

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**CrSi<sub>2</sub> FİLMLERİN YAPISAL ve ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİ**

Fizikçi Uğur Deneb Yılmaz

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kubilay KUTLU**

**İSTANBUL, 2009**

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                            | iv    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                          | vii   |
| SİMGE LİSTESİ .....                                                            | viii  |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                                         | x     |
| ÖNSÖZ .....                                                                    | xi    |
| ÖZET .....                                                                     | xii   |
| ABSTRACT .....                                                                 | xiii  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                 | 1     |
| 2. GENEL BİLGİLER .....                                                        | 4     |
| 2.1 Silisyum Elementinin Yapısal Özellikleri .....                             | 4     |
| 2.2 Krom Elementinin Yapısal Özellikleri .....                                 | 10    |
| 2.3 CrSi <sub>2</sub> 'nin Yapısal Özellikleri .....                           | 11    |
| 2.4 Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition PVD) .....            | 12    |
| 2.4.1 Vakum kaplama .....                                                      | 13    |
| 2.4.2 Püskürtmeyle kaplama .....                                               | 14    |
| 2.4.3 İyon Kaplama .....                                                       | 14    |
| 2.5 Ark Buhar Kaplama- Katodik Ark Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi .....        | 14    |
| 2.5.1 Katot İzi .....                                                          | 15    |
| 2.5.2 Mikro Parçacıklar .....                                                  | 16    |
| 2.5.3 Ark Kaynakları .....                                                     | 16    |
| 2.6 Metal-Yarıiletken Kontaklar .....                                          | 17    |
| 2.6.1 Schottky Kontaklar .....                                                 | 18    |
| 2.7 p-n Eklemler .....                                                         | 20    |
| 2.7.1 Oluşma Potansiyeli .....                                                 | 23    |
| 2.7.2 Düz ve Ters Besleme .....                                                | 24    |
| 2.7.3 Kapasitans .....                                                         | 26    |
| 2.8 Yarıiletken Eklemlerde İletim Mekanizmaları .....                          | 27    |
| 2.8.1 Rekombinasyon- Jenerasyon Akımı .....                                    | 27    |
| 2.8.2 Tünelleme .....                                                          | 28    |
| 2.8.3 Uzay Yüğü Limitli Akım (SCLC) .....                                      | 30    |
| 2.8.4 Difüzyon .....                                                           | 31    |
| 2.8.5 Termiyonik Emisyon: .....                                                | 32    |
| 2.9 Eklemlerin elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi .....                   | 33    |
| 2.9.1 I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi .....              | 33    |
| 2.9.2 C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi .....              | 33    |
| 2.9.3 Yasak Enerji Bant Aralığının G-T- $\omega$ Yöntemiyle Belirlenmesi ..... | 34    |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                                      | 35    |
| 3.1 CrSi <sub>2</sub> İnce Filmlerin Oluşturulması .....                       | 35    |

|       |                                                                                        |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.1 | Altıkların Hazırlanması .....                                                          | 35 |
| 3.1.2 | Katodik Ark Yöntemi İle Kaplama.....                                                   | 36 |
| 3.2   | Eklemlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler .....           | 37 |
| 3.2.1 | XRD Yöntemi ile Filmlerin Analizi .....                                                | 37 |
| 3.2.2 | EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) Yöntemi ile Filmlerin Analizi ....       | 39 |
| 3.2.3 | CrSi <sub>2</sub> Filmlerin FEG-SEM ile İncelenmesi .....                              | 40 |
| 3.4   | Eklemlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....                                | 41 |
| 3.4.1 | Akım-Gerilim Ölçümleri .....                                                           | 41 |
| 3.4.2 | C(G/ω) -V ve C(G/ω)-T (Kapasitans ve İletkenlik) Ölçümleri .....                       | 43 |
| 4.    | BULGULAR.....                                                                          | 44 |
| 4.1   | CrSi <sub>2</sub> Filmlerin Yapısal Özellikleri .....                                  | 44 |
| 4.1.1 | CrSi <sub>2</sub> Filmlerin XRD Analizi Sonuçları .....                                | 44 |
| 4.1.2 | CrSi <sub>2</sub> Filmlerin EDS Sonuçları .....                                        | 46 |
| 4.1.3 | CrSi <sub>2</sub> Filmlerin FEG-SEM Sonuçları .....                                    | 48 |
| 4.2   | Ag/CrSi <sub>2</sub> /Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri .....                      | 50 |
| 4.2.1 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri .....          | 50 |
| 4.2.2 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri .....          | 62 |
| 4.2.3 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri ..... | 72 |
| 4.2.4 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag ekleminin C(G/ω)-T deneyleri .....                       | 76 |
| 4.2.5 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri ..... | 77 |
| 4.2.6 | Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag Eklemlerin C(G/ω)-T Deneyleri.....                       | 80 |
| 5.    | SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....                                                             | 86 |
|       | KAYNAKLAR.....                                                                         | 90 |
|       | ÖZGEÇMİŞ.....                                                                          | 92 |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 4  |
| Şekil 2.2 Elmas yapısı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5  |
| Şekil 2.3 Özden yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 5  |
| Şekil 2.4 n-tipi Si (donör katkılı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 6  |
| Şekil 2.5 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 6  |
| Şekil 2.6 p-tipi Si (akseptör katkılı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 7  |
| Şekil 2.7 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 8  |
| Şekil 2.8 (a) direkt ve (b) indirekt bantlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 9  |
| Şekil 2.9 Cisim merkezli kübik yapı (bcc yapı) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 10 |
| Şekil 2.10 Krom silisit C-40 yapısı. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 12 |
| Şekil 2.11 PVD yöntemleri: (a) vakum buharlaştırma, (b ve c) plazma ortamında püskürtme ile kaplama, (d) vakumda püskürtme ile kaplama, (e) plazma ortamında termal buharlaştırma kaynağı ile iyon kaplama (f) püskürtme kaynağı ile iyon kaplama (g) ark buharlaştırma kaynağı ile iyon kaplama (h) termal buharlaştırma kaynaklı ve iyon tabancasından iyon bombardımanlı iyon demeti destekli kaplama (IBAD)..... | 13 |
| Şekil 2.12 Katodik Ark Kaplama Yöntemi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 17 |
| Şekil 2.13 (a) Birbirinden izole metal ve n-tipi yarıiletkenin bant diyagramı. (b) metal-yarıiletken kontağın bant diyagramı (Ohring M., 1992).....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 17 |
| Şekil 2.14 metal-yarıiletken kontakların enerji-bant diyagramları. Metal ve yarıiletken (a) birbirinden ayrı iken, (b) bir sistemde birleşmiş halleri. Kontak mesafesi $\phi_c$ (c) azalmış durumda iken, (d) sıfır olduğu durum. (Sze M. S., 2007).....                                                                                                                                                             | 19 |
| Şekil 2.15 Düzgün katkılanmış p-n eklem katkılama profili.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 20 |
| Şekil 2.16 p-n eklemde uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yük yoğunlukları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 21 |
| Şekil 2.17 Termal dengede keskin p-n eklemi (a) Uzay-yükü bölgesi. (b) Elektrik alan dağılımı. (c) Potansiyel dağılımı. (d) Enerji-bant diyagramı. ....                                                                                                                                                                                                                                                              | 22 |
| Şekil 2.18 Rekombinasyon süreci (tersi jenerasyon) (a) Banttan banda rekombinasyon. (b) Tek seviyeli tuzaktan rekombinasyon (SZE M. S., 2007) .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 27 |
| Şekil 2.19 Dikdörtgen bir bariyerden tünelleyen elektronun dalgafonksiyonları (SZE M. S., 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1 Katodik ark yöntemiyle n-Si ve p-Si altlıklar üzerine büyütülen $\text{CrSi}_2$ filmler .....                                                                  | 36 |
| Şekil 3.2 X Işınlının Atomik Düzlemlerden Kırınımı .....                                                                                                                 | 37 |
| Şekil 3.3 XRD Sisteminin Şematik Gösterimi .....                                                                                                                         | 38 |
| Şekil 3.4 Philips PW3710 Model XRD Cihazı .....                                                                                                                          | 39 |
| Şekil 3.5 Örnek bir EDS analizi (Saha R.K., 2006) .....                                                                                                                  | 40 |
| Şekil 3.6 FEG-SEM Ölçüm Sisteminin Şematik Gösterimi.....                                                                                                                | 40 |
| Şekil 3.7 JEOL 7000F FEG-SEM Model Taramalı Elektron Mikroskobu .....                                                                                                    | 41 |
| Şekil 3.8 Oda sıcaklığında DC iletkenlik ölçüm sistemi .....                                                                                                             | 42 |
| Şekil 3.9 Sıcaklığa bağlı DC iletkenlik ölçüm sistemi .....                                                                                                              | 42 |
| Şekil 3.10 Sıcaklığa ve frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi .....                                                                                            | 43 |
| Şekil 4.1 Katodik ark yöntemiyle (a) n-Si (b) p-Si altlıklar üzerine büyütülen $\text{CrSi}_2$ filmlerin<br>XRD desenleri.....                                           | 45 |
| Şekil 4.2 (a) $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$ filmin EDS analizi .....                                                                                                       | 46 |
| Şekil 4.2 (b) $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$ filmin EDS analizi.....                                                                                                        | 47 |
| Şekil 4.3 (a) $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$ filmin yüzey görüntüsü (10000-30000-50000 büyütmede).....                                                                      | 48 |
| Şekil 4.3 (b) $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$ filmin yüzey görüntüsü (10000-30000-50000 büyütmede) .....                                                                     | 48 |
| Şekil 4.3 (c) $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$ filmin arakesit görüntüsü (10000 ve 50000 büyütmede).....                                                                      | 49 |
| Şekil 4.3 (d) $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$ filmin arakesit görüntüsü (40000 büyütmede) .....                                                                              | 49 |
| Şekil 4.4 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin oda sıcaklığında üç farklı ortamda, farklı zamanlarda<br>ölçülen yarılogaritmik I-V karakteristikleri ..... | 51 |
| Şekil 4.5 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin vakum ortamında 205-355K sıcaklık aralığında<br>yarılogaritmik I-V karakteristikleri.....                   | 51 |
| Şekil 4.6 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 255K'de yarılogaritmik I-V karakteristiği .....                                                             | 52 |
| Şekil 4.7 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 255-385K sıcaklık ve düşüt gerilim altında akım gerilim<br>yarılogaritmik $I_F-V_F$ karakteristiği .....    | 53 |
| Şekil 4.8 $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$ $I_0-q/kT$ grafiği .....                                                                                                           | 56 |
| Şekil 4.9 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 255-385K sıcaklık aralığında yüksek gerilimlerde<br>yarılogaritmik $I_F-V_F$ karakteristiği .....           | 57 |
| Şekil 4.11 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 235-385K aralığında tam logaritmik $I_R-V_R$ karakteristiği                                                | 59 |
| Şekil 4.13 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$ eklemnin idealite sabiti ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla<br>değişimi.....                                       | 61 |
| Şekil 4.14 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 115-385 K sıcaklık aralığında I-V karakteristiği .....                                                     | 62 |
| Şekil 4.15 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}/\text{Ag}$ eklemnin düşük sıcaklıklar için yarı logaritmik I-V karakteristiği                                                  | 63 |
| Şekil 4.16 Ag/ $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}/\text{Ag}$ eklemnin 325 K'de I-V karakteristiği .....                                                                          | 64 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.17 CrSi <sub>2</sub> /p-Si ekleminde olası rekombinasyon yolları .....                                                      | 65 |
| Şekil 4.18 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin düşük gerilimler için tam logaritmik I <sub>F</sub> -V <sub>F</sub> karakteristiği | 66 |
| Şekil 4.19 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin tam logaritmik I <sub>F</sub> -V <sub>F</sub> karakteristiği .....                 | 67 |
| Şekil 4.21 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin V <sub>R</sub> -I <sub>R</sub> karakteristiği .....                                | 69 |
| Şekil 4.22 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin I <sub>0</sub> -q/kT grafiği .....                                                 | 69 |
| Şekil 4.23 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin idealite sabiti ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi .....                 | 71 |
| Şekil 4.24 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin oda sıcaklığında C(G/ω)-V grafikleri .....                                         | 72 |
| Şekil 4.25 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin 325K'de C(G/ω)-V grafikleri.....                                                   | 72 |
| Şekil 4.26 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin 355K'de C(G/ω)-V grafikleri.....                                                   | 73 |
| Şekil 4.27 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin 1MHz frekansta, üç farklı sıcaklık için 1/C <sup>2</sup> -V grafiği                | 74 |
| Şekil 4.28 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin V= -2V'da C(G/ω)-T karakteristikleri .....                                         | 76 |
| Şekil 4.29 Ag/CrSi <sub>2</sub> /n-Si/Ag eklemin V=4V'da C(G/ω)-T karakteristiği.....                                               | 76 |
| Şekil 4.30 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin oda sıcaklığında C(G/ω)-V grafikleri .....                                         | 77 |
| Şekil 4.31 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin üç farklı sıcaklık için 1kHz frekansta kapasitans-gerilim karakteristiği .....     | 78 |
| Şekil 4.32 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin 325-355K sıcaklıkta 1/C <sup>2</sup> -T grafiği .....                              | 79 |
| Şekil 4.33 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin V= -8V'da (a) C-T, (b) (G/ω )-T karakteristikleri .....                            | 80 |
| Şekil 4.34 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin V= -6V'da (a) C-T, (b)(G/ω)-T karakteristikleri .....                              | 80 |
| Şekil 4.35 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin V= -12V'da (a) C-T, (b) (G/ω)-T karakteristikleri .....                            | 81 |
| Şekil 4.36 (c) Al/BN/p-c-Si/Al MIS yapısının f-(100/T) karakteristiği .....                                                         | 84 |
| Şekil 4.37 Ag/CrSi <sub>2</sub> /p-Si/Ag eklemin ac iletkenlik değişimi .....                                                       | 85 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 Yarıiletken Silisyumun çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007).....                 | 9  |
| Çizelge 2.2 Krom metalinin parametreleri .....                                                  | 11 |
| Çizelge 4.1(a) n- tipi Si üzerine büyütülen $\text{CrSi}_2$ filmin EDS analizi .....            | 46 |
| Çizelge 4.1(b) p-tipi Si üzerine büyütülen $\text{CrSi}_2$ Filmin EDS analizi .....             | 47 |
| Çizelge 4.2 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /n-Si/Ag eklemnin eğim ve doyma akımı değerleri.....            | 55 |
| Çizelge 4.3 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /n-Si/Ag eklemnin SCLC akım mekanizması için m değerleri .....  | 57 |
| Çizelge 4.4 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /n-Si/Ag eklemnin temel diyot parametreleri .....               | 60 |
| Çizelge 4.5 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /p-Si/Ag eklemnin SCLC akım mekanizması için m değerleri .....  | 67 |
| Çizelge 4.6 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /p-Si/Ag eklemnin temel diyot parametreleri .....               | 70 |
| Çizelge 4.7 Ag/ $\text{CrSi}_2$ /n-Si/Ag eklemnin katkılama miktarı ve oluşma potansiyeli ..... | 74 |

## SİMGE LİSTESİ

|                             |                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------|
| TiSi <sub>2</sub>           | Titanyum Silisit                          |
| CoSi <sub>2</sub>           | Kobalt Silisit                            |
| NiSi                        | Nikel Silisit                             |
| MnSi                        | Mangan Silisit                            |
| β-FeSi <sub>2</sub>         | β- Demir Silisit                          |
| ReSi <sub>2</sub>           | Renyum Silisit                            |
| Mn                          | Manganez                                  |
| As                          | Arsenik                                   |
| Sb                          | Antimon                                   |
| P                           | Fosfor                                    |
| N                           | Azot                                      |
| In                          | İndiyum                                   |
| Ga                          | Galyum                                    |
| Al                          | Alüminyum                                 |
| B                           | Bor                                       |
| Ag                          | Gümüş                                     |
| Ge                          | Germanyum                                 |
| E <sub>d</sub>              | Donör enerji seviyesi                     |
| E <sub>a</sub>              | Akseptör enerji seviyesi                  |
| E <sub>H</sub>              | Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi      |
| $\vec{k}$                   | Dalga vektörü                             |
| m <sub>e</sub> <sup>*</sup> | Elektronun etkin kütlesi                  |
| J                           | Akım yoğunluğu                            |
| q                           | Temel yük (1.6x10 <sup>-19</sup> Coulomb) |
| h                           | Planck Sabiti                             |
| μ <sub>n</sub>              | Elektronların mobilitesi                  |
| μ <sub>p</sub>              | Boşlukların mobilitesi                    |
| J <sub>p</sub>              | Boşlukların akım yoğunluğu                |
| J <sub>n</sub>              | Elektronların akım yoğunluğu              |
| A <sup>**</sup>             | Richardson sabiti                         |
| R <sub>ec</sub>             | Rekombinasyon sabiti                      |
| G <sub>th</sub>             | Jenerasyon hızı                           |
| E <sub>F</sub>              | Fermi enerji seviyesi                     |

|              |                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\tau_p$     | Boşlukların ömrü                                                  |
| $\tau_n$     | Elektronların ömrü                                                |
| $V_{th}$     | Yüklerin ısısal hızı                                              |
| $E_i$        | Özden Yarıiletken Fermi seviyesi                                  |
| $S$          | Alan                                                              |
| $A$          | Eğim                                                              |
| $q\Phi_n$    | İletim bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı |
| $q\Phi_m$    | Metalin iş fonksiyonu                                             |
| $\chi$       | Alınganlık (afinite)                                              |
| $E_C$        | İletim bandının taban enerjisi                                    |
| $E_V$        | Valans bandının tavan enerjisi                                    |
| $E_F$        | Fermi enerji seviyesi                                             |
| $\epsilon_s$ | Silisyumun permitivitesi                                          |
| $\Phi_b$     | Bariyer yüksekliği                                                |
| $C_D$        | Fakirleşme bölgesi kapasitansı                                    |
| $L_n$        | Difüzyon uzunluğu                                                 |
| $\eta$       | İdealite faktörü                                                  |
| $W_D$        | Fakirleşme bölgesi genişliği                                      |
| $V_{bi}$     | Oluşma potansiyeli                                                |
| $N_D$        | Donör konsantrasyonu                                              |
| $N_A$        | Akseptör konsantrasyonu                                           |
| $n_i$        | Özden taşıyıcı konsantrasyonu                                     |

## KISALTMA LİSTESİ

|         |                                                 |
|---------|-------------------------------------------------|
| I-V     | Akım-Gerilim                                    |
| C-V     | Kapasitans-Gerilim                              |
| FCC     | Yüzey merkezli kübik kristal yapı               |
| BCC     | Cisim merkezli kübik kristal yapı               |
| DC      | Doğru akım                                      |
| AC      | Alternatif akım                                 |
| RDE     | Reactive Deposition Epitaxy                     |
| LAPW    | Linear Augmented Plane-Wave                     |
| DLTS    | Deep Level Transient Spectroscopy               |
| CVT     | Chemical Vapor Deposition                       |
| PVD     | Physical Vapor Deposition                       |
| RCA     | Radio Corporation of America                    |
| FWHM    | Full Width Half Maksimum                        |
| JCPDS   | Joint Committe on Powder Diffraction Standards  |
| EHP     | Electron-Hole Pair                              |
| IBAD    | Ion Beam Assisted Deposition                    |
| XRD     | X-Ray Diffraction                               |
| FEG-SEM | Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy |
| EDS     | Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy            |

## ÖNSÖZ

Bitirme tezimin hazırlanmasında bilgi tecrübe ve önerileriyle beni yönlendiren, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Kubilay Kutlu'ya,

Tezimin her aşamasında bana karşı hep cesaretlendirici ve sabırlı olan, vaktini ve desteğini esirgemeyen, tecrübesiyle bana yol gösterip çalışmalarımda yardımcı olan, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan Sayın Yrd. Doç. Dr. Orhan Özdemir ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Beyhan Tatar'a,

Deneylelimin yapılması esnasında destek ve yardımlarından ötürü Sayın Prof. Dr. Mustafa Ürgen'e

Çalışmalarım sırasında destek ve yardımlarından faydalandığım çalışma grubu arkadaşlarım Pınar Gökdemir, Evrim Bulgurcuoğlu ve Pelin Aydoğan'a,

Hayatım boyunca yanımda olan, beni ben yapan çok sevgili aileme,

Bana karşı anlayışını, desteğini, sevgi ve dostluğunu hiç bırakmayan Semih Menda'ya,

Çok teşekkür ederim.

## CrSi<sub>2</sub> FİMLERİN YAPISAL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

### ÖZET

CrSi<sub>2</sub> filmler, (100) yönelimli n-tipi silisyum ve (111) yönelimli p-tipi silisyum üzerine ilk defa katodik ark fiziksel buharlaştırma yöntemiyle büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri XRD, EDS ve FEG-SEM analizleriyle, elektriksel özellikleri ise sıcaklığa bağlı akım gerilim, kapasitans gerilim ve iletkenlik ölçümleriyle incelenmiştir.

XRD analizlerden filmlerin hegzagonal ve polikristal yapıda oldukları belirlenmiştir. FEG-SEM analizleri ile filmlerin kolonsal yapıda oldukları ve kolon kalınlıklarının 90 nm olduğu görülmüş olup filmlerin yüzey görüntülerinden tane boyutlarının yaklaşık 100–150 nm aralığında olduğu görülmüştür. EDS sonuçlarına göre yapının 1:2 stokiyometrisine sahip olduğu belirlenmiştir.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemlerin sıcaklığa bağlı akım-gerilim karakteristikleri vakum ortamında yapılan ölçümlerle incelenmiştir. Eklem doğru beslemede I-V karakteristiği incelendiğinde farklı gerilim değerlerinde üç farklı akım mekanizmasının etkin olduğu gözlenmiştir. Bunlar tünelleme, rekombinasyon ve uzay yükü limitli akımdır. 205-355K sıcaklık aralığında Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemının idealite sabiti ve bariyer yüksekliği için değerler sırasıyla 1.66-1.14 ve 0.46-0.83 eV aralığında olduğu belirlenmiştir.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemler için yapılan benzer ölçümlerde, aynı akım mekanizmalarının varlığı gözlenmiştir. I-V karakteristikleri incelendiğinde, p tipi kristal silisyumun kuasi-nötr bölgesine difüz eden ihmal edilemeyecek kadar çok azınlık yük taşıyıcısının enjeksiyonunun varlığı sonucu iletkenlik modülasyonunun gerçekleştiği gözlenmiştir. Eklem, 155-355K sıcaklık aralığında idealite sabiti ve bariyer yüksekliği sırasıyla 2.24- 1.20 ve 0.53-0.92eV arasında bulunmuştur.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemlerin admitans analizleri 295-325-355K sıcaklık değerlerinde geniş frekans aralığında (1kHz-1MHz) kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleriyle yapılmıştır. C-V analizlerinden silisyumun katkılama miktarı, eklem oluşma potansiyeli ve bariyer yüksekliği bulunmuştur.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklem C(G/ω)-V analizleri yapılmış olup sonuçlar incelendiğinde negatif gerilimlerde gözle görülür kesin bir frekans bağımlılığı olduğu fark edilmiştir. Ayrıca I-V sonuçları ile kıyaslandığında aynı gerilim değerleri aralığında aynı olayların varlığı belirlenmiştir.

Ayrıca yapılan C(G/ω)-T ölçümleriyle CrSi<sub>2</sub> için aktivasyon enerjisinin 0.25eV olduğu görülmüştür. Elde edilen E<sub>A</sub> değeri daha önce başka araştırmacılar tarafından DLTS ölçümleriyle hesaplanmış olan CrSi<sub>2</sub> yarıiletken Cr-B kompleksine karşı geldiği saptanmıştır. Bu değerin CrSi<sub>2</sub> için yasak enerji aralığına (E<sub>G</sub>) karşılık geldiği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Krom Silisit, Katodik Ark PVD, Yapısal ve Elektriksel Özellikler, Akım Mekanizmaları, İletkenlik Modülasyonu

## STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF CrSi<sub>2</sub> FILMS

### ABSTRACT

CrSi<sub>2</sub> films were synthesized on (100) oriented n-type silicon and (111) oriented p-type silicon by cathodic arc physical vapor deposition. The structural and morphological properties of the films were investigated by XRD, EDS and FEG-SEM analysis and the electrical features of the heterojunctions were investigated with I-V-T, C(G/ω)-V and C(G/ω)-T measurements.

The structural analysis indicated that the films have hexagonal structure and polycrystalline nature. It is investigated that the films are columnar and their thickness are about 90nm and the surface images of the films have displayed that the particle sizes are about 100-150nm. It is investigated that the structure has 1:2 stoichiometry.

The electrical analysis of the Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag heterjunction is performed by I-V-T measurements. Under forward bias, it is seen that the junction has three distinct regions, that means current transport mechanisms. These mechanisms are identified as tunneling, recombination and space charge limited current. Under the temperature range of 205-355K, the ideality factor and the barrier height values are calculated between 1.66-1.12 and 0.46-0.83eV respectively.

With the help of the similar investigations on Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag junction, the same current transport mechanisms are imposed. With the help of I-V characteristics of the junction, the existence of non-negligible minority carrier injection through quasi-neutral region of p-type crystal silicon is determined. For 155-355K temperature interval the ideality factor and the barrier height of the junction are determined at the range of 2.24-1.20 and 0.53-0.92eV respectively.

The C-V measurements for the Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag junction are performed at the temperature values of 295-325-355K. From C-V-T measurements, the doping concentration, the built-in potential and the barrier height of the sample are calculated.

C(G/ω)-V analysis of the Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag junction has indicated that for the reverse bias there is a obvious frequency dependence.

The activation energy value of CrSi<sub>2</sub> is determined as 0.25 eV by the C(G/ω)-T measurements. The determined E<sub>A</sub> could be misleadingly interpreted as the energy position of defect, calculated by DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) measurement probably from Cr-B complex in CrSi<sub>2</sub> semiconductor in p type Si semiconductor. Nevertheless, owing to both the success of the offered approach on c-Si semiconductor as well as widespread E<sub>G</sub> values(changed from 6x10<sup>-4</sup> to 0.35eV), determined by both theoretically and experimentally for CrSi<sub>2</sub> in recent works encouraged that the extracted E<sub>A</sub> was likely to be a gap of CrSi<sub>2</sub> semiconductor.

**Keywords:** Chromium silicide, Cathodiv Arc PVD, Structural and Electrical Properties, Current Mechanisms, Conductivity Modulation.

## 1. GİRİŞ

Silisitler, silisyumla metallerin kimyasal reaksiyonuyla oluşan yapılardır. Geçiş metal silisitleri, elektriksel ve mekanik özellikleri ile bilimsel çalışmalarda; yüksek termal ve kimyasal kararlılıklarından dolayı endüstriyel uygulamalarda dikkat çekiciliğe sahiptir. Dar yasak enerji aralıklarından dolayı (0.1-0.9eV) bu silisitler silisyum-entegre devreleri ve optoelektronik aygıt uygulamaları için potansiyele sahiptir. Örnek olarak  $TiSi_2$ ,  $CoSi_2$ ,  $NiSi$  gibi silisitler düşük dirençlerinden dolayı mikroelektronikte omik kontak olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise  $CrSi_2$ ,  $MnSi$ ,  $\beta$ - $FeSi_2$  ve  $ReSi_2$  gibi yarıiletken silisitler termoelektrik uygulamaları için potansiyelleri dolayısıyla geniş bir araştırma alanına sahiptir.

Bu silisitlerden  $CrSi_2$ , 0.35 eV dar yasak enerji bant aralığı, yüksek termoelektrik gücü, termal ve kimyasal kararlılığı nedeniyle mikroelektronik, optoelektronik ve yüksek sıcaklık uygulamalarında çok güçlü bir adaydır.

$CrSi_2$  filmlerin hazırlanmasında farklı birçok yöntem kullanılır. Bu yöntemler çeşitli çalışmalarda uygulanarak  $CrSi_2$  üretimi yapılmıştır. Bunlardan bazıları, katı faz reaksiyonu, reaktif çöktürme epitaksi, Cr ve Si'nin reaktif birlikte çöktürmesi ve iyon demet sentezidir.  $CrSi_2$  filmlerin çoğu (111) doğrultusuna sahip Si üzerine büyütmeyle yapılmıştır; çünkü hegzagonal  $CrSi_2$  (001) düzlemi, üçgensel Si(111) ile çok iyi uyum göstermektedir. (Fathauer R.W., 1996)

$CrSi_2$  ısıya dayanıklı metal silisit ailesine ( $TiSi_2$  ailesi) ait tek yarıiletken silisittir. Atomlar arasındaki mesafenin komşu tabakalar arasındaki mesafeden daha geniştir ve farklı tabakalarda bulunan Cr-Si atomları arasında kimyasal bağ vardır.  $CrSi_2$  örgüsündeki her Cr atom 6 d-elektronunu 4 Si atomuyla bağ yapmak için kullanır. Bundan dolayı kalan iki elektron yerelleşir ve bağda yer almaz. Kalan bu iki elektronun  $CrSi_2$ 'nin yarıiletken olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. (Samsonov G.V., 1979)

LAPW (Linear Augmented Plane-Wave) yöntemi kullanılarak  $CrSi_2$  bant aralığı üzerinde yapısal etkiler incelenmiştir.  $CrSi_2$ 'nin indirekt yasak enerji aralığı 0.3eV olarak hesaplanmıştır ve bu değer deneysel (elektriksel ve optik) ölçümlerle uyumludur. (Maththesis .L.F., 1990) Tek bir kristalde yapılan elektriksel ölçümler  $CrSi_2$ 'ni p-tipi yoz yarıiletken olduğunu göstermiştir. (Shinoda D.,1964). n-tipi  $CrSi_2$  elde etmek için ise  $CrSi_2$ 'ye Si veya Mn katkılanmak gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda Hall mobilitesinin sıcaklığın  $-3/2$  kuvvetiyle orantılı olduğu gözlenmiştir. Öte yandan optik analizlere göre, bulk  $CrSi_2$ 'nin indirekt enerji aralıklı bir yarıiletken olduğu bulunmuştur. (Bost M.C., 1987) Elektriksel

ölçümler ile  $\text{CrSi}_2$  ince filmlerin, bulk örneklerinden farklı olarak daha yüksek direnç değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Elektriksel özellikler, film çöktürme yöntemine ve Cr:Si stokiometrisine bağlıdır. Silikon fazlalığı durumunda silisit yarıiletken, eksikliği durumundaysa metalik davranış sergiler. (Maex K., 1995)

$\text{CrSi}_x$ , Cr/CrSi<sub>x</sub>/Cr/CrSi<sub>x</sub> ve CrSi<sub>x</sub>/Si/CrSi<sub>x</sub>/Si elektriksel özellikler için alüminyum oksit levha üzerinde oluşturulmuştur. Sadece kaplanan CrSi<sub>x</sub> metalik özellik gösterirken, kaplamadan sonra tavlanan örnek yarıiletken davranış göstermiştir. Tavllanmış CrSi<sub>x</sub>/Si/CrSi<sub>x</sub>/Si metalik davranış göstermiştir. (Kim C-G., 2005)

Stokiyometrik  $\text{CrSi}_2$ , ark eritme yöntemi ile hazırlanmış ve özellik ölçümleri için tek eksenli sıcak presleme ile sıkıştırılmıştır. (Dasgupta D., 2008)

$\text{Cr}(\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x)$  ve  $\text{Cr}_{1-x}\text{V}_x\text{Si}_2$  tek kristallerin iletim özellikleri Al ve V'nin Si'nin yerine geçmesinin elektriksel öz dirence, Seeback katsayısına, termal iletkenliğe etkilerini araştırılmıştır. (Pan Z. J., 2007)

$\text{CrSi}_2$  tek kristalleri, akı olarak eriyik kalay kullanılarak solüsyon büyütme yöntemiyle ile hegzagonal prizmalar formunda elde edilmiştir. (Shishido T., 2004)

Magnetron püskürtme ile üretilip tavlanan  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  çoklu tabakaların yapısal ve elektriksel özellikleri tavlama sıcaklığı ve tek tabaka kalınlığına bağlılığı incelenmiştir (Decker D., 2004). Yarıiletken  $\text{CrSi}_2$ 'nin elektriksel ve optik özelliklerine izotropik ve anizotropik deformasyonların etkisi düzlem dalga yöntemiyle incelenmiştir. (Krivosheeva A.V., 2003) Shaposkinov'un çalışmasında kristal yapı %106 esnediğinde krom silisit 0.31eV civarı enerji aralıklı direkt yarıiletken haline geldiği gösterilmiştir. (Shaposhnikov V.L, 2002)

Reaktif çöktürme epitaksi ile büyütülen yarıiletken  $\text{CrSi}_2$  nanokristallerin kusurları için DLTS incelemeleri yapılmıştır. DLTS Arhenius eğrisinden hesaplanarak kusurun enerji değeri 0.25eV olduğu belirlenmiştir. (Galkin N.G. 2007 ) Bu değer p-tipi silikonda  $E_v+0.23\text{eV}$  ve n-tipi silikonda  $E_c-0.27\text{eV}$  ile Cr-B kompleksine uygun olduğu bilinmektedir. (Mishra K., 1996)  $\text{CrSi}_2$  nanokristaller ark plazma yöntemiyle hazırlanmış ve atyrene/acrylonitrile copolimer ile kapsüllenmiştir. (Hui Z., 1999) Serbest  $\text{CrSi}_2$  nanoteller ilk defa bir buhar transport yöntemiyle sentezlenmiştir. (Seo K., 2007) Tek kristal  $\text{CrSi}_2$  nanoteller, kaynak malzemesi olarak  $\text{CrSi}_2$  ve transport ayracı olarak iyot kullanılarak kimyasal buhar transport yöntemiyle (CVT) sentezlenmiştir. (Szczech J. R., 2007).  $\langle 100 \rangle$  Silikon altlık üzerine oda sıcaklığında ve 740K'de atmalı lazer ablasyon ile nanometrik  $\text{CrSi}_2$  filmler büyütülmüştür. (Caricato A.P,

2007)

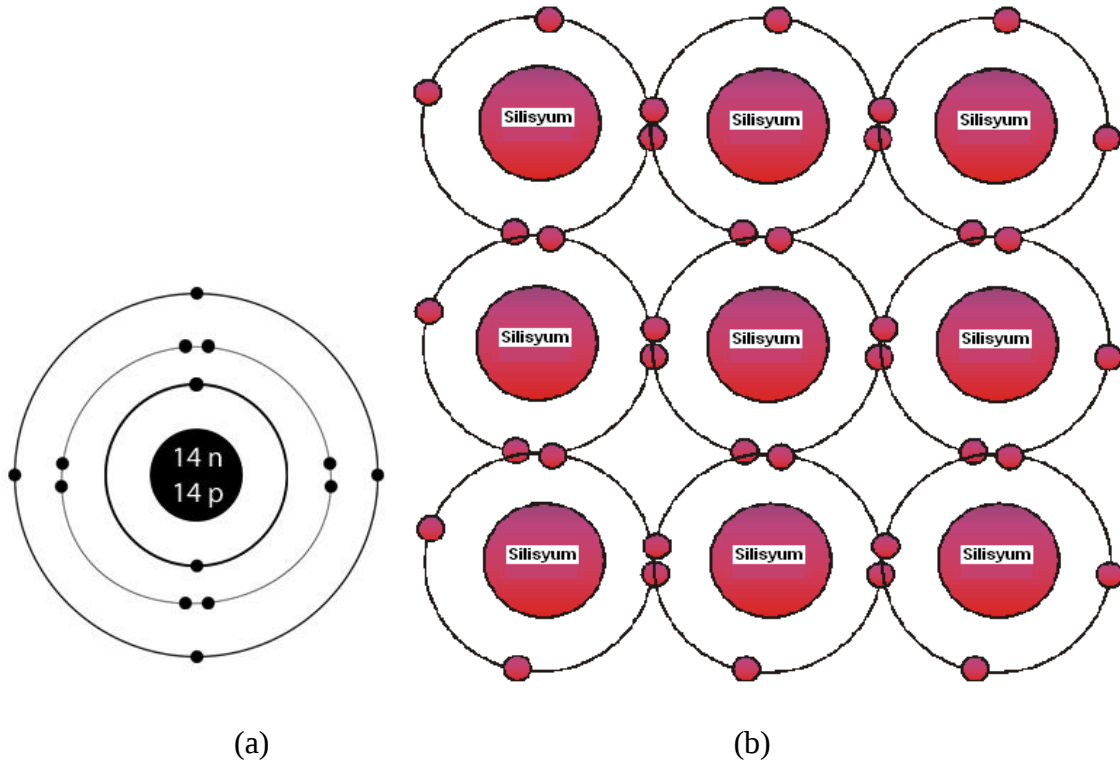
CrSi<sub>2</sub>/Si heteroyapıları Schottky bariyer yapısına da sahip olabileceği literatürde yer almaktadır. (Anıltürk. Ö.S., 1999)

CrSi<sub>2</sub> ile ilgili yapılan bütün çalışmalarda, malzemenin üretim tekniği ön plana çıkmış olup, en verimli üretim tekniği üzerine tartışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada CrSi<sub>2</sub> ince filmler ilk defa katodik ark fiziksel buharlaşma yöntemiyle üretilmiştir. Büyütülen CrSi<sub>2</sub>/n-Si ve CrSi<sub>2</sub>/p-Si eklemlerin XRD, FEG-SEM ve EDS yöntemleri ile yapısal ve morfolojik özellikleri, sıcaklığa bağlı I-V-T ve C(G/ω)-V-T ile ayrıca C(G/ω)-T ölçümleri ile elektriksel özellikleri incelenmiştir.

