’de 20 ve 30 dakika tavlamadan sonra fotoduyarlılık bir miktar artmaktadır. Şekil 4.20’de Ni/nSi fotodiyodun 500°C’de 20 ve 30 dakika tavlama sonrasındaki fotovoltaik karakteristikleri gösterilmiştir.

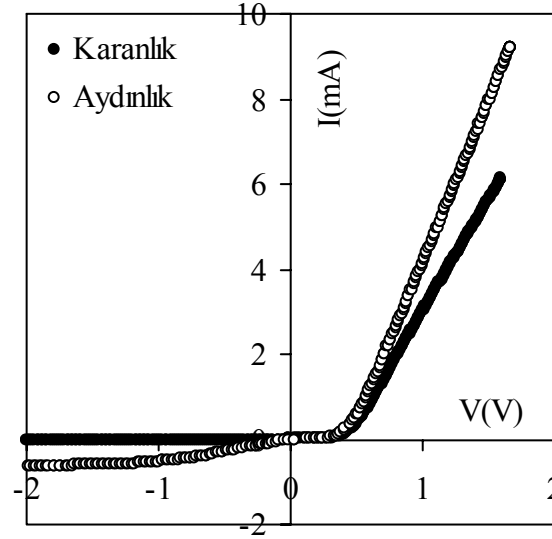


Şekil 4.20 500°C’de (1) 20 dakika ve (2) 30 dakika tavllanmış Ni/nSi diyodun aydınlıktaki ($I=100 \text{ W/cm}^2$) fotovoltaik karakteristikleri.

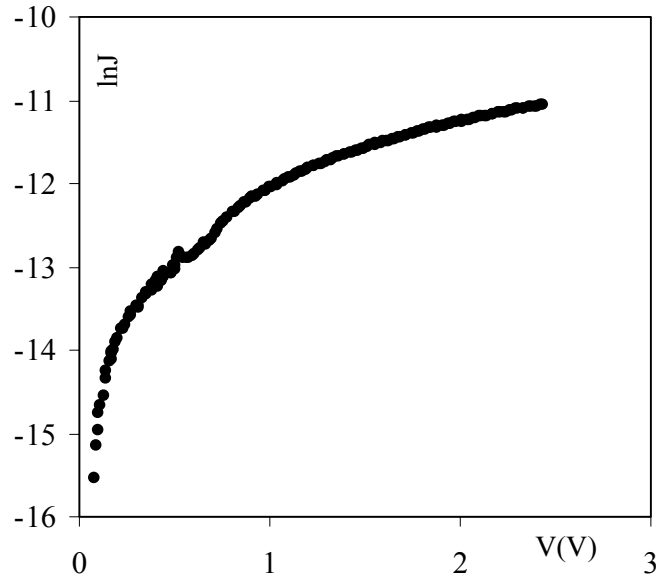
Şekilden görüldüğü gibi tavlama süresi arttıkça fotovoltaik karakteristik bozulmaktadır. Nikelin silisyuma difüzyonu neticesinde Ni/Si sınırında nikel silikat fazların oluşumu, eklemin fotoduyarlılığının azalmasının nedeni olabilir.

4.7 Ni/pSi Diyodların I-V ve C-V Karakteristikleri

Ni/pSi eklemleri nikel filmi ($d_{Ni}=184$ nm, $S_{Ni}=0,36$ cm²) p tipi ($\rho=19,5$ Ω cm) silisyumun üzerine vakumda buharlaştırma yöntemiyle hazırlandı. Şekil 4.21’de ve 4.22’de Ni/pSi eklemnin I-V ve J-V (doğru yön) karakteristikleri gösterilmektedir.



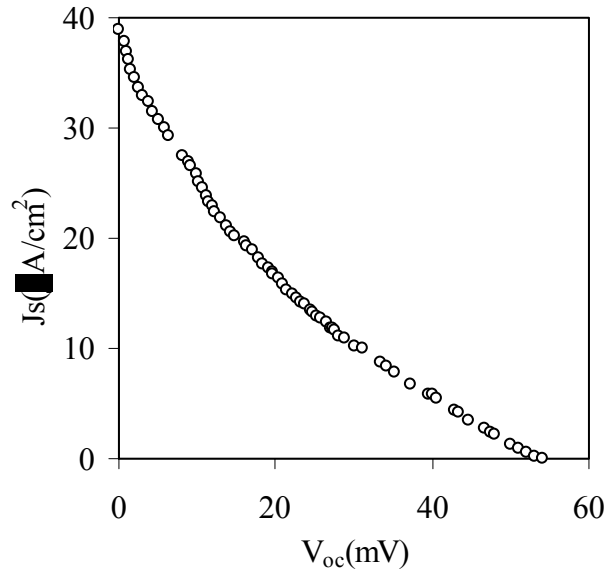
Şekil 4.21 Ni/pSi eklemnin I-V karakteristiği (tavlama öncesi).



