

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN ESASLI FOTODEDEKTÖRLERİN
ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Ayşegül DERE

Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU

TEMMUZ 2014

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

**GRAFEN ESASLI FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül DERE

(121114103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.07.2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 24.07.2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL (F.Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAVAŞ (F.Ü.)

ÖNSÖZ

``Grafen Esaslı Fotodedektörlerin Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin Karakterizasyonu``, konulu yüksek lisans tezimin hazırlanmasında maddi ve manevi her türlü yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na Elazığ Organize Sanayi Bölgesi Maden MYO da görevli olan hocam Yrd.Doç.Dr. Mehmet ÇAVAŞ'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Her zaman ve her konuda olduğu gibi tez çalışmamda da maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

Bu çalışma **FÜBAP-FF 14.06** nolu proje kapsamında Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Ayşegül DERE

Temmuz-2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ.....	1
2.1. Grafenin Yapısal Özellikleri.....	8
2.2. Grafenin Elektronik ve Taşıma Özellikleri ile Bant Yapısı	11
2.3. Grafenin Optik Özellikleri.....	16
3. GRAFEN SENTEZLEME TEKNİKLERİ ve YÖNTEMLERİ	19
3.1. Grafit Kristalinin Mikromekaniksel Bölünmesi (Mekanik Ayrılma Yöntemi).....	20
3.2. Alt Tabaka Temelli Metotlar	21
3.3. Çözücü içerisinde Grafen oksitin İndirgenmesi	22
3.4. Seçilen Çözücü İçerisinde Grafen Üretimi	22
4. YARIİLETKEN MALZEMELER	23
4.1. Fotodedektörler.....	27
4.1.1. Metal Yarıiletken Foto Diyotlar	28
4.1.2. P-N Eklem Diyotlar	30
4.1.3. Schottky Diyotlar.....	31
4.1.4. P-İ-N Diyotlar	32
4.1.5. Heteroeklem Foto Diyotlar	32
4.2. Ramos Teoremi Ve Dış Fotoakım	33
4.3. Absorpsiyon Katsayısı İle Fotodiyot Malzemeleri	35
4.4. Foto Diyotların Akım-Voltaj Karakteristigi	38
4.5. Foto Diyotların Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri	40
4.6. Fotovoltaik Parametreler	40
4.6.1. Açık-Devre Voltajı	41

4.6.2. Kısa Devre Akımı.....	41
4.6.3. Spektral Cevap.....	41
4.6.4. Seri Direnç.....	42
4.6.5. Şönt Direnci.....	42
4.6.6. Kuantum Verimliliği ve Duyarlılığı	42
4.6.7. Doldurma Faktörü	44
4.6.8. Arayüzey Durumları	44
5. MATERYAL VE METOD	45
5.1. DeneySEL İşlemler ve Ölçüm Sonuçları	45
5.1.1. GO Katkılı Methylene Blue (MB) Filmlerin Üretilmesi	47
5.1.2. GO Katkılı Methylene Blue (MB) Diyotlarının Üretilmesi	47
5.1.3. MB+GO Filmlerinin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Görüntüleri ve Yüzey Analizi Sonuçları.....	49
5.1.4. MB+GO Filmlerinin FT-IR Ölçümleri ve Sonuçları.....	52
5.1.5. MB+GO Filmlerinin Optik Ölçüm Sonuçları (UV)	54
5.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto DiyotlarınElektiriksel Ölçüm Sonuçları.....	58
5.2.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri	58
5.2.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Kapasite- İletkenlik-Voltaj Karakteristikleri ..	60
5.2.2.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Kapasite-Zaman Karakteristikleri	67
5.2.3. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Seri Direnç Ölçüm Karakteristikleri.....	69
5.2.4. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri	71
5.3. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının Fotoduyarlılık Ölçüm Sonuçları	76
5.3.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Farklı Aydınlatmalar Altında I-V Karakteristikleri	76
5.3.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Foto Akım- Zaman Karakteristikleri	80
5.3.3. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Foto Akım -İletim Mekanizması.....	83
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	87
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	98

ÖZET

Bu tez`de, grafen oksit katkılı methylene blue (MB+GO) kompozit malzemeleri hazırlandı. İlk olarak Hummer`s metodu ile grafen oksit sentezlendi. MB+GO/p-Si Schottky diyot tabanlı fotodedektörler hazırlandı. Fotodedektörlerin elektriksel ve fototepki özellikleri kapasitans-iletkenlik-gerilim ve akım-gerilim ölçümleri ile araştırıldı. Fotodedektörlerin bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve fototepki parametreleri belirlendi. Hazırlanan fotodedektörlerin fototepki özellikleri grafen oksit katkısı ile geliştirildi. Fotodedektörlerin fotoakımının karanlık akıma oranı (NPDR) olan en önemli performans belirleyici parametresi hazırlanan diyotlar için hesaplandı ve en yüksek değer 0.05 GO katkı oranı için 4.9×10^{-2} A/W olarak bulundu. Elde edilen sonuçlar MB+GO film/p-Si fotodedektörlerin optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, Grafen oksit, Fotodedektör, Organik yarıiletken

SUMMARY

PRODUCTION OF GRAPHENE BASED PHOTODETECTORS AND CHARACTERIZATION OF THEIR ELECTRICAL PROPERTIES

In this thesis, the graphene oxide doped methylene blue composite (MB+GO) materials were prepared. Firstly, the graphene oxide was synthesized by Hummer's method. The MB+GO/p-Si Schottky diode based on photodetectors were prepared. The electrical and photoresponse properties of the photodetectors were investigated by capacitance-conductance-voltage and current voltage measurements. The barrier height, ideality factor and photoresponse parameters of the photodetectors were determined. It was found that the photoresponse properties of the prepared photodetectors were improved by graphene oxide dopant. An important performance metric of the photodetectors is the normalized photocurrent-to-dark current ratio (NPDR) for the prepared diodes were calculated and the highest value was obtained to be 4.9×10^{-2} A/W for 0.05 GO doping ratio. The obtained results indicate that the MB+GO film/p-Si photodetectors can be used in optoelectronic applications.

Key Words: Graphene, Graphene Oxide, Photodetector, Organic Semiconductor.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Periyodik tablonun 4A grubu elementleri.....	3
Şekil 2.1.	Karbonun bazı allotropları. a. Grafit b. Tek duvarlı karbon nanotüp c. Grafen d. 60karbonatomlufulleren(C60)	8
Şekil.2.2.	a. Grafenin bir karbon atomu için elektron bulutunun şematik dağılımı. Grafenin örgü vektörlerin tanımı gerçek uzayda gösterilmiştir. b. Grafenin örgü yapısının şematik gösterimi. a1 ve a2 örgünün birim vektörleridir δ1 , δ2 ve δ3 en yakın komşu vektörleridir. c. Grafenin örgüsüne karşılık gelen Brillouin bölgesi. Dirac noktaları (K ve K') Brillouin bölgesinin köşelerinde konumlanmıştır.	10
Şekil 2.3.	Farklı kenar tipine sahip, kenarlarındaki serbest bağları farklı bir atomla doyurulmuş örnek GNR yapıları. (a) Armchair (b) Zigzag.....	11
Şekil 2.4.	Grafenin elektronik bant yapısı. Sağdaki şekil altı adet Dirac noktasından birinin yaklaşılmış görüntüsüdür.....	13
Şekil.2.5.	İletkenliğin kapı gerilimine göre değişimi.....	14
Şekil.2.6.	Üç farklı sıcaklıkta elektrik alan etkisi (5 K, 70 K 300 K deki alan etkisi).....	15
Şekil.2.7.	Si/SiO ₂ alttaş üzerindeki grafen tabakadan ışığın yansıması.....	17
Şekil 2.8.	Farklı tabaka sayılarına sahip grafenin optik görüntüsü.....	18
Şekil 3.1.	SiO ₂ /Si tabaka üzerine grafenin aktarılması	21
Şekil.4.1.	Katıların band yapısı.....	23
Şekil.4.2.	Yarıiletkenin direk ve indirek bant aralığı.....	24
Şekil.4.3.	Katkılanan maddeye bağlı olarak oluşan P ve N tipi yarıiletkenler.	25
Şekil 4.4.	Fotodiyot'daki algılama olayının şematik gösterilmesi.....	28
Şekil 4.5.	Ters uygulamalı pin fotodiyot devrenin şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.6.	(a) $x=l$ 'de ışık üreten elektron boşluk çifti, V_h ve V_e sürüklenme hızlarıyla zıt olarak elektron ve boşluğun sürüklenmesi, (b) elektronun $t_e = L-l/V_e$ zamanında ve boşluğun $t_h = l/V_h$ zamanında varması, (c) elektron ve boşluğun sürüklenmesi gibi oluşan her bir I_e ve I_h fotoakımını gösterir.(d) elektron ve boşluğun her birinin toplam süresi.....	34
Şekil 4.7.	(a) doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkende foton Emilimi (b) dolaylı bant aralıklı bir yarıiletkende foton Emilimi (VB valans bandı, CB iletim bandı).....	36
Şekil 4.8.	Foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri	39