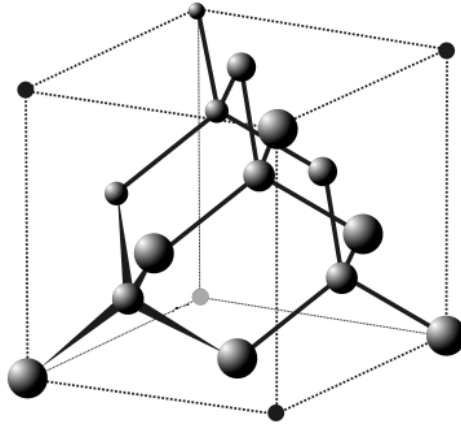
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Silisyum Elementinin Yapısal Özellikleri

Katıhal fiziğinde önemli bir yere sahip olan silisyum, periyodik tablonun 4. grubunda yer alır ve elektron dağılımı  $_{14}\text{Si} : 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$  şeklindedir. Silisyum atomunun valans kabuğuna dört elektron  $3s^2 3p^2$  yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her Si atomunun 4 valans elektronu  $3s^2 3p^2$  durumundan  $sp^3$  durumuna geçer. Silisyum elmas yapı şeklinde kristalleşir ve bu yapıda her bir Si atomu 4 komşu Si atomu ile kovalent bağ yapar (Şekil 2.1). Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi elmas yapıda  $(000)$  ve  $\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right)$  konumlarında iki atom bulunmaktadır. Elmas yapının ilkel hücresinde iki atom bulunur ve birim hücresinde de 8 atom mevcuttur.



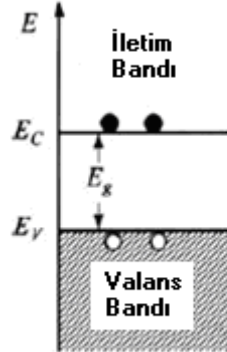
Şekil 2.1 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı



Şekil 2.2 Elmas yapı

Elmas yapının birim hücresinde hacim köşegeninin dörtte biri kadar birbirinin içine girmiş silisyuma ait iki tane yüzey merkezli kübik örgü (fcc yapı) bulunmaktadır.

Özden yarıiletken silisyum kristalin iletkenliğini sadece özden iletim elektronları ve boşlukları sağlar. Özden yarıiletkenler için enerji bant diyagramı Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Özden yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007)

Daha iyi iletkenliğe sahip yarıiletken elde etmek için yarıiletkene bazı katkı atomları katkılanır ve bu şekilde n ve p-tipi yarıiletkenler elde edilir.

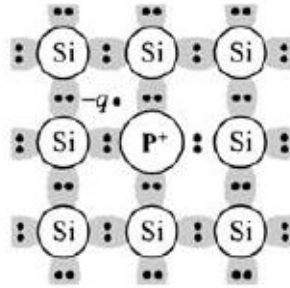
Si atomuna, periyodik cetvelin 5. grup elementlerinden biri (As, Sb, P, N gibi) katkılандığında n-tipi Si elde edilir. 5. grup elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektronu bulunur. Bu elektronların dördü Si atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur, geriye kalan tek elektron ise katkı atomuna zayıf bağlıdır ve çok çabuk serbest kalır (Şekil 2.4). Bu durumda katkı atomu Si kristaline örgü içinde serbestçe hareket edebilen bir

elektron vermiş olur. Katkı atomu elektron verdiği için donör; bu şekilde katkılanan yarıiletken de n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.5’de de gösterildiği gibi donör atomları yarıiletken enerji bant diyagramında iletim bandının hemen altına yerleşir. Donör enerji seviyesi  $E_d$

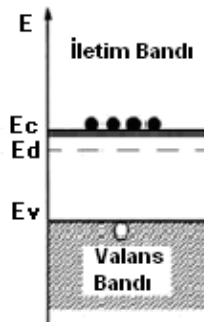
$$E_d = \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \right)^2 \left( \frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H \quad (2.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada,  $\varepsilon_r$  yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti,  $m_e$  elektronun kütlesi,  $m_e^*$  elektronun etkin kütlesi,  $E_H$  hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisini ifade eder (13.6 eV).

n-tipi yarıiletkende donörün iyonlaşması ile valans bandında boşluk oluşmadığı için donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu boşluk konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte elektronlar baskın olacaktır. Yani, n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar, azınlık yük taşıyıcıları ise boşluklardır.



Şekil 2.4 n-tipi Si (donör katkı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)

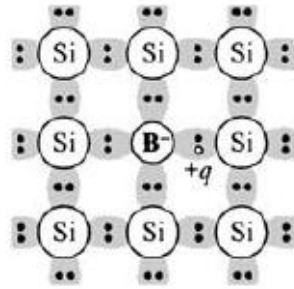


Şekil 2.5 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007)

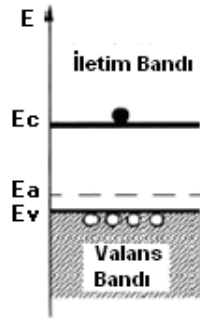
Si atomu, periyodik cetvelin 3. grup elementlerinden biri (In, Ga, Al, B gibi) ile katkıldığında p-tipi Si elde edilir. 3. grup elementlerinin son yörüngelerinde üç valans elektronu bulunur. Bu üç valans elektronu Si atomunun dört valans elektronunun üçü ile kovalent bağ yapar ve Si atomunun bir elektronu bağ yapamaz. Bu elektronun karşısında boşluk olur. Bu boşluk diğer Si = Si bağlarından bir elektronun bu boşluğa yerleşmesiyle doldurulabilir. Bu defa da elektronun kopmuş olduğu yerde bir boşluk meydana gelir, bu boşluk da başka komşu atomlardan kopan elektronlarla doldurulur. Bunun neticesinde valans bandında boşluk oluşmuş olur ve bu boşluk örgü içerisinde bağımsız olarak hareket eder (Şekil 2.6). Yani katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olur. Katkı atomu elektron aldığı için akseptör olarak, akseptör atomları ile katkılanmış yarıiletken de p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.7'de gösterildiği akseptör atomları yarıiletken enerji bant diyagramında valans bandının hemen üzerine yerleşir. Akseptör enerji seviyesi  $E_a$  ;

$$E_a = \left( \frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left( \frac{m_h^*}{m_h} \right) E_H \quad (2.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada  $m_h$  boşluk kütlesi,  $m_h^*$  ise boşluk etkin kütlesini ifade eder.



Şekil 2.6 p-tipi Si (akseptör katkı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)



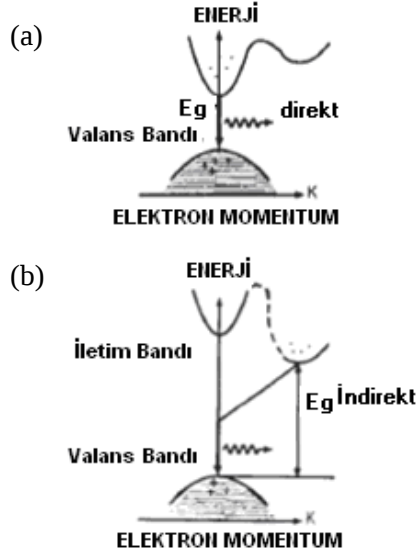
Şekil 2.7 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji bant diyagramı (Sze M. S., 2007)

p-tipi yarıiletkeninde akseptör atomunun valans bandından bir elektron koparmasından dolayı iletim bandında bir elektron oluşmadığı için, akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarıiletkenindeki boşluk konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte boşluklar baskın rol oynayacaklardır. Yani p-tipi yarıiletkeninde çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar olup, azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır.

Yarıiletken üzerine düşen bir fotonun yarıiletken tarafından soğurularak, valans bandındaki bir elektronun yasak bandı aşarak iletim bandına geçmesi iki şekilde olabilir:

1. Direkt geçişler
2. İndirekt geçişler

Eğer yarıiletkenin bant yapısı Şekil 2.8 (a)'da gösterildiği gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı aynı doğrultuda  $\vec{k} = 0$  ise böyle yarıiletkenlere direkt bant geçişli yarıiletkenler denir. Bu; enerji-momentum uzayında dalga vektörü değişiminin sıfır olması anlamına gelir  $\Delta\vec{k} = 0$ . Yani, direkt bantlı yarıiletkenlerde elektron valans bandından iletim bandına dalga vektöründe veya momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan geçer.



Şekil 2.8 (a) direkt ve (b) indirekt bantlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992)

İndirekt geçişli yarıiletkenlerde Şekil 2.8b’de görüldüğü gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı k-momentum uzayında farklı değerlerdedir. Bu da, enerji-momentum uzayında dalga vektöründeki değişimin sıfırdan farklı olması anlamına gelir  $\Delta \vec{k} \neq 0$ . Bu geçişte enerji korunur fakat soğurulan fotonun momentumunun, valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için yeterli olmadığından dolayı ortamdaki bir fononun (kristaldeki örgü atomlarının titreşim kuantı) soğurulması veya ortama yayılması gerekmektedir. Çizelge 2.1’de de ifade edildiği gibi Si kristali indirekt geçişli bir yarıiletkenidir ve yasak enerji aralığı 1.12 eV’dur.

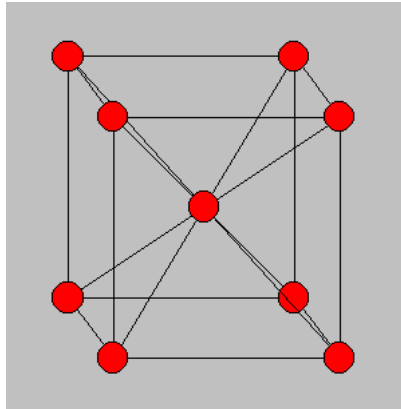
Çizelge 2.1 Yarıiletken Silisyumun çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007)

| Özellikler                                                  | Si                    |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Atom yoğunluğu( $cm^{-3}$ )                                 | $5.02 \times 10^{22}$ |
| Atomik ağırlık                                              | 28.09                 |
| Kristal yapısı                                              | Elmas                 |
| Yoğunluk ( $g / cm^3$ )                                     | 2.329                 |
| Örgü sabiti( $^{\circ}A$ )                                  | 5.43102               |
| Dielektrik sabiti                                           | 11.9                  |
| Elektron alınganlığı $\chi(V)$                              | 4.05                  |
| Yasak bant aralığı (eV)                                     | 1.12 (indirekt)       |
| İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_C (cm^{-3})$ | $2.8 \times 10^{19}$  |

|                                                              |                                        |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_v$ ( $cm^{-3}$ )  | $2.65 \times 10^{19}$                  |
| Özden taşıyıcı konsantrasyonu $n_i$ ( $cm^{-3}$ )            | $9.65 \times 10^9$                     |
| Elektron etkin kütlesi ( $m^* / m_e$ )                       | $m_l^* = 0.98$<br>$m_t^* = 0.19$       |
| Boşlukların etkin kütlesi ( $m^* / m_h$ )                    | $m_{lh}^* = 0.16$<br>$m_{hh}^* = 0.49$ |
| Elektronların sürüklenme mobilitesi $\mu_n$ ( $cm^2 / V-s$ ) | 1,450                                  |
| Boşlukların sürüklenme mobilitesi $\mu_p$ ( $cm^2 / V-s$ )   | 500                                    |
| Doyma hızı ( $cm / s$ )                                      | $1 \times 10^7$                        |
| Bozulma alanı ( $V / cm$ )                                   | $2.5 - 8 \times 10^5$                  |
| Azınlık taşıyıcı ömrü (s)                                    | $\approx 10^{-3}$                      |
| Kırılma indisi                                               | 3.42                                   |
| Optik-fonon enerjisi (eV)                                    | 0.063                                  |
| Erime noktası ( $^{\circ}C$ )                                | 1414                                   |
| Isısal iletkenlik $W / cm-K$                                 | 1.56                                   |
| Isısal yayılma ( $cm^2 / s$ )                                | 0.9                                    |
| Isı kapasitesi ( $J / mol - ^{\circ}C$ )                     | 20.07                                  |

## 2.2 Krom Elementinin Yapısal Özellikleri

Krom elementi periyodik tabloda 6. grupta yer alan bir metaldir. Elektron dağılımı:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$  şeklindedir. Kromun kristal yapısı cisim merkezli kübik yapıdır (Şekil 2.9). Bu metalinin bazı parametreleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.9 Cisim merkezli kübik yapı (bcc yapı)

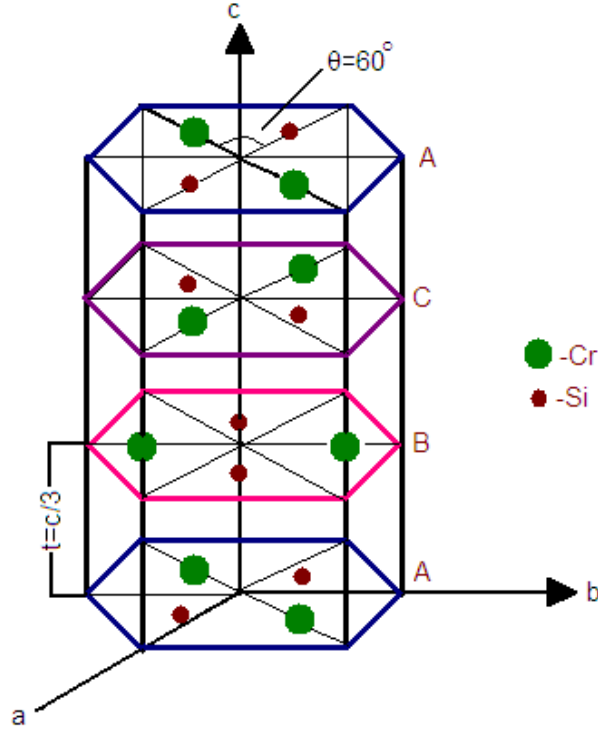
Çizelge 2.2 Krom metalinin parametreleri

| Özellikler                                      | Cr                                   |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Atom numarası                                   | 24                                   |
| Atomik ağırlığı                                 | 51.9961                              |
| Elektron dağılımı                               | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$ |
| Erime noktası ( °C )                            | 1857                                 |
| Kaynama noktası ( °C )                          | 2672                                 |
| Elektriksel iletkenlik ( $cm^{-1}\Omega^{-1}$ ) | $7.74 \times 10^4$                   |
| Isısal iletkenlik (W/cmK)                       | 0.937                                |
| Elektron iş fonksiyonu (eV)                     | 4.5                                  |

### 2.3 CrSi<sub>2</sub>'nin Yapısal Özellikleri

Krom silisit yüksek erime noktasına sahip dayanıklı metal silisitlerden biridir. Erime noktası 1763 K olup, yüksek termoelektrik gücü, termal ve kimyasal kararlılığı ile yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli yere sahiptir. Bu nedenle foto termo çeviriciler ve sensörler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Elektriksel özellikleri film büyütme tekniğine ve Cr:Si stokiometrisine bağlıdır. Optik absorpsiyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, krom silisitindirekt yasak enerji aralığının 0.35-0.5 eV civarında ve direkt aralığının ise 0.67 eV civarı bulunmuştur. Oda sıcaklığında Si(111) ile örgü uyumsuzluğu %–0.14 civarındadır, bu yüzden Si(111) altlıkla uyumlu beklenir. Uzay grubu P6<sub>4</sub>22 olan CrSi<sub>2</sub> hegzagonal C-40 yapıdadır. P6<sub>2</sub>22 grubu baz örgü vektörü c'ye paralel 6 katlı dönme eksenini içerir. 6<sub>2</sub> sembolü iki simetri işleminin çarpımını açıklar: Bu simetri işlemleri 360°/6=60° ile düzgün dönmeler ve  $\vec{t} = \frac{2}{6}\vec{c} = \frac{1}{3}\vec{c}$  dönüşümleridir.

CrSi<sub>2</sub> yapısı üç hegzagonal tabakaya sahiptir. Bunlar birbirleri etrafında dönme ekseninde 60° açıyla dönük olarak bulunurlar. Her tabakada Si-Si-(Cr) serisiyle tekrarlanan bir dizi bulunur. Örgü parametreleri sırasıyla; a= 0,4428 nm, c=0,6369 nm'dir. Hegzagonal tabakada bir Cr atomu 6 en yakın komşu Si atomuna sahiptir, bir Si atomu 3 Cr ve 3 Si atomuyla birleşmiştir. Bir tabakada en yakın komşu uzaklığı 0.256 nm olmakla beraber Cr atomlarının dört iç-düzlemsel Si komşusu vardır, bunlar bir sonraki CrSi<sub>2</sub> tabakalarında bulunurlar. Her Si atomunun iki Cr, iki Si iç düzlemsel komşusu vardır. Farklı CrSi<sub>2</sub> tabakalarında bulunan en yakın komşu atomları arasındaki mesafe 0.248 nm'dir. ( Filonenko O., 2004)

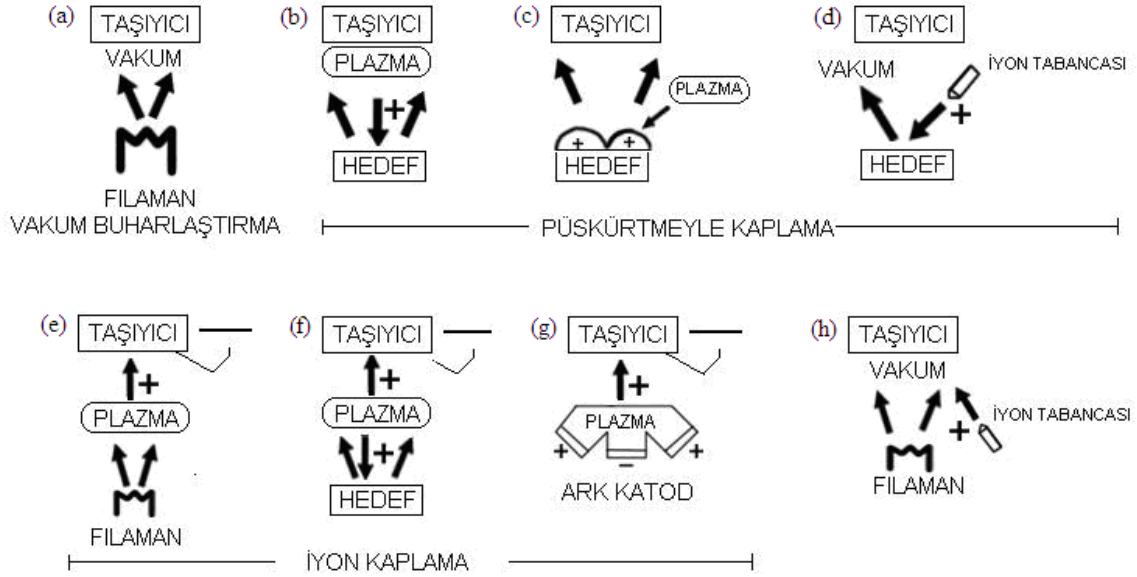


Şekil 2.10 Krom silisitinin C-40 yapısı.

$\text{CrSi}_2$ 'nin C-40 yapısı.  $\text{CrSi}_2$  tabakaları ABCABC sırasını izler. Üç ayrı hegzagonal  $\text{CrSi}_2$  tabakası,  $t=c/3$  dönüşümünü tarafından izlenerek, dönme eksenini etrafında  $60^\circ$ 'lik açıyla dönmüş durumdadır.

#### 2.4 Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition PVD)

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi, katı bir kaynağın vakum altında buharlaştırılması ve bu maddenin kaplama oluşturmak için taşıyıcı yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem birçok alt gruba ayrılmış olmakla birlikte buharlaştırmaya ve sıçratmaya dayalı olmak üzere iki temel grup altında toplanabilir. PVD yöntemi filmin kalınlığı birkaç nanometreden binlerce nanometre olabilecek bir aralıkta ince film kaplama tekniğidir. Tipik PVD kaplama hızı saniyede  $10\text{-}100\text{\AA}$ 'dır. PVD yöntemlerini Şekil 2.11'de gösterildiği gibi vakum buharlaştırma, püskürtme ile kaplama, termal buharlaştırma, iyon kaplama olarak sıralayabiliriz. (Donald M. Mattox 1998)



Şekil 2.11 PVD yöntemleri: (a) vakum buharlaştırma, (b ve c) plazma ortamında püskürtme ile kaplama, (d) vakumda püskürtme ile kaplama, (e) plazma ortamında termal buharlaştırma kaynağı ile iyon kaplama (f) püskürtme kaynağı ile iyon kaplama (g) ark buharlaştırma kaynağı ile iyon kaplama (h) termal buharlaştırma kaynaklı ve iyon tabancasından iyon bombardımanlı iyon demeti destekli kaplama (IBAD).

#### 2.4.1 Vakum kaplama

Vakum buharlaştırma olarak da bilinen bu yöntemde termal buharlaşma kaynağından çıkan malzeme, kaynak ve taşıyıcı arasında gaz molekülleri ile hiç çarpışma yapmadan veya çok az çarpışma yaparak taşıyıcıya ulaşır. Vakum ortamı aynı zamanda kaplama sisteminin gaz kontaminasyonunun minimum seviyede tutulmasını sağlar. Vakum kaplama sisteminin tolare edebileceği gaz kontaminasyonu seviyesine göre genel olarak  $10^{-5}$  Torr ile  $10^{-9}$  Torr arasındaki basınç değerlerinde oluşur. Termal buharlaştırma hızı diğer buharlaştırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok yüksektir. Termal buharlaştırma genel olarak tungsten tel bobin veya yüksek enerjili elektron demeti gibi kaynaklarla yapılır. Buharlaşma kaynağı tarafından taşıyıcının ısınmasını azaltmak için taşıyıcı buharlaştırma kaynağından belirli bir mesafede tutulur.

### 2.4.2 Püskürtmeyle kaplama

Fiziksel püskürtme yöntemi, plazmada ivmelendirilen atomik boyutlu, yüksek enerjili bombardıman parçacığından momentum transferi ile katı yüzeyinden yüzey atomlarının koparılmasıyla oluşan ve termal olmayan bir buharlaştırma yöntemidir. Kaynak ile taşıyıcı arasındaki uzaklık, vakum kaplamayla kıyaslandığında genelde daha kısadır. Püskürtmeyle kaplama, vakum ortamında iyon tabancası veya düşük basınçlı plazma ( $<5$  mTorr) kullanılarak katı yüzeyine enerjili iyon bombardımanı ile yapılabilir. Püskürtmeyle kaplama aynı zamanda yüksek enerjili parçacıkların taşıyıcı yüzeyi yakınına ulaşmadan önce gaz fazında çarpışmalarıyla “termalize” oldukları püskürtme hedefinden püskürtülerek veya yansıyarak daha yüksek plazma basıncında (5-30mTorr) da yapılabilir.

### 2.4.3 İyon Kaplama

İyon kaplama, kaplanan filmin özelliklerini kontrol etmek ve geliştirmek için, atomik boyuttaki yüksek enerjili parçacıklar ile büyütülen filmin, periyodik veya eş zamanlı bombardımanına dayanır. Bu teknik ile üretilen metal buharı yüksek hıza sahip, yüksek enerjili parçacıklardan (plazma) oluşur. Yüksek enerjili parçacıkların elde edilmesi için, bu metal buharına pozitif potansiyel ve aynı zamanda altlığa da negatif bir gerilim uygulanır; böylece iyonların enerjisi ve dolayısıyla hızları daha da artırılmış olur. Belirli bir gerilimin altında kısmen iyonize olmuş metal buharı kullanılarak yapılan bu kaplama işlemleri genel olarak iyon kaplaması (ion-plating) olarak tanımlanır. İyon kaplama işlemi için geliştirilen üç ana buharlaştırma yöntemi elektron demeti ile plazma oluşturma, sıçratma ve katodik ark-buharlaştırma yöntemi olarak sıralayabiliriz. Bunların arasında en yüksek iyonlaştırma derecesinin, en yüksek ortalama iyon enerjisinin ve altlık üzerinde yeterince yüksek iyon akımı yoğunluğunun sağlandığı yöntem katodik ark-buharlaştırma yöntemidir. Bu yöntem, düşük kaplama sıcaklıklarında bile yüksek yapışma mukavemetine sahip, homojen ve üstün tribolojik özellikler gösteren ince sert kaplamaların üretimine imkan sağlar. (Donald M. Mattox 1998)

## 2.5 Ark Buhar Kaplama- Katodik Ark Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi

Ark buhar çöktürme yöntemi kaynak olarak buharlaşma malzeme kaynağı olarak arklama koşulları altında elektrottan buharlaşmayı kullanan bir PVD tekniğidir. Arklama şartları elektrot malzemesinin buharı veya gazından geçen yüksek akım-düşük voltaj elektriksel akımından oluşur. Ark voltajının sadece buharın veya gazın iyonizasyon potansiyelinin

yakınında bulunması gerekir. Katottaki iyon bombardımanı ve anottaki elektron bombardımanı elektrotları ısıtır. Çıkan çoğu malzeme termal olarak buharlaşmıştır ama bazıları katottan erimiş damlacık veya katı parçacıklar olarak dışarı atılır. Buharlaştıran atomların yüksek bir yüzdesi ark buharlaştırma sürecinde iyonize olurlar. Ark iyi bir vakumda yakın yerleştirilmiş elektrotlar arasında elektrot malzemesinin birazı buharlaştırılarak veya elektrotlar arasında düşük basınçta veya yüksek basınç gaz halinde ortamda (gaz halinde ark) oluşturulabilir. Yüksek basınç gaz arkları PVD sürecinde kullanılmazlar. PVD’de ark buharlaştırma termal buharlaştırma ve püskürtme arasında, kendine özgü bir buharlaştırma kaynağı olarak düşünülebilir.

Eğer buharlaştırma ark erozyonlu katot yüzeyinden oluşuyorsa, sisteme sürekli katodik ark kaynağı denir. Katot erimiş veya su soğutmalı katı katotlu bir katı olabilir (“soğuk katot”). Soğuk katot film biriktirme için en yaygın kullanılan katodik ark kaynağıdır. Kararlı bir ark oluşturmak için arktan minimum akım geçmek zorundadır. Minimum ark akımları bakır titanyum gibi düşük erime sıcaklığı olan malzemeler için 50-10A arası, tungsten gibi dayanıklı metaller için 300-400A arası değişir. Ark potansiyel düşmelerinin çoğu katot yüzeyi yakınında oluşacaktır. Ark voltajı elektronları katottan anoda hareketini kolaylaştıracak şekilde 15-100 Volt civarı olabilir. Arktaki enerji harcanması (yaklaşık olarak):

Isınma % 34

Elektron emisyonu % 21

Buharlaşma % 3

İyonizasyon % 7

İyonlara enerji % 23

Elektronlara enerji % 10 olarak dağılır. (Donald M. Mattox 1998)

### 2.5.1 Katot İzi

Vakum arkın katodunda akım katot izleri denen çok az sayıda ayrı bölgede toplanır. Katot izi oluşumu vakum ark ateşlemesinin temel karakteristiğidir ve izlerin fiziği bir çok kişi tarafından çalışılmıştır. İz boyutunun 1-10 mikron aralığında olduğu ve izlerin akım yoğunluğunun  $10^6$ - $10^8$  A/m<sup>2</sup> olduğu bilinmektedir. Akım yoğunluğu çok yükselirse ark iki veya daha fazla ize ayrılır. Rastgele hareket sırasında katot izi, bölgeyi buharlaştıran kadar, oksit kalıntı gibi bir yüzey tümseğine veya yüksek elektron emisyonlu bir bölgeye takılabilir.

Ark izinin hızını, gaz basıncı, türleri ve manyetik alanın uygulanması gibi bir çok faktör etkiler.

Katot izinin çapı, izin akım yoğunluğu, izin tipi veya hızı, erozyonun tipi, izin ömrü, iz başına toplam akım ve kütle azalma hızı gibi parametreler ile katot izi tanımlanabilir.

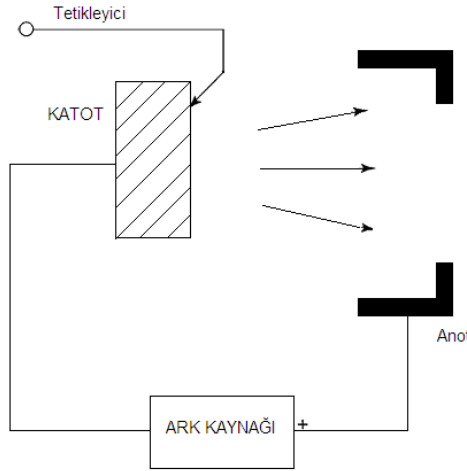
### 2.5.2 Mikro Parçacıklar

Vakum arkı tarafından oluşan plazmanın kütlesi ark yükü Coulomb başına onlarca mikrogram mertebesindedir. Ancak hedefin gerekli miktarda buharlaşmaması durumunda atomik parçacıkların yanı sıra, filmin üzerinde istenmeyen mikron mertebesinde makroparçacık denen yapılar oluşur. Bu parçacıkların boyutunun atomik boyuta göre büyük olmasından dolayı makro adını almışlardır. Makroparçacık oluşumu katot kütle harcanmasına (tüketimine) bir ek kaynaktır; bu yüzden harcanan katot kütlesi, oluşan plazma kütlesinden fazladır, farklılık makroparçacık kütlesidir. Ancak katot erimişse makroparçacıklar oluşmaz.

### 2.5.3 Ark Kaynakları

Eğer arkın yüzey boyunca rastgele hareketine izin veriliyorsa, ark kaynağına rastgele ark kaynağı olarak adlandırılır. Aksi durumda, ark yüzeyde belirli bir yolda hareket ettiriliyorsa “yönlendirilmiş ark” kaynağı denir. Ark, manyetik alanlar kullanılarak yönlendirilir; bu durumda farklı yönlendirme ark kaynakları oluşur. Yönlendirilmiş ark kaynakları rastgele ark kaynaklarından daha az makroparçacık üretirler.

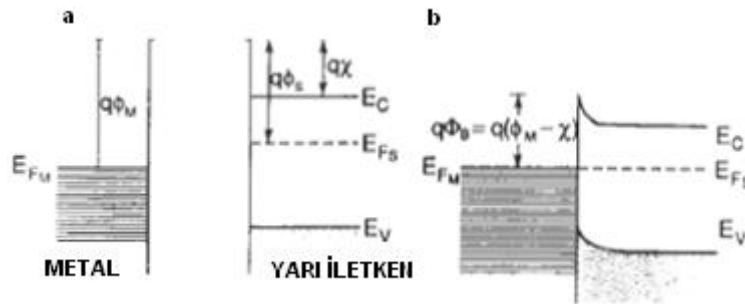
Katot üzerindeki ark hareketi, gaz bileşiminden, basınçtan, katot malzemesinden, safsızlıktan ve manyetik alanın varlığından etkilenebilir. Manyetik alan olmadığında ark tamamen rastgele hareket etme eğilimindedir. Katot bir disk ise, ark istatistiksel olarak en çok merkezdedir, dolayısıyla erozyonun en çok diskin merkezinde olması beklenir. Eğer katot yüzeyinde daha güçlü bir manyetik alan varsa, ark hareketi manyetik alanın yüzeyle yaptığı açıyla belirlenecektir. Katotların hem katodik ark kaynağı hem de magnetron püskürtme kaynağı olarak kullanılmasını, manyetik alan konfigürasyonlarında küçük değişiklikler yaparak sağlanmıştır. Şekil 2.12’de şematik olarak katodik ark sistemi gösterilmiştir. (Vossen J. L., 1991)



Şekil 2.12 Katodik Ark Kaplama Yöntemi

## 2.6 Metal-Yarıiletken Kontaklar

Mikroelektronik aygıtların çoğunluğunun çalışma prensipleri metal-yarıiletken ve p-tipi yarıiletken-n-tipi yarıiletken (p-n eklemi) kontakların fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Bu tür kontakların sınır bölgesinde potansiyel engeller meydana gelmektedir. Potansiyel engellerin oluşması, metal-yarıiletken arası yük taşıyıcılarının konsantrasyonlarının yeniden oluşmasına bağlıdır. Bu tür kontakların elektriksel özellikleri, dışarıdan uygulanan gerilimin değeri ve yönü ile değişmektedir. Kontaklar doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiği gösterebilir. Kontakların lineer olmayan özellikleri, elektrik akımının doğrultulması, dönüşümü, yükseltilmesi veya elektrik sinyallerinin jenerasyonu için kullanılabilir. Şekil 2.13’da metal- yarıiletken kantağın enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.13 (a) Birbirinden izole metal ve n-tipi yarıiletkenin bant diyagramı. (b) metal-

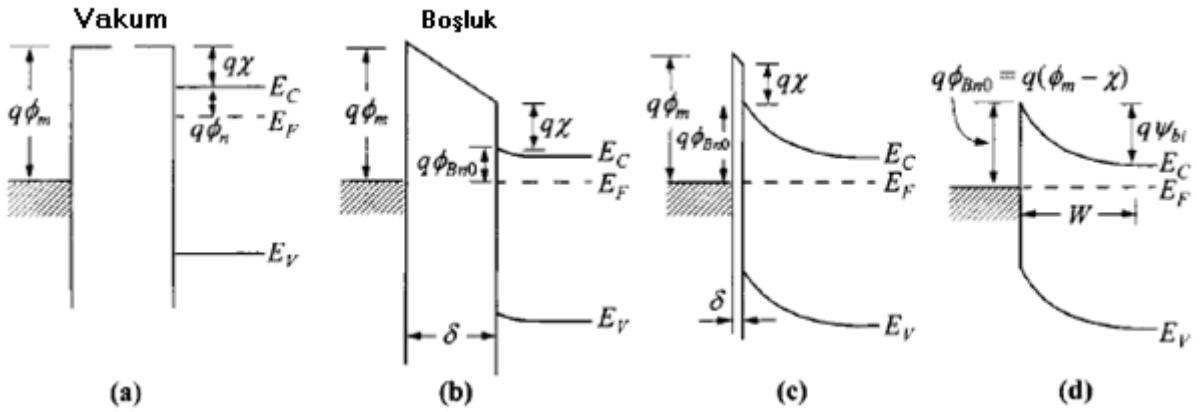
yarıiletken kontağın bant diyagramı (Ohring M., 1992)

Metal-yarıiletken kontaktarı, Schottky kontaklar ve omik kontaklar olarak sınıflandırılabilir.

### 2.6.1 Schottky Kontaklar

Schottky bariyer (MS) diyodlar tek yönlü hızlı devre elemanları olarak kullanılmaktadır. Metal ve yarıiletken ile kontak yapıldığında, metal-yarıiletken arayüzeyde bariyer oluşur. Bu bariyer akım iletimini kontrol eder. Kontakın yarıiletkenle buluştuğu noktadaki bariyeri anlayabilmek için bazı parametreleri tanımlamak gereklidir: İş fonksiyonu,  $q\phi_m$  olarak gösterilir, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve her metal için  $q\phi_m = q\phi_n - q\chi$  değerine eşittir. Burada  $\chi$  elektron alınganlığı ve iletim bandının tabanı  $E_C$  ile vakum seviyesi arasındaki farka eşittir,  $q\phi_n$  ise iletim bandının tabanı  $E_C$  ile Fermi seviyesi  $E_F$  arasındaki enerji farkına eşittir.