Şekil 4.22 Ni/pSi eklemnin doğru yön J-V karakteristiği (tavlama öncesi).

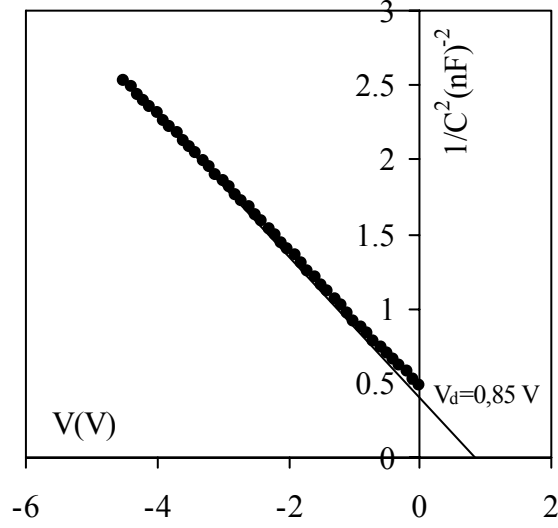
Bu karakteristiklerden hesaplanan Ni/pSi eklemnin elektrik parametreleri Çizelge 4.5’de verilmektedir. Şekil 4.21’den ve Çizelge 4.5’den görüldüğü gibi Ni/pSi eklem (tavlamadan önce), Ni/nSi ekleme göre daha yüksek doğrultma özelliklerine sahiptir. Bunun yanısıra, Ni/pSi eklem ışığa duyarlılık göstermektedir ($\frac{I_{ters}(ayd)}{I_{ters}(kar)} = 178$). Bu nedenle Ni/pSi eklemler Schottky diyodu gibi kullanılabilirler.

Şekil 4.23’de Ni/pSi diyonun fotovoltaiik karakteristiğı verilmektedir. Şekilden elde edilen açık devre gerilimi ve kısa devre akım yoğunluğu $V_{oc} = 54$ mV ve $J_{sc} = 39 \mu A/cm^2$ ’dir.



Şekil 4.23 Ni/pSi eklemnin aydınlıktaki fotovoltaiik karakteristiğı (Tavlama öncesi).

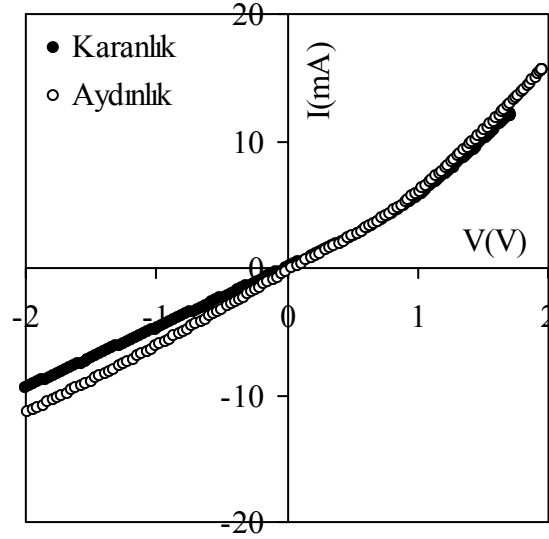
Şekil 4.24’de Ni/pSi diyodun C-V karakteristiği gösterilmektedir. Bu grafikten hesaplanan difüzyon potansiyeli $V_d \sim 0,85$ V ve silisyum tarafındaki akseptörlerin konsantrasyonu $N_A = 0,372 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ’dür.



Şekil 4.24 Ni/pSi diyodun C-V karakteristiği (1 MHz).

4.8 Tavlamanın Ni/pSi Diyodların Elektrik Parametrelerine Etkisi

Bu bölümde 500°C’de 90 dakika tavllanmış Ni/pSi eklemlerin I-V ve C-V karakteristikleri incelenmektedir. Şekil 4.25’de Ni/pSi eklemin tavlama sonrası (500°C, 90 dakika) I-V karakteristikleri verilmektedir. Buradan elde edilen parametreler Çizelge 4.5’de verilmektedir. Görüldüğü gibi, tavlama neticesinde eklemin doğrultma ve fotoduyarlılık özellikleri keskin azalmıştır.