Şekil 5.1.	Grafen Oluşumu.....	45
Şekil 5.2.	Grafen oksit çözeltisi ve santrifüj edilmesi	46
Şekil 5.3.	Hydrazine Monohydrate içinde GO`ın dispersi.....	46
Sekil 5.4.	0.005 GO katkılı MB filmin AFM görüntüsü verilmiştir.	49
Şekil 5.5.	0.01 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü.....	50
Şekil 5.6.	0.03 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü.....	50
Şekil 5.7.	0.05 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü.....	51
Şekil 5.8.	0.1 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü	51
Şekil 5.9.	FT-IR-ATR analiz cihazı.....	53
Şekil 5.10.	Grafen FT-IR ölçüm sonucu.....	53
Şekil 5.11.	GO FT-IR ölçüm sonucu	54
Şekil 5.12.	GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin geçirgenlik eğrileri	55
Şekil 5.13.	GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin geçirgenlik eğrileri	55
Şekil 5.14.	GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin yansıma eğrileri	56
Şekil 5.15.	GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin $ah\nu^2-h\nu$ eğrileri	56
Şekil 5.16.	Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun devresi	58
Şekil 5.17.	Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının I-V ve C-V ölçümleri için kullanılan deney düzeneği	59
Şekil 5.18.	GO katkılı MB filmlerinin karanlık altındaki I-V grafiği.....	59
Şekil 5.19.	0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi.....	60
Şekil 5.20.	0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun G(S)-V eğrisi.....	61
Şekil 5.21.	0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^{-2} -V eğrisi	61
Şekil 5.22.	0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi.....	61
Şekil 5.23.	0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun G(S)-V eğrisi.....	62
Şekil 5.24.	0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^{-2} -V eğrisi	62
Şekil 5.25.	0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi	62
Şekil 5.26.	0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun G(S)-V eğrisi.....	63
Şekil 5.27.	0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^{-2} -V eğrisi	63
Şekil 5.28.	0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi.....	63

Şekil 5.29. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki G(S)-V eğrisi	64
Şekil 5.30. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C^{-2}(F)$ -V eğrisi	64
Şekil 5.31. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C(F)-V eğrisi.....	64
Şekil 5.32. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki G(S)-V eğrisi	65
Şekil 5.33. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C^{-2}(F)$ -V eğrisi	65
Şekil 5.34. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi.....	67
Şekil 5.35. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi.....	68
Şekil 5.36. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi.....	68
Şekil 5.37. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C(F)-t eğrisi	68
Şekil 5.38. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C (F)-t eğrisi	69
Şekil 5.39. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi.....	69
Şekil 5.40. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi.....	70
Şekil 5.41. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi.....	70
Şekil 5.42. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Rs-V eğrisi	70
Şekil 5.43. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Rs (ohm)-V eğrisi	71
Şekil 5.44. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj-V eğrisi.....	72
Şekil 5.45. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj-V eğrisi.....	72
Şekil 5.46. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj(F)-V eğrisi.....	72
Şekil 5.47. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj(F)-V eğrisi.....	73

Şekil 5.48. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj(F)-V eğrisi.....	73
Şekil 5.49. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj-V eğrisi	74
Şekil 5.50. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj-V eğrisi	74
Şekil 5.51. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(S)-V eğrisi.....	75
Şekil 5.52. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(S)-V eğrisi.....	75
Şekil 5.53. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(F)-V eğrisi.....	75
Şekil 5.54. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi	76
Şekil 5.55. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi	77
Şekil 5.56. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi	77
Şekil 5.57. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I-V eğrisi	78
Şekil 5.58. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I-V eğrisi.....	78
Şekil 5.59. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -t eğrisi	80
Şekil 5.60. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -t eğrisi	80
Şekil 5.61. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 6V`da I_{ph} -t eğrisi.....	81
Şekil 5.62. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 15 V`daki I_{ph} -t eğrisi	81
Şekil 5.63. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 5V`daki I_{ph} -t eğrisi.....	82
Şekil 5.64. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -P eğrisi.....	83
Şekil 5.65. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -P eğrisi.....	84
Şekil 5.66. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -P eğrisi.....	84
Şekil 5.67. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I_{ph} -P eğrisi.....	85
Şekil 5.68. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I_{ph} -P eğrisi	85

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 4.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontaklar	31
Tablo 5.1. AFM de Ölçülen Filmlerin Ortalama Ölçüm Sonuçları.	52
Tablo 5.2. MB+GO ince filmlerin Enerji band aralığı.....	57
Tablo 5.3. Al/p-Si/MB+GO/Al diyotların elektronik parametreleri	66
Tablo 5.4. Al/p-Si/MB+GO/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri.	79
Tablo 5.5. Hazırlanan fotodiyotlar için fotoakım (I-t ölçümüyle), fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik hassasiyet değerleri	83
Tablo 5.6. Al/p-Si/MB+GO/Al diyotlar için elde edilen γ değerleri	86

KISALTMALAR

<u>Simge</u>		<u>Birim</u>
I	: Akım	(A)
J	: Akım yoğunluğu	(A/cm ²)
μ	: Mobilite	(cm ² /V.s)
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi	(eV)
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi	(eV)
E_F	: Fermi enerjisi	(eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı	(eV)
p	: Boşluk konsantrasyonu	(cm ⁻³)
n	: Elektron konsantrasyonu	(cm ⁻³)
N_d	: Verici atomların konsantrasyonu	(cm ⁻³)
N_a	: Alıcı atomların konsantrasyonu	(cm ⁻³)
T	: Mutlak sıcaklık	(K)
I₀	: Ters doyma akımı	(A)
n	: İdealite faktörü	
hν	: Foton enerjisi	(eV)
R	: Direnç	(Ω)
R_s	: Seri direnç	(Ω)
GO+MB	: GO katkılı Methylene Blue	
W	: Tüketime tabakasının genişliği	(Å)
P	: Güç	(Watt)
FF	: Doldurma faktörü	(%)
V_{oc}	: Açık devre voltajı	(V)
I_{sc}	: Kısa devre akımı	(A)

1. GİRİŞ

Silisyum temelli teknolojinin ulaştığı nokta düşünüldüğünde yarıiletken teknolojisinde silikonun yerini alabilecek yeni bir madde arayışı yıllardır araştırmacılar tarafından sürdürülmektedir. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen yeni malzemelerin çoğu kullanılmamakla birlikte silisyum bu alanda en çok kullanılan yarıiletken maddelerden biri olmuştur [1] .

Silikon 20. yüzyılın ortalarından itibaren günümüze kadar birçok uygulamada kullanılmıştır. Fakat silikonun termal değişikliklerdeki salınımları atomların titreşimleri sonucu yapı boyutunda olmasından dolayı 10 nanometrenin altındaki boyut uygulamalarında kullanılamamıştır. Bunun önemli nedenlerinden biri mikrochip hacmini 2 kat düşürmek için malzeme boyutunu 10 kat düşürmek gerektiğinden dolayıdır. Bunun yanında silikon doğrusal olmayan bir bant aralığına sahip olmakla beraber veri hızı GHz'ler mertebesinde ve yük taşıyıcılığı oldukça düşüktür. Bütün bu nedenlerden dolayı günümüzde teknolojinin geldiği nokta dikkate alındığında silikon dışında madde kullanılması ihtiyacı doğmuştur [2].