Metal-yarıiletken arasındaki mesafedeki elektrik alanın ( $E = \frac{V}{x}$  olduğundan dolayı) artışına öncülük eder ve bundan dolayı negatif yükler metal yüzeyde toplanır. Bu yükler yarıiletkenin fakirleşme bölgesindeki pozitif yükler ile dengelenir. Bundan dolayı ilgili bantlar Şekil 2.14c'de görüldüğü gibi bükülür ve ideal durum için bariyer yüksekliği  $q\phi_{bno}$  basitçe metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron alınganlığı arasındaki farka eşit olur.  $q\phi_m$  metal ile değişir ve yüzey kirliliğine çok duyarlıdır. Örneğin temiz yüzeyli krom (Cr) için  $q\phi_m$  ; 4.65 eV iken ve Si için  $q\chi$  ; 4.05 eV'ye eşittir (Sze M. S., 2007).



Şekil 2.14 metal-yarıiletken kontakların enerji-bant diyagramları. Metal ve yarıiletken (a) birbirinden ayrı iken, (b) bir sistemde birleşmiş halleri. Kontak mesafesi  $\phi$  (c) azalmış durumda iken, (d) sıfır olduğu durum. (Sze M. S., 2007)

Deneyssel bariyer yüksekliği değeri, teorik (ideal) bariyer yüksekliği değerinden sapabilir. Bu sapmanın sebeplerini şöyle sınıflandırabiliriz:

- i) metal ve yarıiletken arasında bir arayüzey tabakası
- ii) arayüzey durumların varlığı

Bir metal, bir yarıiletken (n-tipi olarak) üzerine buharlaştırılırsa yarıiletken ile kontak oluşur ve yarıiletkenin ilgili bantları (iletim ve valans bantları) yüzeyde metalin Fermi enerjisiyle  $\epsilon_F$  belirgin bir enerji ilişkisine sahip olur. Bu ilişki kaba bir yaklaşımı ile ( $\rho = qN_D$  için  $x < W_D$  ve  $\rho = 0$  için  $x > W_D$  burada  $W_D$  fakirleşme bölgesinin genişliğidir), fakirleşme bölgesinin genişliğinin değişimini, fakirleşme bölgesinin kapasitansı (veya yükü) ve uygulanan voltajın bir fonksiyonu olan elektriksel kuvvetin altında sabitlenir.

$$W_D = \left[ \frac{2\epsilon_s}{qN_D} \left( V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Burada  $N_D$  donör konsantrasyonu,  $\epsilon_s$  silisyumun elektriksel geçirgenliği (permitivite),  $V$  uygulanan besleme voltajı,  $V_{bi}$  oluşma potansiyeli,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  sıcaklık,  $q$  temel yüküdür. Eğer  $N_D$  fakirleşme bölgesinde sabit ise yüksek frekanslı C-V eğrisinden türetilmiş değeri  $\frac{1}{C_D^2}$  ye  $V$  grafiğinin eğiminden elde edilebilir. Eğimin gerilim eksenini kestiği nokta ise oluşma potansiyeline karşılık gelir. Diğer bir deyişle, analitik olarak aşağıdaki gibi olacaktır.

$$Q_{SC} = qN_D W_D \quad (2.4)$$

$$C_D = \frac{\epsilon_s S}{W_D} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2 \left[ V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right]}{qS^2 \epsilon_s N_D} \quad (2.6)$$

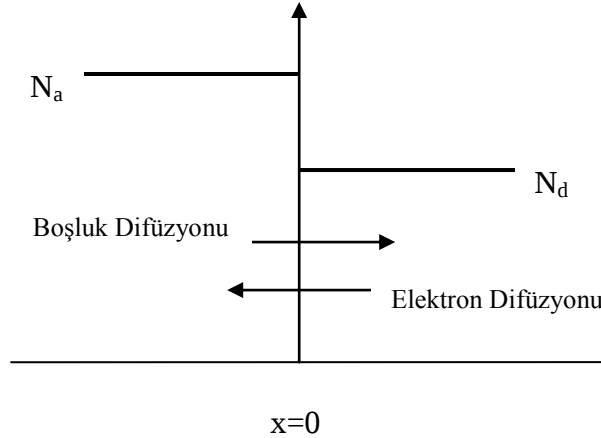
$$N_D = \frac{2}{qS^2\epsilon_s \left( \frac{d}{dV} \frac{1}{C^2} \right)} \quad (2.7)$$

Burada S elektrotun alanıdır.

Bunun yanında kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri derin safsızlık seviyelerinin ve arayüzey durumların araştırılmasında da kullanılabilir.

## 2.7 p-n Eklemler

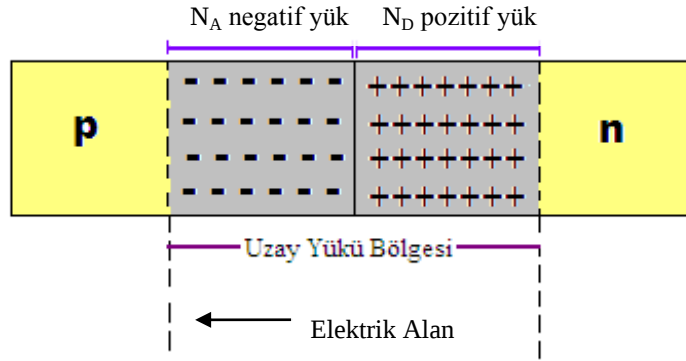
Biri n-türü diğeri p-türü olacak şekilde, farklı katkılanmış iki yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşan yapılar p-n eklemler olarak adlandırılır. Bir p-n eklemden n tipi yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronlar olurken, p-tipinde ise yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır. İki yarıiletken bir araya getirildiklerinde yük yoğunluklarının farkından boşluklar n-tipi yarıiletkene doğru, benzer şekilde, elektronlar da p-tipi yarıiletkene doğru hareket ederler. Denge durumunda şekil 2.15'deki gibi bir durum oluşur.



Şekil 2.15 Düzgün katkılanmış p-n eklemin katkılama profili

p ve n tipi yarıiletkenlerin birleşme bölgesindeki, boşluklar ve elektronlarca pozitif ve negatif yüklenmiş bölgeye uzay yükü bölgesi denir. Bütün yükler bu bölgede elektrik alan tarafından sürüklenirler. Uzay yükü bölgesinde bütün serbest yükler tükendiğinde bu bölge fakirleşme (arınma) bölgesi adını alır. Uzay yükü bölgesinin kenarlarında çoğunluk yük taşıyıcıları konsantrasyonlarında yoğunluk gradyenti bulunur. Bu yoğunluk gradyentini çoğunluk taşıyıcılarında bir difüzyon kuvveti ürettiymiş gibi düşünebilir. Uzay yükü bölgesinin

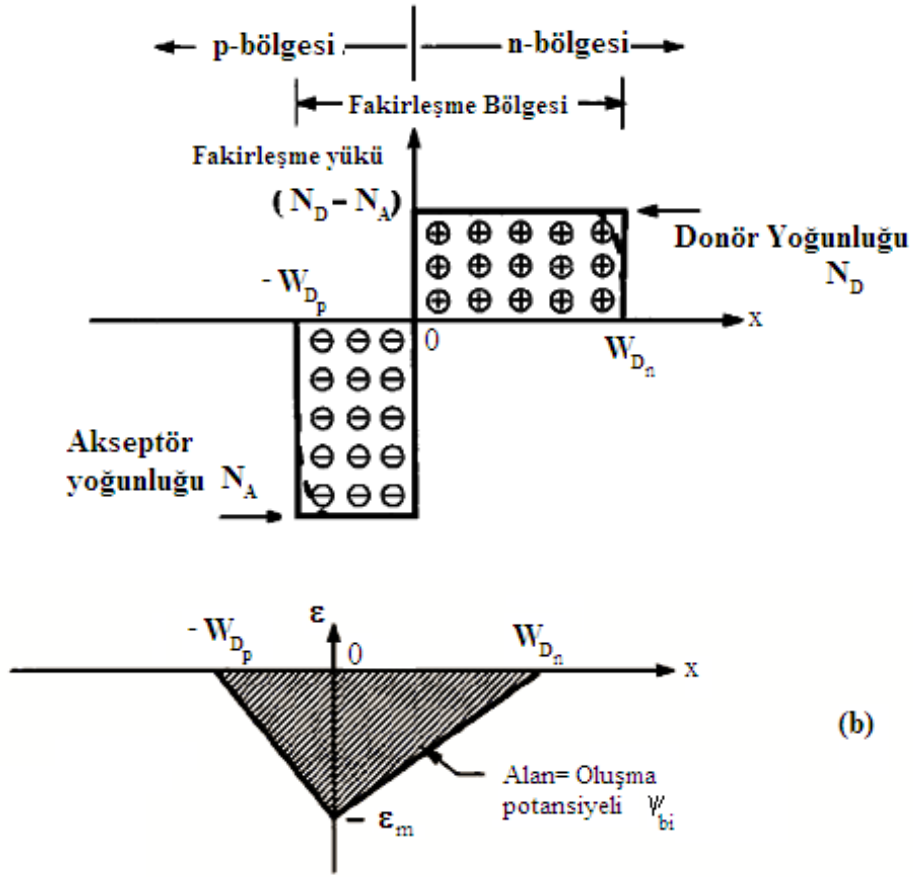
kenarında elektronlar ve boşluklar üzerine etkiyen bu difüzyon kuvvetleri Şekil 2.16'da gösterildiği gibi uzay yükü bölgesindeki elektrik alanı, elektronlar ve boşluklar üzerine, her tip parçacık için difüzyon kuvvetinin ters yönünde başka bir kuvvet üretir. Termal dengede difüzyon kuvveti ve elektrik alanı birbirini dengeler. (Neamen D., 2006)



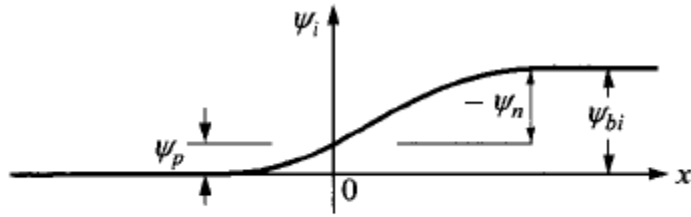
Şekil 2.16 p-n eklemde uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yük yoğunlukları

Bir yarıiletkendeki safsızlık akseptör safsızlığından  $N_A$  donoö safsızlığına  $N_D$  keskin bir şekilde değişiyorsa buna keskin eklem denir. Özellikle  $N_A \gg N_D$  (veya tersi durum) söz konusuyla, tek taraflı keskin  $p^+-n$  (veya  $n^+-p$ ) eklem elde edilir. Poisson denklemi çözüldüğünde, p-n eklemdeki elektriksel alanın değişimi ve bununla ilgili olan potansiyel değişimi bulunur ve bu durum Şekil 2.17b ve c'de resmedilmiştir. Nihayetinde, ideal p-n eklemi için enerji bant değişimi şekil 2.17d'deki gibi olacaktır (SZE M. S., 2007).

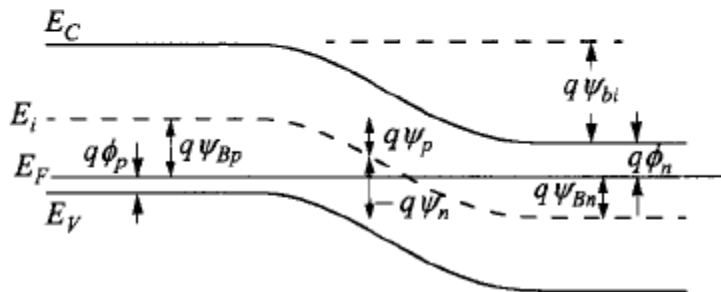
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.17 Termal dengede keskin p-n eklemi (a) Uzay-yükü bölgesi. (b) Elektrik alan dağılımı. (c) Potansiyel dağılımı. (d) Enerji-bant diyagramı.

### 2.7.1 Oluşma Potansiyeli

p-n eklem uclarına bir potansiyel farkı uygulanmadığı durumda, eklem termal dengededir. Bu durumda sistemin Fermi enerji seviyesi sabittir. Şekil 2.17d gibi uzay yükü bölgesinin nötr p ve n bölgelerindeki enerji bantlarını ve termal dengedeki sistemin Fermi enerji seviyesinin sabit olduğunu gösterir. İletim ve değerlik bantları, özden Fermi enerjisi gibi, p ve n bölgelerinin Fermi seviyesinin değişimine bağlı olduğundan dolayı uzay yükü bölgesinde bükülmek zorundadır. n bölgesinin iletim bandındaki elektronlar p tipinin iletim bandına geçmeye çalışırken bir potansiyel bariyeriyle karşılaşır. Bu potansiyel bariyerine oluşma potansiyeli denir ve  $V_{bi}$  ile gösterilir. Oluşma potansiyeli n bölgesindeki çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ile p bölgesindeki azınlık yük taşıyıcıları arasında dengeyi devam ettirir. Aynı şekilde, p bölgesinin değerlik bandındaki boşluklar n bölgesinin değerlik bandına gitmeye çalışırken bir potansiyelle karşılaşır. Bu potansiyel bariyeri aynı zamanda p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları boşluklar ile n bölgesindeki azınlık taşıyıcıları boşluklar arasındaki dengeyi korur. Eklemdeki bu potansiyel farkı bir voltmetre ile ölçülemez çünkü ölçümün denenmesi durumunda, yarıiletkenle probalar arasında yeni potansiyel bariyerleri oluşturacak,  $V_{bi}$ 'yi etkisiz hale getirecektir.

$V_{bi}$  potansiyeli dengeyi korur dolayısıyla bu voltaj ile akım üretilemez. Özden Fermi seviyesi eklem boyunca bant kenarlarında ileti bandından eşit uzaklıklıdır bu yüzden oluşma potansiyeli n ve p bölgelerindeki özden Fermi seviyeleri arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (2.8)$$

n bölgesinde iletim bandında elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_C \exp\left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right] = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \quad (2.9)$$

Burada  $n_i$  ve  $E_{Fi}$  sırasıyla özden taşıyıcı konsantrasyonu ve özden Fermi enerjisidir. n bölgesindeki  $\phi_{Fn}$  potansiyeli,

$$e\phi_{Fn} = E_F - E_{Fi} \quad (2.10)$$

$$\phi_{Fn} = \frac{+kT}{e} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad (2.11a)$$

Benzer şekilde p bölgesindeki potansiyel de

$$\phi_{Fp} = \frac{+kT}{e} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (2.11b)$$

Sonuç olarak adım eklem için oluşma potansiyeli,

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.12)$$

$$V_t = kT/e \quad (2.13)$$

### 2.7.2 Düz ve Ters Besleme

p-n eklemi en önemli özelliği akımın, p bölgesi n ye göre negatif potansiyel uygulandığında akım geçmezken, p bölgesine n bölgesine göre pozitif bir dış potansiyel uygulandığında akımın rahatça iletilmesidir. Eklemi fakirleşme bölgesi boyunca, nötr n ve p bölgelerine bir V potansiyel farkının uygulandığını düşünelim. Eklemdeki elektrostatik potansiyel bariyeri düz besleme ( $V_F$ ) ile azalır, dengedeki kontak potansiyeliyle ( $V_0$ ), daha düşük bir değere ulaşır ( $V_0 - V_F$ ). Potansiyel bariyerindeki düşme, düz besleme p bölgesindeki elektrostatik potansiyeli n tarafına göre artırır. Ters besleme için ( $V = -V_R$ ) tam tersi olmakla beraber, p tarafının elektrostatik potansiyeli, n tarafına göre azalmıştır ve eklemdeki potansiyel engeli genişler ( $V_0 + V_R$ ). Ters besleme ile eklemdeki alan, uygulanan alanla artar. Eklemdeki elektrik alandaki değişim fakirleşme bölgesinin kalınlığında değişim yapar, bundan dolayı verilen bir elektriksel alan değeri için ortaya çıkan pozitif ve negatif yüklerin (dengelenmemiş donör ve akseptör iyon olarak) uygun miktarda olması gerekir. Bu yüzden genişliğin, düz beslemede azalmasını ve ters gerilimde artmasını bekleriz. Difüzyon akımı, n tarafındaki çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronların potansiyel enerji bariyerini atlayarak, p tarafına difüz etmesiyle ve boşlukların p'den n tarafına geçmek için kendi bariyerlerini atlamasıyla gerçekleşir. Düz beslemede, bariyer  $V_0$  dan,  $V_0 - V_F$ 'ye düşer ve n-tarafının iletim bandında, n'den p'ye geçmek için daha çok elektron, daha küçük bariyerden yeterli enerjiye sahip olarak atlar hale gelir. Bu yüzden, elektron difüzyon akımı düz beslemede biraz daha büyük olabilir. Benzer şekilde, p'den n tarafına düz beslemede düşen bariyer yüzünden daha çok boşluk difüz eder. Ters beslemede, bariyer genişler, ( $V_0 + V_R$ ) bu yüzden, n tarafında iletim bandındaki elektronların veya p tarafında değerlik bandındaki boşlukların bu bariyer aşmak için yeterli enerjiye sahip olmazlar. Bundan dolayı, difüzyon akımı ters besleme için ihmal edilebilir. Sürüklenme akımı potansiyel bariyerinin yüksekliğinden etkilenmez. Bunun sebebi, sürüklenme akımının, sadece taşıyıcıların bariyerden ne kadar hızlı kaydığı ile sınırlı olmamasındandır. Taşıyıcıların

bariyerden ne kadar sıklıkla kaydığı önemlidir. Akımın sürüklenme bileşenine katılmak için gerekli eklemenin her iki tarafından da azınlık taşıyıcılarının sağlanması elektron-boşluk çiftlerinin (electron hole pair-EHP) termal uyarılmaya oluşturulmasıyla olur. Örneğin eklem yakınında p tarafında yaratılan bir EHP, p-tipi malzemenin azınlık elektronunu temin eder. Eğer EHP geçiş bölgesinin  $L_n$  difüzyon uzunluğunda oluşturulduysa, bu elektron eklem difüzyon eder ve n tarafına doğru bariyeri süpürür. Meydana gelen akıma jenerasyon akımı denir, büyüklüğü, doğrudan, EHP oluşumunun hızına bağlıdır. Bu jenerasyon akımı EHP'leri eklem yakınında optik uyardırmayla da mümkün olabilir. Eklemden geçen toplam akım, difüzyon ve sürüklenme bileşenlerinin toplamıdır. Parçacık akış yönleri birbirlerine ters olmasına rağmen elektron ve boşluk difüzyon akımları, her ikisi de p'den n'ye; sürüklenme akımı ise n'den p'ye doğrudur. Dengeye eklemden geçen net akım sıfırdır, her taşıyıcı tipi için sürüklenme ve difüzyon bileşenleri birbirini götürür. Ters gerilim altında, eklemdaki büyük bariyer yüzünde her iki difüzyon bileşenleri ihmal edilebilir ve tek akım n den p ye göreceli olarak küçük, jenerasyon akımıdır. p bölgesinden n bölgesine fazla boşlukların enjeksiyonunun, n malzemesinde boşluk fazlalığı dağılımı oluşturması beklenir. Boşluklar n bölgesinin derinlerine difüzyon ettikçe, elektronlarla tekrar birleşirler ve sonuç olarak fazla boşluk dağılımı difüzyon denkleminin çözümü olarak elde edilir. n bölgesi, boşluk difüzyon uzunluğu  $L_p$ 'den daha uzunsa, sonuç üstel olur. Benzer şekilde, p malzemesinde enjekte olan elektronlar, fazla elektronlara üstel bir dağılım vererek, difüzyon ve rekombine olurlar. Bu fazla taşıyıcı dağılımları, p-n eklem düz beslemeden ters beslemeye anahtarlamada dikkate alınmalıdır. Elektronların ve boşlukların eklem boyunca difüzyon akımlarını değerlendirerek, bir diyotun akım-gerilim karakteristiği şu şekilde verilebilir.

$$I = I_0 \left[ e^{qV/kT} - 1 \right] \quad (2.14)$$

$$I_0 = qA \left[ \left( \frac{D_p}{L_p} \right) p_n + \left( \frac{D_n}{L_n} \right) n_p \right] \quad (2.15)$$

Denklem diyot denklemi olarak bilinir, düz beslemede akım gerilime eksponansiyel olarak bağlı iken, ters beslemede sabit değerde yani doyma akımının olması beklenir. Yani doğru beslemede;

$$I_F = I_0 \exp^{-qV_F/kT} - 1 \quad (2.16)$$

Ve ters beslemede

$$I_R = I_0 \exp^{-qV_R/kT} - 1 \quad (2.17)$$

Olmalıdır. Eğer  $V_R$   $kT/q$ 'dan birkaç kat büyükse toplam akım sadece ters doyma akımına eşittir.

$$I_0 = -qA \left[ \left( \frac{D_p}{L_p} \right) p_n + \left( \frac{D_n}{L_n} \right) n_p \right] \quad (2.18)$$

### 2.7.3 Kapasitans

DC gerilim üzerine bindirilmiş düşük genlikli AC sinyali, p-n eklemine kontaklarına uygulandığında, p-n eklemi paralel plakalı kondansatör gibi algılanır. Bu durumda sığa;

$$C = \frac{\epsilon_s S}{W_D} \quad (2.19)$$

olacaktır. Burada,  $W_D$  fakirleşme bölgesi genişliği,  $\epsilon$  yarıiletkenin permitivitesi.

$W$  ters gerilime bağlı olduğundan  $C$  voltajla değişebilir kapasitanstır. Düz besleme için, bir DC sinyalinin üzerine bindirilmiş olan AC sinyalinin değişimi azınlık taşıyıcı dağılımının depolanan yüklerinde değişimlerinden etkilenir. Boşluk enjeksiyonunun egemen olduğu bir düz beslenmiş pn diyodu,  $n$  bölgesinde depolanan boşluklardan dolayı yüklerin tekrar dağılımı için gerekli  $\tau_p$  RC zamanı ile birlikte AC sinyale cevap verir.

Düz beslemede  $V \gg kT/q$  için

$$I = I_0 e^{qV/kT} \quad (2.20)$$

Yazılabilir. Bu denklemde  $V$ 'ye göre türev alınırsa, AC iletkenlik;

$$G_{ac} = q/kT I_s e^{qV/kT} = q/kT I \quad (2.21)$$

Böylece yük tutma kapasitansı,  $C_s = \tau_p G$  is

$$C_s = \left( q \tau_p / kT \right) I \quad (2.22)$$

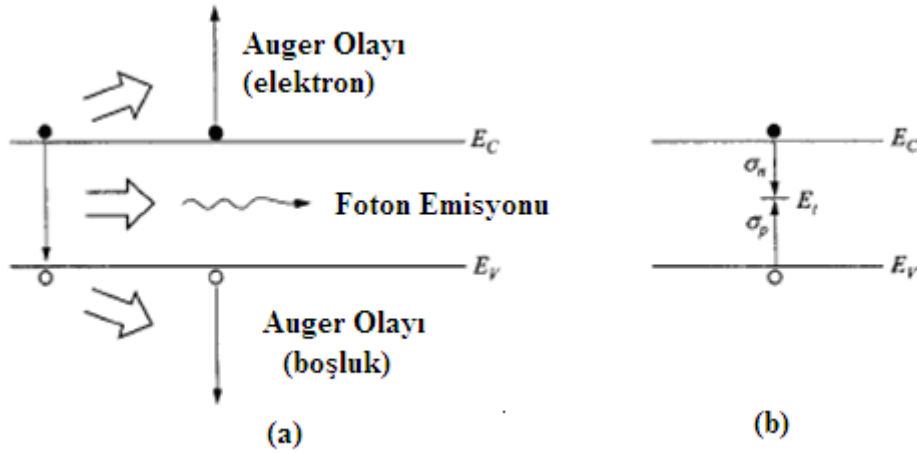
## 2.8 Yarıiletken Eklemlerde İletim Mekanizmaları

### 2.8.1 Rekombinasyon- Jenerasyon Akımı

Bir yarıiletkenin termal denge durumu bozulursa (örn.  $pn=n_i^2$ ), sistemin dengeye ulaşması için bazı süreçler gerçekleşir. Bu süreçler  $pn>n_i^2$  olduğunda rekombinasyon ve  $pn<n_i^2$  olduğunda termal jenerasyon olarak adlandırılır. Şekil-18'de banttan banda elektron-boşluk rekombinasyonu görülmektedir. Elektron enerjisi iletim bandından değerlik bandına geçerken bir fotonun yayınlanmasıyla veya enerjinin başka bir serbest elektrona veya boşluğa (Auger süreci) transfer edilmesiyle korunur. Banttan banda geçişler direkt bant aralıklı yarıiletkenler için, genelde 3-4. grup bileşikler, daha olasıdır. Bu tip geçişler için rekombinasyon hızı, elektron ve boşluk konsantrasyonlarının çarpımı olarak verilir.

$$R_e = R_{ec}pn \quad (2.23)$$

$R_{ec}$  terimine rekombinasyon sabiti denir, termal jenerasyon hızı  $G_{th}$  ile ilişkilidir.



Şekil 2.18 Rekombinasyon süreci (tersi jenerasyon) (a) Banttan banda rekombinasyon. (b) Tek seviyeli tuzaktan rekombinasyon (SZE M. S., 2007)

$R_{ec}$  sıcaklığın bir fonksiyonudur ve aynı zamanda yarıiletkenin bant yapısına bağlıdır. Direkt bant aralıklı bir yarıiletken, banttan banda geçişlerde daha etkilidir,  $R_{ec}$  katsayısı indirekt bant aralıklı yarıiletkenden ( $R_{ec} \sim 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ ) çok daha büyüktür,  $\sim 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ . termal dengede,  $pn=n_i^2$ ,  $R_e=G_{th}$  ve net geçiş hızı  $v_t(=R_e-G_{th})$  sıfıra eşittir. Düşük seviyeli enjeksiyonda, bu durum fazla taşıyıcıların  $\Delta p=\Delta n$  çoğunluk taşıyıcılarından daha azdır, n-tipi malzeme için  $p_n=p_{no}+\Delta p$  ve  $n_n \sim N_D$ , net geçiş hızı,

$$v_r = R_e - G_{th} = R_{ec} \quad pn - n_i^2$$

$$\approx R_{ec} \Delta p N_D \equiv \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (2.24)$$

Burada boşluklar için taşıyıcı ömrü,

$$\tau_p = \frac{1}{R_{ec} N_D} \quad (2.25)$$

Ve p-tipi malzemede,

$$\tau_n = \tau_p = \frac{\sigma_n + \sigma_p}{\sigma_n \sigma_p \nu_{th} N_t} \quad (2.26)$$

Si ve Ge gibi yarıiletkenlerde dolaylı bant aralıklarında, baskın geçişler bulk tuzaklar yoluyla rekombinasyon/jenerasyon, yoğunluk  $N_t$  ve enerji  $E_t$  bant aralığını temsil eder. (Şekil 2.18b). Tek seviye rekombinasyon iki süreçle anlatılabilir, elektron yakalama ve boşluk yakalama. Net geçiş hızı Shockley-Read-Hall istatistiği ile açıklanabilir.

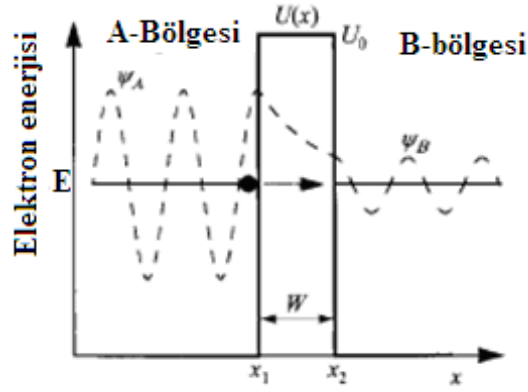
$$v_r = \frac{\sigma_n \sigma_p \nu_{th} N_t \quad pn - n_i^2}{\sigma_n \left[ n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]} \quad (2.27)$$

### 2.8.2 Tünelleme

Tünelleme bir kuantum mekaniksel olgudur. Klasik mekanikte taşıyıcılar tamamen potansiyel duvarlarıyla sınırlandırılmışlardır sadece bu taşıyıcılar bariyerlerden yüksek enerjiye sahip olduklarında, termoiyonik emisyon durumunda, engelden kaçabilirler. Kuantum mekaniğinde, bir elektron dalgafonksiyonu ile temsil edilir. Dalgafonksiyonu sonlu potansiyel yüksekliğinde duvarda aniden sonlanmaz ve bariyerin içine nüfuz edebilir (Şekil 2.19) Elektronun sonlu yükseklikte ve genişlikte bariyer boyunca tünellemesinin olasılığı sıfır değildir.

Tünelleme olasılığını hesaplamak için dalgafonksiyonu  $\psi$  Schrödiger denklemi ile tanımlanır.

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} (E - U(x)) \psi = 0 \quad (2.28)$$



Şekil 2.19 Dikdörtgen bir bariyerden tünelleleyen elektronun dalgafonksiyonları (SZE M. S.,2007)

$U_0$  yükseklikli ve  $W$  genişlikli basit bir dikdörtgen bariyer düşünürsek,  $\psi$ ,  $\exp(\pm ikx)$  formundadır, burada  $\exp \int ik(x)dx$   $k = \sqrt{2m^*(E - U_0)}/\hbar$ . Tünelleme için  $E$  enerji değeri,  $U_0$  bariyerinin altındadır, bu yüzden kök içindeki ifade negatiftir ve  $k$  imajinerdir.

Daha karmaşık bariyer şekilleri için, Schrödinger denkleminin basitleştirilmesi WKB(Wentzel-Kramers-Brillouin) yaklaşımı ile yapılır, eğer ki potansiyel  $U(x)$  çok hızlı değişmiyorsa. Bu durumda dalga fonksiyonu  $\exp \int ik(x)dx$  formundadır. Tünelleme olasılığı,

$$T_t = \frac{|\psi_B|^2}{|\psi_A|^2} \approx \exp -2 \int_{x_1}^{x_2} |k(x)| dx$$

$$\approx \exp \left\{ -2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} U(x) - E} dx \right\} \quad (2.29)$$

Bilinen tünelleme olasılığı ile beraber, tünelleme akımı  $J_t$ , A bölgesinden hazır taşıyıcıların sayısının B bölgesindeki boş durumların sayısı ile çarpımından hesaplanabilir.

$$J_t = \frac{qm^*}{2\pi^2\hbar^3} \int F_A N_A T_t (1 - F_B) N_B dE \quad (2.30)$$

burada  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $N_A$  ve  $N_B$  sırasıyla ilgili bölgelerin Fermi-Dirac dağılımları ve durum yoğunluklarıdır.

### 2.8.3 Uzay Yüğü Limitli Akım (SCLC)

Bir yarıiletken de uzay yüğü katkılama konsantrasyonları ve serbest taşıyıcı konsantrasyonuyla tanımlanır.

$$\rho = (p - n + N_D - N_A)q \quad (2.31)$$

Bir yarıiletkenin nötr bölgesinde,  $n=N_D$  ve  $p=N_A$ , yani uzay yük yoğunluğu sıfırdır. Farklı malzemelerden oluşmuş eklemenin civarında, katkılama tipleri veya katkılama konsantrasyonları,  $n$  ve  $p$  sırasıyla  $N_D$  veya  $N_A$  dan fazla olabilir. Fakirleşme yaklaşımında,  $n$  ve  $p$  sıfır kabul edilir ve böylece uzay yüğü çoğunluk taşıyıcı seviyesine eşittir. Gerilim altında, taşıyıcı konsantrasyonları  $n$  ve  $p$ , dengedeki değerlerine göre artabilir. Enjekte olan  $n$  veya  $p$ , konsantrasyonun yanısıra, denge halindeki katkılama konsantrasyonun yanısıra daha büyükse, uzay yüğü etkisi gerçekleşir. Enjekte olan taşıyıcılar bu yüzden uzay yükünü ve elektrik alan profilini kontrol eder. Bu bir alanın akımı yönlendirdiği,  $\nu = \mu\mathcal{E}$ , alanı arttıran bir geri akış mekanizmasına sebep olur. Uzay yüğü etkisi az katkılı malzemelerde daha yaygındır ve fakirleşme bölgesinin dışında gerçekleşir.

Uzay yüğü etkisinin varlığında, eğer akım enjekte olan taşıyıcıların sürüklenme bileşeniyle ağır basıyorsa, buna uzay yüğü limitli akım denir. Bu bir sürüklenme akımı olduğu için, elektron enjeksiyon durumuyla ifade edilir,

$$J = qn\nu \quad (2.32)$$

Uzay yüğü yine enjekte olmuş taşıyıcıların Poisson denkleminin şu formda olmasıyla tanımlanır,

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = \frac{qn}{\epsilon_s} \quad (2.33)$$

Taşıyıcı hızı elektrik alanla, şiddetine bağlı farklı fonksiyonlarla ilgilidir. Düşük alan mobilite rejiminde,

$$\nu = \mu\mathcal{E} \quad (2.34)$$

Hız-doyum rejiminde,  $\nu_s$  alandan bağımsızdır. Ultra-kısa örneğin veya zaman skalasının limitinde, balistik rejim vardır, burada hiç saçılma yoktur ve,

$$\nu = \sqrt{\frac{2qV}{m^*}} \quad (2.35)$$

Denklem 2.35-2.38'den, uzay yükü limitli akımı mobilite rejiminde (Mott-Gurney Yasası) çözülebilir;(ref4)

$$J = \frac{9\epsilon_s \mu V^2}{8L^3} \quad (2.36)$$

Hız-doyum bölgesinde,

$$J = \frac{2\epsilon_s \nu_s V}{L^2} \quad (2.37)$$

Balistik bölgede (Child-Langmuir yasası)

$$J = \frac{4\epsilon_s}{9L^2} \left( \frac{2q}{m^*} \right)^{1/2} V^{3/2} \quad (2.38)$$

Burada L, örneğin uzunluğu.

#### 2.8.4 Difüzyon

Bir eklemden, taşıyıcı konsantrasyonunun bir gradyenti bulunuyorsa, sistemin dengesini korumak için yüksek taşıyıcı konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye bir yük göç ile bir difüzyon süreci gerçekleşir. Bu taşıyıcı akısı bir difüzyon akımı meydana getirir.

$$J_n = qD_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (2.39a)$$

$$J_p = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (2.39b)$$

Burda  $D_n$  difüzyon sabiti denir.

Fiziksel olarak, difüzyon, saçılmadan olduğu gibi, taşıyıcıların rastgele termal hareketinden oluşur. Bu yüzden;

$$L = \sqrt{D\tau} \quad D = \nu_{th} \tau_m \quad (2.40)$$

olur.

Difüzyon sabitiyle mobilite arasında da bir ilişki vardır, bu ifade, n tipi ve p tipi yarıiletkenler için,

$$D_n = \left( \frac{kT}{q} \right) \mu_n \quad (2.41a)$$

$$D_p = \left( \frac{kT}{q} \right) \mu_p \quad (2.41b)$$

Bunlar Einstein denklemi olarak bilinir. Dejenere olmayan yarıiletkenler için geçerlidir. 300K'de,  $kT/q=0.0259V$  ve  $D$  değerleri, mobilite değerlerinden elde edilebilir.

Difüzyonla ilgili başka bir parametre de difüzyon uzunluğudur. Bu da  $L = \sqrt{D\tau}$  ile verilir.

### 2.8.5 Termiyonik Emisyon:

Termoiyonik emisyon akımı, çoğunluk taşıyıcılarının akımıdır ve daima bir potansiyel bariyeriyle birlikte bulunur. Bariyerin şekli değil yüksekliği önemlidir. En genel aygıt, Schottky bariyer diyodu ve metal-yarıiletken eklemdir. Kontrol mekanizması olarak termoiyonik emisyon için ayırıcı özellik, bariyer tabakası içindeki çarpışma veya sürüklenme difüzyon sürecinin ihmal edilebilir olmasıdır.

Ayrıca, bariyer genişliği ortalama serbest yoldan daha ince olmalıdır veya üçgen bariyer durumunda, bariyerin eğimi, ortalama serbest yol içinde enerjide bir  $kT$  düşüşü olacak şekilde yüksek olmalıdır. Ayrıca taşıyıcılar bariyerden enjekte olduktan sonra, o bölgedeki difüzyon akımı limit etkeni olmamalıdır. Bu yüzden bariyerin arkasındaki bölge başka bir n-tipi yarıiletken veya metal tabaka olmalıdır.