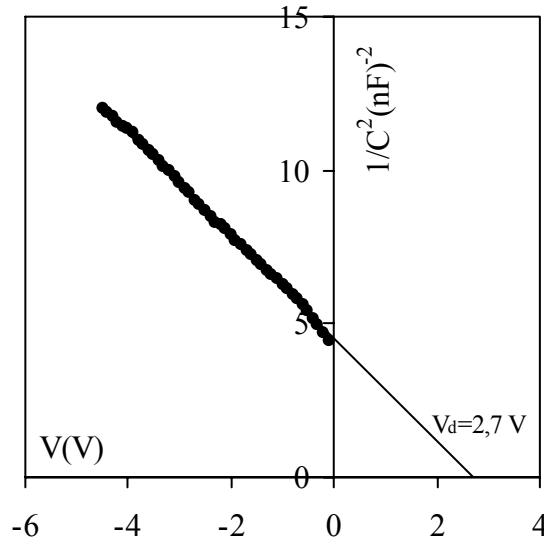


Şekil 4.25 Ni/pSi eklemin I-V karakteristiği (500°C, 90 dakika).

Çizelge 4.5 Ni/pSi için I-V karakteristiklerinden hesaplanan parametreler.

işlem	ϕ_b (eV)	J_s (A/cm ²)	β	I_d/I_{ters} (V= 1,5V)	$I_{ters}(\text{ayd})/I_{ters}(\text{kar})$	V_{oc} (mV)	$J_s(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
tav. önce	0.909	$4.89 \cdot 10^{-9}$	1.74	13	178	54	39
90 dak. tavlama son.	0.67	$6.18 \cdot 10^{-5}$	0.48	1.2	1.3	35	196

Şekil 4.26'de Ni/pSi eklemnin C-V karakteristiği verilmektedir.



Şekil 4.26 Ni/pSi eklemnin C-V karakteristiği (500°C, 90 dakika).

Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi tavlama neticesinde engel yüksekliği azalır, doyma akım yoğunluğu artar, doğrultma katsayısı ve fotoduyarlılık azalır. Bunların sebebi, tavlama sürecinde karşılıklı etkileşme neticesinde eklemnin sınırında yeni $NiSi_2$ ve $NiSi$ fazlarının oluşumu ile ilgili olabilir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir ve şu şekilde yorumlanmıştır.

1. Ni/Si yapının 500°C 90 dakika tavlama neticesinde XRD spektrumlarında NiSi₂ ((111) için $2\theta=28,2876^\circ$ ve (331) için $72,6238^\circ$) ve NiSi ($2\theta=44,6417^\circ$ ve $51,0536^\circ$) fazlarının oluşumu gözlenmiştir. XRD spektrumlarındaki piklerin yarım şiddetinden hesaplanan polikristal NiSi₂ ve NiSi fazlarının tane boyutları $d(\text{NiSi}_2) = 465 \text{ \AA}$ ve $d(\text{NiSi}) = 971 \text{ \AA}$ olarak bulunmuştur. 500°C'de tavlama süreci 15 saate çıkarıldığında, yukarıda gösterilen NiSi₂ ve NiSi piklerinin şiddetleri artmaktadır. Ayrıca, 500°C'de 15 saat tavlama Ni/Si eklemlerin sınır bölgesinde oluşan fazlardaki NiSi tane boyutları azalırken ($d(\text{NiSi}) = 796 \text{ \AA}$), NiSi₂ tane boyutu artmaktadır ($d(\text{NiSi}_2) = 580 \text{ \AA}$).
2. Tavlana maruz kalmış Ni/Si ekleminde, nikelin silisyum altlığına difüzyonu (yayılması) gerçekleşir. 500°C'de 15 saat tavlama neticesinde nikelin silisyumda konsantrasyon dağılımı XRF yöntemi ile incelenmiştir. Nikelin difüzyonu neticesinde silisyum altlığında oluşan konsantrasyon dağılımı iki bölgeden oluşur (Şekil 4.3). 1) Silisyum yüzeyine yakın bölgede ($x < 1 \mu\text{m}$) nikelin konsantrasyonu ($N \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) çok yüksektir ve konsantrasyon dağılımı merdiven biçimindedir. 2) Silisyumun iç bölgesinde ($x > 1 \mu\text{m}$) nikelin konsantrasyonu ($N \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) daha düşüktür ve konsantrasyon dağılımı (gradyanı) daha küçüktür. Nikelin silisyumdaki konsantrasyon dağılımından hesaplanan nikelin difüzyon katsayısı, silisyumun yüzey ve iç bölgesinde sırasıyla $D_y \sim 5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ve $D_i \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak hesaplanmıştır. Ni/Si eklemin tavlama sürecinde meydana gelen olayları nikelin silisyumdaki konsantrasyon dağılımı ve X ışınları kırınımı (XRD) sonuçları ile yorumlamak mümkündür. Nikelin silisyuma difüzyonu sürecinde, nikel silisyum atomları ile etkileşir ve Ni-Si fazları oluşur. Difüzyon sürecinde yeni fazların oluşması reaktif difüzyon olarak adlandırılır. Bu olay, nikelin yüksek konsantrasyonlu bölgesinde meydana gelir, yani silisyumun yüzeye yakın bölgesinde NiSi₂ ve NiSi fazları oluşur. Bu bölgede nikelin yayılma hızı çok düşüktür, yani difüzyon katsayısı küçüktür ($D_y \sim 5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sn}$). Silisyum atomları ile etkileşmeyen nikel atomları daha büyük hızla ($D_i \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$) örgüdeki arayer pozisyonları ile altlığın içine doğru hareketlenirler. Tavlama sürecinin 90 dakikadan 15 saate çıkartılmasıyla NiSi₂ fazlarındaki tane boyutlarının büyümesi, difüzyon neticesinde silisyum altlığında nikelin miktarının artması ile yorumlanabilir.
3. Tavlama yapılmamış Ni/nSi ve Ni/pSi eklemler Schottky engel özellikleri gösterirler