Stanford Üniversitesindeki araştırmacılar, karbon atomlarının şeritlerinin ultra hızlı işlemcilerin gelecek nesiller için kullanılabilirliğine dair güçlü deneysel kanıtlar sağlamışlardır. Stanford üniversitesinde bir kimya profesörü olan Hongjie Dai ve arkadaşları grafen olarak adlandırılan karbona dayalı bir malzemeye, son derece ince bir şerit ile elde edilen yeni bir kimyasal işlem uygulamış ve daha sonra bu şeritlerin mükemmel elektronik özellikler gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır. Dai; bu özelliklerin teorikte öngörüldüğünü fakat pratikte gösterilmediğini söylemiştir. Bu özellikler, işlemcilerdeki transistor mantığını kullanmak için grafen şeritlerini cazip kılmaktadır. Bu keşif IBM, HP ve Intel'deki araştırmacıların dikkatini çekerek daha fazla ilgiye yol açmıştır. Bir atom kalınlığında tabaka halinde düzenlenmiş karbon atomlarından oluşan grafen, grafitin bir bileşenidir. Yapısı, elektronik alanında gelecek nesillerde kullanılması için çalışılan diğer karbon bazlı malzeme olan karbon nanotüplere benzemektedir. Hem grafen hemde karbon nanotüpler elektronikte çok hızlı geçiş hızına olanak verebilen elektronları, hızlı bir şekilde taşıyabilmektedirler [3].

Grafen esaslı transistörler bugünün silikon transistörlerinden binlerce kat daha büyük hızlarda çalışabilmektedir. Bununla birlikte grafenin bugünkü silikon chiplerle

karşılaştırıldığında önemli bir dezavantajı vardır. Yarı iletken transistörlerin temel özelliklerinde elektriksel iletkenliğin farklı durumları arasındaki geçişi grafende olmasına rağmen bu durumlar arasında açma/kapama oranı olarak adlandırılan bu fark çok yüksek değildir, bu silikonun aksine kapatılabilir olan hatta kapalı durumlarda grafen`de daha çok elektronların hareketinin devam ettiği anlamına gelir. Milyarlarca transistörlerden bu şekilde yapılan bir chip, büyük miktarda enerjinin kaybına neden olduğu için elverişsiz olmaktadır. Fakat araştırmacılar sadece birkaç nm genişliğinde çok ince şeritler halinde grafen tabakalarını oyarak bu açma/kapama oranlarını çarpıcı bir biçimde artırmanın mümkün olabileceğini teorize etmişlerdir. Bu teorileri destekleyen ilk kanıt IBM ve Columbia Üniversitesindeki araştırmacılardan gelmiş, fakat üretilen oranlar hala silikondan çok daha düşük kalmış olup, bunun için Dai, ince grafen şeritler yapmak için farklı bir yaklaşım ele almaya karar vermiştir. Diğer bilim adamları karbon atomlarının uzaklığını ayırmak için litografik teknikler kullanmalarına rağmen Dai, çözüm tabanlı bir yaklaşıma dönmüş ve grafenin yığılmış tabakalarından yapılmış grafit pullar ile işleme başlayarak, sonra bu pullar arasına nitrik asit molekülleri ve sülfürik asit kimyasallarını ekleyerek, hızlı bir şekilde grafen tabakaları birbirinden ayırmak için zorlamış ve asitleri ısıtarak buharlaştırmak suretiyle, tabakaları ayırarak grafitin 200 kat genişlemesini sağlamıştır [3].

Teknolojik uygulamalarda kullanılabilme potansiyeline sahip olması grafen`e duyulan ilginin en önemli sebeplerinden birisi olmaktadır. Grafen, teorik olarak (2B grafit) 60 yıldır çalışılmakta ve bu çalışmaların genelini, karbon bazlı malzemelerin özelliklerini anlamaya yönelik araştırmalar oluşturmaktadır (Wallece P. R. 1947) [4].

Ağırlıkça yer kabuğunun altıncı sırasında karbon elementi bulunur. Farklı karbon-karbon bağlarının oluşumundan dolayı karbonun değişik allotropları da mevcuttur. Bunlara örnek olarak grafit ve elmas verilebilir. Elmas bilinen en sert maddedir. Karbonlar, kendi aralarında yaptıkları bağların dışında diğer elementlerle oluşturdukları bağlarla beraber yaklaşık on milyona yakın bileşik oluştururlar. Karbon yaşamın temel bir elementi olup, tarih öncesi çağlarda keşfedilmiştir. Organik maddelerin yeterli oksijenle tepkimesi sonucunda açığa çıkmasıyla öğrenilmiştir [5].

4A grubu
6 C (Karbon) 12.011
14 Si (Silisyum) 28.085
32 Ge (Germanyum) 72.63
50 Sn (Kalay) 118.710
82 Pb (Kurşun) 207.2

Şekil.1.1 Periyodik tablonun 4A grubu elementleri

Şekil 1.1’de gösterilen 4A grubu elementlerine bakıldığında Ge teknolojisinden Si teknolojisine geçişin periyodik tabloda, bir sıra üste çıkılması anlamına geldiği görülmektedir. Bu düşünceye göre karbonun, silikondan üstün olması gerekmektedir. 4A grubunda 1 basamak üste çıkılmasının pek çok fiziksel ve kimyasal anlamı bulunmaktadır. Kuantum mekaniksel olarak elektronlar birbirleri ile Coulomb kuvveti aracılığı ile etkileşirler. Bu elementler en dış yörüngelerinde aynı sayıda elektrona ve bu yüzden de aynı kimyasal özelliklere sahip olsalar da elektronik dalga fonksiyonlarının boyutları ve sahip oldukları element enerjileri çok büyük farklılıklar gösterir. Örneğin silikonun karbon atomundan 8 tane daha fazla elektronu vardır. Bu yüzden Si elektronlar arasında meydana gelen Coulomb etkileşimini perdelemek için daha geniş elektron yörüngelerine sahiptir. Karbona kıyasla Si’deki kimyasal bağların daha uzun ve zayıf olmasının nedeni de budur (Si-Si arası mesafe 2.35 Å iken C-C arası mesafe 1.42 Å).

Bahsedilen bu özelliklerden başka karbon 3500 °C'lik erime sıcaklığı ile gruptaki diğer elementlerden en yüksek erime sıcaklığına sahip olanıdır. Buna karşılık Si için bu değer 1700 °C'dir. Bütün bu farklar karbonun yaşamdan sorumlu bir element olmasını açıkça ortaya koymaktadır. Karbon'un en önemli özelliklerinden biri elektronik durumlarının hidrojene benzer saf s ve p melezleşmeleri kullanılarak açıklanmasıdır. Bu melezleşmiş yörüngeler birçok farklı kristal yapıya neden olan doğrusal ve kuvvetli kovalent bağları meydana getirir. 1950'li yıllarda bu allotropların yapısını ilk keşfeden bilim adamı Linus Pauling'dir. Pauling grafitin yapısını şu şekilde tanımlar: 'Grafite bugün grafen olarak tanımladığımız dev molekül tabakalarından oluşmaktadır.' Bu yönden bakıldığında grafen diğer bütün allotropların yapı taşıdır. Aslında bu allotropların birçok elektronik ve yapısal özelliği grafenin özelliklerinden elde edilir. Buna rağmen bu allotroplar arasında grafen en son keşfedilen yapıdır. Fullerenler 1980'lerde, nanotüpler 1990'larda keşfedilirken grafen, Andre Geim ve çalışma grubu (2004) tarafından selo bant (scotch tape method) metodu ile şaşırtıcı bir şekilde grafitten, tabaka soyma yöntemi ile elde edilmiştir (Novoselov vd.2004) [2].