Fermi-Dirac istatistiğine göre, elektronların yoğunluğu (n-tipi taşıyıcı için) iletim bant kenarının üzerinde enerjilerinin fonksiyonu olarak üstel olarak düşer. Sonlu bir sıcaklıkta (sıfır olmayan), herhangi sınırlı bir enerjide taşıyıcı yoğunluğu sıfır değildir. Termal olarak oluşan taşıyıcıların bu kısmı artık bariyer tarafından sınırlanmazlar bu yüzden termoiyonik emisyon akımına katkıda bulunurlar. Bariyerin üzerinden geçen toplam elektron akımı;

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.42)$$

Olur burada,  $\phi_B$  bariyer yüksekliği ve  $A^{**}$  Richardson sabiti olarak bilinir ve etkin kütlenin bir fonksiyonudur.  $A^{**}$  kuantum mekaniksel tünelleme ve yansıma ile geliştirilebilir.

$$A^{**} = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.43)$$

## 2.9 Eklemlerin elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

### 2.9.1 I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir diyotun akım gerilim ölçümü yapıldığında diyotun doğrultma özelliği olduğu görülür, yani düz besleme gerilimi altında akım iletilirken, ters beslemede akım neredeyse hiç iletilmeyecektir. Bir diyotun düz besleme uygulanması durumunda, üzerinden geçireceği akım gerilimle üstel olarak değişir. Akım skalası logaritmik olarak alındığında, termiyonik emisyonun gerçekleştiği düşük gerilim bölgesinde, yani gerilimin  $3kT/q$  değerinden küçük olduğu kısımda, lineer bir bölge görülür. Bu bölge saptanıp eğimi hesaplanarak diyotun o sıcaklık için idealite sabiti ve bariyer yüksekliği hesaplanabilir.

İdeal diyot denklemi,

$$I = I_0 e^{qV/kT} - 1 \quad (2.44)$$

$$\eta = \frac{q}{AkT} \quad (2.45)$$

$$\phi_B = -\frac{kT}{q} \left[ \ln I_0 - \ln(S \times A^{**} \times T^2) \right] \quad (2.46)$$

Burada q:elektronun yükü, k:Boltzman sabiti, A:logI-V eğrisinin lineer kısmının eğim değeri,  $\phi_B$  : Bariyer yüksekliği,  $A^{**}$  :Richardson sabiti.

### 2.9.2 C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Admittans analizi DC sinyalin üzerine bindirilmiş bir ac sinyali ile gerçekleşir. İnce filmlerin C-V ölçümlerinden eklem bariyer yüksekliği ve yarıiletkenin katkılama miktarı belirlenebilir. Alınan değerlerden  $1/C^2$ -V grafiği çizildiğinde, eğri ekstropole edilerek gerilim eksenini kesmesi sağlanır. Ekseni kestiği nokta oluşma potansiyelini verir. Bu doğrunun eğim değeri ile de Denklem 2.7'den katkılama miktarı belirlenebilir.

### 2.9.3 Yasak Enerji Bant Aralığının G-T- $\omega$ Yöntemiyle Belirlenmesi

Yarıiletkenlerin enerji bant aralığının UV-görünür geçirgenlik ölçümleriyle belirlenmesi  $E_G$  1eV'dan küçük olduğu durumlarda zorlaşır. Elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına uyarılması yerine, Schokley-Read Hall istatistiği  $E_G$ 'nin elektriksel yöntemlerle belirlenmesinin göz önüne alınır. İstatistiğe göre, aktivasyon enerjisinin değişimiyle jenerasyon rekombinasyon ve difüzyon mekanizmaları beklenir. İlk süreç orta sıcaklıkta, aktivasyon enerjisi bant aralığının yarısı olduğu durumda baskındır, ikinci durum yüksek sıcaklıklarda aktivasyon enerjisinin bant aralığına eşit olduğu durumda baskındır. AC iletkenlik (kapasitans)-sıcaklık frekans G(C-T- $\omega$ ) ölçümlerine dayanarak yarıiletkenin, bant aralığı belirlenebilir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada n-tipi Si (100) ve p-tipi Si (111) taşıyıcılar üzerine katodik ark yöntemi ile oda sıcaklığında  $\text{CrSi}_2$  ince filmler büyütülmüştür. Bunun için önce taşıyıcılar temizlenerek kaplamaya hazır hale getirilmiş olup daha sonra katodik ark yöntemiyle filmler kaplanarak yapı analizleri, yüzey morfolojileri ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

#### 3.1 $\text{CrSi}_2$ İnce Filmlerin Oluşturulması

##### 3.1.1 Altlıkların Hazırlanması

Kaplama işleminde kullanılacak olan (100) yönelimine sahip n-tipi ve (111) yönelimine sahip p-tipi Si altlıklar 50x50x3 mm boyutlarında kesilerek hazırlandı. Kullanılan n-tipi Si altlıkların öz dirençleri 5-10  $\Omega\text{-cm}$  ve p-tipi Si altlıkların öz dirençleri 10.5-19.5  $\Omega\text{-cm}$ 'dir.

Altlıklar kaplama öncesi RCA temizleme yöntemi göz önünde bulundurularak temizlendi.

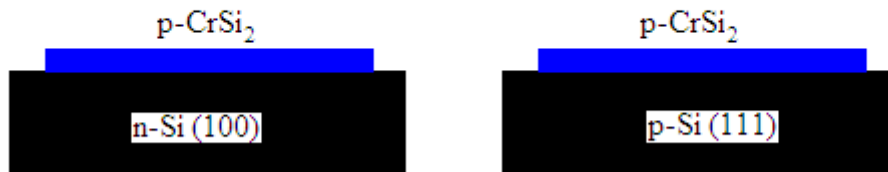
RCA temizleme yöntemi:

1. Altlıklar trikloretilen ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_3$ ) içinde 5 dakika kaynatılır.
2. Ardından saf suya tutulur.
3. Ultrasonik sistemde çalkalama işlemine tabi tutulur.
4. Altlıklar  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$  (1/1 oranındaki) çözeltisine 10 dakika batırılır.
5. Altlıklar  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  (2/1 oranındaki) çözeltiye 5 dakika süresince batırılır.
6. Ardından altlıklar 5 dakika boyunca saf suyla yıkanır.
7. Son olarak altlıklar  $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$  (1/10 oranındaki) çözeltiye 30 saniye batırılıp çıkarılır.
8. Ardından tekrar saf suda 15-20 dakika yıkanır

Temizleme işlemi biten altlıklar kaplama işlemi için hazırlanmış özel bir taşıyıcıya; taşıyıcı da hedefin karşısına yerleştirildi.

### 3.1.2 Katodik Ark Yöntemi İle Kaplama

CrSi<sub>2</sub> filmler, (100) yönelimine sahip n-tipi silisyum ve (111) yönelimine sahip p-tipi silisyum altlıklar üzerine katodik ark fiziksel buharlaştırma yöntemi kullanılarak İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında hazırlanmıştır. Taşıyıcıların yüzeylerinde herhangi bir pürüz kalmaması için ilk olarak RF gerilimde bir dakika boyunca 600V, daha sonra 30 saniye boyunca 800V ve son olarak 1 dakika boyunca 1000V potansiyel farkı uygulandıktan sonra kaplama aşamasına geçilmiştir. Kaplama işlemi 1.5 dakika boyunca 100V gerilimde,  $6.6 \times 10^{-3}$  Pa basınç altında, sabit 20V-50A ark akımında gerçekleştirilmiştir. Kaplama sırasında oluşan Cr plazması hedeften düzgün ve homojen olarak yayılmıştır. Daha sonra gerilim 1000V değerine çıkarılarak 4 dakika boyunca yayındırma işlemiyle, krom atomlarının silisyumun içine nüfuz etmesi sağlanarak CrSi<sub>2</sub> filmler elde edilmiştir. Bu işlem sırası bütün CrSi<sub>2</sub> filmlerin üretimi için aynı standart uygulanarak yapılmıştır. Kaplama işlemi sonrası yapılan 4 dakikalık tavlama işlemi tamamıyla aynı vakum ortamı içerisinde olmakla birlikte hiçbir şekilde ikincil bir adımda ısıtım işlemi uygulanmamıştır. Filmler iki farklı kalınlıkta büyütülerek, yapısal analiz için kalın filmler üretilirken (800-900 nm) elektriksel özellikleri incelemek için heteroeklemlerin film kalınlıkları (40-50 nm) daha ince üretilmiştir.



Şekil 3.1 Katodik ark yöntemiyle n-Si ve p-Si altlıklar üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmler

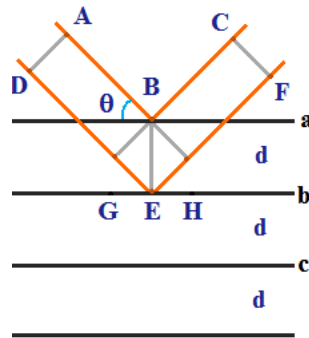
### 3.2 Eklemlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

#### 3.2.1 XRD Yöntemi ile Filmlerin Analizi

XRD yöntemi kristal katıların yapısal özelliklerinin incelenmesinde kullanılan güçlü analitik bir yöntemdir. X ışını radyasyonunun dalgaboyu “ $\lambda$ ” ile numunenin atomik düzlemleri arasındaki uzaklık “ $d$ ” arasındaki ilişki Bragg Yasası ile verilmektedir. Birbirlerine paralel ve eşit mesafeli atomik düzlemlerden kırılan X ışınları bu düzlemlerden yansıyorlarmış gibi hareket etmektedirler. XRD’ de kaydedilen yansıma tek bir düzlemden değil paralel düzlemler takımından gelen yansımaların toplamıdır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 1, 2 ve 3 numaralı düzlemlerden yansıyan dalgaların kaydedilebilmesi için birbirlerini kuvvetlendirmeleri yanı aynı fazda olmaları gerekmektedir. İki ışının aynı fazda olması için yol farkı  $\lambda$ ’nın tam katlarına eşit olmalıdır.  $GE+EH=n\lambda$  ve  $GE=d\sin\theta$ ,  $EH=d\sin\theta$  olduğu şekilden görülmektedir. Yerlerine koyulursa “Bragg Yasası” olarak bilinen,

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.1)$$

eşitliği elde edilir.

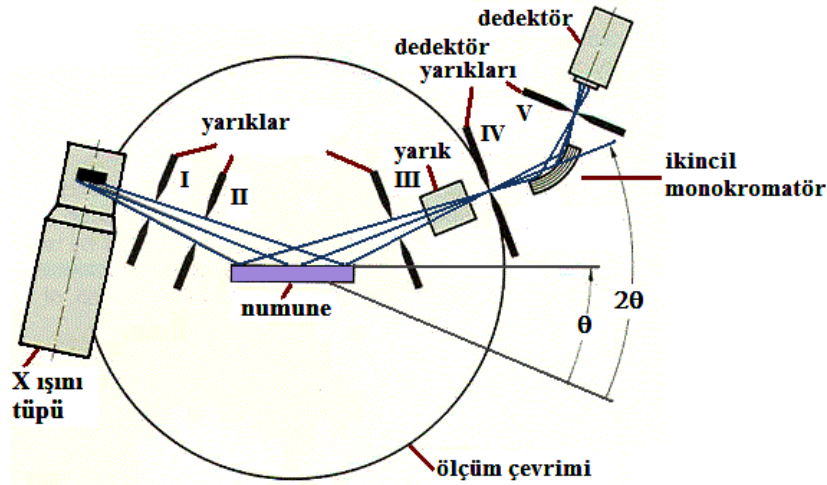


Şekil 3.2 X Işınlınının Atomik Düzlemlerden Kırınımı

“ $n$ ” yansımanın mertebesi ve “ $\theta$ ” difraksiyon veya Bragg açısı olarak adlandırılmaktadır ve numune düzlemi ile X ışını kaynağı veya yansıma doğrultusu arasındaki açı olarak değerlendirilir.

Difraksiyon desenleri farklı atomların girişimi sonucu olduğundan farklı bileşikler için difraksiyon deseni tektir. Şekil 3.2’den görüldüğü gibi Bragg açısı numune ile X ışını kaynağı arasındaki açı olduğundan yansıyan X ışını demeti ile dedektör arasında açı  $2\theta$  kadardır. Oluşan desen  $2\theta$  açılara karşılık gelen yansıma şiddetlerinin serisini içeren difraksiyon desenindeki her bir pik numune içerisindeki spesifik düzlem setlerine karşılık gelmektedir.

XRD desenindeki her bir pikin FWHM (yarı yükseklikteki tam genişlik) kristal boyutu ve yapıdaki örgüdeki biçim değişiklikleri (örgü distorsiyonu) hakkında bilgi taşımaktadır. Eşitlik (3.1)'de verilen Bragg Bağıntısı, farklı kristal yapılar için örgü parametreleri ile düzlem Miller indislerine ait parametreler arasındaki bağıntılar birleştirilerek tanecik boyutu hakkında bilgi veren Scherrer bağıntısı bulunmaktadır.



Şekil 3.3 XRD Sisteminin Şematik Gösterimi

CrSi<sub>2</sub> filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi, Yüzey Teknolojisi ve Korozyon Laboratuvarı'nda bulunan "Philips PW3710" model XRD cihazı ile 40 kV - 40 mA'de üretilen 0.154 nm dalgaboylu Cu-K<sub>α</sub> ışını kullanılmıştır. X ışını giriş açısı 0.5° olarak alınmıştır. (2θ) 20-100°, arasındaki açılar her biri 0.02° olan adımlar ile taranmıştır ve her bir adımda 0.25 saniye boyunca ölçüm alınmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen XRD spektrumları JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) XRD veri analizi kartı ile karşılaştırılmıştır. Eşitlik 3.3'te verilen Scherrer bağıntısı kullanılarak filmlerin tanecik boyutları hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0.94\lambda}{W_p \cos \theta} \quad (3.2)$$

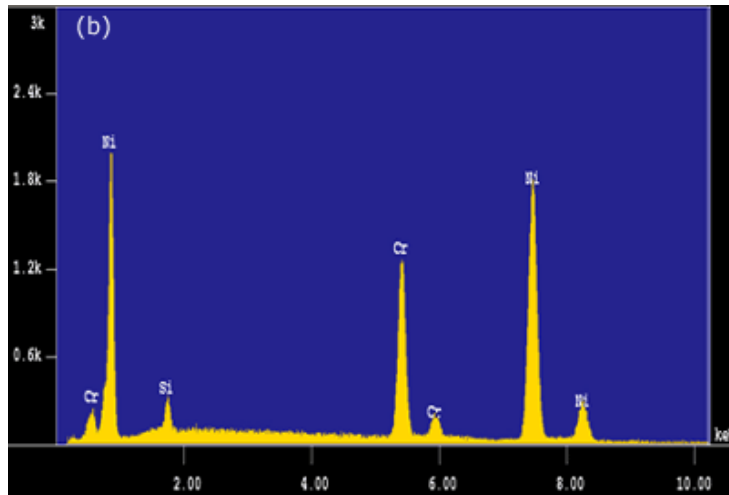
$\lambda$  kristal örgüsüne düşen X-ışınlarının dalgaboyu,  $\theta$  örgüye düşen X-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı,  $d$  kristaldeki atomik düzlemler arası mesafe ve  $n$  yansıma derecesi,  $(hkl)$  düzlemlere ait miller indisleri,  $D$  taneciklerin ortalama çapı,  $W_p$  pikin yarı yüksekliğinin tam açısal genişliğinin (FWHM) radyan cinsinden ifadesidir.



Şekil 3.4 Philips PW3710 Model XRD Cihazı

### 3.2.2 EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) Yöntemi ile Filmlerin Analizi

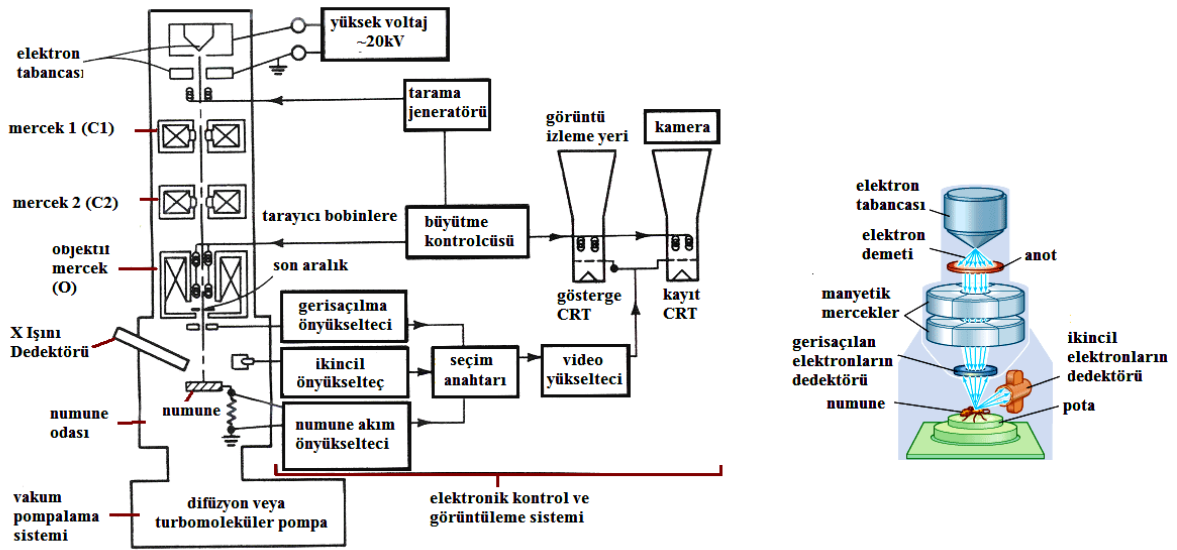
$\text{CrSi}_2$  ince filmlerin yapısında bulunan krom ve silisyum elementlerinin oranları Joel 5410 model taramalı elektron mikroskobuna bağlı Norvor su soğutma dedektörlü NORAN 2100 EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) analiz sistemi ile elde edilmiştir. EDS analiz sisteminde elektron demeti ile malzeme içindeki atomlar yüksek iyonize edildiklerinde karakteristik X-ışını oluştururlar. Dedektör tarafından algılanan X-ışınları elektrik sinyaline dönüştürülerek belirli şiddetlere sahip piklerden oluşan X-ışını enerji histogramı haline dönüştürülür. Bu histogram sayesinde malzemedeki her bir elementin tipi ve miktarı belirlenir.



Şekil 3.5 Örnek bir EDS analizi (Saha R.K., 2006)

### 3.2.3 CrSi<sub>2</sub> Filmlerin FEG-SEM ile İncelenmesi

Taramalı elektron mikroskopisinin, katı malzemelerin mikro yapısal özelliklerinin analizinde kullanılan etkili yöntemlerden biri olduğu bilinmektedir. FEG-SEM yönteminde odaklanmış yüksek enerjili bir elektron demeti numunenin yüzeyi boyunca tarama yapmaktadır. Elektron demeti ve numune arasındaki etkileşimler sonucu oluşan radyasyonların ölçümü, numune hakkında önemli bilgiler vermektedir. FEG-SEM görüntüleme tekniğinde iki tip radyasyon kullanılmaktadır. Bunlar, kaynağın yüksek enerjili elektronları ile zayıf bağlı iletim bandı elektronları arasındaki etkileşmeden oluşan “ikincil elektronlar” ve kaynak demeti numuneye çarptığında numunenin elektronlarının elastik saçılmasından oluşan “geri saçılma (backscattering) elektronları”dır. Bu iki tip radyasyonun sinyallerinin modülasyonu CRT’de (katot ışıını tüpü) bir görüntü olarak gösterilmektedir ve numunenin yüzey morfolojisi hakkında bilgiler sunmaktadır. Şekil 3.6’da FEG-SEM ölçüm sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.6 FEG-SEM Ölçüm Sisteminin Şematik Gösterimi

CrSi<sub>2</sub> filmlerin yüzeysel özelliklerini belirlemek için İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalürji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elektron Mikroskobu Laboratuvarı’nda bulunan ve Şekil 3.7’de gösterilen “JEOL 7000F FEG-SEM” model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Büyütme oranı x10000, x30000, x40000, x50000

kullanılarak çekilen FEG-SEM görüntüleri için 2kV ile 5 kV enerjili elektron demeti kullanılmıştır.



Şekil 3.7 JEOL 7000F FEG-SEM Model Taramalı Elektron Mikroskobu

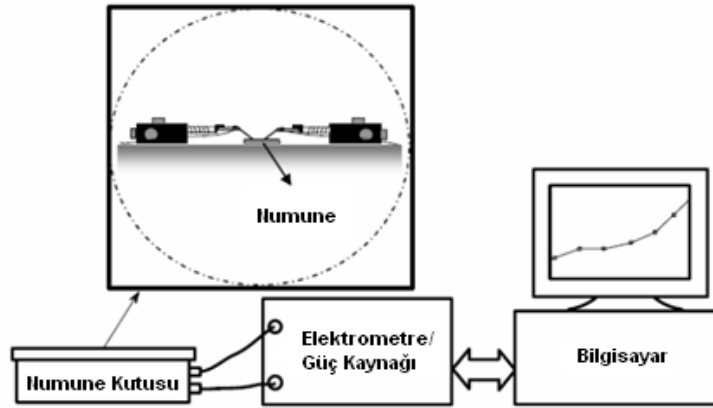
### 3.4 Eklemlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 3.4.1 Akım-Gerilim Ölçümleri

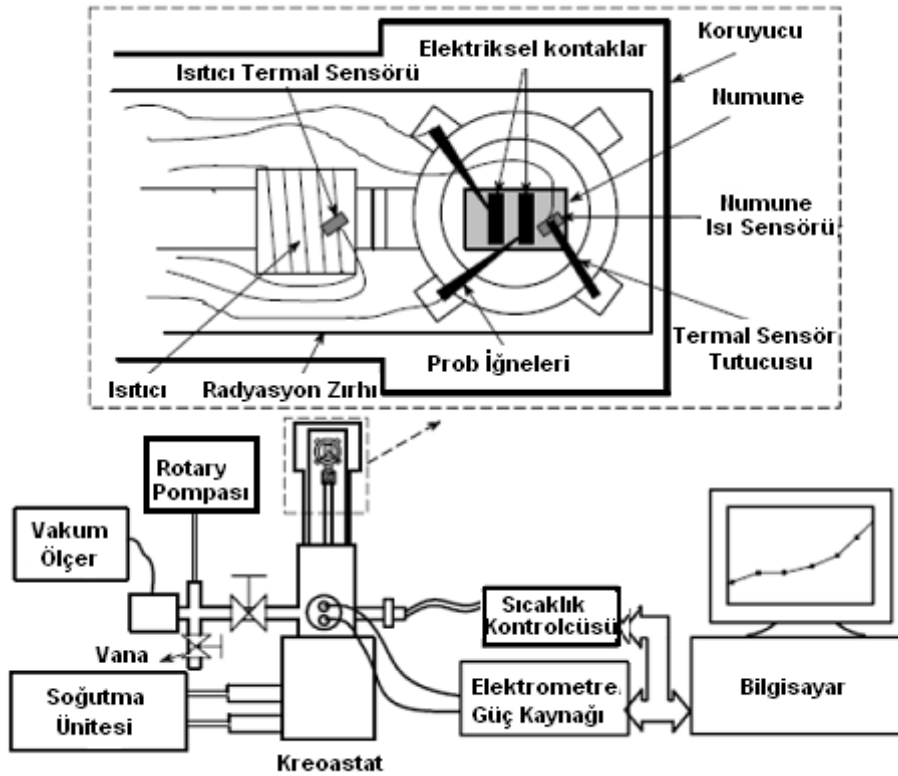
Hazırlanan örneklerin oda sıcaklığındaki akım-gerilim ölçümleri Şekil 3.8’te gösterilen sistemle, sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri ise Şekil 3.9’de gösterilen sistemle elde edilmiştir. Bunun için akım-gerilim sisteminde Keithley 6517 marka elektrometre kullanılmıştır.

Oda sıcaklığındaki iletkenlik ölçüm sistemine bazı öğelerin eklenmesiyle sıcaklığa bağlı iletkenlik ölçüm sistemi elde edilir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 3.9’da verilmiştir. Bu sistemde soğutucu olarak He kreostat (ARS, S204) kullanılmıştır. Bu sistem 13–450°K aralığındaki sıcaklık kontrolüne olanak verir. Örneklerin elektrik kontağı, kreostatın kuyruğundaki iki iletken iğne ile yapılır. Sıcaklığı algılamak için iki termal sensör bulunmaktadır. Bunlardan biri ısıtıcının üzerine yerleştirilir ve diğeri de örneğin sıcaklığını ölçmek için örneğin üzerine yerleştirilir. Sıcaklık kontrolü LakeShore 331 model sıcaklık kontrol aygıtı ile sağlanmıştır. Radyasyon, düşük sıcaklıklara ulaşılmasını engellediği için

ölçüm sistemi radyasyon ve vakum kalkanı ile çevrelenmiştir.



Şekil 3.8 Oda sıcaklığında DC iletkenlik ölçüm sistemi



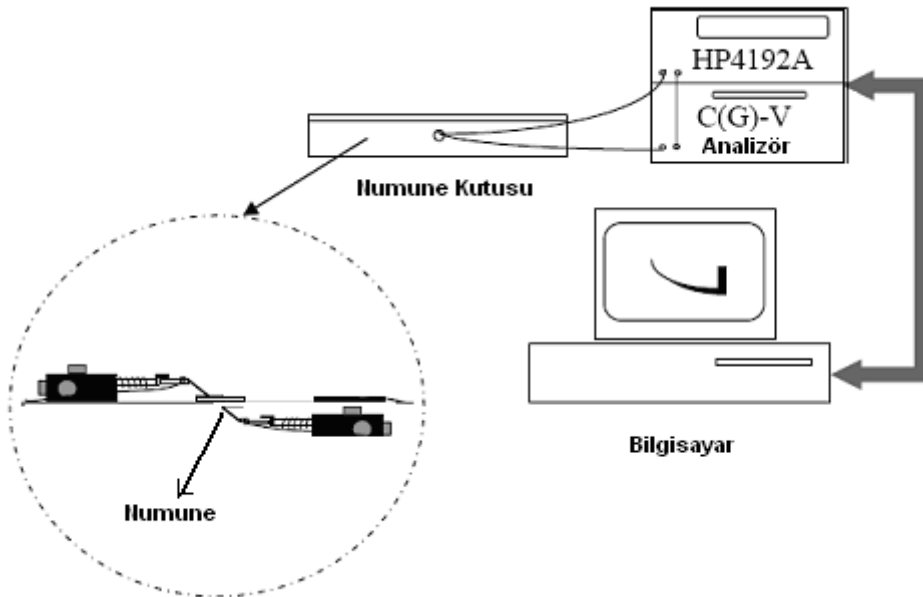
Şekil 3.9 Sıcaklığa bağlı DC iletkenlik ölçüm sistemi

p ve n-tipi taşıyıcılar üzerine kaplanan  $\text{CrSi}_2$  filmlerin akım-gerilim ölçümleri, elektriksel kontaklar yapıldıktan sonra sıcaklık bağlı olarak alınmıştır.

Filmin iki yüzüne de Ag pasta ile omik kontak yapıp akım-gerilim ölçümleri bu kontaklar üzerinden yapılmıştır.

### 3.4.2 $C(G/\omega)$ -V ve $C(G/\omega)$ -T (Kapasitans ve İletkenlik) Ölçümleri

Admittans yöntemi yüke duyarlı spektroskopik bir tekniktir. Burada DC gerilimin üzerine bindirilmiş ac sinyali incelenen örneğe uygulandığında, örneğin üzerinden geçen AC akım ile bulunur. Bu AC akım, sığa ve iletkenlik kısımları içerisinde barındırır. Ayrıca örneklerin frekans duyarlılığı uygulanan dış DC voltajın AC modülasyonu (frekansı) ile izlenebilir. Kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinin yapıldığı bilgisayar kontrollü sistem HP4192A model empedans analizör ve kHz-MHz frekans aralığında farklı kapı biaslarında admitans sıcaklık taramasını kaydetmek için kullanılan bir sıcaklık kontrol ünitesi ile (Lakeshore 331) bir Helyum kapalı daire kreostat (Material Research System CSW-2025) cihazlarından oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Daha sonra 1kHz-1mHz frkans aralığında seçilen farklı ön elektrot gerilimleri için örneklere sıcaklık taraması yapılmıştır. Sıcaklık taraması sırasında sıcaklık belirli bir yüksek değere ayarlanıp, 2 K'lık düşüşlerle tarama gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler bilgisayar kontrollü LABVIEW programıyla yapıp çeşitli gerilim değerlerinde admitansın ( $C$  ve  $G/\omega$ ) sıcaklık ve frekans taraması elde edilmiştir.



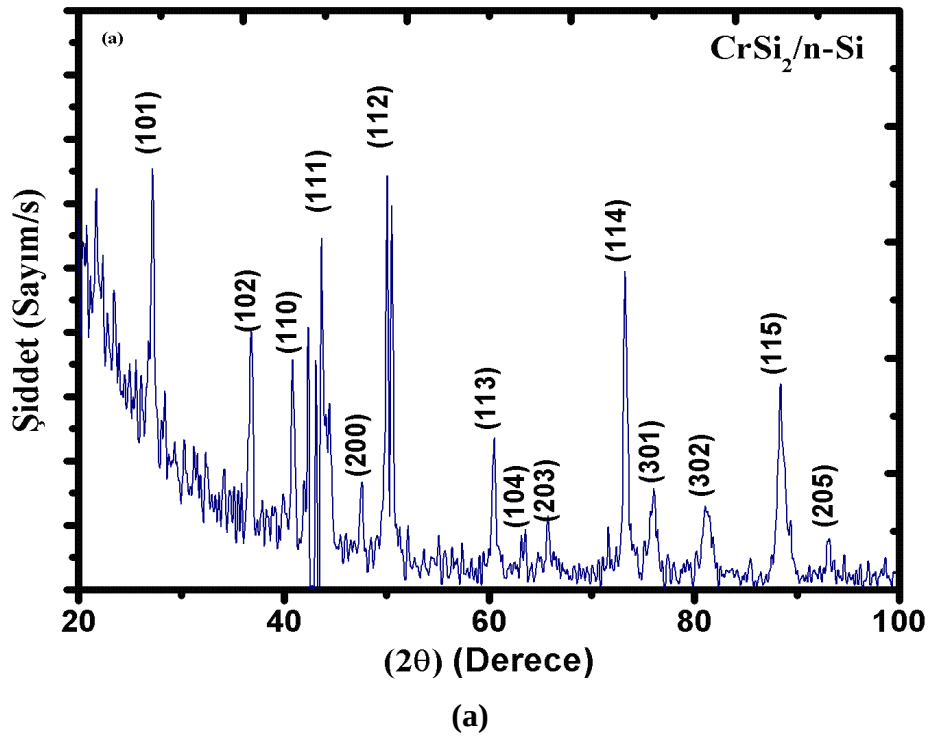
Şekil 3.10 Sıcaklığa ve frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi.

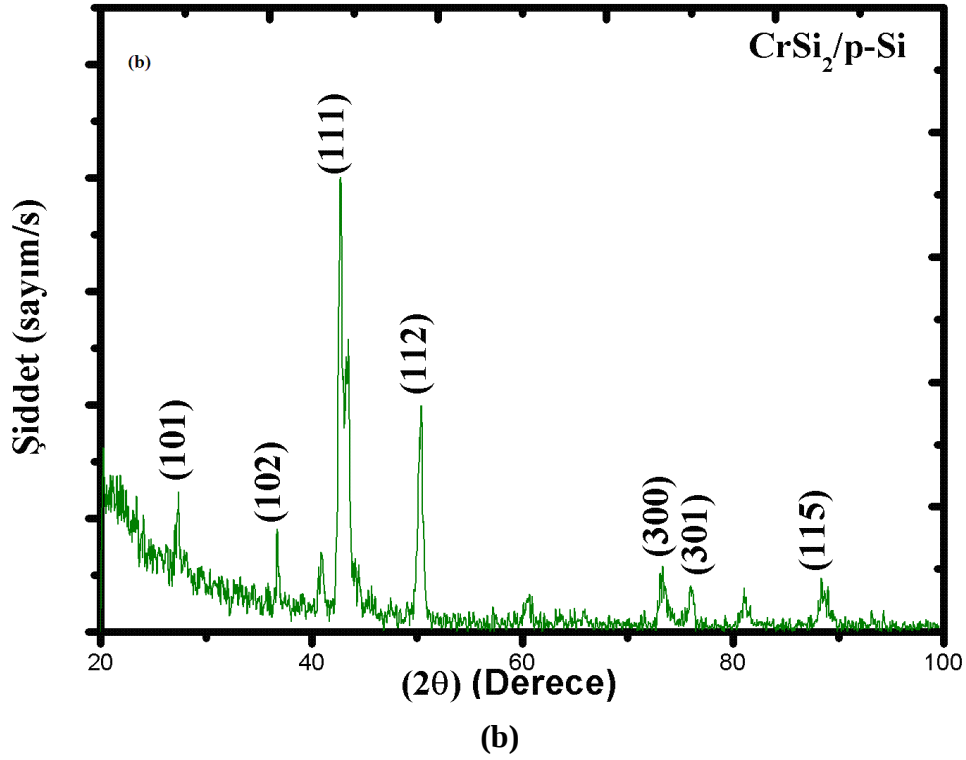
## 4. BULGULAR

### 4.1 CrSi<sub>2</sub> Filmlerin Yapısal Özellikleri

#### 4.1.1 CrSi<sub>2</sub> Filmlerin XRD Analizi Sonuçları

Katodik ark yöntemiyle (100) yönelimli n ve (111) yönetime sahip p tipi silisyum taşıyıcılar üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmlerin XRD analizleri sonucu filmlerin, hegzagonal yapıda olduğu ve polikristal olarak kristalize oldukları anlaşılmıştır. Elde edilen XRD desenindeki pikler (101), (102), (110), (003), (111), (112), (113), (114), (300), (301), (302), (115) ve (205) düzlemlerine, bunlar da sırasıyla  $2\theta = 27.1^\circ$ ,  $36.5^\circ$ ,  $40.5^\circ$ ,  $42.3^\circ$ ,  $43.1^\circ$ ,  $50.2^\circ$ ,  $60.4^\circ$ ,  $73.1^\circ$ ,  $74.1^\circ$ ,  $75.8^\circ$ ,  $80.9^\circ$ ,  $88.5^\circ$  ve  $93.1^\circ$  saçılma açılarına karşılık gelir.





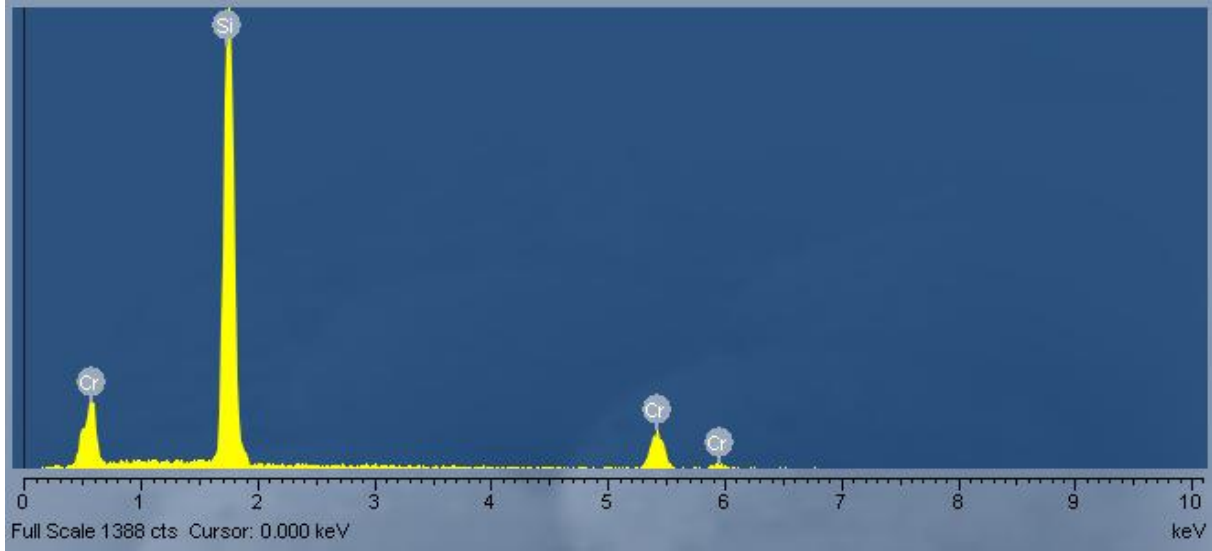
Şekil 4.1 Katodik ark yöntemiyle (a) n-Si (b) p-Si altlıklar üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmlerin XRD desenleri

Denklem 3.2’de verilen Scherrer formülü yardımıyla n tipi Si üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> moleküllerin tanecik boyutu n-tipi silisyum üzerine büyütülmüş numune için (112) ve (111) düzleminden sırasıyla 45 ve 56.55 nm, p-tipi silisyum üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> moleküllerin tanecik boyutu ise aynı düzlemler için sırasıyla 22.5 ve 37.4 nm olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlara bakıldığında tanecik boyutlarının sistematik olduğu gözlenmiştir. Büyütülen filmin yüzey özellikleri taşıyıcının özelliklerine bağlıdır ve büyütme esnasında taşıyıcı yüzey özelliklerine göre gelen atomlar adacıklar halinde büyürken bu büyüme ancak birbirlerinin tane sınırlarına ulaşıncaya kadar devam edebilir bu da tanecik boyutlarını etkileyen faktörlerden biridir. Beklendiği üzere (100) yönelimli n-tipi silisyum altlıklarda CrSi<sub>2</sub> tane boyutlarının, (111) yönelimli p-tipi Si altlıklar üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmlerin tane boyutlarına göre daha büyük olduğu görülmüştür.