(Şekil 4.6 ve Şekil 4.21). Hem n-tipi hem de p-tipi silisyumla nikelin engel oluşturmaması, nikelin silisyumda hem donör, hem de akseptör katkısı gibi davranmasından dolayıdır. Bilinmektedir ki, nikel silisyumda hem donör seviyesi ($E_c - 0,35\text{eV}$) hem de akseptör seviyesi ($E_v + 0,35\text{eV}$) oluşturmaktadır. Ni/nSi ve Ni/pSi eklemlerin 500°C 'de tavlama neticesinde doğrultma ve fotoduyarlılık özellikleri azalır. Eklemlerin elektrik ve fotovoltajik parametrelerinin bozulmasını nikelin silisyumda reaktif difüzyonu neticesinde, Ni/Si eklemin sınır bölgesinde NiSi_2 ve NiSi fazlarının oluşumu ile yorumlamak mümkündür. Yani tavlama işlemi, tavlama sonrası Ni / $\text{NiSi}_2(\text{NiSi})$ / Si heteroeklemine dönüşür. Yeni oluşan fazlar metalik özelliklere sahip olduklarından ve bu fazların büyük olasılıkla homojen olmamasından dolayı eklemlerin doğrultma ve fotovoltajik karakteristikleri bozulur.

4. Tavlama işlemi sonrası Ni/nSi ve Ni/pSi eklemlerin akım gerilim, fotovoltajik ve kapasitans-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi ve karşılaştırılması sonucu, p-tipi silisyum altlığın yüzeyinde yapılan Ni/pSi eklemin daha yüksek Schottky engeli özelliklerine sahip olduğu ve Schottky diodu olarak kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Caferov, T., (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Caferov, T.,(2000), Yarıiletken Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

D.J.Coe ve E.H.Rhoderick (1976),“Silicide Formation in Ni-Si Schottky Barrier Diodes”, J.Phys. D: Appl. Phys., Vol.9.

M.K.Datta, S.K.Pabi ve B.S.Murty (2000),“Phase Fields of Nickel Silicides Obtained by Mechanical Alloying in the Nanocrystalline State”, Journal of Apply. Physics Volume 87, number 12.

K.Y.Gao, B.X.Liu (1999)“High current Ni ion implantation to synthesize NiSi₂ Layers on Si with Very Low Resistivity”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 148: 615-620.

Michail E. Kiziroglou, Member, IEEE, Alexander A. Zhukov, Mamdouh Abdelsalam, Xiaoli Li, Peter A. J. De Groot, Philip N. Bartlett ve Cornelis H. De Groot(2005), “Electrodeposition of Ni-Si Schottky Barriers”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No10.

G.Majni, F.Della Vale ve C.Nobili (1984)“Growth Kinetics of NiSi on <100> and <111> Silicon”, J.Phys. D:Appl. Phys.,17: L77-L81.

S.Rey, J.Hommet, G. Schmerber, F.Le Normand (2000)“Diamond Growth on polycrystalline Nickel Silicides”, Journal of Crystal Growth 216: 225-234.

M.Seibt, H. Hedemann, A.A.Istratov, F.Riedel, A. Sattler ve W.Schröter (1999) “Structural and Electrical Properties of Metal Silicide Precipitates in Silicon”, Phys. Stat. Sol. (a) 171,301.

W.S.Yoo, Tomomi Murakami, Veronique Carron (2003)“Advanced Devices Using Low Temperature NiSi formation”, SSt September.

F.F.Zhao, J.Z.Zheng, Z.X.Shen v.d. (2004), Microelectronic Engineering 71:104-111.

İNTERNET KAYNAKLARI

www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 28.10.1978

Doğum yeri Rize

Lise 1993-1996 Fatih Kız Lisesi

Lisans 1998-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat
Fakültesi Fizik Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat
Fakültesi Fizik Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

2005-Devam Ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat
Fakültesi Fizik Bölümü