Manchester Üniversitesinden Konstantin Novoselov ve Andre Geim'in çalışmaları sonucu grafen'e duyulan ilgi artmış olup, Grafenin gösterdiği önemli özelliklerden biri sıcaklıktan bağımsız $104 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ değerine ulaşan mobilitesi, diğeri ise Kesirli Kuantum Hall etkisidir. Grafende diğer önemli bir özellik elektron taşınımıdır. Yoğun madde fiziğinde elektron taşınımı, göreceli olmayan doğasından dolayı Schrödinger Denkleminde uyum gösterir. Ancak, grafende bu taşınım Schrödinger denkleminde sağlanmaz. Grafendeki elektronların hızları ışık hızına göre oldukça küçüktür, etkin olarak, elektronlar ışık hızının 1/300'lük kesrinde ($\sim 10^6 \text{ m/s}$, fermi hızına kıyasla) kütleli Dirac denkleminde uyum gösterirler. Yani elektronun katı haldeki madde içerisindeki hızları ışık hızından oldukça düşük olduğu için, göreceli olmayan parçacık denklemi (Schrödinger denklemi) elektronların katılardaki davranışlarını oldukça iyi bir şekilde izah etmesine rağmen, grafen için durum oldukça farklıdır. Grafenin bu doğası onun oldukça ilginç fiziksel özelliklere sahip olduğunu gösterir [5,6]. Grafen elektronları için yazılan denklemle gerçekten göreceli parçacıklar için yazılan denklem arasındaki tek fark denklemdeki ışık hızının değeridir. Ayrıca grafendeki elektronların etkin kütleleri sıfırdır. Bu yüzden grafen elektronlarına kütleli Dirac fermiyonları da denmektedir. Temel denklemdeki bu farklılık kuantum taşınım probleminde kendini gösterir. Klein paradoksu olarak adlandırılan, olağandışı tünelleme olayı da grafende gözlemlenmiştir [6].

Materyali tanımlayan en önemli parametrelerden biri boyuttur. 70 yıl önce, Landau ve Peierls iki boyutlu kristallerin tam olarak termodinamik olarak kararlı olmadığını ve dolayısıyla var olamayacağını kanıtlamaya çalışmış olsalar da bu teori, düşük boyutlardaki kristal örgülerindeki termal dalgalanmaların ıraksayan katkılarının, sonlu bir sıcaklıkta atomların yer değiştirmelerinin atomlar arası mesafelerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir. Daha sonraları bu tartışma, Mermin tarafından araştırılıp, geliştirilmiş ve birçok deneysel gözlem ile desteklenmiştir. Gerçekten, ince filmlerin donma noktası, azalan kalınlıkla hızlı bir şekilde düşmektedir ve düzinelerce atomik tabaka kalınlığında kararsız hale gelmektedirler. Bu nedenden dolayı, atomik tek tabakalar daha büyük üç boyutlu yapıların temel parçaları olarak bilinmektedir. 2004 yılına kadar 3D yapılar olmaksızın, iki boyutlu yapıların varlığı öngörülmemiş ve bu durum deneysel olarak grafenin keşfedilmesiyle ve diğer serbest durumdaki iki boyutlu kristallerin (tek tabakalı boron nitrit ve yarı tabakalı BSCCO) gözlenmesiyle değişmiştir. Bulunan iki boyutlu kristaller sadece süreklilik göstermesiyle değil, aynı zamanda yüksek kristal kalitesi göstermesiyle de büyük önem teşkil etmiştir. Diğer önemli nokta ise grafendeki yük taşıyıcılarıdır. Bu taşıyıcılar binlerce atomlar arası mesafelerde saçılmadan hareket edebilirler. İki boyutlu kararlılığın sonradan anlaşılmasının yararı ise böyle tek atomik kalınlıklı kristallerin teoriyle uzlaşa içinde olabileceğidir. Bunu tamamlayan diğer bir bakış açısı da; elde edilmiş olan iki boyutlu kristallerin, yanal skalası $\approx 10\text{nm}$ olan üç boyutta, hafifçe buruşturularak gerçekten kararlı hale getirilmesidir. Deneysel olarak gözlenen böyle bir 3D kıvrılma, elastik enerjide kazanca, belirli bir sıcaklığın üzerindeki toplam serbest enerjiyi minimize eden termal titreşimde sönmeye sebebiyet verir (Geim and Novoselov 2007) [5].

Karbonun 2-boyutlu kristali olan grafenin 2004 yılında geniş alanlarda sentezlenmesi sonucu gelecek nesil elektronik uygulamalar için yeni bir yönelim oluşturmuş ve genel olarak grafen konusundaki araştırmalar elektronik uygulamalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle grafen, yüksek taşıyıcı mobilitesi sayesinde yüksek frekans analog elektronik uygulamalar için gelecek vadeden bir malzeme olmakla beraber elektronik bant aralığının olmaması dijital elektronik uygulamalarını kısıtlamakta fakat optik uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Tek atom kalınlığındaki grafen tabakasının olağandışı elektronik özellikleri ve geniş bant optik geçirgenliği sayesinde, optik geçirgen ve iletken kaplamalardan ultrahızlı fiber lazerlere kadar geniş bir uygulama alanına sahiptirler [7].

Bu çalışmada, grafenin yapısal, elektronik, optik özellikleri, grafen sentezleme teknikleri ve yöntemleri, yarıiletken malzemeler, fotodedektörler ve çeşitleri, I-V karakteristikleri, fotovoltaiik parametreler ile numune hazırlama teknikleri açıklandı. Deneysel çalışmalarda, UV, FT-IR, AFM ve I-V, C-V, G-V, I-t, C-t analizleri yapılarak, yapılan bu analizlerden elde edilen deneysel sonuçların grafikleri çizilip, genel bir değerlendirmesi yapılarak literatürle kıyaslandı. Öncelikle, hummer`'s metoduyla grafitten grafen oksit, GO`den de grafen elde edilerek grafenin ve GO ın FT-IR analizi yapıldı. Grafen oksit, sol jel yöntemiyle Methylene Blue ile belirli oranlarda katkılanırılarak kompozit jel elde edildi, elde edilen jel`ler mikroskop camına film yapılarak bunların optiksel ve yüzeysel özellikleri incelendi aynı zamanda elde edilen jeller ile P-tipi Si üzerine Al/p-Si/MB+GO/Au Schottky diyot yapılarak elektriksel olarak I-V, C-V, Rs-v, G-V, I-t, C-t karakteristikleri incelendi. Oda sıcaklığındaki Al/p-Si/MB+GO/Au Schottky diyotun idealite faktörü, doğrultma oranı ve bariyer yüksekliği gibi parametreler elektriksel karakteristiklerinden elde edildi. C-V karakteristikleri yardımıyla ϕ_B (bariyer yüksekliği), V_{bi} (difüzyon voltajı) ve N_a (akseptör taşıyıcı konsantrasyonu) hesaplandı. I-t grafikleri yardımıyla fotoiletkenlik hassasiyeti (S_{ph}) ve duyarlılığı (R) hesaplanırken, I-V karakteristiklerinden, diyotun doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_{Bo}), gibi temel diyot parametreleri hesaplandı. C-V ve G-V karakteristikleri 10kHz-1MHz frekans aralığında incelendi. Ayrıca, frekansa bağılı deneysel C-V ve G-V ölçümlerinden yararlanılarak seri direnç (R_s) grafikleri çizilerek sonuçlar tartışıldı.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı grafen ve grafen oksit üreterek, üretmiş olduğumuz grafen ve GO`ın moleküler bağ yapısını inceleyerek literatürle uyumlu olup olmadığını belirlemek, organik yarıiletken olan Methylene Blue malzemesine farklı oranlarda GO katkılanırılarak sol jel yöntemiyle üretilmiş olan kompozit jeller yardımıyla GO katkılı MB ince filmlerin optiksel ve yüzeysel özelliklerinin katkı miktarına bağılı olarak değişimini incelemek ve üretilen GO katkılı MB diyotların elektriksel verimliliğini inceleyerek bu diyotların fotodedektör olarak kullanılabileceğini araştırmaktır.