#### 4.1.2 CrSi<sub>2</sub> Filmlerin EDS Sonuçları

Şekil 4.3’de n tipi ve p tipi Si üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmlerin 10 keV enerjili elektronlarla elde edilen EDS sonuçları verilmiştir. Tepe noktalarının altında kalan alanların toplamı, atomların yüzde toplamına karşılık gelmektedir.

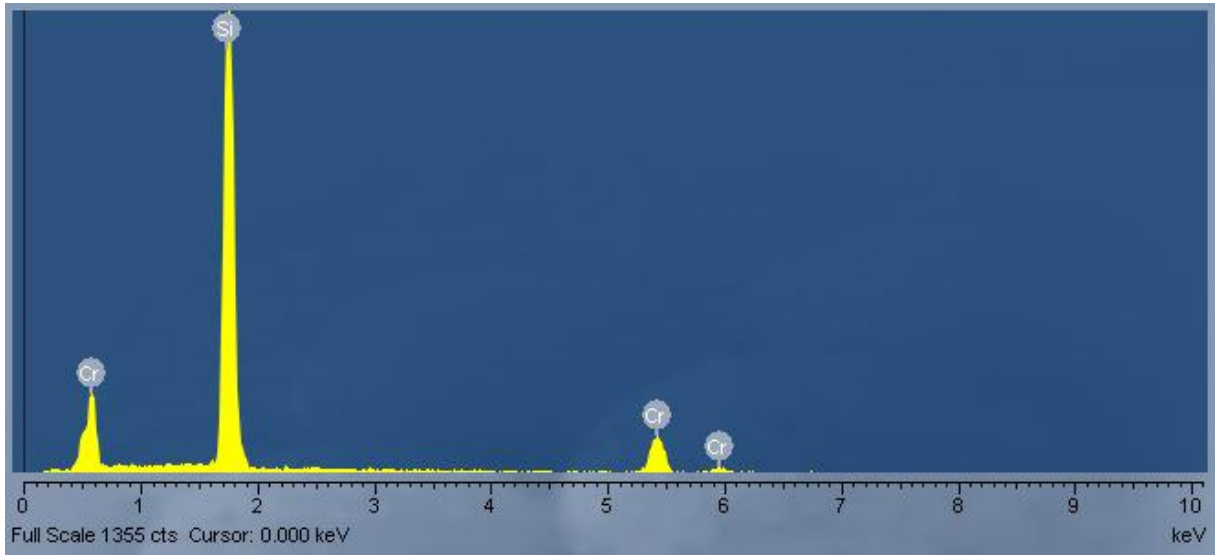


Şekil 4.2 (a) CrSi<sub>2</sub>/n-Si filmin EDS analizi

EDS yöntemi ile belirlenen CrSi<sub>2</sub> filmlerde Cr ve Si atomlarının oranları Çizelge 4.1’de hem CrSi<sub>2</sub>/n-Si hem de CrSi<sub>2</sub>/p-Si heteroyapılar için gösterilmiştir.

Çizelge 4.1(a) n- tipi Si üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> filmin EDS analizi

| CrSi <sub>2</sub> | ATOM (%) | W(%)  |
|-------------------|----------|-------|
| Si                | 67.77    | 53.18 |
| Cr                | 32.23    | 46.82 |



Şekil 4.2 (b) CrSi<sub>2</sub>/p-Si filmin EDS analizi

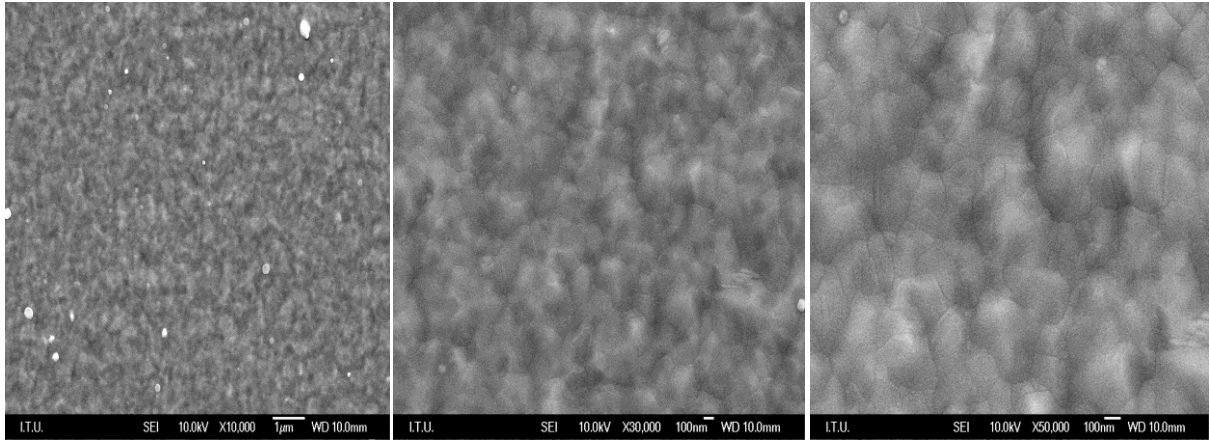
Çizelge 4.1(b) p-tipi Si üzerine büyütülen CrSi<sub>2</sub> Filmin EDS analizi

| CrSi <sub>2</sub> | ATOM (%) | W(%)  |
|-------------------|----------|-------|
| Si                | 67.71    | 53.11 |
| Cr                | 32.29    | 46.89 |

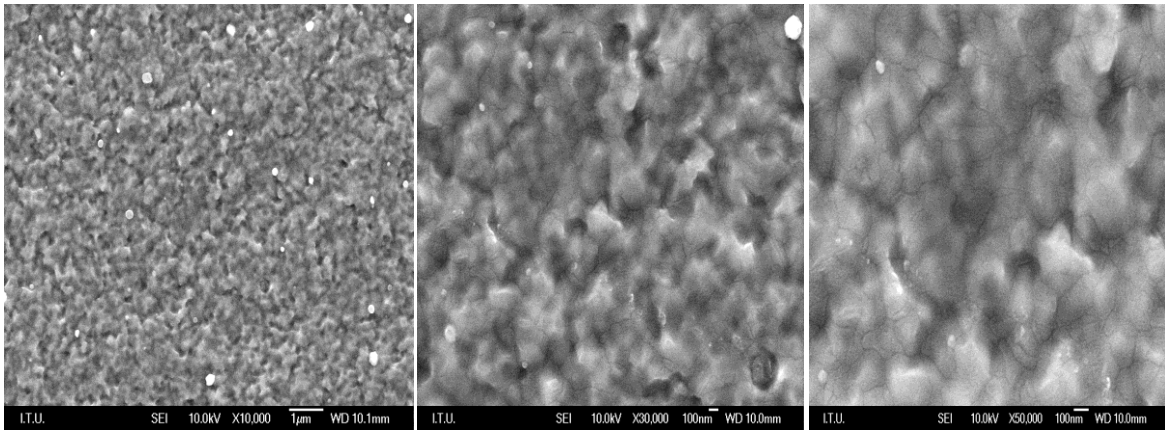
CrSi<sub>2</sub>'in stokiyometrik yapısına göre iki silisyum atomuna karşılık bir krom atomu olması gerektiğini bilinmektedir. EDS analizi sonuçlarına göre, Çizelge 4.1'den de görüldüğü üzere farklı taşıyıcılar üzerine büyütülen filmlerin krom içerme yüzdesi %32 civarında olup, yapıda atomik yüzde olarak iki silisyum atomuna karşılık yaklaşık bir krom atomu bulunmaktadır. Bu sonuç da büyütülen filmin CrSi<sub>2</sub> yapısında olduğunu doğrulamaktadır.

#### 4.1.3 CrSi<sub>2</sub> Filmlerin FEG-SEM Sonuçları

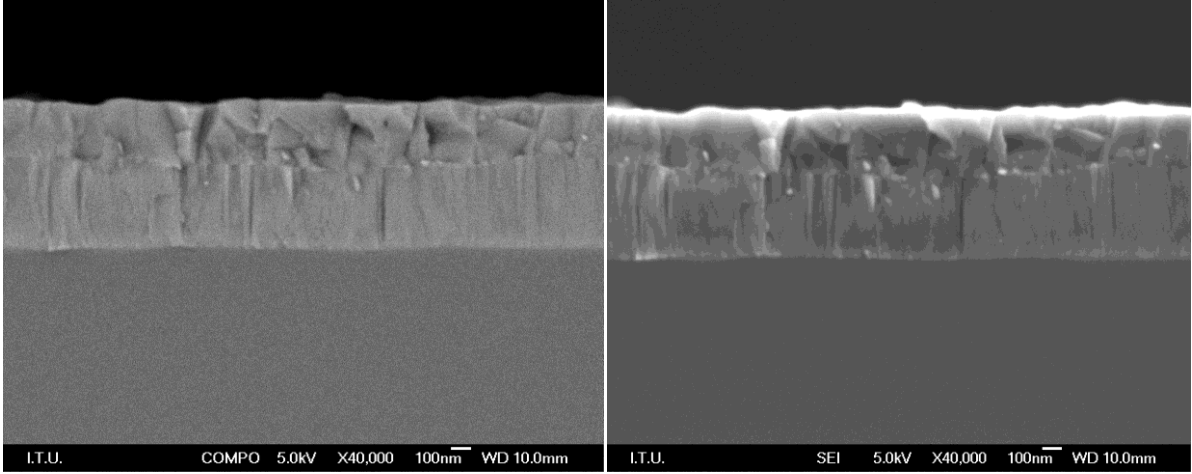
CrSi<sub>2</sub> ince filmlerin kalınlık ve morfolojik yapı incelemeleri FEG-SEM analizleriyle yapılmıştır ve Şekil 4.2’de CrSi<sub>2</sub>/n-Si ve CrSi<sub>2</sub>/p-Si numuneler için arakesit görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.2a-b’de görüldüğü gibi büyütülen filmlerin yüzey görüntülerinden, filmlerin homojen bir şekilde büyüdüğü ve tane boyutlarının 100-150 nm civarı olduğu anlaşılmaktadır. Arakesit görüntülerinden büyütülen filmlerin kalınlıklarının 900 nm civarı olduğu Şekil 4.2c-d’den belirlenmiştir. Arakesitlerden alınan gerisaçılma elektron görüntüsü, CrSi<sub>2</sub> filmlerin kolonsal yapıda büyüdüğünü ve kolon kalınlıklarının 60-100nm civarı olduğunu göstermiştir.



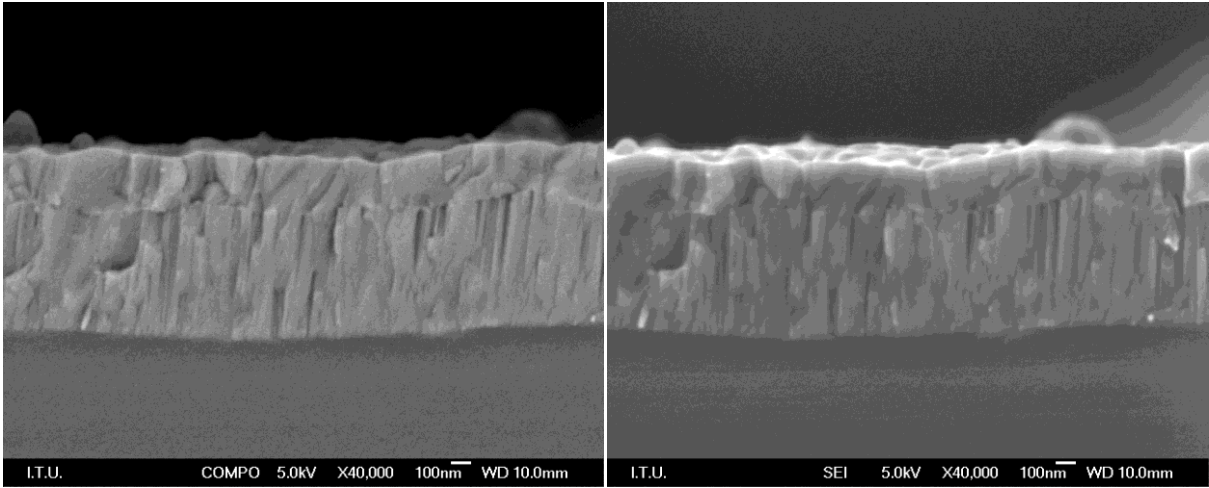
Şekil 4.3 (a) CrSi<sub>2</sub>/n-Si filmin yüzey görüntüsü (10000-30000-50000 büyütmede)



Şekil 4.3 (b) CrSi<sub>2</sub>/p-Si filmin yüzey görüntüsü (10000-30000-50000 büyütmede)



Şekil 4.3 (c)  $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$  filmin arakesit görüntüsü (10000 ve 50000 büyütmede)

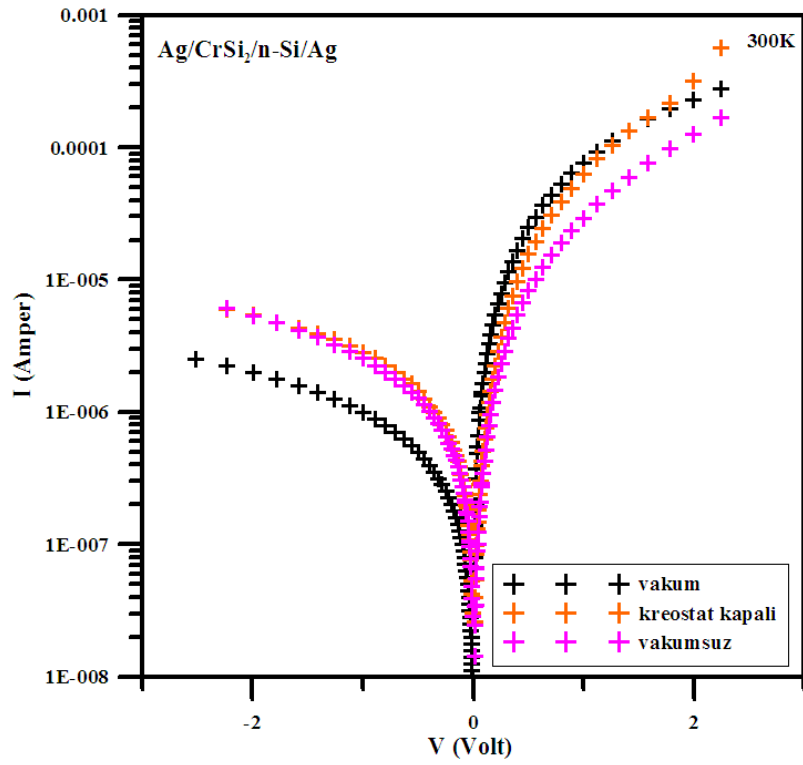


Şekil 4.3 (d)  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  filmin arakesit görüntüsü (40000 büyütmede)

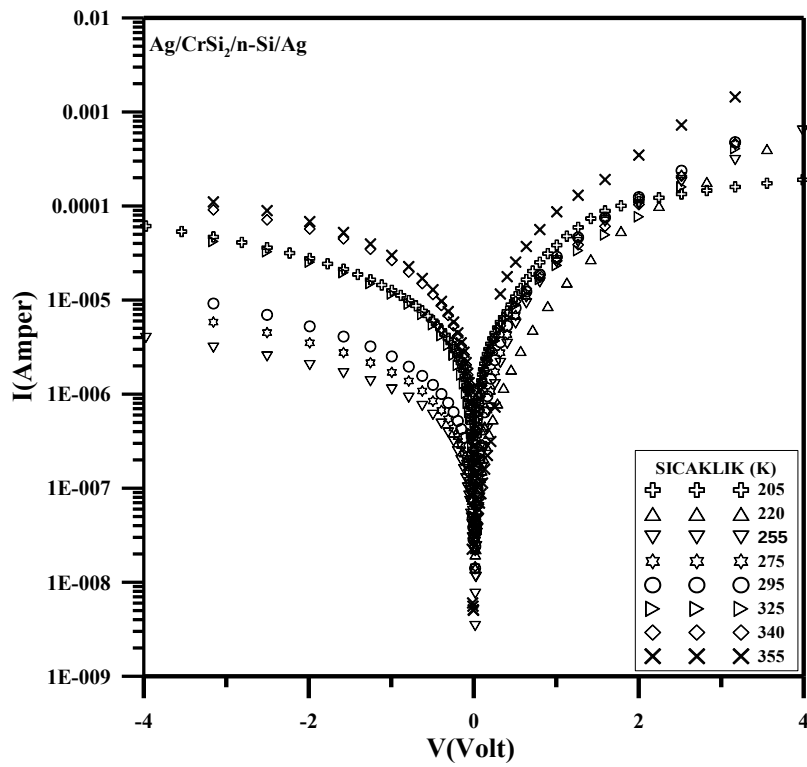
## 4.2 Ag/CrSi<sub>2</sub>/Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri

### 4.2.1 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri

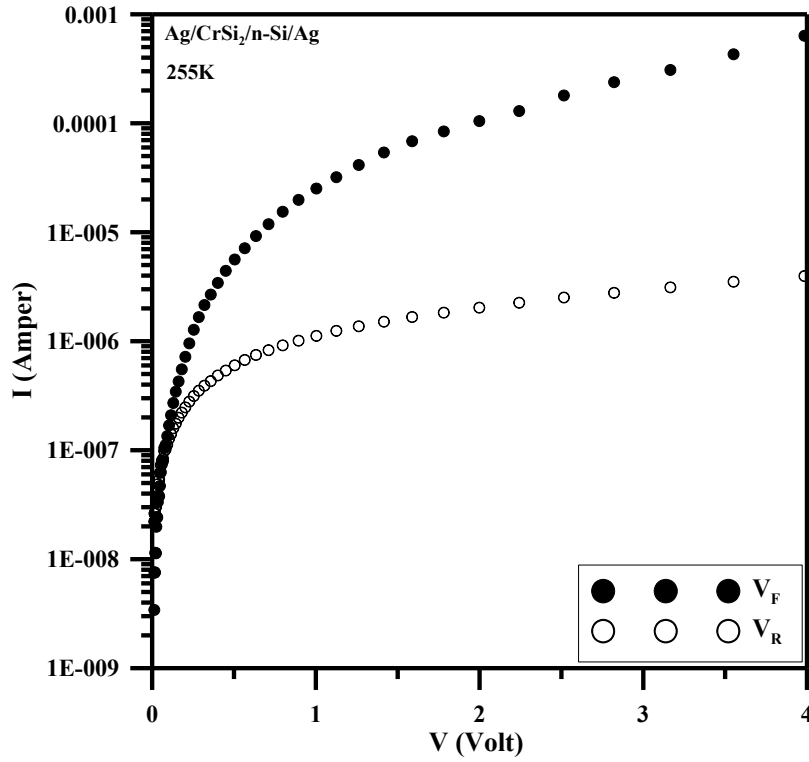
Katodik ark yöntemi ile üretilen CrSi<sub>2</sub>/n-Si ve CrSi<sub>2</sub>/p-Si eklemlerin vakumsuz ortamda, kreostat kapalı iken ve vakum ortamında, sıcaklığa bağlı akım gerilim ölçümleri geniş bir sıcaklık aralığında karanlık koşullarda yapılmıştır. Ölçümler sonucunda üç farklı zamanda yapılan deneylerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.4). Farklı zamanlarda yapılan ölçümlerin aynı sonuçları vermesi deneyin tekrarlanabilir olduğunun kanıtıdır. Bu da üretilen yapının kararlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca uygulanan gerilim değerlerine karşılık eklemden ölçülen akım değerinin sistematik olduğunu ve sadece eklemden geldiğini, dolayısıyla ölçüm aygıtlarından gelebilecek kaçak akımın önemsiz olduğunu göstermiştir. Birbirlerine çok yakın olmalarına karşın en iyi diyot karakteristiğinin vakum altında yapılan ölçümler sonucunda elde edildiği Şekil 4.4'den anlaşılmaktadır. Bu nedenle diğer tüm ölçümler vakum ortamında yapılmıştır. Vakum altında akım-gerilim ilişkisi hem düz hem de ters beslemede Şekil 4.4'de oda sıcaklığında gösterilmiştir. Anlaşılabacağı üzere, düz beslemede akımın ters beslemeye oranla daha fazla olduğu dolayısıyla eldeki p-n eklemin beklendiği üzere bir diyot davranışı sergilediği söylenebilir. Bütün bu verilerin ışığında, diyotun ideallik sabiti, bariyer yüksekliği gibi temel özelliklerinin yanı sıra, akımın iletim mekanizmaları, akım-gerilim ilişkisinin farklı sıcaklıklarda elde edilmesiyle hem CrSi<sub>2</sub>/n-Si hem de CrSi<sub>2</sub>/p-Si heteroeklemler için araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk önce n-tipi Si altlık üzerine kaplanmış CrSi<sub>2</sub> numune için I-V-T ölçümleri ve analizler ortaya konulacak daha sonra da benzer bir analiz p-tipi altlık üzerine hazırlanmış numune için tekrar edilecektir. Bu kapsamda Şekil 4.5'te I-V-T ölçüm sonuçları Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag için verilmiştir.



Şekil 4.4 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin oda sıcaklığında üç farklı ortamda, farklı zamanlarda ölçülen yarılogaritmik I-V karakteristikleri

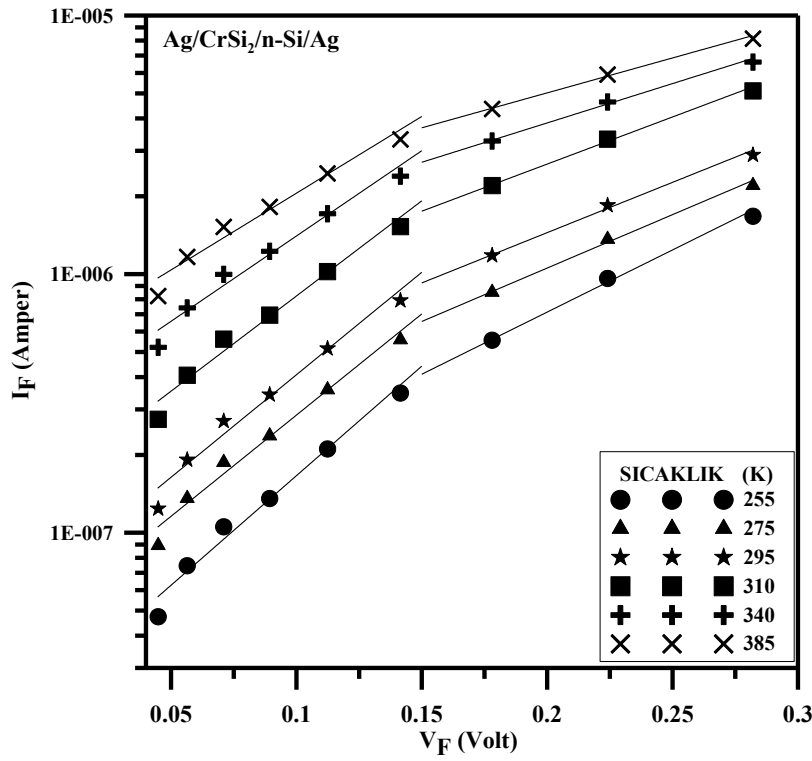


Şekil 4.5 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin vakum ortamında 205-355K sıcaklık aralığında yarılogaritmik I-V karakteristikleri



Şekil 4.6 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin 255K’de yarılogaritmik I-V karakteristiği

Doğrultma oranı  $\pm 2V$  için aydınlık-karanlık koşullarda  $10^3$  civarında olduğu Şekil 4.6’da görülürken, daha yüksek sıcaklıklarda bu oranın bozulmaya başladığı gözlenmiştir. Ters gerilimdeki akım değerleri Şekil 4.5’e göre birbirinden ayrışık ve sıcaklığa ilk bakışta bağlı olduğu gözükmemektedir. Halbuki düz beslemede ise, birbiri üzerine binen ve sanki sıcaklığa bağlı olmayan akım, ekleminden geçmektedir. Bu nedenle, akım-gerilim ilişkisinin düz ve ters besleme için ayrı ayrı incelenmesinde yarar vardır. Şekil 4.7’de, geniş bir sıcaklık aralığındaki düz beslemeye karşılık gelen akım değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin 255-385K sıcaklık ve düşüt gerilim altında akım gerilim yarılogaritmik  $I_F$ - $V_F$  karakteristiği

Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi düşük gerilimin iki ayrı bölgeden oluştuğu, diğer bir deyişle, iki akım mekanizmasının etkin olduğu anlaşılmaktadır. 0.35V'dan düşük gerilim değerleri için, akım gerilimle üstel olarak artmaktadır. Bu bölgede, akım gerilim ilişkisinin,

$$I_F = I_0 \exp AV_F - 1 \quad (4.1)$$

ifadesiyle orantılı olduğu bilinmektedir.  $I_0$  doyma akımını belirtir ve

$$I_0 = SA^{**}T^2 \exp \left[ -\frac{q\phi_B}{kT} \right] \quad (4.2)$$

ifadesiyle değişir. Eşitlik 4.1'deki A eğimi temsil eder ve iletim mekanizmasına göre sıcaklığa bağlı olarak değişebilir ve Eşitlik 4.3 ile ifade edilir

$$A = \frac{d \ln I_F}{dV_F} \quad (4.3)$$

ve ideallik sabiti,

$$\eta = \frac{q}{kTA} \quad (4.4)$$

şeklinde verilir. Anlaşılabileceği üzere  $\eta$  ,  $\phi_B$  ve A diyodun performansı ile doğrudan ilişkilidir ve etkin akım mekanizmaları için ipuçlarını verir. Eğer akım, tünelleme akımı ise A sıcaklıktan bağımsız ve  $I_0$  'ın sıcaklığa bağlılığı,

$$I_0 \propto \exp -E_A/kT \quad (4.5)$$

ifadesiyle orantılı olur. Öte yandan, akım fakirleşme bölgesindeki rekombinasyon akımından oluşmuş ise,

$$A = \frac{q}{\eta kT} \quad (4.6)$$

olacaktır. İdealite değeri bu durum için 1 ve 2 aralığında bulunur.  $I_0$  ise sıcaklığa bağlı olarak

$$I_0 \propto \exp -E_G/\eta kT \quad (4.7)$$

ifadesiyle değişir. Difüzyon akımı etkin ise, A ve doyma akımı  $A = \frac{q}{kT}$  ve

$I_0 \propto \exp -E_G/kT$  ifadeleriyle değişir. Son olarak termoiyonik emisyon akımı için ise bu ifadeler,

$$A = \frac{q}{kT} \text{ ve } I_0 \propto \exp \left[ -\frac{\phi_B}{kT} \right] kT^{3/2} \quad (4.8)$$

şeklindedir.

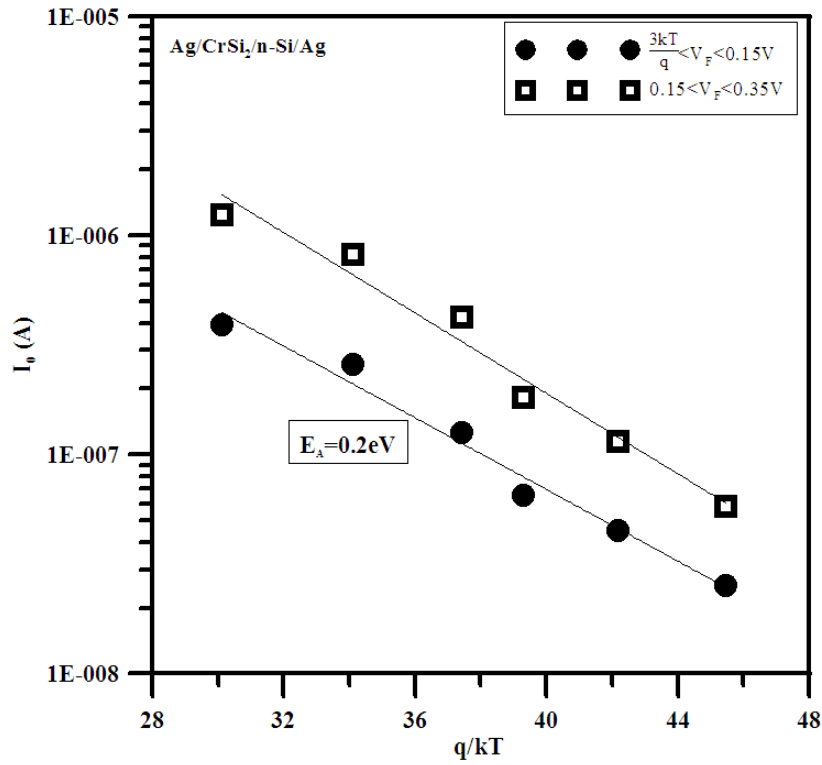
Tüm bu bilgilerin ışığında, Şekil 4.7 tekrar incelendiğinde  $3kT/q$ -0.15V gerilim aralığında A'nın sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir, bu da tünelleme akım mekanizmasını işaret eder. Gerilim 0.15-0.3V aralığında ise, eğim değerinin sıcaklığa bağlı olduğu görülmekte, bu da iletim mekanizmasının farklılaştığını ortaya koymaktadır. Bu bölgede etkin akım mekanizmasının rekombinasyon mekanizması olduğu düşünülmektedir. A'nın sıcaklığa göre değişimi, bahsedilen bölgeler için ayrı ayrı verilmiştir ve Çizelge 4.2'de ayrıntılı olarak görülmektedir. Beklendiği üzere, birinci gerilim bölgesinde neredeyse sıcaklığa bağlı olmayan A değerleri bulunurken, ikinci bölgede kaydadeğer bir sıcaklık bağıllığı hem Şekil 4.7'den hem de Çizelge 4.2'den anlaşılmaktadır. Ayrıca, ikinci gerilim bölgesinden bulunan ideallik sabitinin 1.5-2 aralığında hesaplanması, rekombinasyon akım mekanizmasının etkin olduğu

düşüncesini güçlendirmektedir.

Çizelge 4.2 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemine eğim ve doyma akımı değerleri

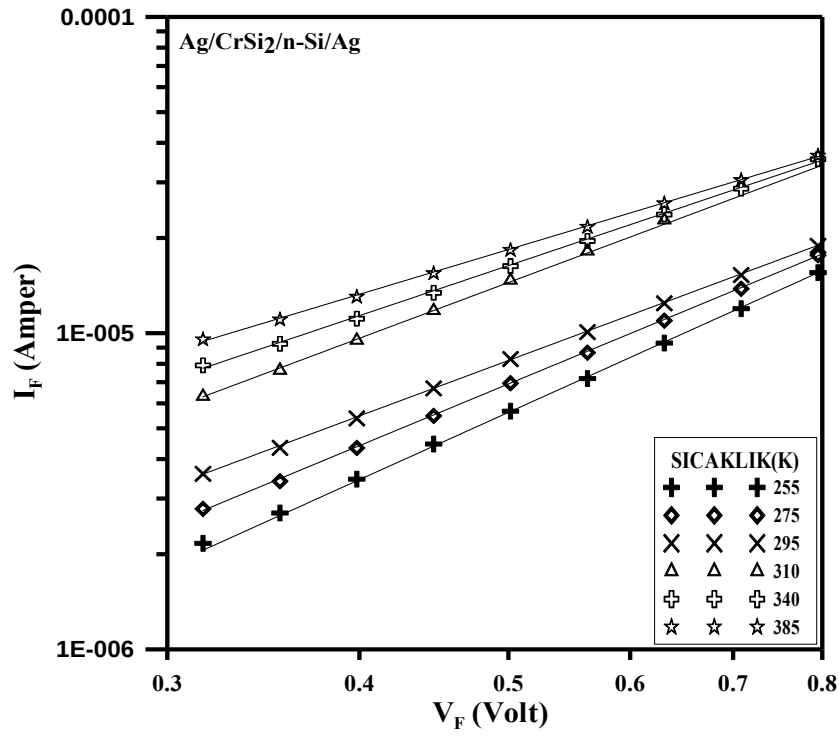
| $3kT/q < V_F < 0.15 \text{ V}$ |                      |                             | $0.15 < V_F < 0.30 \text{ V}$ |                             |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| T (K)                          | A (V <sup>-1</sup> ) | $I_0 \times 10^{-8}$ (Amp.) | A (V <sup>-1</sup> )          | $I_0 \times 10^{-8}$ (Amp.) |
| 255                            | 18.9                 | 2.55                        | 13.2                          | 5.81                        |
| 275                            | 18.6                 | 4.51                        | 11.2                          | 11.6                        |
| 295                            | 18.2                 | 6.58                        | 10.4                          | 18.4                        |
| 310                            | 18.7                 | 12.6                        | 9.24                          | 42.5                        |
| 340                            | 17.2                 | 25.8                        | 7.75                          | 82.4                        |
| 385                            | 17.3                 | 39.4                        | 7.00                          | 125                         |

Her iki bölgedeki  $I_0$  değerinin  $1/T$ 'ye göre değişim grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiş ve grafikten aktivasyon enerjisi 0.2 eV olarak bulunmuştur. Her ne kadar  $I_0$  -  $1/T$  değişimi rekombinasyon akım mekanizması için beklenen bir durum olsa da, tünelleme mekanizması için çelişkili bir sonuçtur. Başka bir deyişle, tünelleme mekanizması için akımın sıcaklıkla orantılı olması gerekir, tersi ile değil. Burada tünelleme mekanizmasının hakim olduğu durumda rekombinasyon mekanizmasının da mevcut olduğu ve iki akım mekanizmasının akımı beraber ilettiği söylenebilir. Gerçekten de bu iddia ilk kez Matsuura tarafından ileri sürülmüş ve a-Si:H/p-a-Si:H heteroeklem için akım mekanizmaları ortaya konmuştur (Matsuura 1984).



Şekil 4.8 CrSi<sub>2</sub>/n-Si I<sub>0</sub>-q/kT grafiği

Öte yandan 0.35V'u aşan gerilim değerleri için etkin akım mekanizması uygulanan gerilimin kuvvetiyle orantılı; yani  $I \propto V^m$  olduğu Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Burada m sıcaklıkla ters orantılı olarak değişen bir nicelik olup, çalışılan sıcaklık aralığında değerinin 2.3 ile 1.46 arasında değiştiği tabloda gösterilmiştir.  $m > 2$  olduğu durumda uzay yükü limitli iletim (SCLC) mekanizması olduğu bilinmekte olup ayrıca  $m \geq 1.5$  olduğu durumlar için kusur limitli SCLC (Trap Limited SCLC) akım mekanizmasının varlığından söz edilmektedir (Lampert M. A., 1970).

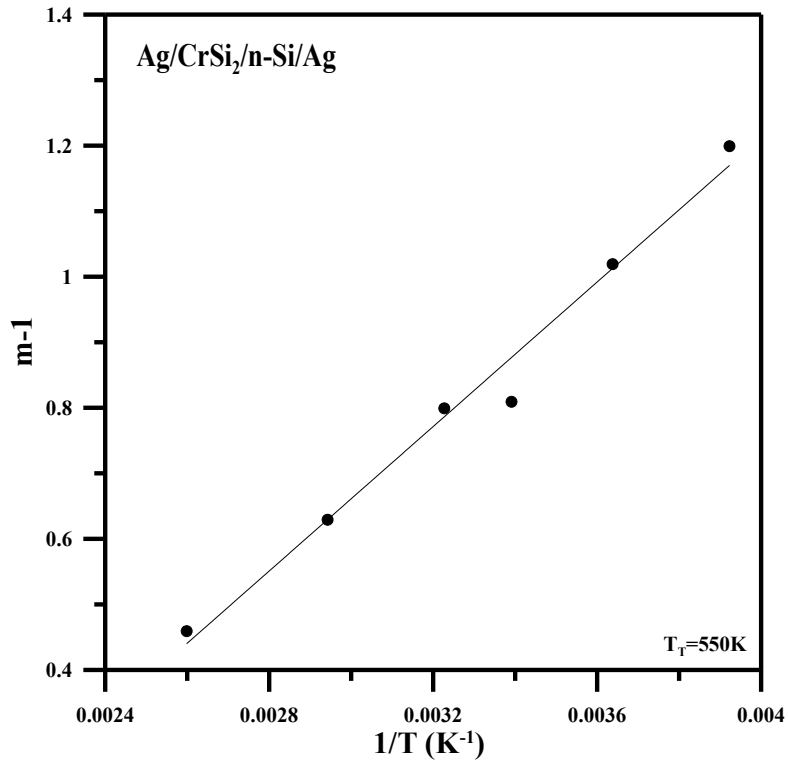


Şekil 4.9 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin 255-385K sıcaklık aralığında yüksek gerilimlerde yarılogaritmik  $I_F$ - $V_F$  karakteristiği

Ayrıca  $m = 1 + \frac{T_T}{T}$  olmakla beraber Şekil 4.10'da gösterildiği gibi  $m-1$ 'in  $1/T$ 'ye göre değişim grafiğinden  $T_T$  düzensizlik parametresi belirlenmiştir. Düzensizlik değeri aydınlık-karanlık koşullarda 550K olarak bulunmuştur, bu değer de 50 meV enerjiye karşılık gelir.