2. GRAFEN

Grafen, karbonun 2-boyutlu malzemesi olup, mükemmel yapısı ve büyüleyici özelliklerinden dolayı araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. (Novoselov ve ark., 2004). Grafen, yüksek oda sıcaklığında $15.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ taşıyıcı hareketliliği, ayarlanabilir band aralığı, görünür bölgede, yüksek şeffaflık ve yüksek mekaniksel mukavemet (güç) gösterir. (Wallace, 1947; Han ve ark., 2007; Nair ve ark., 2008; Fan ve ark., 2011). Bu gibi benzersiz özellikleri şeffaf elektrotlar, görüntüleme cihazları ve güneş pili uygulamaları için oldukça uygundur. (Cai ve ark., 2009; Li ve ark., 2009, 2010; Cruz ve ark., 2012). Grafenin diğer avantajı, (tek ya da çok katmanlı) ultra ince tabaka formunda üretilebilir ve uygun altlıklara transfer edilebilir olmasıdır. Grafen nanotabakalar, dökme grafitin pul pul dökülmesi ile mekanik ve kimyasal buhar çöktürmesiyle de üretilebilir. (Marcano ve ark., 2010). Grafitin pul pul dökülmesi için en yaygın yöntem graphene oksit (GO) elde etmek üzere güçlü bir oksitleyici maddenin kullanılmasıdır. Bununla birlikte, grafenin büyük ölçekli üretimi için grafit tozundan üretilmiş olan grafen oksitin kimyasal indirgenmesi yöntemi kullanılır (Wang ve ark., 2011). Son zamanlarda, Li ve arkadaşları grafen / silikon eklemine dayanarak güneş pilleri üretmişlerdir [8].

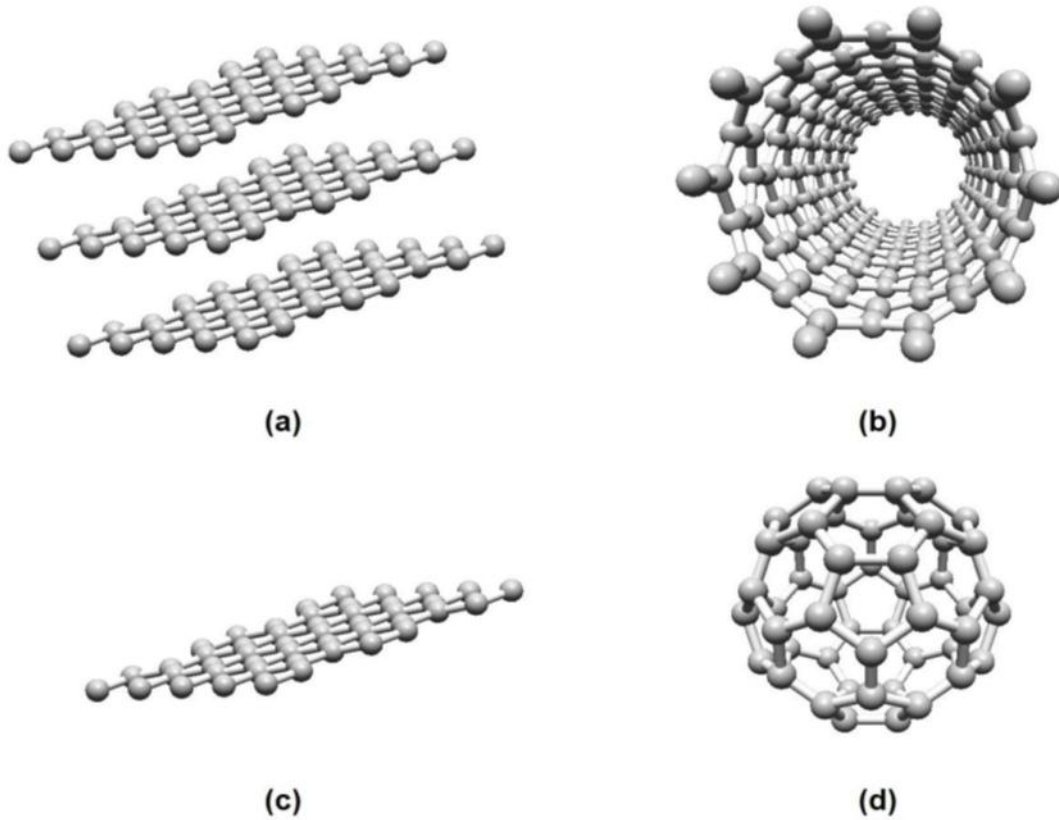
Son zamanlarda, grafen araştırmacıları transistörler ve ince film uygulamaları üzerinde yoğunlaşmış, ancak grafenin farklı alanlardaki uygulamaları için yapılan araştırma ve çalışmalar hızla artmaktadır [9,10]. Grafenin pratik uygulamaları büyük ölçekli yüzeylerde ve silisyum pul için kullanılabilecek grafenin belirlenmesi ve kalite kontrolü, güvenilir, yüksek verimli bir yöntem gerektirir. Grafen oksit (GO) hazırlamak için alternatif yöntemlerden biri modifiye edilmiş Hummers yöntemi ile grafit oksitlenmesi elde edilmesidir. Grafenden farklı olarak, GO suda çözünürlüğü yüksek olan ve çok sayıda reaktif gruplarına (örneğin, karboksil ve hidroksil) sahiptir, ama yine de grafenin temel yapısını sağlar. Böylece, GO fonksiyonel grafen malzeme veya grafen kompozitleri hazırlamak için mükemmel bir zemin sağlar [11]. Kimyasal yapı olarak Grafen oksit (GO) hidroksil ya da epoksit kısımlarına bağlı birkaç sp^3 melezlenmiş karbon atomuyla altıgen şekilde düzenlenmiş sp^2 melezlenmiş C-atomlu tabakalardan oluşur. Bu tabakaların kenar bölgeleri, karboksil ya da karbonil grubu taşır, Esnek ve geniş alan elektronik uygulamalarda, kolay işlenebilir çözüm tabanlı yöntemler tarafından dielektrik özellikleri,

şeffaflık ve elektronik özelliklerinin ayarlanabilirliği grafen oksitin kapsamını genişletir [12].

2.1. Grafenin Yapısal Özellikleri

Karbon atomunun atomik yörüngesinde $1s^2$ $2s^2$ ve $2p^2$ 'yi içeren altı tane elektron bulunmaktadır, dış yörüngesindeki 4 elektron, benzer enerjilere sahiptir. Karbon atomunda, sp , sp^2 ve sp^3 gibi 3 olası hibritleşme, 2, 3, 4 atomlarına karşılık vardır [13,15].

Karbon atomlarının bal peteği örgüsü oluşturacak şekilde bir araya gelmiş tek katmanlı hali grafeni oluşturur. Grafenin çok katmanlı hali ise grafiti oluşturur. Grafenin yuvarlanarak oluşturduğu silindirik yapıları ise basitçe karbon nanotüp olarak ifade edilir.



Şekil 2.1. Karbonun bazı allotropları. a. Grafit b. Tek duvarlı karbon nanotüp c. Grafen d. 60 karbon atomlu fullerene (C_{60}) [14].

Tek duvarlı karbon nanotüp (SWNT), tek katmanlı grafenin yuvarlanmasıyla, çok duvarlı karbon nanotüp (MWNT) ise birkaç katmanlı grafenin yuvarlanmasıyla elde edilen

yapılardır. Fulleren ise karbon atomlarının bir araya gelerek oluşturdıkları küresel yapılara denilmektedir. Karbonun bu dört allotropu Şekil 2,1’de görülmektedir. Bir de çok eski zamanlardan beri bilinen karbonun bir diğer allotropu ise elmas’dır. Grafit, grafen, karbon nanotüp ve fulleren gibi karbon allotropları sp^2 hibritleşmesi yaparken elmas allotropu sp^3 hibritleşmesi yapmaktadır. Grafenin tek katmanlı iki boyutlu yapısında her bir karbon atomu, komşusu olan diğer en yakın üç karbon atomu ile bağ yapar. Oluşan bu bağlar arasındaki mesafe 1,42 Å’dur. İki boyutta karbon atomlarının yaptıkları bu bağlar literatürde σ bağları olarak adlandırılmakta ve σ bağları oldukça kuvvetli bağlardır [13,14]. Bundan dolayı grafen, dünyada en sağlam malzemelerden biri olma özelliği taşımaktadır. Grafenin çok katmanlı hali olan grafitte ise katmanlar arasındaki bağların yaklaşık mesafesi 3,35 Å’dur. Katmanlar birbirine, zayıf Van der waals bağı ile bağlıdırlar. Katmanların birbirlerinden ayrılmalrı bu nedenle oldukça kolaydır. Bu duruma verilecek en güzel örnek, kurşun kalemle bir kâğıda yazı yazıldığında, kalemin ucundaki grafitin katmanları arasındaki zayıf bağların kopması ve bir veya birkaç katman grafen tabakasının yayılarak yazıyı oluşturmastır. Grafen sağlam ve sert bir malzeme olmasıyla birlikte oldukça esnek bir yapıya da sahiptir [14].

Altıgen karbon katmanlarının üst üste yığılmasıyla oluşan yapı, grafiti temsil ettiğı bilinmesine karşın bu yığın içinden tek katmanın izole edilerek sentezlenebileceğine inanılmıyordu. 2004 yılında tek katmanlı bir tabakanın izole edilebileceğini ve bu yapının kararlı olduğunu Konstantin Novoselov, Andre Geim ve çalışma arkadaşları göstermişlerdir. Ayrıca grafene kapı gerilimi (gate potential) uygulayarak, grafenin taşıyıcı yük yoğunluğunun kontrol edilip edilemeyeceğini araştırarak, oldukça önemli olan bir çalışmaya imza atmışlardır. Grafende yük taşıyıcılarının mobilitesini hesaplayarak; ambipolar alan etkisi, kuantum hall etkisi gibi fiziksel nicelikleri de deneysel olarak gözlemişlerdir (Novoselov K.S. ve ark, 2004) [15].

Grafenin birim hücresinde iki adet karbon atomu bulunmaktadır. Kristal örgü yapısı Bravais örgüsü yerine üçgensel örgü şeklinde ele alınabilir. Grafenin örgü öteleme vektörleri,

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{a}}{2} (3, \sqrt{3}, 0) \quad \vec{a}_2 = \frac{\vec{a}}{2} (3, -\sqrt{3}, 0) \quad (2.1)$$

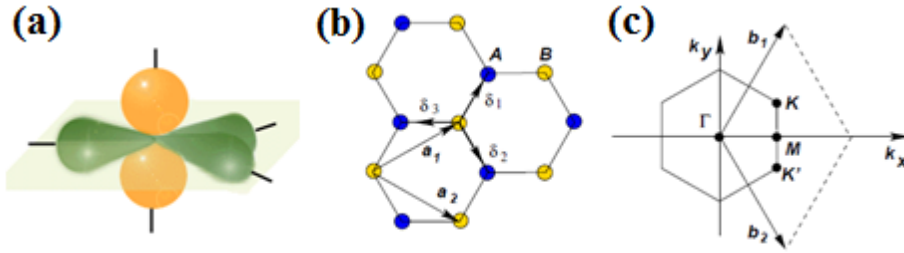
Şeklindedir ve ters örgü vektörleri ise,

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{3a} (1, \sqrt{3}, 0) \quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{3a} (1 - \sqrt{3}, 0) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. denklem 2.1 ve denk. 2.2’de verilenler, iki karbon atomu arasındaki mesafedir. K ve K’ noktaları ise brillouin bölgesinin köşelerinde bulunup, grafenin taşıma özellikleri bakımından özellikle ayrı bir öneme sahiptir. Bu noktaların konumları,

$$K = \left[\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right] \quad K' = \left[\frac{2\pi}{3a}, -\frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right] \quad (2.3)$$

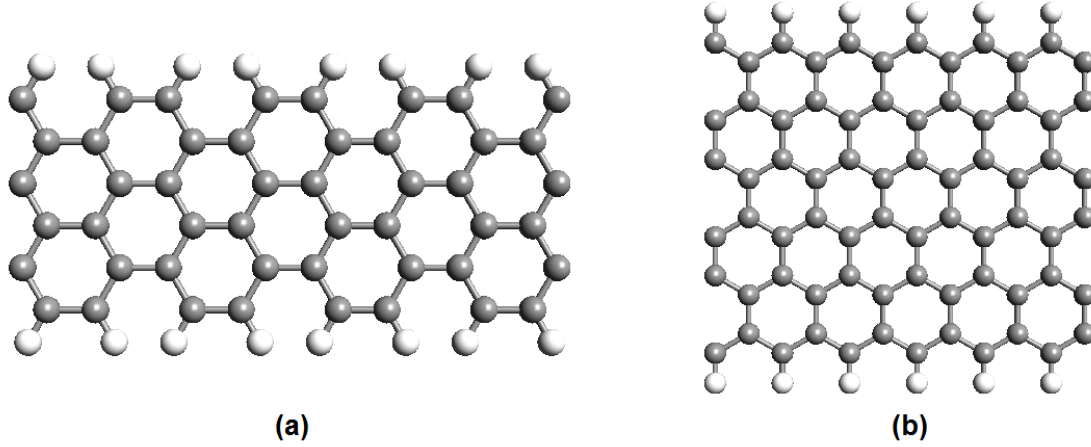
Şeklinde verilmektedir. Ayrıca bu noktalara Dirac noktaları da denilmektedir [2,13-15].



Şekil.2.2. a. Grafenin bir karbon atomu için elektron bulutunun şematik dağılımı. Grafenin örgü vektörlerin tanımı gerçek uzayda gösterilmiştir. b. Grafenin örgü yapısının şematik gösterimi. $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ örgünün birim vektörleridir $\vec{\delta}_1$, $\vec{\delta}_2$ ve $\vec{\delta}_3$ en yakın komşu vektörleridir. c. Grafenin örgüsüne karşılık gelen Brillouin bölgesi. Dirac noktaları (K ve K') Brillouin bölgesinin köşelerinde konumlanmıştır [13].

Basitçe, grafen katmanlarını iki boyutta sonsuza kadar uzanan yapılar olarak ele aldığımızda kenarlarındaki etkiler ve yapıdaki küçük kusurlar göz ardı edilebilir. Oysa sentezlenen grafenler sonlu bir yapıda olabilirler. Teorik anlamda sentezlenen grafen yapıların fiziksel özellikleri, her ne kadar düşünülen sonsuz grafen katmanları ile örtüşse de yapının sonlu olmasından dolayı kenarlarındaki serbest bağlardan kaynaklanan etkiler ortaya çıkmaktadır ve bu etkiler göz ardı edilmemektedir. Bu etkileri ortadan kaldırmak için kenardaki serbest bağlar çeşitli atomlarla doyurulabilir. Bahsedilen bu sonlu grafenin örgü yapısına grafen nanoşerit (GNR) denilmektedir. Kenarlarının tipine göre GNR'ler armchair ve zigzag olmak üzere 2 ayrı kategoride incelenmektedir. Her iki kenar tipinde,

kenarlarındaki serbest bağları farklı bir atomla doyurulmuş GNR'ler Şekil 2.3'de görülmektedir [14].



Şekil 2.3. Farklı kenar tipine sahip, kenarlarındaki serbest bağları farklı bir atomla doyurulmuş örnek GNR yapıları. a. Armchair b. Zigzag [14].

2.2. Grafenin Elektronik ve Taşıma Özellikleri ile Bant Yapısı

Grafen sentezi her ne kadar yakın bir geçmişte gerçekleşmiş olsa da elektronik özelliklerinin araştırılması ile ilgili çalışmalar 1947 yılına kadar dayanmaktadır. Wallace, o yıllarda sıkı-bağ yaklaşımını kullanarak, grafitin elektronik enerji bantlarının yapısını ve Brillouin bölgelerini araştırmış ve araştırmasına da “tek bir altıgen katman” diye ifade ettiği grafen yapısını ele alarak başlamıştır [16].

En yakın komşu yaklaşımında sıkı-bağ Hamiltonyeni,

$$H_0 = -t \sum_{n,\delta_i} a_n^\dagger b_{n+\delta_i} + a_n^\dagger b_{n+\delta_i} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki t , sıçrama parametresi, $a_n^\dagger b_{n+\delta_i}$, A ve B alt örgülerine karşılık gelen yok etme operatörleridir. Denklem 2.4’de verilen Hamiltonyen,

$$H_0 = \sum_{n,\delta_i} (a_n^\dagger + b_{n+\delta_i}^\dagger) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_{n+\delta_i} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

biçiminde de yazılabilir.