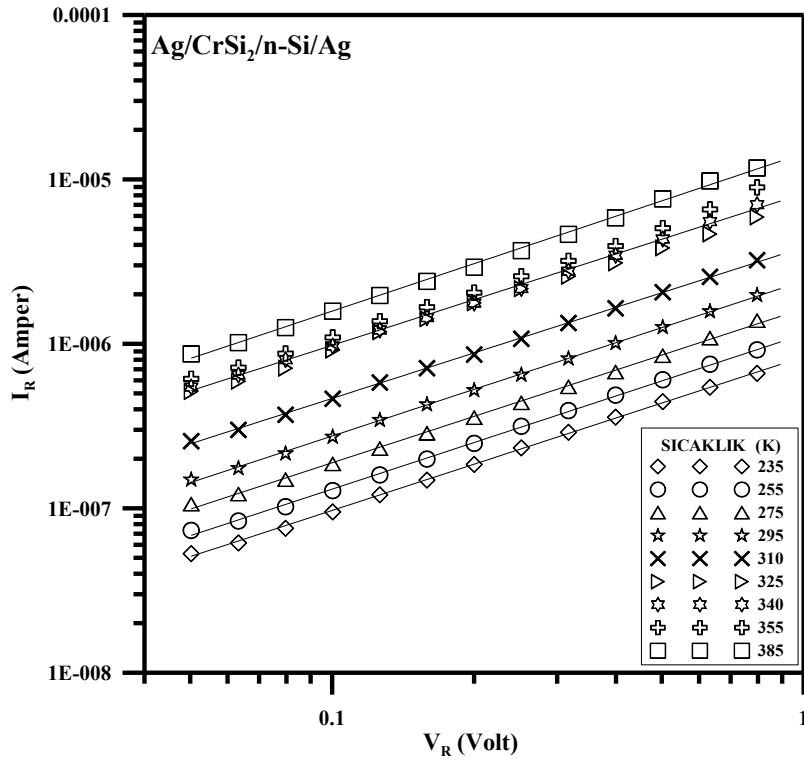
Çizelge 4.3 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin SCLC akım mekanizması için  $m$  değerleri

| T (K) | m    |
|-------|------|
| 255   | 2.20 |
| 275   | 2.00 |
| 295   | 1.81 |
| 310   | 1.80 |
| 340   | 1.64 |
| 385   | 1.46 |



Şekil 4.10 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklem için  $(m-1)-1/T$  grafiği

Ters besleme altında eklemden geçen akım mekanizmasının belirlenmesi için, ters gerilim yönünde akım-gerilim ilişkisi Şekil 4.9'daki gibi tam logaritmik olarak çizilmiştir.



Şekil 4.11 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin 235-385K aralığında tam logaritmik I<sub>R</sub>-V<sub>R</sub> karakteristiği

İncelenen sıcaklık aralığında akım-gerilim ilişkisi logaritmik ekseninde bakıldığında eğimin tüm sıcaklıklarda sabit bir oran ile değiştiği tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle, ters akım voltajın kareköküyle orantılıdır; bu da keskin formda bir fakirleşme bölgesinin varlığını ve jenerasyon akım mekanizmasını gösterir.

Benzer şekilde ters yönde elde edilen aktivasyon enerji değeri düz beslemedeki değer ile aynıdır. Elde edilen E<sub>A</sub> değerleri, DLTS ölçümleriyle CrSi<sub>2</sub>/p-Si ve CrSi<sub>2</sub>/n-Si heteroekleminde bulunan ve Krom-Bor (Cr-B) kompleksi olarak adlandırılan derin nokta kusur enerji seviyesi ile uyumludur. (Galkin N. G., 2007)

Kısaca şu ana kadar yapılan incelemelere göre, eklemin düz beslemedeki akım ifadesi,

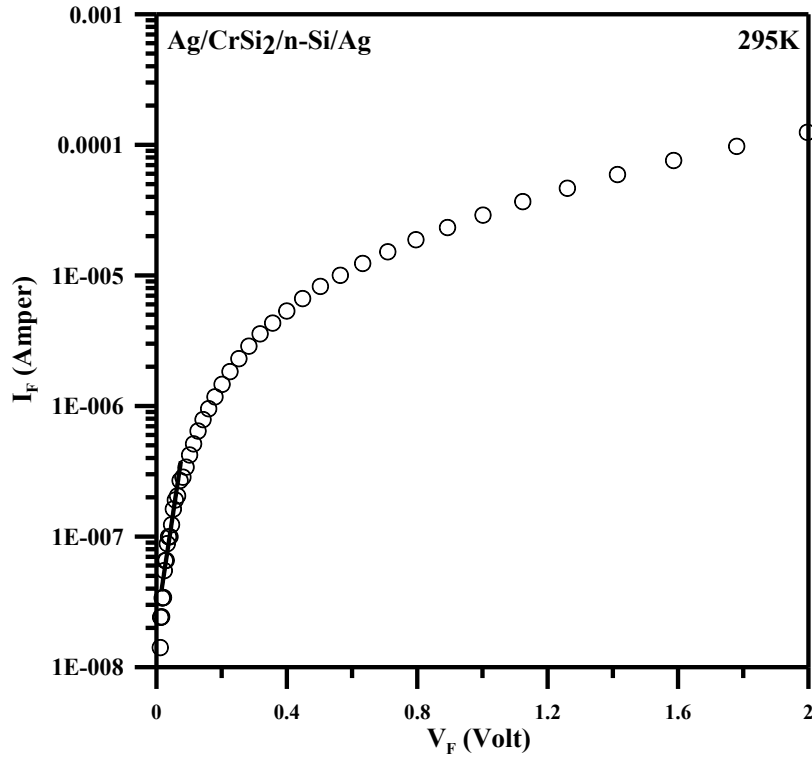
$I_F \propto \exp\left[-\frac{E_A}{kT}\right] \exp AV$  eşitliği ile orantılıdır. E<sub>A</sub> ve A değeri gerilim ve sıcaklıktan

bağımsızdır ve kusur yardımcı tünelleme jenerasyon-rekombinasyon modeliyle Matsuura tarafından açıklanmıştır. Ters gerilim doğrultusunda, ters akım

$$I_R \propto \exp\left[-\frac{E_A}{kT}\right] V_R^{1/2} \quad (4.9)$$

ile orantılı olduğu görülmüştür. Bu I<sub>R</sub> akım rekombinasyon-jenerasyon sürecinin sonucudur.

Son olarak, termoiyonik emisyon modeline göre temel diyot parametreleri bulunmuş ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

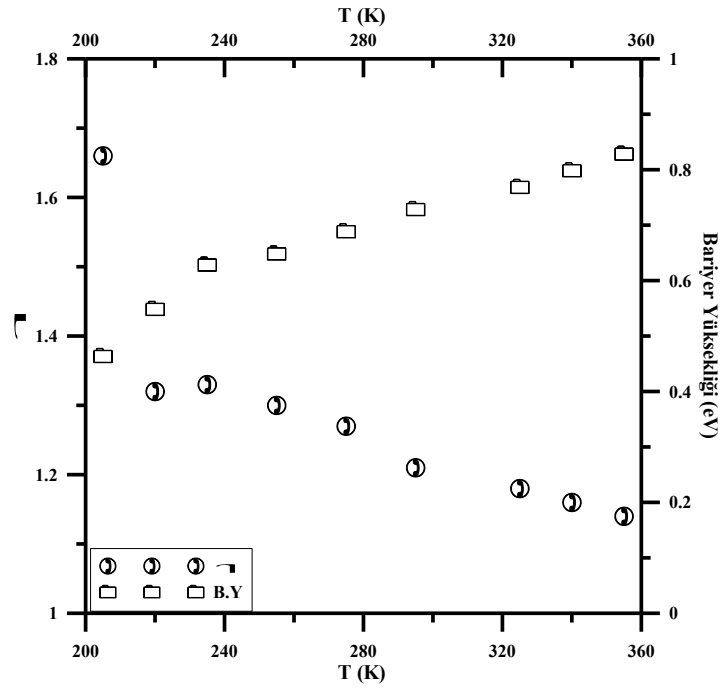


Şekil 4.12 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin 295K’de yarılogaritmik  $I_F$ - $V_F$  karakteristiği

Çizelge 4.4 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin temel diyot parametreleri

| T (K) | $I_0$ (A)             | $\ln I_0$ | A    | $\eta$ | B.Y (eV) |
|-------|-----------------------|-----------|------|--------|----------|
| 205   | $1.57 \times 10^{-7}$ | -15.7     | 33.9 | 1.66   | 0.46     |
| 220   | $1.32 \times 10^{-8}$ | -18.1     | 39.9 | 1.32   | 0.55     |
| 235   | $1.65 \times 10^{-9}$ | -20.2     | 37.0 | 1.33   | 0.63     |
| 255   | $6.98 \times 10^{-9}$ | -18.8     | 34.9 | 1.30   | 0.65     |
| 275   | $1.73 \times 10^{-8}$ | -17.9     | 36.7 | 1.27   | 0.69     |
| 295   | $2.14 \times 10^{-8}$ | -17.7     | 32.3 | 1.21   | 0.73     |
| 325   | $1.25 \times 10^{-7}$ | -15.9     | 30.1 | 1.18   | 0.77     |
| 340   | $1.31 \times 10^{-7}$ | -15.8     | 29.2 | 1.16   | 0.80     |
| 355   | $1.83 \times 10^{-7}$ | -15.5     | 28.5 | 1.14   | 0.83     |

Çizelge 4.4'den de görüldüğü gibi Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin idealite sabiti beklendiği üzere sıcaklıkla ters orantılı olmakla beraber, 2055-355K sıcaklık aralığında değeri 1.66-1.14 arasında değişmektedir. İdealite sabitinin sıcaklığın artmasıyla ideal değere (1'e doğru) yaklaşması, diyot performansının iyileştiği anlamına gelir. Bariyer yüksekliği ise yine beklendiği gibi sıcaklıkla artmakla beraber değeri 0.46–0.83eV arasında değişmektedir. Diyotun bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla doğru orantılı olarak artması, yine beklenen bir durumdur, çünkü idealite sabiti ( $\eta = 1$ ) taşıyıcıların bir bariyerden atlamasını öngörür. Diğer bir deyişle, idealite sabiti arttıkça taşıyıcıların bariyeri artması zorlaşacaktır, yani bariyer yüksekliği artacaktır. İdealite sabitinin ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi Şekil 13'de gösterilmiştir.

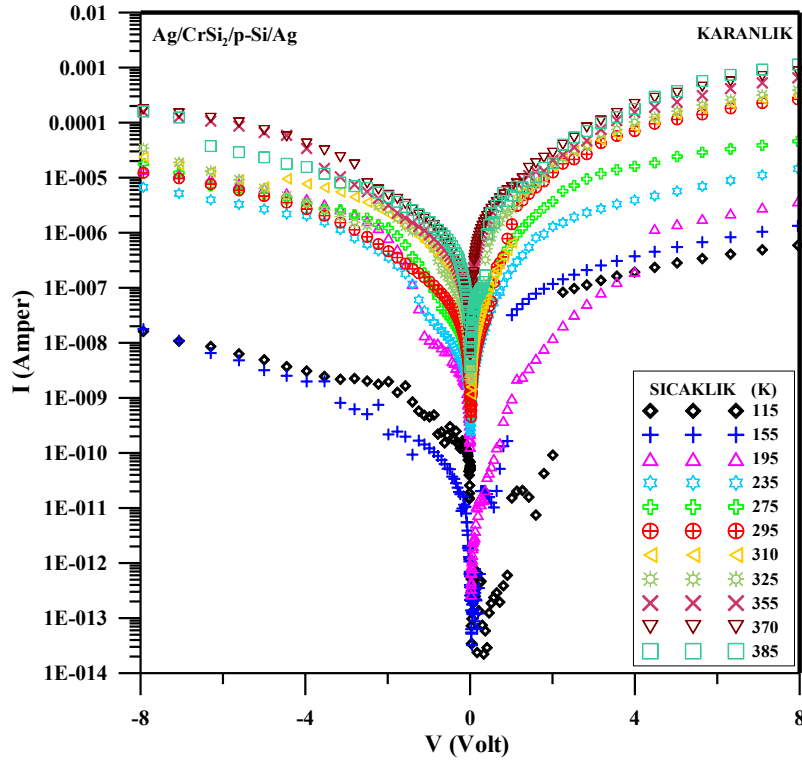


Şekil 4.13 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin idealite sabiti ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

Benzer bir inceleme süreci Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag heteroeklemlerde de yapılmış ve bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

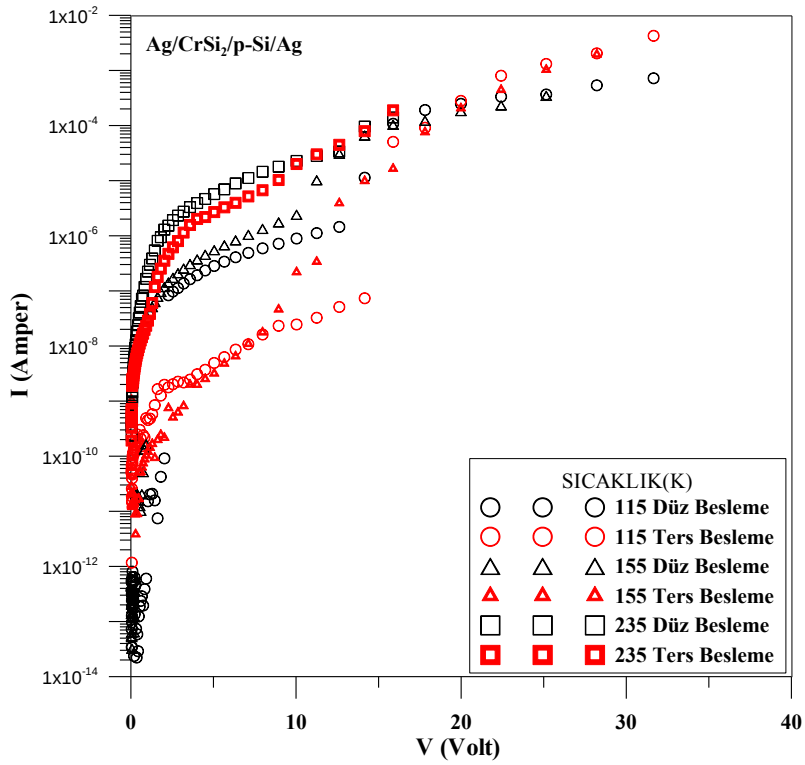
#### 4.2.2 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemlerin vakum ortamında aydınlık ve karanlıkta akım gerilim ölçüm sonuçlarının grafikleri Şekil 4.14'deki gibidir. Eklemlerin doğrultma katsayısının Şekil 4.14'den 100 olduğu görülmektedir.



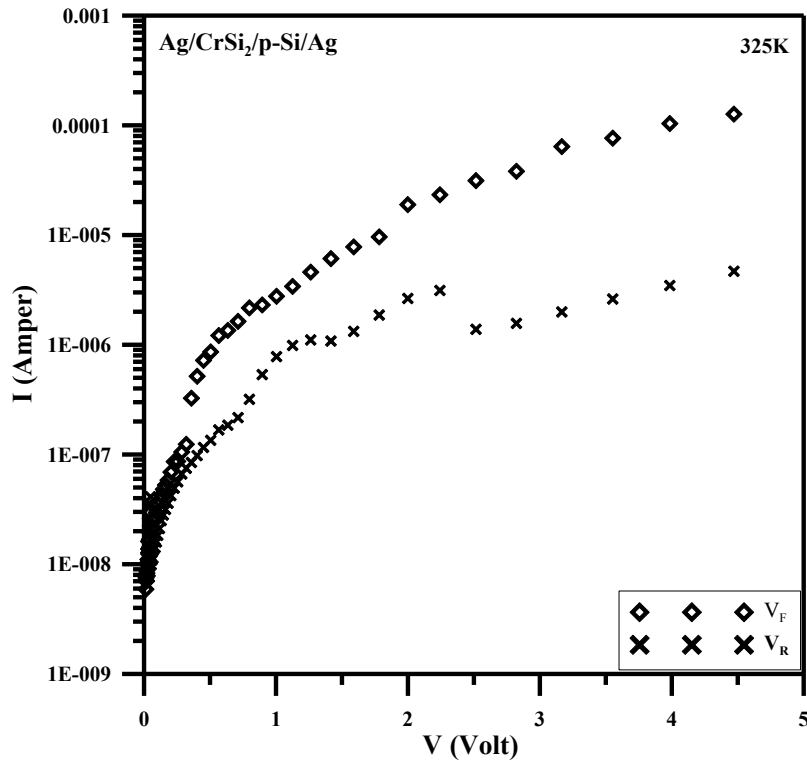
Şekil 4.14 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin 115-385 K sıcaklık aralığında I-V karakteristiği

Şekil 4.14'de Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemlerin geniş bir sıcaklık aralığında (115-385K) akım-gerilim karakteristiği görülmektedir. Düşük sıcaklıklar için ölçüm tekrar edilerek, Şekil 4.15'de Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemini ters ve düz beslemede yarılogaritmik I-V karakteristiği için gösterilmiştir.



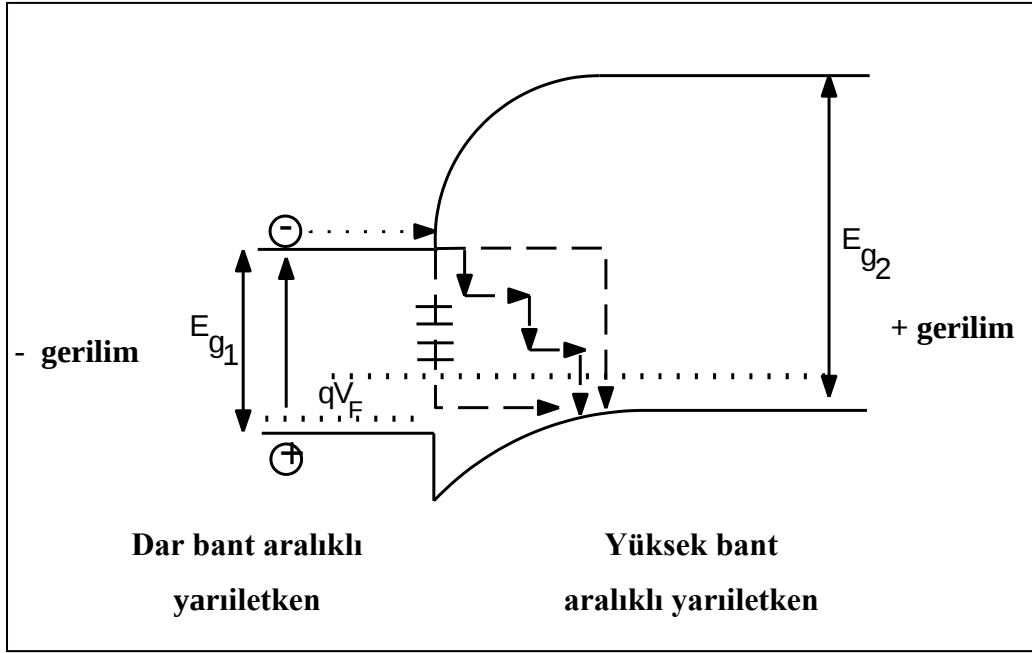
Şekil 4.15 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklem için yarı logaritmik I-V karakteristiği

Şekil 4.15’de yüksek gerilim değerlerinde bir akım atlaması gözlenirken, 10V’dan düşük gerilimler için doğrultma özelliği görülmektedir. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda (115-235K) 100 kat doğrultma varken sıcaklığın artmasıyla doğrultma oranı 10 kata doğru azalmaktadır. Örnek olarak Şekil 4.16’da 325K’de Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklem için akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir.



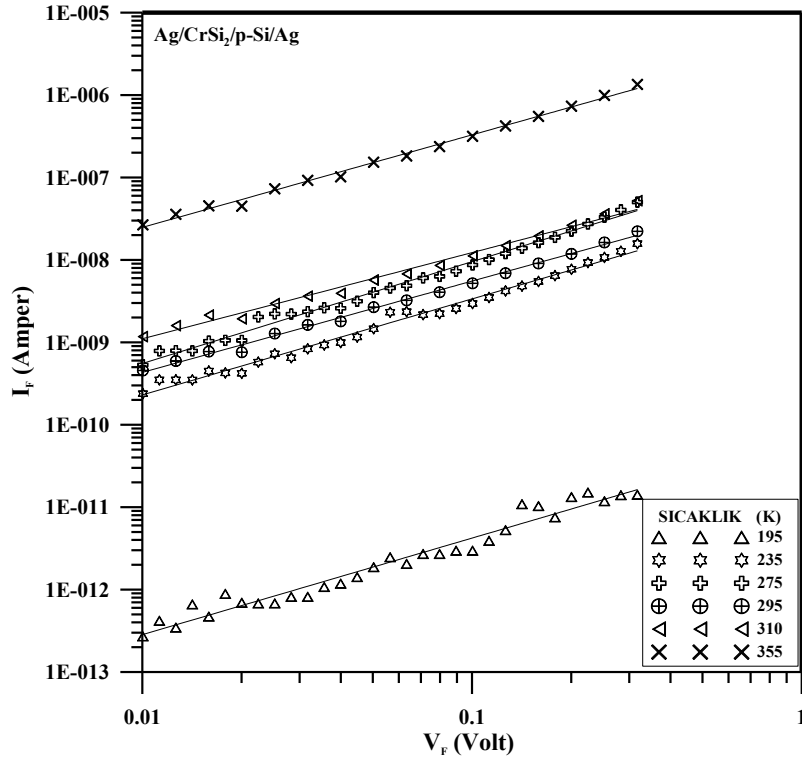
Şekil 4.16 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemine 325 K’de I-V karakteristiği

Şekil 4.15 incelendiğinde 10V’un ötesindeki I-V eğrilerinde ise belirgin bir şekilde akım atlaması görülmüş olup, bu durumun da p tipi kristal silisyumun kuasi-nötr bölgesine difüz eden ihmal edilemeyecek kadar çok azınlık taşıyıcısının enjeksiyonu nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Bu iletkenlik çok miktarda sızan azınlık yüklerini nötralize etmek için p-c-Si yarıiletken tarafından aynı miktarda çoğunluk taşıyıcısı nötr bölgeye dahil olmalıdır; bu nedenle iletkenlikte artış olur ve bu olgu da iletkenlik modülasyonu olarak literatürde yer alır.



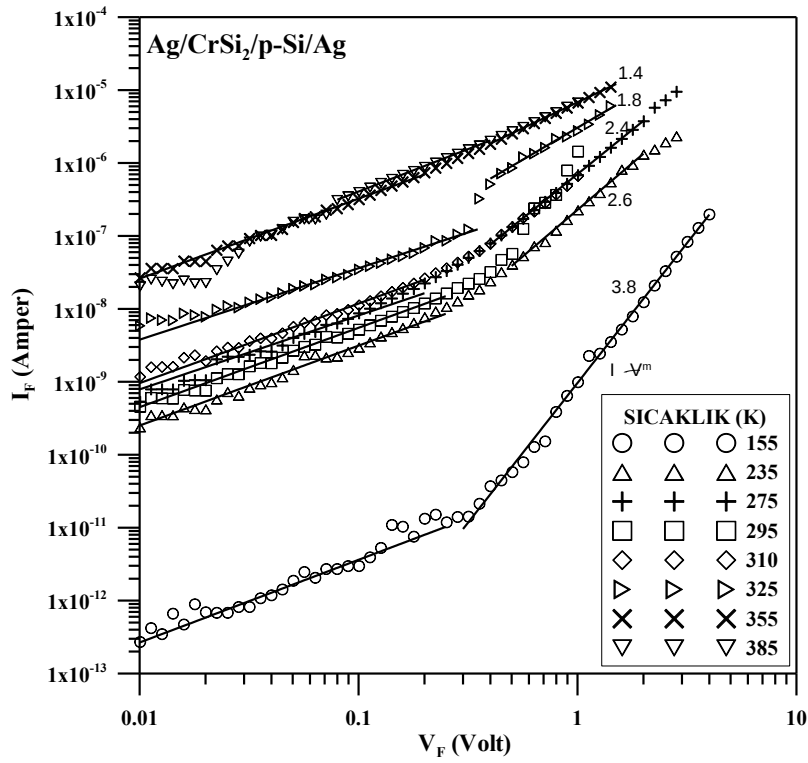
Şekil 4.17  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  eklemde olası rekombinasyon yolları

İletkenlik modülasyonu, Bölüm 4.2.5’de tartışılan C-V eğrilerinde de bilindik davranıştan farklılık gösterir. Ama ilk önce etkin akım mekanizmalarını belirlemek için  $10\text{V}$ ’dan düşük gerilimlerdeki I-V karakteristiklerini inceleyelim. Şekil 4.18’de  $3kT/q-0.35\text{V}$  arası  $\text{Ag}/\text{CrSi}_2/\text{p-Si}/\text{Ag}$  eklemde logaritmik eksenle akım gerilim karakteristiği görülmektedir, bu grafikten düşük gerilim altında A’nın sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir, bu da tünelleme mekanizmasının hakim olduğunu belirtir.



Şekil 4.18 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemnin düşük gerilimler için tam logaritmik  $I_F$ - $V_F$  karakteristiği

Yüksek gerilim bölgesinde Şekil 4.19'de görüldüğü gibi  $m$  sıcaklıkla 3.8-1.4 arasında değişmektedir, bu durumda SCLC iletim mekanizması ile açıklanabilir. Bununla beraber şekil 4.19'dan görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda eğim sabitleşmeye, sıcaklıkla değişmez bir tutum sergilemeye başlamıştır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda tünelleme mekanizmasının etkin iletim mekanizması olmasıyla açıklanabilir.

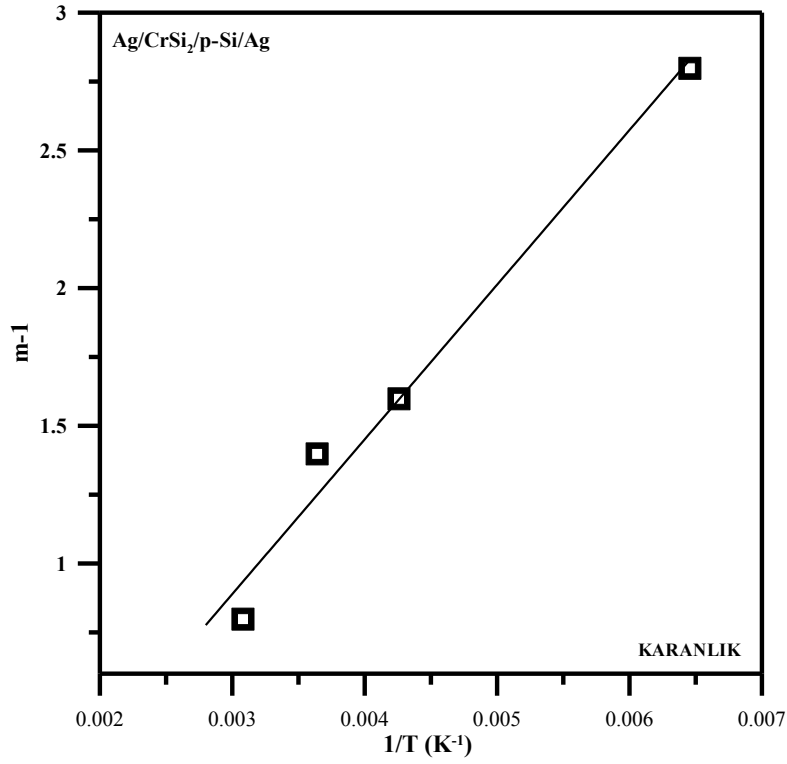


Şekil 4.19 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemnin tam logaritmik  $I_F$ - $V_F$  karakteristiği

SCLC mekanizmasına göre Çizelge 4.5 ve Şekil 4.20’de verildiği gibi  $m-1$  ile  $1/T$  arasındaki ilişki düzensizlik parametresini gösterir. Bu değer de n-tipi taşıyıcılar üzerine büyütülen filmlerde elde edilen değerle uyumlu olarak 560K olarak bulunmuştur.

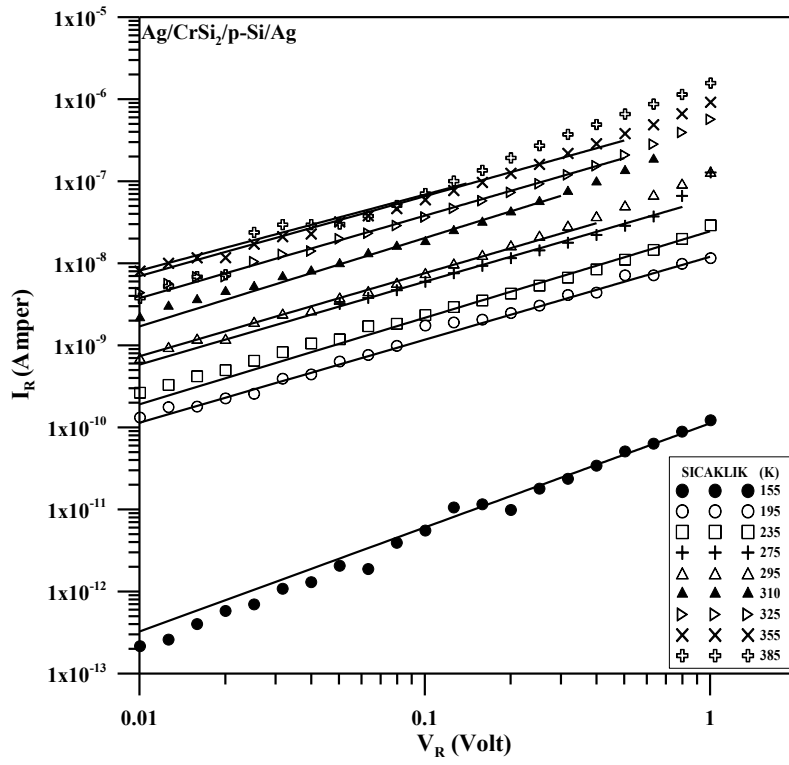
Çizelge 4.5 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemnin SCLC akım mekanizması için  $m$  değerleri

| T (K) | m   |
|-------|-----|
| 155   | 3.8 |
| 235   | 2.6 |
| 275   | 2.4 |
| 325   | 1.8 |
| 355   | 1.4 |

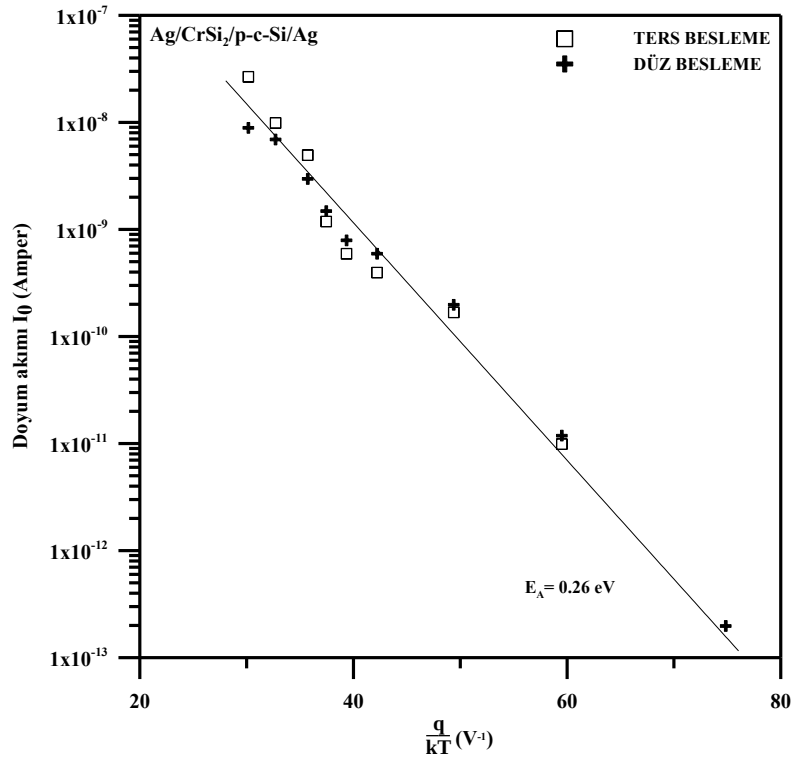


Şekil 4.20 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklem için (m-1)-1/T grafiği

Ters besleme altında Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklem için I-V karakteristiği Şekil 4.21 ile verilmiştir. Ters besleme durumunda da n-tipi için söylendiği gibi jenerasyon akımından söz etmek mümkündür. Şekil 4.22’de gösterildiği gibi ters ve düz besleme doyma akımlarından da aktivasyon enerjisi 0.26eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer CrSi<sub>2</sub>/n-Si heteroeklemde bulunan ve Cr-B kompleksine karşılık gelen aktivasyon enerjisiyle uyumludur.



Şekil 4.21 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemnin  $V_R$ - $I_R$  karakteristiği

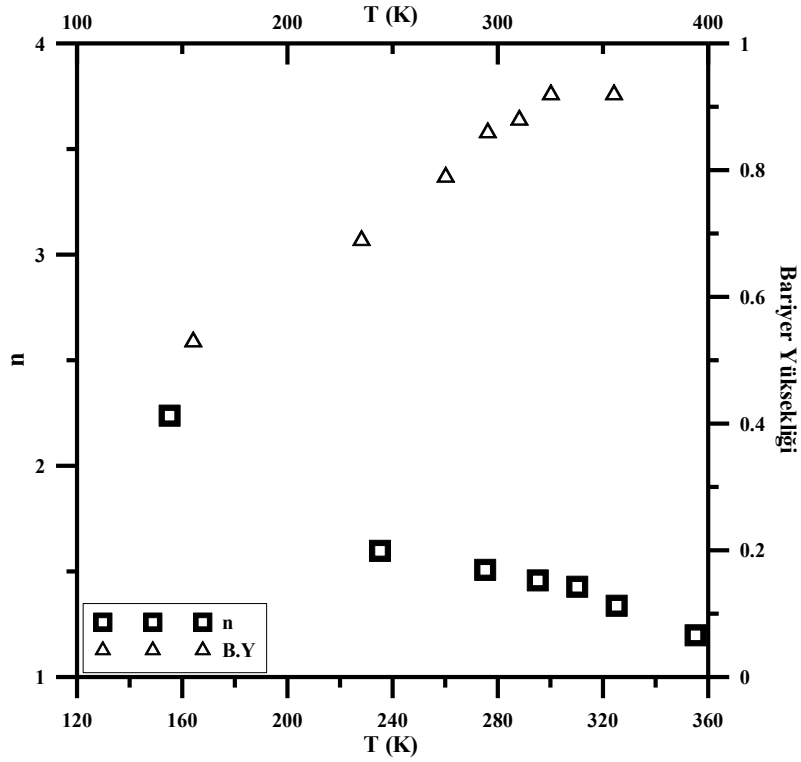


Şekil 4.22 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemnin  $I_0$ - $q/kT$  grafiği

Termoionik emisyon modeline göre CrSi<sub>2</sub>/p-Si heteroeklemin temel diyot parametreleri tabloda sergilenmiştir.