Denklem 2.4 ve 2.5’deki bağıntılar,

$$a_a = \frac{1}{N} \sum_k e^{ika} a(k) \quad b_{a+\delta i} = \frac{1}{N} \sum_k e^{ik(a+\delta i)} b(k) \quad (2.6)$$

şeklinde verilirse (N x N'lik bir örgü, N2 ilkel birim hücrelerin sayısı) ve bu operatörler denklem 2.4'de yerine konulursa

$$\begin{aligned} \sum_{n,\delta i} b_{n+\delta i}^\dagger a_n &= \frac{1}{N^2} \sum_k \sum_q \sum_{n,\delta i} e^{i(k-q)n_e - iq\delta i b(q)a(k)} \\ &= \sum_k b(k)^\dagger a(k) \sum_{\delta i} e^{-ik\delta i} \equiv \sum_k b(k)^\dagger a(k) \phi(k) \end{aligned} \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilir. Denklem. 2.7'deki toplamın son hali alınır ve denklem 2.4'de yerine konulursa

$$H_o = \sum_k \phi^\dagger(k) h_o \phi(k) \quad , \quad \phi^\dagger(k) = (a(k)^\dagger \ b(k)^\dagger) \quad (2.8)$$

$$h_o(k) = \begin{pmatrix} 0 & \phi^*(k) \\ \phi(k) & 0 \end{pmatrix}, \quad \phi(k) = -t \left[e^{ik_x a / \sqrt{3}} + 2e^{ik_x a / (2\sqrt{3})} \cdot \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right] \quad (2.9)$$

$$\phi(k) = -te^{\frac{ik_x a}{\sqrt{3}}} \left[1 + 2e^{-i\frac{k_x a \sqrt{3}}{2}} \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right] \quad (2.10)$$

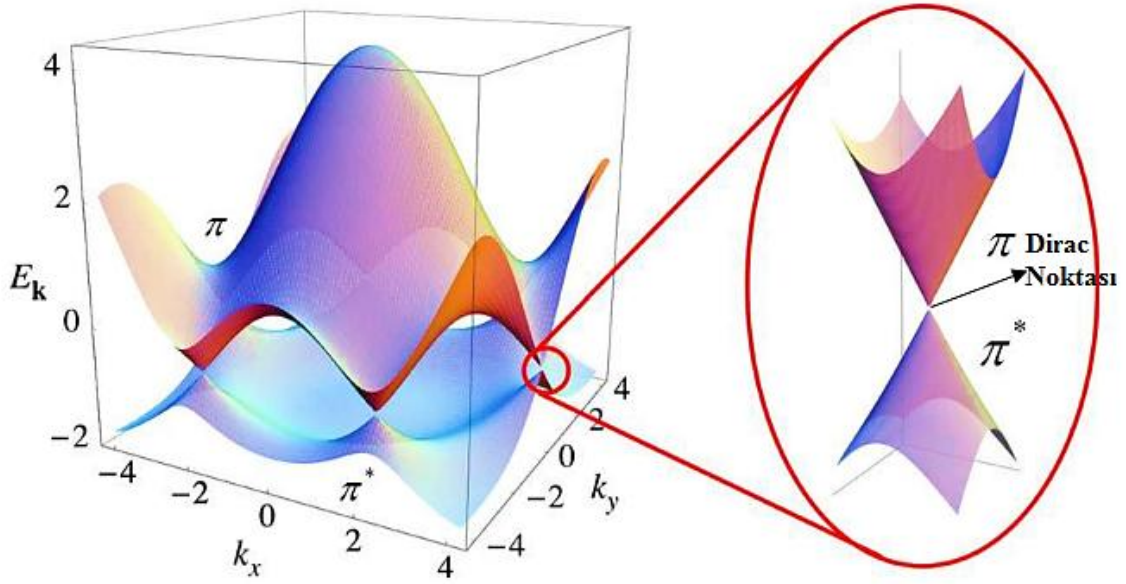
bağıntıları elde edilir. h_o 'ın köşegenleştirilmesi aynı zamanda H_o 'ı da köşegenleştirir. Enerji bantları özdeğerlerden elde edilir.

$$\mathcal{E}(k) = \pm |\phi(k)| = \pm \sqrt{1 + 4\cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right) + 4\cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}k_x a}{2}\right)} \quad (2.11)$$

Elde edilen denklem 2.11 kullanılarak, sıkı-bağ yaklaşımı neticesinde grafenin elektronik bant yapısı elde edilir. (+) işareti değerlik bantlarına (π) ve (-) işareti iletkenlik bantlarına (π^*) karşılık gelmektedir. Fakat bu yaklaşım sadece en yakın ilk komşu karbon atomu ile etkileşimi içermektedir. Denklem 2.11'den yararlanılarak elde edilen elektronik bant yapısı Şekil 2.4, gösterilmiştir [14].

Walace tarafından hesaplanan π^* iletim bandı ve π valans bandları Dirac yada nötr noktaları diye adlandırılan altı noktaya temas eder. Simetri, bu altı noktaları birbirinden bağımsız olan bir K ve K'ne indirgeyebilmeyi sağlar. Elektron taşımada daha çok ilişkili olan düşük enerjilere kendimizi sınırlarsak bantlar, doğrusal bir dağılıma sahip ve bant yapısı EDirac a temas eden koniler 2 olarak görülebilir. Çünkü bu ortogonal π ve π^* durumlarında etkileşim yok, bu yüzden kesişimlerine izin verilir. Bu bantların EDirac a teması gerçek olduğundan grafenin sıfır bant aralığına sahip olduğunu gösterir ve bu

nedenle genellikle bir yarı iletken de sıfır boşluk olarak tanımlanır. Grafenin bant yapıları Dirac noktasından itibaren simetriktir [32].



Şekil 2.4. Grafenin elektronik bant yapısı. Sağdaki şekil altı adet Dirac noktasından birinin yaklaşılmış görüntüsüdür [17,14].

Grafenin birim hücresinin iki atom içermesiyle, Brillouin bölgesi başına iki tane koni şeklinde noktayla karşılaşılır. Bu noktalarda, Şekil 2,4’de de görüldüğü gibi bantlar birbirini keser. Elektronun sahip olduğu enerji bu noktaların yakınında dalga vektörüne doğrusal olarak bağlıdır ve Bu davranıştan dolayı grafendeki elektronlar kütlesiz Dirac fermiyonlarına [18, 19] çok benzemektedir. Dirac denklemi elektronlara benzer şekilde 1/2 spinli rölativistik kuantum parçacıklarını tanımlamaktadır. Bu sebeple rölativistik olmayan kuantum parçacıkları için geçerli olan Schrödinger denklemi grafendeki elektronlar için geçerli olmaz. Aslında bu davranış grafenin kristal yapısının bir sonucudur [14].

Grafenin elektriksel alan sergilemesi ona olan büyük ilginin diğer bir nedenidir. Elektriksel alan etkisine sahip olması transistör olarak kullanılacağı anlamına gelmektedir. Grafen esaslı transistörlerden elde edilen sonuçlara göre grafenin iletkenliği kapı voltajının bir fonksiyonu olarak değişmekte ve bu durum uygulanan kapı gerilimine karşılık öz direncin değiştiğini göstermektedir. Uygulanan kapı gerilimi artırıldığında öz direnç giderek azalmaktadır (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir). Buna karşılık iletkenlik,

uygulanan kapı geriliminin artmasıyla lineer olarak artmıştır. Hall etkisinin işareti $V_g = 0$ civarlarında değişmiştir [20]. Bu işaret değişimi, uygulanan bir pozitif kapı gerilimi ile elektronların büyük bir kısmının harekete geçtiğini veya uygulanan negatif kapı gerilimi ile hollerin çoğunun harekete Geçiş bölgesi, V_g den uzaklaştıkça Hall katsayısı;

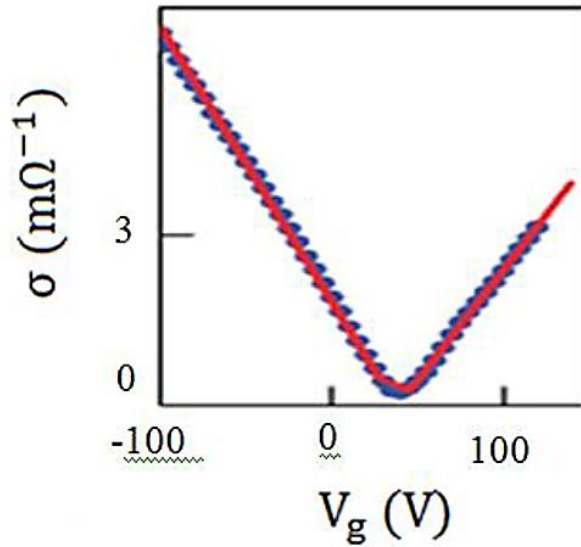
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (2.12)$$

olarak değişmiştir. Burada n elektron veya hollerin (boşlukların) konsantrasyonu'dur ve e elektronun yüküdür. Alanın sebep olduğu yüzeydeki yük yoğunluğu teorik olarak;

$$\frac{n}{V_g} \approx 7.2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{V}^{-1} \quad (2.13)$$