Çizelge 4.6 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin temel diyot parametreleri

| T (K) | I <sub>0</sub> (A)    | lnI <sub>0</sub> | A    | n    | B.Y (eV) |
|-------|-----------------------|------------------|------|------|----------|
| 155   | 3.2x10 <sup>-13</sup> | -28.8            | 33.3 | 2.24 | 0.53     |
| 235   | 3.0x10 <sup>-10</sup> | -21.9            | 31.1 | 1.60 | 0.69     |
| 275   | 9.3x10 <sup>-9</sup>  | -20.8            | 27.9 | 1.51 | 0.79     |
| 295   | 6.5x10 <sup>-10</sup> | -21.1            | 26.9 | 1.46 | 0.86     |
| 310   | 1.5x10 <sup>-9</sup>  | -20.3            | 26.0 | 1.43 | 0.88     |
| 325   | 5.2x10 <sup>-9</sup>  | -20.1            | 26.5 | 1.34 | 0.92     |
| 355   | 3.7x10 <sup>-8</sup>  | -17.1            | 27   | 1.20 | 0.92     |



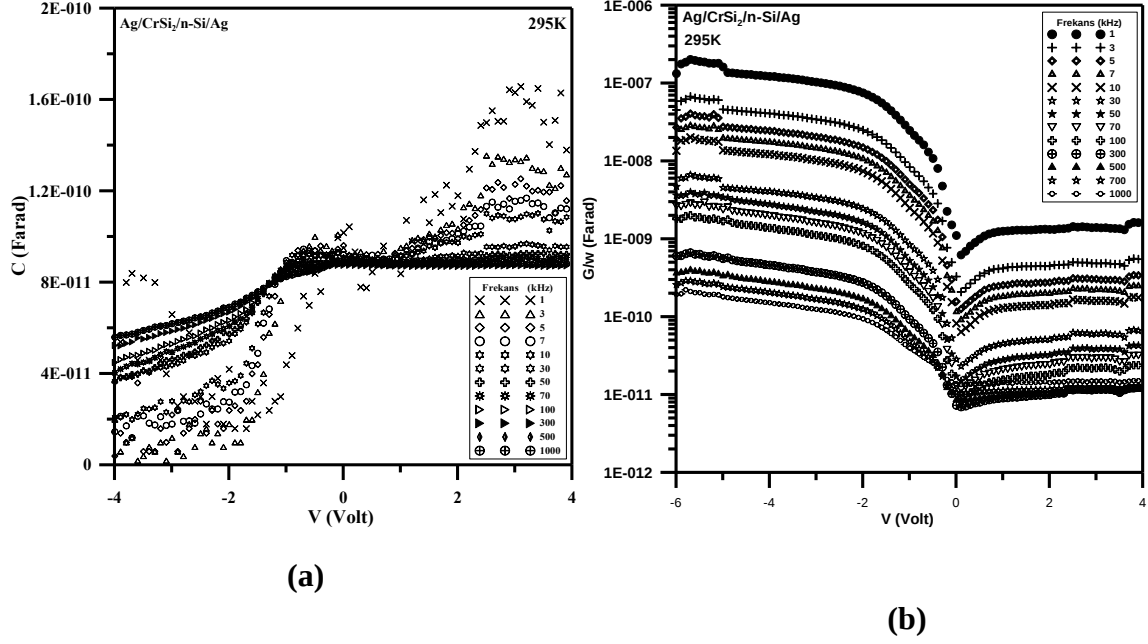
Şekil 4.23 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin idealite sabiti ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

Şu ana kadar eldeki CrSi<sub>2</sub>/n-Si ve CrSi<sub>2</sub>/p-Si heteroeklemlerin I-V-T ölçümleri üzerine tartışma yapılmış ve sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır. Özetle her iki heteroeklemde bulunan Cr-B kompleksinden kaynaklı derin nokta kusurlar yardımıyla tek adımlı tünelleme, rekombinasyon jenerasyon ve SCLC akım mekanizmaları mevcuttur.

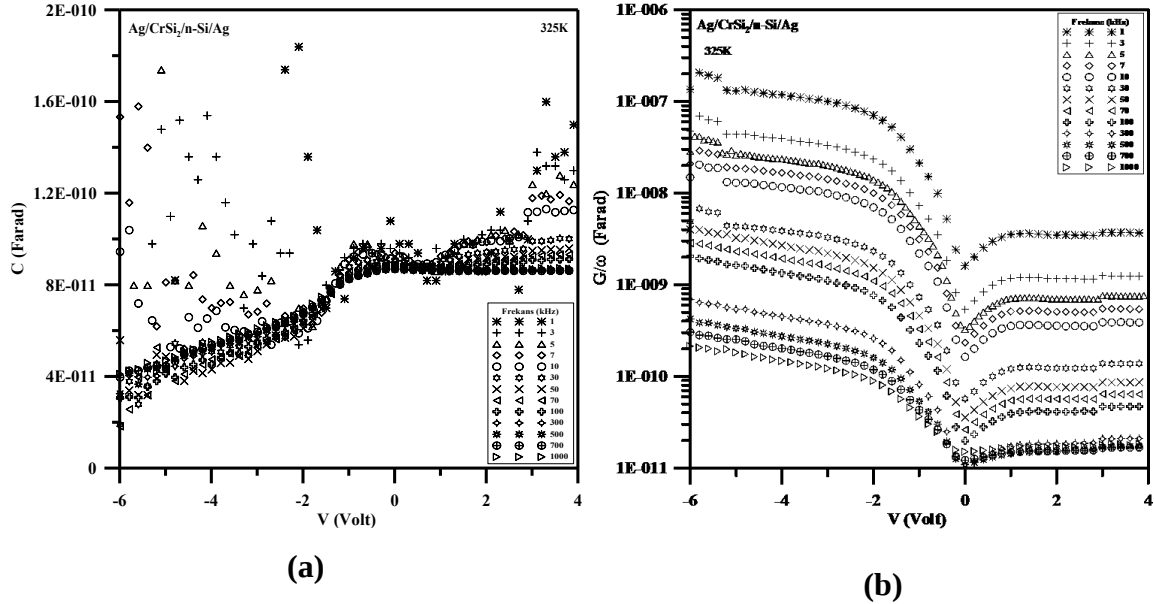
DC durumda tespit edilen bulgular AC durum için de admitans yöntemiyle bir sonraki bölümde incelenecektir.

#### 4.2.3 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

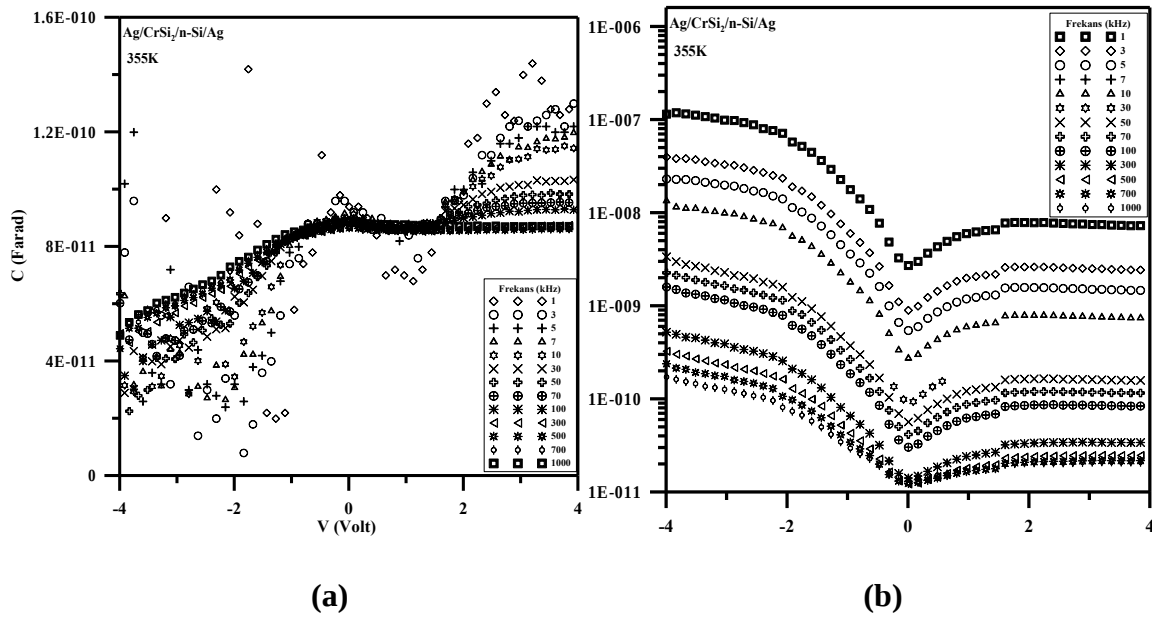
Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin sığa(ac iletkenlik)-gerilim (C(G( $\omega$ )-V) ölçümleri, 1kHz-1000kHz frekans aralığında oda sıcaklığı için Şekil 4.24'de verilmiştir. Benzer ölçümler oda sıcaklığı üstü sıcaklıklarda (325 ve 355K gibi) tekrar edilmiş ve Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.24 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin oda sıcaklığında C(G/ω)-V grafikleri



Şekil 4.25 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin 325K'de C(G/ω)-V grafikleri



Şekil 4.26 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemine 355K'de C(G/ω)-V grafikleri

Oda sıcaklığındaki C(G/ω)-V değişimleri incelendiğinde kaçak akımın yüksek olduğu bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MOS) C-V davranışı sergilediği anlaşılmaktadır. MOS türü sızgılarda, belirgin üç rejim olduğu, bunların da sırayla yığılma, fakirleşme ve ters yığılma olarak adlandırıldığı bilinmektedir. İlk rejim çoğunluk yüklerince (elektronlar), ikincisi çoğunluk yüklerinin fakirleşmesiyle ve sonuncusu da azınlık yüklerince (boşluklar) oluştuğu bilinir (SZE,M., 2007). Bu durumlar Şekil 4.24a'da, V>0 yığılma bölgesine, V<0 fakirleşme bölgesine ve V<<0 ise ters yığılma bölgesine karşılık gelir. V>0 bölgesinde, yüksek frekanslar için gerilimden bağımsız sabit bir sığa gözükürken, nispeten düşük frekanslarda sızgıda bir dağılım fark edilmektedir. Bu tür durumlar literatürde, yüklerin MOS yapısındaki yalıtkan tabakanın içine tünellemesi sonucu olduğu bilinmektedir. (Özdemir O., 1999)

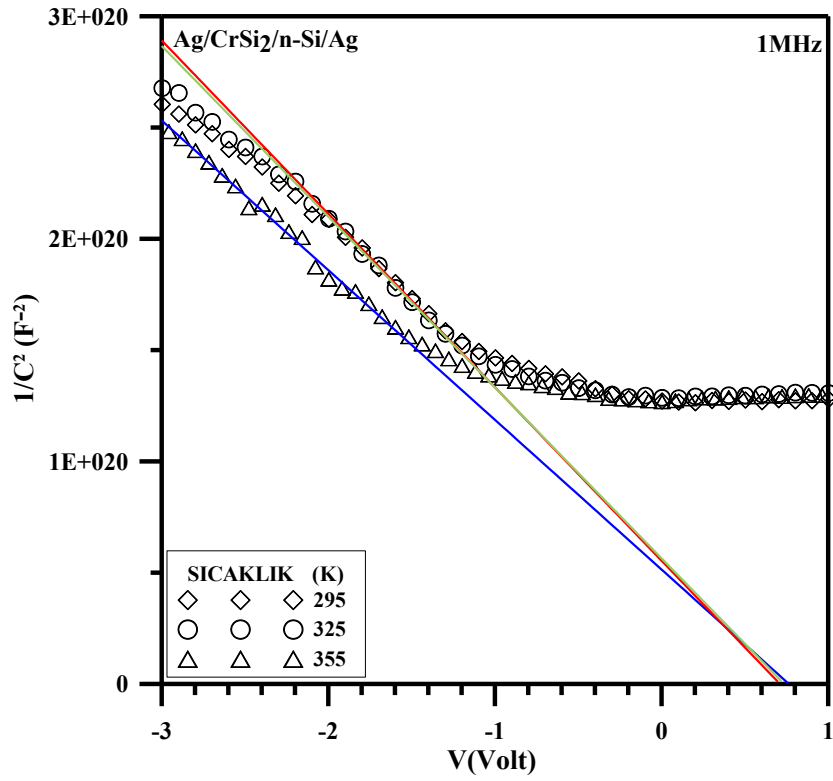
V<0 bölgesinde de frekans bağıllığı açıkça gözükmektedir. Frekans 1MHz'e doğru arttıkça, fakirleşme bölgesi, derin fakirleşme bölgesi olacak şekilde değişir (Nicollian E. H.). Derin fakirleşme bölgesi, fakirleşme rejiminin bir başka versiyonudur ve azınlık yüklerinin yeterince yaratılmamasında kendini belli etmekle beraber ve p-n türü eklemlerde de ortaya çıkan bir olgudur. Azınlık yüklerinin ve arayüzeyde var olabilecek kusurların etkilerini ihmal edebilmek için, 100kHz ve üstündeki frekans değerlerindeki C-V eğrileri kullanılarak katkılama miktarı ve oluşma potansiyeli (ve bariyer yüksekliği) bulunabilir.

CrSi<sub>2</sub>/n-Si eklemine 1MHz ac modülasyon frekansında C-V ölçümleri farklı sıcaklıklar için

yapılmış ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Anderson keskin eklem difüzyon modeline göre kapasitans,

$$C = \left\{ \frac{qN_D N_A \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_0}{2N_D \epsilon_1 + N_A \epsilon_2} \frac{1}{V_{bi} - V_R^{1/2}} \right\}$$

ile ifade edilmiştir.  $N_D$  ve  $N_A$ ,  $\text{CrSi}_2$  ve n-Si yarıiletken taşıyıcı konsantrasyonları ve  $\epsilon_1(\epsilon_2)$ ,  $\text{CrSi}_2(\text{n-Si})$ ’nin dielektrik permitivitesi,  $V_{bi}$  ise eklem oluşma potansiyelidir.



Şekil 4.27 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin 1MHz frekansta, üç farklı sıcaklık için 1/C<sup>2</sup>-V grafiği

Çizelge 4.7 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemnin katkılama miktarı ve oluşma potansiyeli

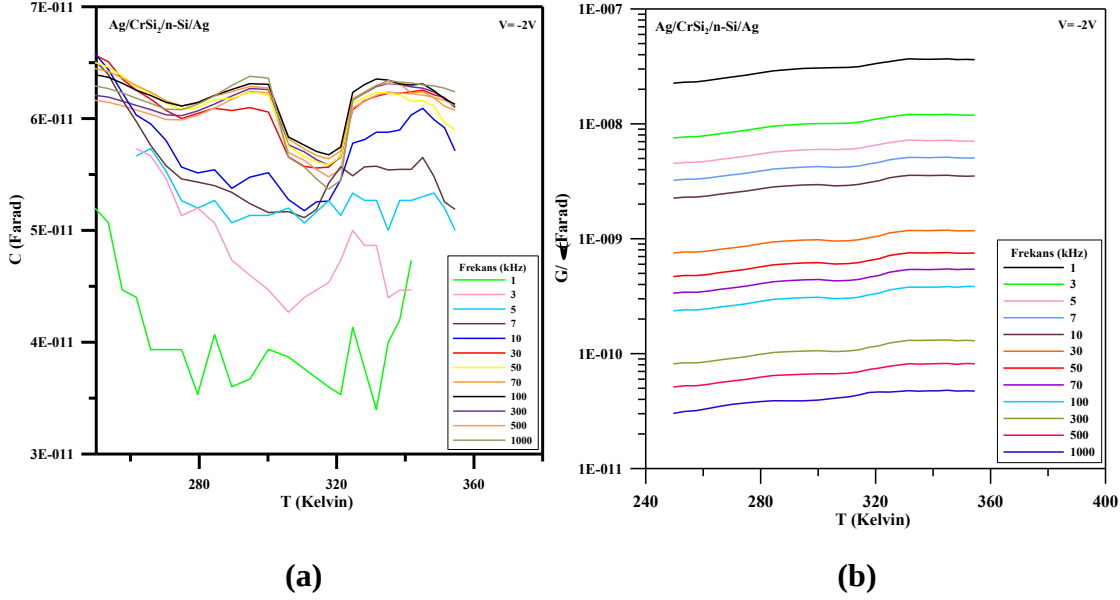
| T (K) | d(C <sup>-2</sup> )/dV | N <sub>d</sub> (cm <sup>-3</sup> ) | V <sub>bi</sub> (V) | Φ <sub>b</sub> (eV) |
|-------|------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 295   | 7.8x10 <sup>19</sup>   | 2x10 <sup>14</sup>                 | 0.70                | 1.01                |
| 325   | 7.7x10 <sup>19</sup>   | 2x10 <sup>14</sup>                 | 0.70                | 1.05                |
| 355   | 6.7x10 <sup>19</sup>   | 2x10 <sup>14</sup>                 | 0.75                | 1.08                |

Şekil 4.19’de gösterildiği gibi -3V ve -1V ters gerilim aralığında  $1/C^2$ -V eğrileri doğrusal özellik gösterir, eğri ekstrepole edilerek gerilim eksenini kestiği nokta belirlenirse bu değer oluşma potansiyelini gösterir. Şekil 4.27’de elde edilen bu değer  $0.70 \pm 0.05V$  civarında olduğu tablodan anlaşılmaktadır.  $1/C^2$ -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun ( $N_d$ ) değeri  $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$  olarak belirlenmiştir, bu değer de 10-20  $\Omega\text{cm}$  öz dirence sahip n-tipi Si taşıyıcı için beklenen bir değerdir. Ayrıca bu durum fakirleşme bölgesinin sadece kristal silisyum tarafında olabileceğine de işaret eder.

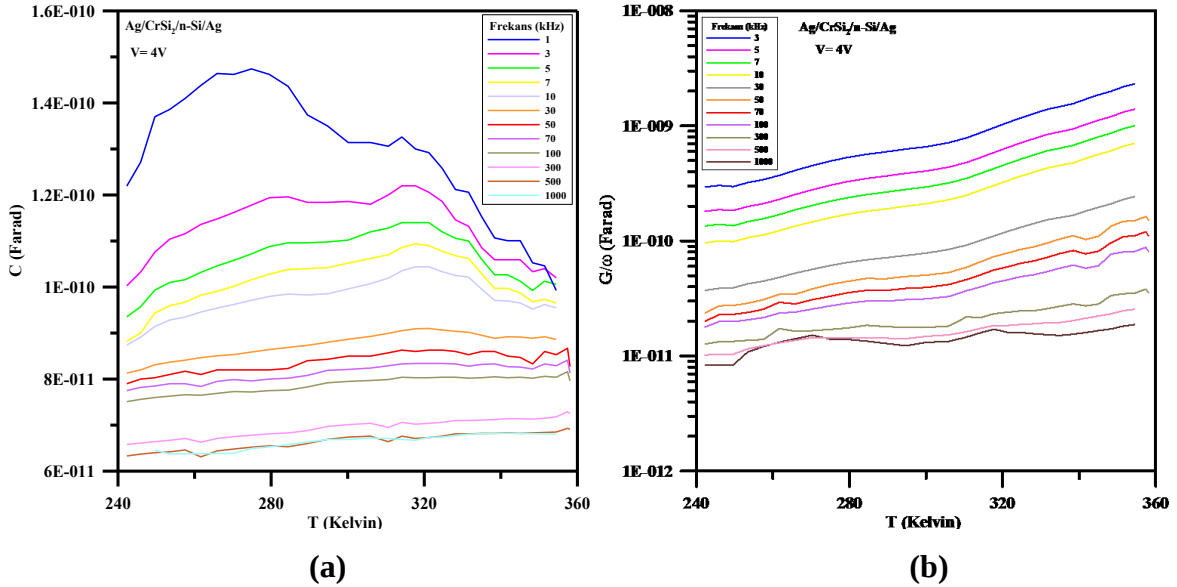
Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemlerin farklı frekanslarda gerilime bağlı kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden sonra davranışların daha iyi anlaşılması için ayrı bir deney olarak eklemlerin sıcaklığa bağlı kapasitans ve iletkenlik değişimi incelenmiş ve sonuçları bir sonraki bölümde verilmiştir.

#### 4.2.4 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag ekleminin C(G/ω)-T deneyleri

Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemlerin -2 V ve 4V için sabit gerilim altında geniş frekans aralığında (1kHz-1000kHz) sıcaklığa bağlı kapasitans iletkenlik (C(G/ω)-T) ölçümleri Şekil 4.28, 4.29'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin V= -2V'da C(G/ω)-T karakteristikleri

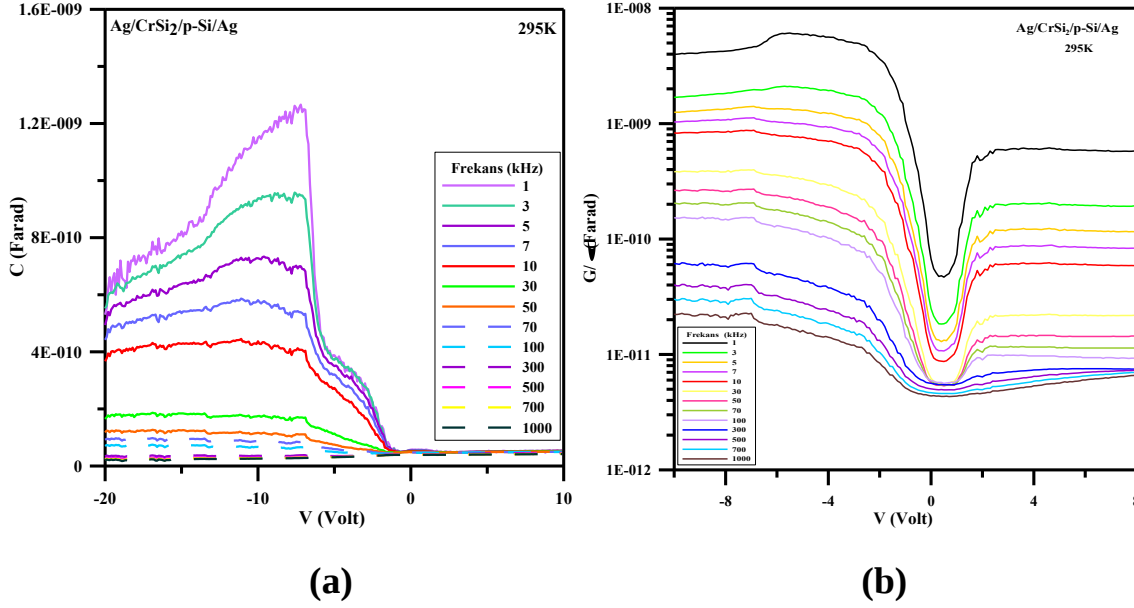


Şekil 4.29 Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemin V=4V'da C(G/ω)-T karakteristiği

Benzer şekilde, Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin için de, C(G/ω)-V ve C(G/ω)-T ölçümleri de yapılmış ve Bölüm 4.2.5 ve 4.2.6'da ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

#### 4.2.5 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

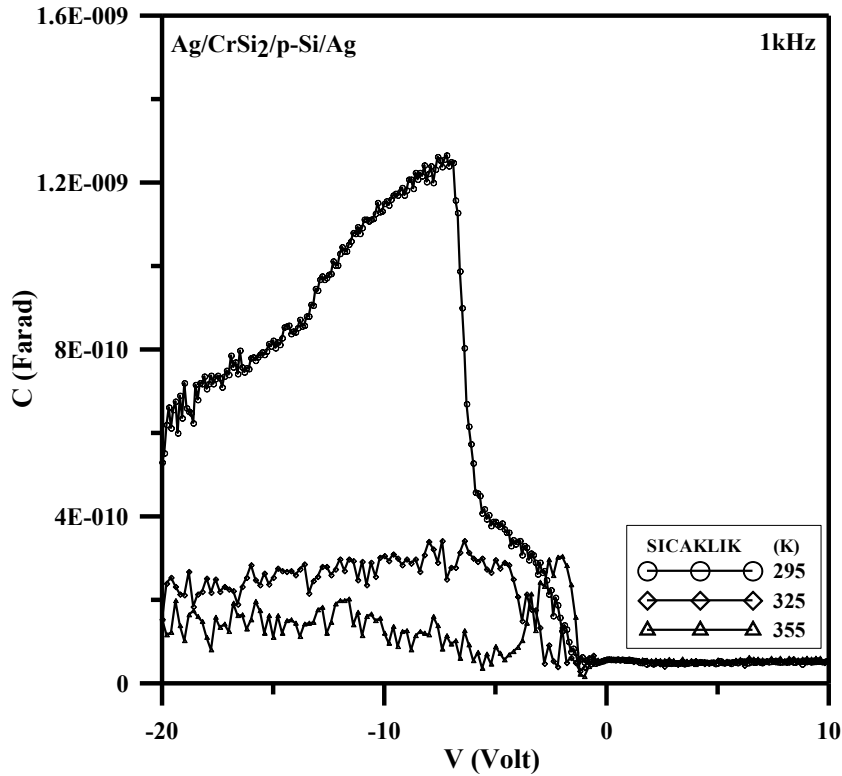
Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemine kapasitans gerilim ve iletkenlik ölçümleri 295–325-355K sıcaklıklarında 1kHz-1MHz frekans aralığında yapılmıştır. Oda sıcaklığında eklemine 1kHz-1MHz frekans aralığında C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları Şekil 4.30a ve 4.30b’de görülmektedir.



Şekil 4.30 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemine oda sıcaklığında C(G/ω)-V grafikleri

Şekil 4.30a incelendiğinde negatif gerilimlerde gözle görülür kesin bir frekans bağımlılığı olduğu fark edilmektedir. Şekil 4.30’dan açıkça görüldüğü gibi yapının kapasitansı belli bir düz bias değerinde birden keskin bir biçimde artmakta ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaktadır. Şekil 4.30b incelendiğinde bu artışın düşük ac modülasyon frekansında (burada 1kHz) daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Diğer yandan, 0 Volt’dan büyük gerilim değerleri için kapasitans değerinde önemli bir değişim olmamaktadır. C-V ölçümleri, I-V ölçümleri ile kıyaslandığında belirli bir voltaj aralığında aynı olayın varlığı görülmüştür. Kapasitans değerinin artmaya başladığı gerilim, SCLC mekanizmasının başlangıcına karşılık gelmektedir. Aynı zamanda kapasitansın maksimum olduğu nokta azınlık yük enjeksiyonunun yeniden başladığı noktaya denk gelir. Bu yüzden, düz beslemeden dolayı enjekte olan elektronlar, n>p olan ters yığılma bölgesini meydana getirmişler ve bunlardan bazıları daha yüksek düz besleme koşulunda yarıiletkenin nötr bölgesine difüz etmişlerdir. Bu arada, yük dengesi korumak için aynı miktarda boşluk Si tarafından yaratılmalıdır, bu da iletkenliğin artmasına sebep olur. Kapasitansın maksimum olduğu gerilim değeri ters yığılma gerilimidir

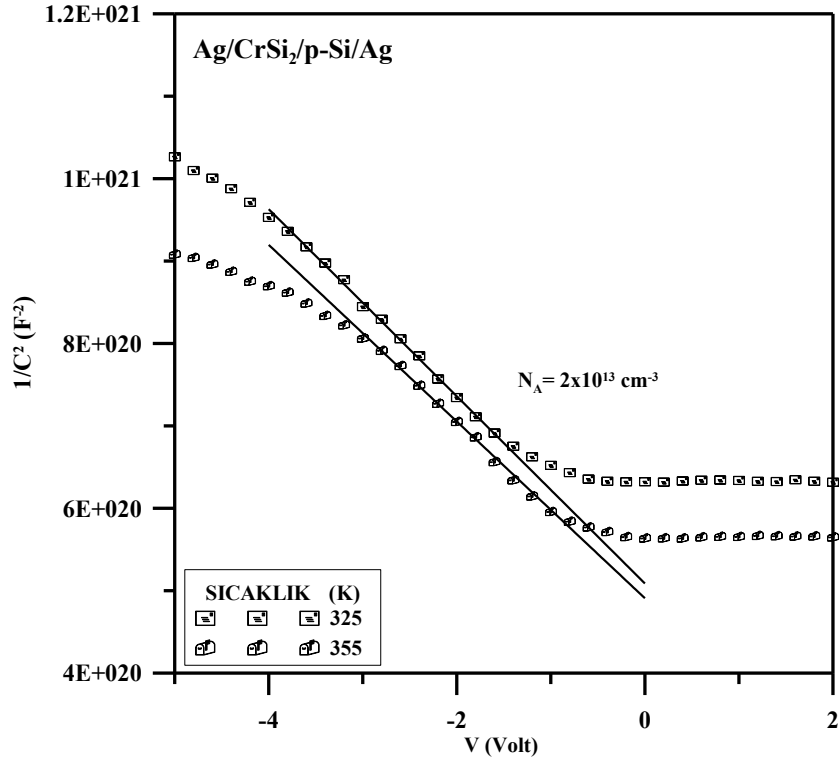
(Kanicki J., 1992). Azınlık taşıyıcı konsantrasyonunun denge konsantrasyonuyla kıyaslanabilir hale gelmesi depolama tipi davranışın, negatif kapasitans olarak da yorumlanan indükleyici türe dönüşmesine sebep olur. İndüktif katkı, diğer bir söyleyişle azınlık taşıyıcı enjeksiyonu yüzünden seri drenajın modülasyonu, zamana ihtiyaç duyar ve bu yüzden uygulanan gerilimle ac akım arasında bir gecikme meydana gelir. Bundan dolayı C indüktif hale gelir, düz gerilim  $n > p$  olan bir ters yığılma bölgesinin varlığını gösterir ve bu ters yığılma bölgesinin varlığı gereği ölçümlerde sıcaklık/frekans bağıllığı beklenmektedir ve bu durum frekansa bağıllık olarak Şekil 30a'da görülmüştür. Aynı şekilde görüldüğü üzere azınlık yük taşıyıcıları çok büyük ac gerilim modülasyonunu takip edemedikleri için yüksek frekansta (veya düşük sıcaklıkta) indüktif katkı zayıflar. Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin 1 kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklar (295-325-355K) için kapasitans gerilim karakteristiği Şekil 4.31'de görülmektedir. Ters yığılma bölgesinin varlığı gereği ölçümlerde beklenen sıcaklık bağıllığı da bu şekilde açıkça görülmektedir. Yani sabit sıcaklıkla frekansa bağlı C-V eğrisinde görülen davranış, sabit frekansta farklı sıcaklığa bağlı C-V davranışıyla benzerdir.



Şekil 4.31 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin üç farklı sıcaklık için 1kHz frekansta kapasitans-gerilim karakteristiği

n tipi silisyum üzerine büyütülen filmlerde olduğu gibi Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemler için de

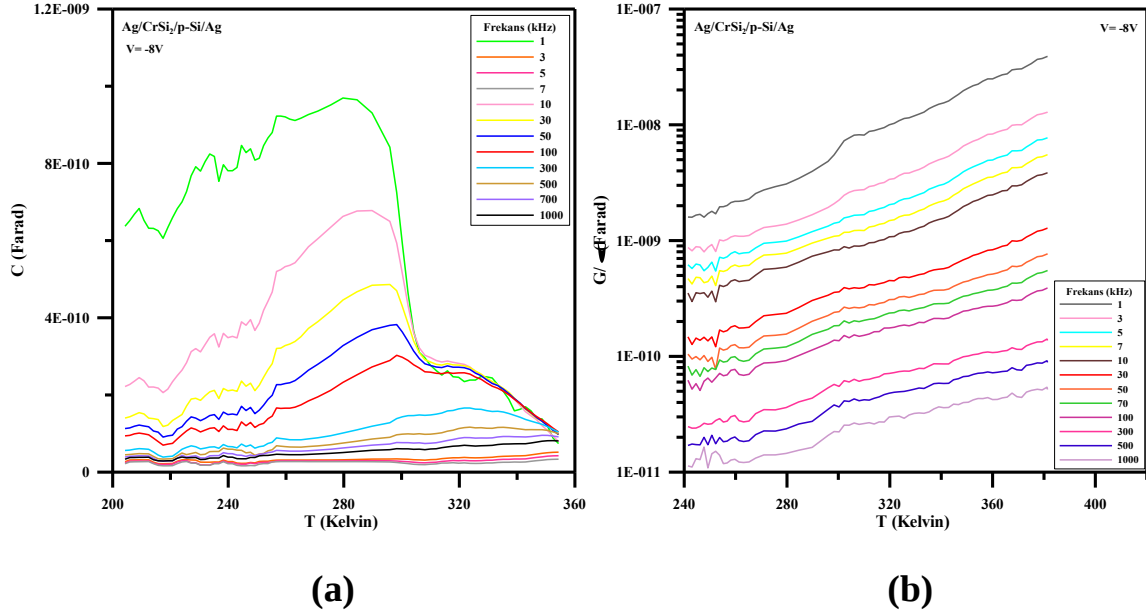
$1/C^2$ -T grafiği çizilmiş ve şekil 4.32’de gösterilmiştir. Bu grafiğin eğiminden p-tipi silisyum için katkılama miktarı  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanmıştır.



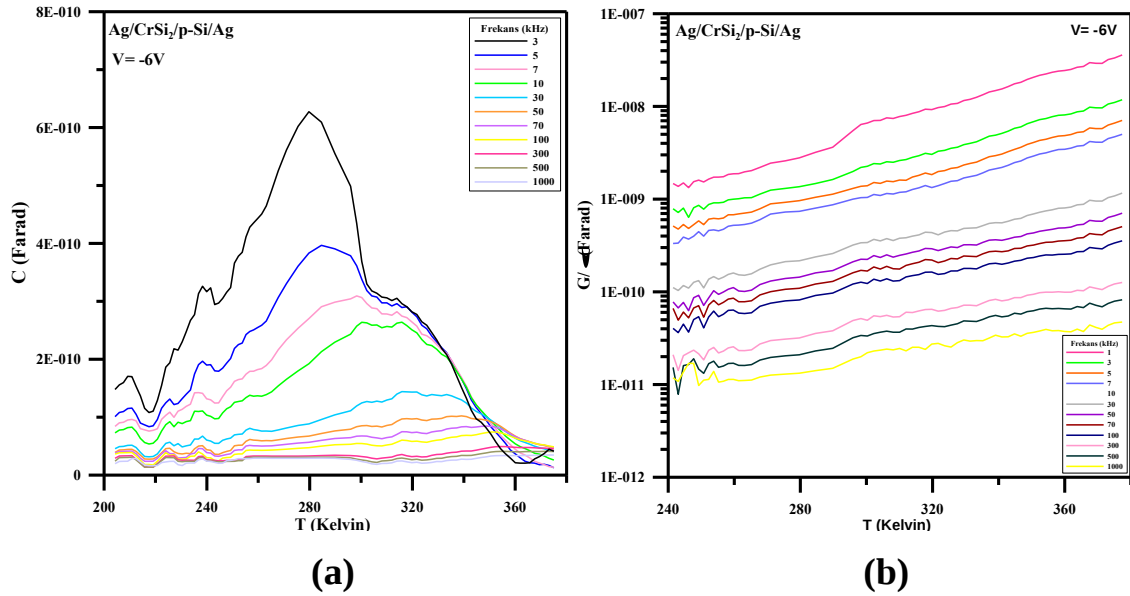
şekil 4.32  $\text{Ag/CrSi}_2/\text{p-Si/Ag}$  eklemin 325-355K sıcaklıkta  $1/C^2$ -T grafiği

#### 4.2.6 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag Eklemlerin C(G/ω)-T Deneyleri

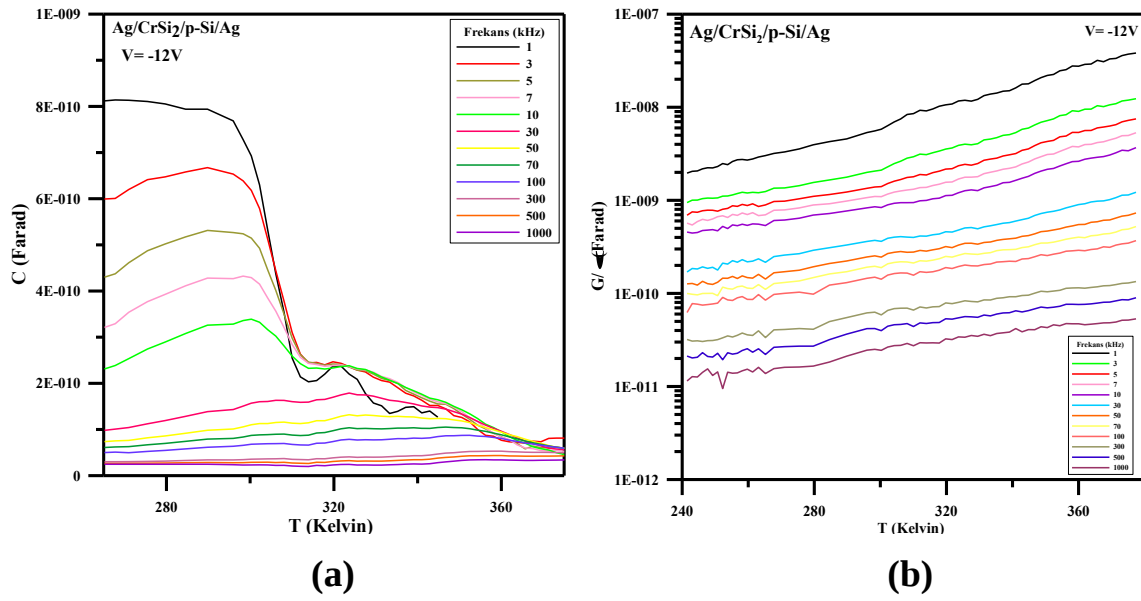
Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemlerin -6V, -8V ve -12V sabit gerilim altında geniş frekans aralığında (1kHz-1000kHz) kapasitans-sıcaklık değişimi ve iletkenlik-sıcaklık (C(G/ω)-T) değişimi Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin V= -8V’da (a) C-T, (b) (G/ω )-T karakteristikleri



Şekil 4.34 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemin V= -6V’da (a) C-T, (b)(G/ω)-T karakteristikleri



Şekil 4.35 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemine V = -12V’da (a) C-T, (b) (G/ω)-T karakteristikleri

Bir önceki bölümde Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag yapısının admitans analizi, oda sıcaklığında 1kHz-1MHz frekans aralığında ayrıntılı incelenmişti (Bkz. Şekil 4.30a).

Gerilim negatif değerlere gittikçe, kapasitansta tek bir maksimum noktasına keskin bir artış görülmektedir, gerilim negatif tarafta daha da büyük değerlere gittikçe kapasitansta frekansa bağlı bir düşüş görülmektedir. Bu tür davranış p tipi katkılanmış silikon yarıiletkenin balkından azınlık taşıyıcı enjeksiyonunu gösterir ve bu yüzden yük dengesini korumak için yarıiletken tarafından ekstra boşluk sağlanmalıdır.

Kapasitanstaki ilk artış c-Si yarıiletkende yaratılan elektronlardan dolayıdır. İkincisi muhtemelen CrSi<sub>2</sub> tarafından gelmektedir. Azınlık taşıyıcı enjeksiyonundan önce jenerasyon ve daha sonra elektronların iletilmesi oluşmalıdır. Uygulanan gerilimin kutuplanmasına bağlı olarak (elektrik alan) yaratılan elektronlar Cr/p-Si arayüzeyine doğru yönlenecektir ama jenerasyon süreci dar bant aralıklı yarıiletkenlerin bant aralığını belirlemek için alternatif yaklaşımın anahtarıdır.

Bu yüzden önce metal-oksid-yarıiletken (MOS) yapılarda elektronların jenerasyon mekanizmasını ve birleşik terminolojisini tartışalım (Sze M. S., 2007, Nicollian E. H. 1982).

MOS yapısı için gerilim altında, azınlık taşıyıcıları için ana mekanizma, oda sıcaklığında arayüzey boyunca ve/veya oda Fermi seviyesi yakınlarında balk tuzağında yarıiletkenin fakirleşme bölgesinde azınlık taşıyıcıların rekombinasyon jenerasyonudur. Yüksek sıcaklıklar

için, difüzyon mekanizması baskındır. Yaratılan azınlık taşıyıcıları ac ön elektron gerilim modülasyonunu eğer ac gerilimin periyodu yeterince uzunsa takip edebilirler. Bu nedenle, frekans bağımlılığı elektronların etkin taşıyıcı olduğu iyi bilinen MOS yapının ters yığılma modunda beklenmektedir. Bu sebeple, dielektrik relaksasyon zamanı  $\tau$ , taşıyıcı konsantrasyonu  $n_i$  ile orantılı olmalıdır, jenerasyon-rekombinasyon ve difüzyon mekanizmaları için sırasıyla,

$$\tau \propto \frac{1}{n_i} \exp(E_G/2kT) \quad (4.9)$$

$$\tau \propto \frac{1}{n_i^2} \exp(E_G/kT) \quad (4.10)$$

Bu bilginin ışığında değişen gerilim altında azınlık taşıyıcısı yaratacak mekanizma G ile C, T ve  $\omega$  'nin bir fonksiyonu olarak ölçümler yapılarak  $E_A$  aktivasyon enerjisinin bulunmasıyla belirlenebilir. Burada seri direnç  $R_s$ , ölçülen admitans,  $\mathbf{Z}_m = \mathbf{G}_m + j\omega\mathbf{C}_m$  empedansa dönüştürülerek, ilk önce  $\mathbf{Y} = \mathbf{Z}_m^{-1}$  ve sonra yalıtkan film kapasitansı Z'den çıkarılır ve empedans tekrar admitansa dönüştürülür. Son olarak G ifadesi,

$$G = \frac{G_m \omega C_I \sqrt{G_m^2 + \omega^2 C_m^2}}{\omega C_I G_m \sqrt{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} + \omega^2 C_m (C_I - 1) \sqrt{G_m^2 + \omega^2 C_m^2}} \quad (4.11)$$

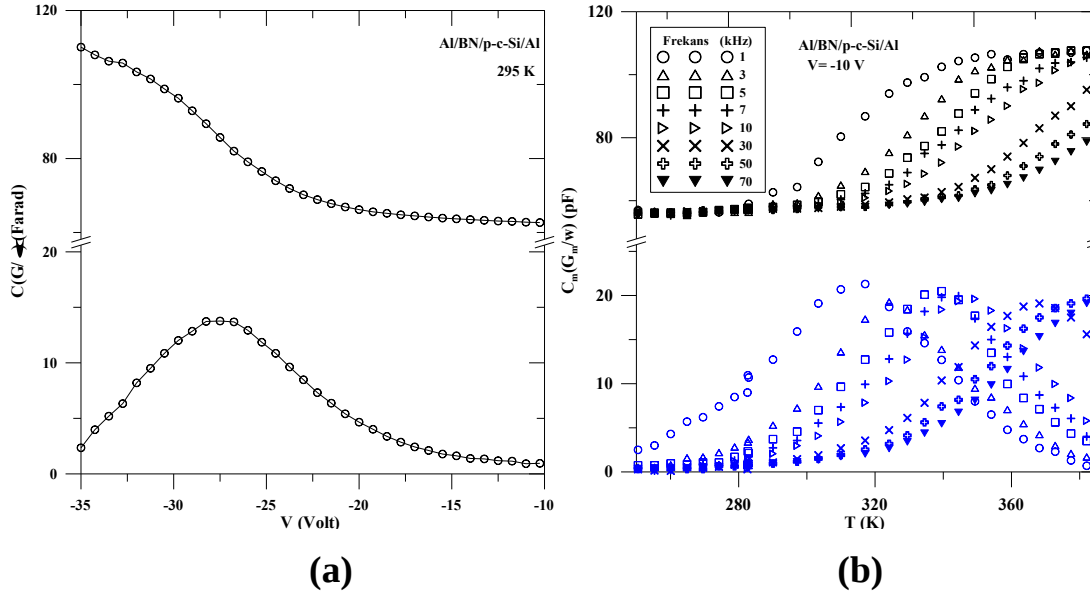
olur.

Burada  $C_I$ = yalıtkan film kapasitansı (örneğin MIS yapıda BN film ve  $\text{CrSi}_2$  yarıiletken için n/p tipi Si) . G'nin  $1/T$ 'ye göre grafiği çizilerek (azınlık taşıyıcı geriliminin jenerasyonu)  $E_A$ 'yı verir. Daha önce söylendiği gibi  $E_A$  etkin mekanizmaya ya  $E_G$  kadar ya da  $E_G$ 'nin yarısı kadar olacaktır. Böylece  $E_A$ 'nın belirlenmesi (veya mekanizmanın) yarıiletkenin enerji bant aralığını belirlemede çok büyük önem taşır.

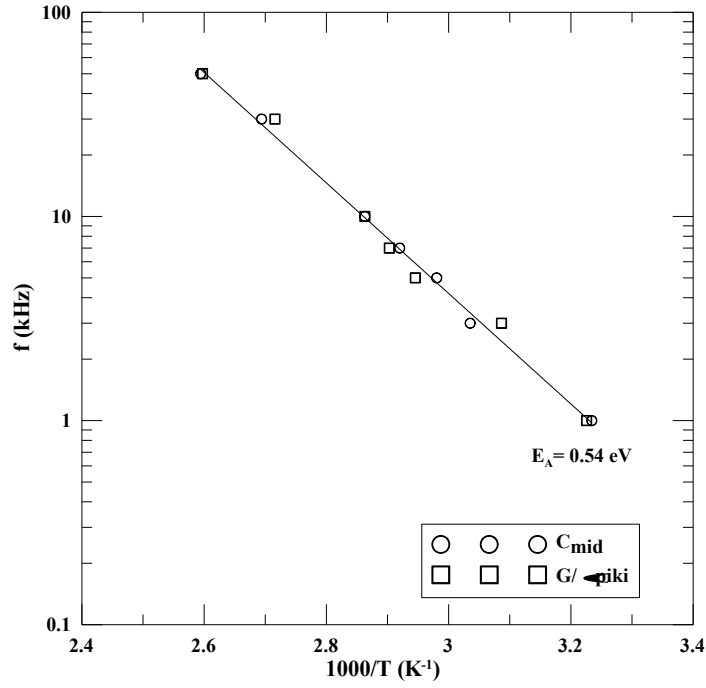
Bu analizi göz önüne alarak, ilk yaklaşım  $\text{Al}/\text{BN}/\text{p-Si}/\text{Al}(\text{ohmic})$  MIS yapısı için yapılmıştır. İlk olarak oda sıcaklığında BN film için  $C(G/\omega)-V_G$  karakteristikleri ile MIS kapasitörün yığılma, ters yığılma ve fakirleşme bölgelerine götüren gerilimleri belirlenmiş ve Şekil 36a'da gösterilmiştir.

Daha sonra, ters yığılma gerilimi için, Şekil 4.36b'de görüldüğü gibi farklı frekanslar için (1kHz-1MHz) sıcaklık taraması yapılmıştır. Frekans- $1/T$  ( $G_m/\omega$ 'nin pik noktasından veya

kapasitans adımlarının ortasından elde edilen) grafiğinin Arrhenius eğrisinden, Şekil 4.36c’de gösterildiği gibi, aktivasyon enerjisi 10V ön elektrot geriliminde 0.54eV bulunmuştur. Ayrıca  $E_A$ ’yı, G gerilime göre simetrik olduğu yerde, Şekil 36a-b,  $1/T$ ’nin fonksiyonu olarak azalan veya artan G’nin eğimiyle de bulunabilir. Sözü edilen her yaklaşımdan 0.55eV civarında tek bir  $E_A$  değeri elde edilmiştir, bu jenerasyon-rekombinasyon mekanizmasına göre beklenen bir değerdir. Yani kristal silikonun 1.12eV ‘lik yasak enerji aralığının yarısına karşılık gelir. ( $E_A \sim E_G/2$ )

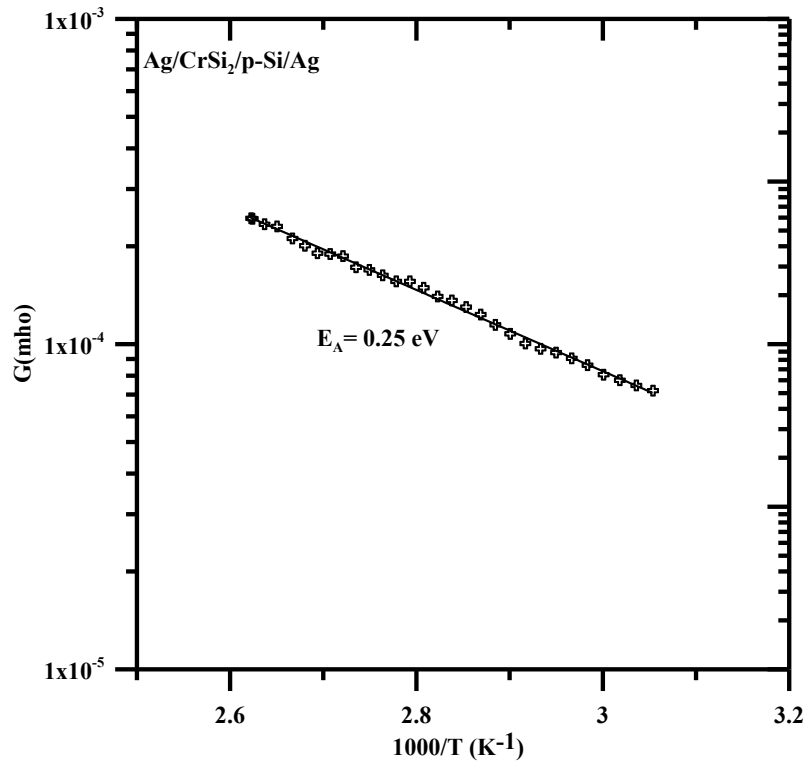


Şekil 4.36 Al/BN/p-c-Si/Al MIS yapısının (a) C-V, (b) G-V karakteristiği



Şekil 4.36 (c) Al/BN/p-c-Si/Al MIS yapısının  $f$ -( $100/T$ ) karakteristiği

Benzer analiz aktivasyon  $\text{CrSi}_2$  için yapılmıştır. AC İletkenliğin sıcaklığın tersine göre grafiği çizilerek aktivasyon enerjisinin 0.25eV olduğu görülmüştür. Elde edilen  $E_A$  değeri daha önce DLTS ölçümleriyle hesaplanmış (Galkin N. G., 2007),  $\text{CrSi}_2$  yarıiletkende p-tipi silikonda Cr-B kompleksine karşı gelmektedir.



Şekil 4.37 Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemine ac iletkenlik değişimi

Bununla birlikte c-Si için önerilen yaklaşımını  $E_G$  değerlerinde CrSi<sub>2</sub> için teorik ve deneysel olarak diğer çalışmalarla (Galkin N. G., 2001, Caricato A. P., 2007) uyumu sayesinde,  $E_A$ 'nın CrSi<sub>2</sub> yarıiletkenin bant aralığı ( $E_G$ ) olduğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yarıiletken silisitler elektriksel, fotovoltaiik, termoelektrik ve elektrokromik özelliklerinden dolayı termoelektrik ve fotovoltaiik aygıtların ve kızılötesi sensörler gibi çeşitli uygulama alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır ve bu malzemeler üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Dar yasak enerji aralığına sahip yarıiletken silisitler içerisinde  $\text{CrSi}_2$  yüksek termal kararlılığından dolayı mikro/nano elektronik uygulamalar için kullanışlı bir malzemedir. Yarıiletken kromsilisit filmlerin üretiminde literatürde karşılaşılan birçok problem vardır ve bu problemler  $\text{CrSi}_2$  filmlerin üretimi için farklı tekniklerin kullanımına neden olmuştur. Bu çalışmada  $\text{CrSi}_2$  filmler ilk defa farklı bir üretim tekniği olarak Katodik ark yöntemiyle n ve p-tipi altlıklar üzerine büyütülmüştür. Bu teknikle üretilen  $\text{CrSi}_2$  filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri XRD, EDS, FEGSEM analizleriyle incelenmiştir. Bu filmlerden elde edilen  $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$  ve  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  heteroeklemlerin elektriksel özellikleri de sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri ve hem sıcaklığa hem de frekansa bağlı olarak C-V ölçümleri ile incelenmiştir.

X-ışınları kırınım deseninde görülen pikler  $2\theta=27.5^\circ, 36.5^\circ, 40.5^\circ, 42.3^\circ, 43.1^\circ, 50.2^\circ, 60.4^\circ, 73^\circ$ , ve  $88^\circ$  saçılma açılara, bunlar da sırasıyla (101), (102), (110), (003), (111), (112), (113), (114) ve (115) düzlemlerine karşılık gelmektedir.  $\text{CrSi}_2$  filmlerin XRD analizi sonucunda bu filmlerin hegzagonal kristal yapısına sahip olduğu ve polikristal doğada büyüdüğü belirlenmiştir. Ayrıca XRD sonuçlarından n-Si(100) ve p-Si(111) yönelimine sahip altlıklar üzerinde büyütülen  $\text{CrSi}_2$  filmlerin benzer özellikte olmalarına rağmen farklı pik şiddetlerine ve yönelimlerine sahip oldukları tespit edildi. Bu da altlık parametrelerinin  $\text{CrSi}_2$  filmlerin yapı özelliklerine doğrudan etki yapabileceği anlamına gelir.  $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$  eklemlerin XRD analizleri incelendiğinde maksimum pik yöneliminin (112) düzlemine ait (%100 piki) ve  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  eklemlerinde maksimum yönelimlerinin (111) düzlemine ait (%100 piki) olduğu görülmüştür. Bu iki maksimum yönelim referans alınarak yapılan tanecik hesabından n-Si(100) üzerine büyütülen  $\text{CrSi}_2$  filmlerin ( 45 nm ve 56 nm ) tanecik boyutlarının p-Si(111) altlık üzerine büyütülen filmlerin ( 22 nm ve 37 nm ) tanecik boyutlarından daha büyük olduğu belirlendi.  $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}$  ve  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  filmlerin 10keV enerjili elektronlarla elde edilen EDS sonuçlarına göre filmlerin krom içerme yüzdesi %32-34 civarında ve Silisyum içeriğinin de %66-68 civarında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlardan  $\text{CrSi}_2$  filmlerin stokiometrik oranda yani beklenildiği gibi 1:2 oranında olduğu görülmüştür.

$\text{CrSi}_2$  filmlerin kalınlık ve morfolojik yapı incelemeleri FEG-SEM analizleriyle yapılmıştır.

Arakesit görüntülerinden büyütülen filmlerin kalınlıklarının 900nm civarı olduğu belirlenmiştir. Arakesitlerden alınan geri saçılma elektron görüntüsü filmlerin kolonsal yapıda olduklarını ve kolonların kalınlıklarının 60-100nm civarı olduğunu göstermiştir. Filmlerin FEG-SEM yüzey görüntüleri incelendiğinde tane boyutlarının yaklaşık 100–150 nm aralığın da olduğu görülmüştür.

Bu sonuçların ışığında bu kaplama yöntemiyle elde edilen  $\text{CrSi}_2$  filmlerin her iki altlık üzerine de başarıyla üretildiği ve p- $\text{CrSi}_2/\text{n-Si}(100)$  ve p- $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}(111)$  heteroeklemlerin p-n ve p-p olmak üzere iki eklem şeklinde oluşturulduğu görülmüştür. Bu eklemlerin elektriksel özellikleri incelenmesi için her iki tarafa Ag kontak yapılmıştır.

$\text{Ag}/\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$  ve  $\text{Ag}/\text{CrSi}_2/\text{p-Si}/\text{Ag}$  heteroeklemlerin elektriksel özellikleri sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V-T), kapasitans-gerilim (C-V-T) admitans ölçümleri ve  $C(G/\omega)$ -V iletkenlik ölçümleri; ayrıca alternatif yöntemle  $\text{CrSi}_2/\text{p-Si}$  heteroeklem için  $C(G/\omega)$ -T ölçümleriyle yasak enerji bant aralığı hesabı yapılmıştır.

$\text{Ag}/\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$  eklemler için yapılan I-V-T ölçümleri geniş bir sıcaklık aralığında (205-355K) üç farklı ortamda (Vakumsuz- kreostat kapalı iken- vakumlu) yapılarak en iyi diyot özelliklerinin vakum ortamında kendini gösterdiği gözlemlendikten sonra ölçümler vakum ortamında yapılmıştır. Eklemlerin doğrultma oranı  $\pm 2\text{V}$  için karanlık koşullarda  $10^3$  civarında olurken daha yüksek sıcaklıklarda bu oranın bozulmaya başladığı gözlenmiştir. Eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri incelendiğinde düşük gerilim altında akımın iki ayrı bölgeden oluştuğu, diğer bir deyişle, iki akım mekanizmasının etkin olduğu görülmüştür. Düşük gerilimlerde ( $3kT/q < V < 0.35\text{V}$ )  $\log I$ -V grafiğinin eğim değeri değişmemektedir, bu durumda eklemden düşük gerilimler için tünelleme mekanizmasının hakim olduğu düşünülmektedir. Daha yüksek gerilim bölgesinde ise ( $V > 0.35\text{V}$ ) eğim değerinin sıcaklıkla değiştiği görülmüştür, bu durum ise rekombinasyon akım mekanizmasının etkin mekanizma olduğunu belirtir.  $0.35\text{V}$ 'u aşan gerilim değerleri için etkin akım mekanizması uygulanan gerilimin kuvvetiyle orantılıdır; yani  $I \propto V^m$ . Burada m sıcaklıkla ters orantılı olarak değişen bir nicelik olup, çalışılan sıcaklık aralığında değerinin 2.3 ile 1.4 arasında değiştiği belirlenmiştir.  $m > 2$  olduğu durumda SCLC iletim mekanizması olduğu bilinmekte olup ayrıca  $m > 1.4$  olduğu durumlar için kusur limitli SCLC (Trap Limited SCLC) akım mekanizmasının varlığı bilinmektedir.  $\text{Ag}/\text{CrSi}_2/\text{n-Si}/\text{Ag}$  eklemi için aktivasyon enerjisi 0.2eV, düzensizlik parametresi ise 560K olarak hesaplanmıştır. Son olarak termoiyonik emisyon teorisine göre diyot parametreleri hesaplanarak, idealite sabitinin 1.66 ile 1.16, bariyer yüksekliğinin ise

0.46 ile 0.80eV arasında değiştiği görülmüştür. İdealite sabiti beklendiği üzere sıcaklıkla azalırken, bariyer yüksekliğinin sıcaklık arttıķa arttığı görülmüştür.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemler için de aynı işlemler yapılıp genel olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Eklemlerin geniş bir sıcaklık aralığında (115-385K) akım-gerilim ölçümleri alınarak, davranışlara bakıldığında, yüksek gerilim değerlerinde bir akım atlaması gözlenirken, 10V'dan düşük gerilimler için doğrultma özelliği görülmüştür. 10V'un ötesindeki I-V eğrilerinde görülen bu belirgin atlamaların p tipi kristal silisyumun kuasi-nötr bölgesine difüz eden ihmal edilemeyecek kadar çok azınlık taşıyıcısının enjeksiyonu nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Bu iletkenlik çok miktarda sızan azınlık yüklerini nötralize etmek için p-c-Si yarıiletken tarafından aynı miktarda çoğunluk taşıyıcısı nötr bölgeye dahil olmalıdır; bu nedenle iletkenlikte artış olur ve bu olgu da iletkenlik modülasyonu olarak literatürde yer almaktadır. Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemlerin I-V karakteristikleri incelendiğinde n-tipi üzerine büyütülen eklemlerle benzer özellikler gösterdiği g r l şt r. Düşük gerilim değerlerinde p-tipi üzerine büyütülen örnekler için de etkin akım mekanizması olarak tünelleme belirlenmiştir. Daha yüksek gerilimlerde SCLC akım mekanizmasıyla beraber yine tünelleme mekanizmasının eklemlerde iletim mekanizmasını sağladığı anlaşılmıştır. Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si eklem için düzensizlik parametresi 560K olarak hesaplanmış olup aktivasyon enerjisi ise 0.26eV olarak bulunmuştur. 155-355K sıcaklık aralığında eklem idealite sabiti 2.24-1.20, bariyer yüksekliği ise 0.53-0.93eV arasında değişmektedir. Her iki eklemden de elde edilen E<sub>A</sub> değerleri, DLTS  l  mleriyle CrSi<sub>2</sub>/p-Si ve CrSi<sub>2</sub>/n-Si heteroekleminde bulunan ve Krom-Bor (Cr-B) kompleksi olarak adlandırılan derin nokta kusur ile uyumludur. (Galkin N. G., 2007)

DC durumda tespit edilen bulgular ac durum için de admitans yöntemiyle incelenmiştir.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag heteroeklemlerin 295-325-355K sıcaklık değerlerinde, geniş frekans aralığında (1kHz, 1MHz) admitans ölçümleri sonucunda sergilediği C-V davranışının MOS türü sığalarla benzerliği fark edilmiştir. Eklem C-V karakteristiğine bakıldığında V>0 bölgesinde, yüksek frekanslar için gerilimden bağımsız sabit bir sığa gözükürken, nispeten düşük frekanslarda sığada bir dağılım fark edilmektedir. -3V ve -1V ters gerilim aralığında 1/C<sup>2</sup>-V eğrilerinden, oluşma potansiyelinin 0.70 0.05V civarında olduğu görülmüştür. 1/C<sup>2</sup>-V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun (N<sub>d</sub>) değeri 2.10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> olarak belirlenmiştir, bu değer de 10-20  cm özdirence sahip n-tipi Si taşıyıcı için beklenen bir değerdir.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/n-Si/Ag eklemlerin -2V ve 4V sabit gerilimler altında geniş frekans aralığı (1kHz-1000kHz) kapasitans-sıcaklık değişimi ve, iletkenlik-sıcaklık ((G/ω)-T) ölçümleri yapılmış ve C(G/ω)-V ile uyumlu sonuçlar gözlenmiştir.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag heteroeklemlerin 295-325-355K sıcaklık değerlerinde, geniş frekans aralığında (1kHz, 1MHz) admitans ölçümleri (C-V ve G/ω-V) yapılmıştır. Eklemin C-V karakteristiğine bakıldığında negatif gerilimlerde kayda değer bir frekans bağımlılığı olduğu görülmüştür. Eklemin kapasitansı belli bir düz bias değerinde birden keskin bir biçimde artmakta ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra azaldığı, 0 Volt'dan büyük gerilim değerleri için kapasitans değerinde önemli bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Admitans analizleri, akım gerilim analizleriyle kıyaslandığında belirli bir voltaj aralığında aynı olayın varlığı görülmüştür. Kapasitans değerinin artmaya başladığı gerilim SCLC mekanizmasının başlangıcına karşılık gelmektedir ve kapasitansın maksimum olduğu nokta azınlık yük enjeksiyonunun yeniden başladığı noktaya denk gelir. Düz beslemeden dolayı enjekte olan elektronlar, n>p olan ters yığılma bölgesini meydana getirmişler ve bunlardan bazıları daha yüksek düz besleme koşulunda yarıiletkenin nötr bölgesine difüz etmişlerdir. Bu arada, yük dengesi korumak için aynı miktarda boşluk Si tarafından yaratılmış olmalıdır, bu da iletkenliğin artmasına sebep olmaktadır.

Ag/CrSi<sub>2</sub>/p-Si/Ag eklemlerin -6V, -8V ve -12V sabit gerilim altında geniş frekans aralığında (1kHz-1000kHz) kapasitans-sıcaklık değişimi ve iletkenlik-sıcaklık (C(G/ω)-T) değişimi incelenmiştir. C(G/ω)-V grafiklerinin, eklemler için C-V ölçümlerinden yorumu yapılan, azınlık yük taşıyıcı enjeksiyonunu destekler nitelikte olduğu görülmüştür.

AC İletkenliğin sıcaklığın tersine göre grafiği çizilerek aktivasyon enerjisinin 0.25eV olduğu görülmüştür. Elde edilen E<sub>A</sub> değeri daha önce DLTS ölçümleriyle hesaplanmış (Galkin N. G., 2007), CrSi<sub>2</sub> yarıiletkeninde p-tipi silikonda Cr-B kompleksine karşı gelmektedir. Bununla birlikte c-Si için önerilen yaklaşımını E<sub>G</sub> değerlerinde CrSi<sub>2</sub> için teorik ve deneysel olarak diğer çalışmalarla (Galkin N. G., 2001, Caricato A. P., 2007) uyumu sayesinde, E<sub>A</sub>'nın CrSi<sub>2</sub> yarıiletkenin bant aralığı (E<sub>G</sub>) olduğu düşünülmektedir. . Böylece dar yasak enerji aralıklı yarıiletken olan CrSi<sub>2</sub>'nin alternatif yöntemle E<sub>G</sub> değerinin 0.25eV olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Anıltürk Ö. S., Turan R., (1999), "Temperature Dependence of a  $\text{CrSi}_2$  Schottky Barrier on n-type and p-type Si", *Semiconductor Science Technology* 14, 1060-1064
- Bost M. C., Mahan J. E., (1987), "An Investigation of the optical constants and band gap of chromium disilicide", *Journal of Applied Physics* 63, sayfa
- Caricato A. P., Leggieri G., Luches G., Romano F., Baruca G., Mengucci P., Mulenko., (2007) "Morphological and structural characterization of  $\text{CrSi}_2$  nanometric films deposited by laser ablation", *Applied Surface Science* 254, 1224-1227
- Dasgupta T., Etourneau J., Chevalier B., Matar S.F., Umarji A.M., (2008) "Structural, thermal and electrical properties of  $\text{CrSi}_2$ ", *Journal of Applied Physics* 103, sayfa
- Decker D., Loos E., Drobniewski C., Mogilatenko A., Schumann J., Beddies G., Hinneberg H.J., (2004) "Structure and properties of  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  multilayers", *Microelectronic Engineering* 76, 331-335
- Fathauer R.W., Grunthaner P.J., Lin T.L., Chang K.T., Mazur J.H., Jamieson D.N., *J. Vac. Sci. Technol. B*6 (1988) 708.
- Filonenko O., (2004), "Structural Investigations of Thin Chromium Disilicide Films on Silicon" Chemnitz University of Technology
- Galkin N. G., Dozsa L., Turchin T. V., Goroshko D. L., Pecz B., Toth L., Dobos L., Khanh N. Q., Cherednichenko A. I., (2007), "Properties of  $\text{CrSi}_2$  nanocrystallites grown in a silicon matrix", *Journal of Physics: Condensed Matter* 19, sayfa
- Hui Z., Wang D., Sun X. Z. X., Wang D., Sun J., Li T., (1999), "Studies on  $\text{CrSi}_2$  Nanocrystal Encapsulated with Styrene/Acrylonitrile Copolymer", *Mol. Cryst. And Liq Crst* 337, 205-208
- Kanicki J., *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices, Materials and Device Physics*, Artech House Inc., 1992; Volume 2.
- Kim C. G., (2005), "Electrical properties of  $\text{CrSi}_x$ ,  $\text{Cr}/\text{CrSi}_x/\text{Cr}/\text{CrSi}_x$ , and  $\text{CrSi}_x/\text{Si}/\text{CrSi}_x/\text{Si}$  sputtered on alumina plates", *Thin Solid Films* 479, 182-187
- Krivosheeva A. V., Shaposhnikov V. L., Borisenko V. E., (2003), "Electronic structure of stressed  $\text{CrSi}_2$ ", *Materials Science and Engineering B*101, 309-312
- Lampert M. A., (1970) "Current Injection in Solids", Academic Press New York
- K. Maex, M.V. Rossum (Eds.), *Properties of Metal Silicides*, INSPEC, London, UK, 1995.
- Mattheiss L. F., (1990), "Structural effects on the calculated semiconductor gap of  $\text{CrSi}_2$ ", *Physical Review B* 43
- Matsuura H., (1994), "Electrical Properties of Amorphous/Crystalline Semiconductor Heterojunctions and Determination of Gap-state Distributions in Amorphous Semiconductors", Kyoto University
- Mattox D. M. (1998) "Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing Film

Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control”, Noyes Publications, Westwood, New Jersey

Mishra K, 1996 Appl. Phys. Lett. 68 3281–3

Neaman D., (2006), “An Introduction to Semiconductor Devices”, McGraw-Hill Companies, Inc, New York

Nicollian E.H., Brews J.R., (1982) “MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology”, John Wiley and Sons

Özdemir O., Özder S., Atılğan İ., Katırcıoğlu B., (1999), "Admittance analysis of an MIS structure made with PECVD deposited a-SiNx:H films", J. Non-Cryst. Sol., 249, 131-144

Pan Z.J., Zang L.T., Wu J.S., (2007) “Effects of Al doping on the transport performances of CrSi<sub>2</sub> single crystals”, Scripta Materialia 56, 245-248

Pan Z.J., Zang L.T., Wu J.S., (2007) “Effects of V doping on the transport performances of CrSi<sub>2</sub> single crystals”, Scripta Materialia 56, 257-260

Samsonov G.V., L.A. Dvorina, B.M. Rud, Silicidi, Metallurgiya (1979)

Seo K., Varadwaj K. S. K., Cha D., In J., Kim J., Park J., Kim B., (2007) “Synthesis and Electrical Properties of Single Crystalline CrSi<sub>2</sub> Nanowires”, Journal of Physical Chemistry 111, 9072-9076

Shaposhnikov V. L., Krovosheeva A. V., Krovosheev A. E., Filonov A. B., Borisenko V. E. (2002) “Effects of stresses is electronic properties of chromium disilicide”, Microelectronic Engineering 64, 219-223

Shinoda D. S. Asanabe and Yozo Sasaki, J. Phys. Soc. of Japan 19 (3) (1964) 269.

Szczeczek J. R., Schmitt A. L., Bierman M. J., Jin S., (2007) “Single-Crystal Semiconducting Chromium Disilicide Nanowires Synthesized via Chemical Vapor Transport”, Chem. Mater. 19, 3238-3243

Sze M. S., Kwog K. N., (2007), “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey

Vossen J. L., Kern W., (1991), “Thin Film Processes II”, Academic Press Inc., San Diego

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 08.06.1984

Doğum yeri İstanbul

Lise 1999-2002 Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2006 Yıldız Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak.  
Fizik Bölümü

Yüksek Lisans 2006- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2007-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

### Yayınlar

- Beyhan Tatar, A. Evrim Bulgurcuoğlu, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, Deneb Yılmaz, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2008), “Electrical And Photovoltaic Properties of Cr/Si Schottky Diodes”, International Journal of Hydrogen Energy.
- Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir ve Kubilay Kutlu, (2008), “Conduction Mechanism Analysis in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/N-Si Heterojunction Through J-V-T Measurement”, Semiconductor Science Technology, 23, 095018 (8pp).
- Beyhan Tatar, Pınar Gökdemir, Deneb Yılmaz, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2007), “The Current-Voltage Characteristics Of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS Type Schottky Diodes”, Balkan Physics Letters.
- Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2007), “Electrical Properties of Cr/p-Type Si Schottky Barrier Diodes At Room Temperatures”, Balkan Physics Letters.

### Poster

- Deneb Yılmaz, Beyhan Tatar, Kubilay Kutlu, Mustafa Ürgen (2008) The Synthesis and Optical Properties of CrS<sub>2</sub> Thin Films Grown by Energetic Arc-PVD Technique (2008), Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi.
- Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, A. Evrim Bulgurcuoğlu, Kubilay Kutlu, (2008), “Electrical Features of Au/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/n-Si Heterojunction Through J-V-T Measurement”, Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi.
- Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, A. Evrim Bulgurcuoğlu, Kubilay Kutlu, (2008) “Conduction Mechanism Analysis in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/n-Si Heterojunction Through J-V-T Measurements”, Nanomat 2008 International Workshop of Advanced Materials and Devices for Photovoltaic Applications.
- Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Kubilay Kutlu ve Mustafa Ürgen, (2008), “Photovoltaic Properties of p-CrSi<sub>2</sub>/n-Si(100) Heterojunction Prepared with an Energetic PVD Technique”, Nano TR 4.
- Pınar Gökdemir, Deneb Yılmaz, Beyhan Tatar, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2007), “The Current-Voltage Characteristics Of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS Type Schottky Diodes”, Türk Fizik Derneği 24. Uluslararası Fizik Kongresi.
- Deneb Yılmaz, Beyhan Tatar, Pınar Gökdemir, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2007), “Electrical Properties of Cr/p-Type Si Schottky Barrier Diodes At Room Temperatures”, Türk Fizik Derneği 24. Uluslararası Fizik Kongresi.
- Orhan Özdemir, Pınar Gökdemir ve Deneb Yılmaz, (2008), “Observation of Apparent MOS Regimes on Al/PECVD Grown Boron Nitride/p-c-Si/Al MIS Structure, Investigated Through Admittance Spectroscopy”, 19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides.

**Projeler**

- Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Pınar Gökdemir, Deneb Yılmaz, Kubilay Kutlu, Bora Bozkurt, (2008), “PECVD Yöntemiyle Büyütülmüş Bor Nitrür Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi ve Tavlamanın Film Yapısına Etkileri” Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü (BAPK), 28-01-01-02.
- Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Pınar Gökdemir, Deneb Yılmaz, Kubilay Kutlu, (2007) “Metal–Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi” Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü (BAPK), 27-01-01-05.
- Kubilay Kutlu, Beyhan Tatar, Orhan Özdemir, Pınar Gökdemir, Deneb Yılmaz, (2007) “Fotovoltaik Uygulamalar İçin  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si Heteroeklemlerin İncelemeleri” Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü (BAPK), 27-01-01-04.