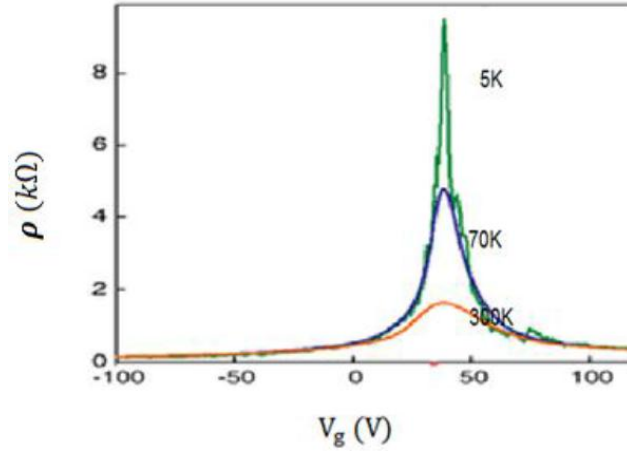
olarak tahmin edilmiştir [21]. Tek duvarlı karbon nanotüplerin kapı gerilimi bağıllığı, grafenin kapı gerilimi bağıllığı ile karşılaştırıldığında grafenin ki oldukça farklılık göstermiş ve tek duvarlı karbon nanotüplerin iletkenliği uygulanan kapı voltajının giderek artırılmasıyla, azalmaya başlamıştır. Tek duvarlı karbon nanotüpler sadece hole (boşluk) taşıyıcılarını içeren bir p-tipi yarıiletken olarak düşünülmektedir [22]. Grafene ise hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletken özelliği gösterebilmektedir.

Grafenin her iki yük taşıyıcısını da içeren bir madde olduğu buradan anlaşılmaktadır. Bu yük taşıyıcıları dışarıdan uygulanan kapı gerilimiyle kontrol edilebilir [23].



Şekil.2.5. İletkenliğin kapı gerilimine göre değişimi [21].

Madde içindeki elektronların (yük taşıyıcılarının) yönetilebilmesi yeni nesil elektroniğin kalbi olduğu için grafen de bulunan elektronların bu farklı davranışı, silisyum tabanlı yarı iletken teknolojisinin limitlerinden daha ötesine gitmemiz konusunda bize izin vermesi beklenilmektedir [21].



Şekil.2.6. Üç farklı sıcaklıkta elektrik alan etkisi (5 K, 70 K 300 K deki alan etkisi) [21].

Kapı geriliminin etkisi sıcaklık düşürüldükçe büyüdüğü görülmüştür. Çok tabakalı grafenlerde sıcaklığın 300K olduğu durumlarda mobilite $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ iken, 4 K olan sıcaklıklarda mobilite $60000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olduğu gözlemlenmiştir [21,24]. Kapı geriliminin etkisi tabaka kalınlığı arttığında giderek kaybolur. Grafit, görülebilir kapı bağımlılığı olmaksızın temelde elektriksel olarak iletkenlik sağlayabilmektedir.

Buna ek olarak, düşük sıcaklıklarda bir manyetik alan uygulandığında elektrik alan etkisinin kuantize olduğu gösterilmiştir. Bundan dolayı grafenin kuantum Hall etkisine sahip olduğu gözlenmiş (KHE) [25]. Daha öncede belirtildiği gibi grafenin diğer hiçbir maddede olmayan bazı özellikleri olduğu bilinmekteydi. Bilinen bu özelliklerden en dikkat çeken grafinin olağan dışı Hall etkisine sahip olması ve hiçbir zaman sıfır iletkenlik göstermemiş olmasıdır. Grafenin olağan üstü Hall etkisi bilinen bir metalden bir grafen tabakasını kesin bir şekilde ayırmaktadır. Kuantizasyon o kadar kesindir ki kuantum Hall etkisi, öz direncin ölçülmesinde kullanılmış ve araştırmacılar, kuantum Hall etkisinin numunenin kalınlığına karşı oldukça duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Hatta iki tabaka grafenin bu olağan dışı Hall etkisini göstermediğini görmüşlerdi.

Grafendeki direncin, iletkenliğe bağılılığı

$$\rho^{-1} = \sigma = ne\mu \quad (2.14)$$

şeklinde olup σ çok küçük V_g ile değişir ve V_g nin değişimi taşıyıcı tipini belirler ve Hall katsayısının işaretini değiştirir.

Grafendeki taşıyıcı mobilitesi, elektrik alan ve magneto direnç ölçümleri;

$$\mu = \frac{\sigma(V_g)}{en} \quad \mu = \frac{RH}{\rho} \quad (2.15)$$

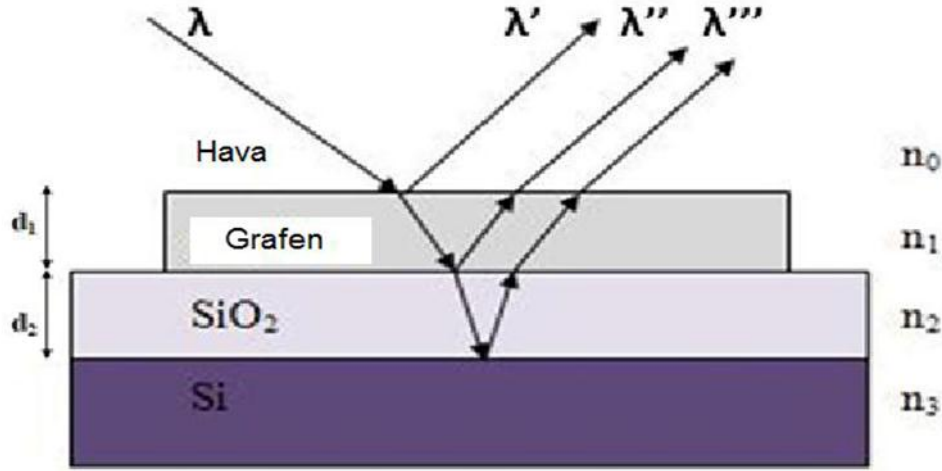
Her iki durumda da mobilite hesabı hemen hemen aynı değeri verir.

Bilinen bir gerçektir ki, grafenin özellikleri altta ve düzensizliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etki yapılan deneyler ile doğrulanmıştır. 30 K den düşük sıcaklıklarda taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık 10^9 1/cm² olan askıda grafen tabakaların mobilitesi yaklaşık olarak 5×10^5 cm²/Vs değerine ulaşmasına rağmen, Yine de alttlık kullanılarak üretilen tek tabaka grafenden beklentiler çok yüksek olmuştur. Altlığın zararlı etkisine rağmen tek tabaka grafen`ler oda sıcaklığında 100 nm lik uzunlukta ve çok düşük sıcaklıkta 1 μm uzunluklarda balistik iletim sergilemişlerdir. [21].

Belirtilen bu üstün elektriksel özellikleri dikkate alındığında grafen, gelecek nesil elektronik devreler için potansiyel bir malzeme olmuştur [23].

2.3. Grafenin Optik Özellikleri

İdeal grafen kalınlığının değeri 0.34 nm dir [26]. Bu kalınlık grafenin bir optik mikroskopla zor görülebileceğini düşündürmektedir. Grafen tabakaların görünübilirliğine dair yapılan ilk çalışmalarda, görünübilirlik kesin bir şekilde dielektrik tabakanın kalınlığına bağlanmış, hatta dielektrik tabaka kalınlığı 300 nm yerine 315 nm (yani % 5 lik bir farkla bile) seçildiğinde tek tabaka grafenin görülemeyeceği ileri sürülmüştü [27,28]. Fakat Singapore üniversitesinden G. Teo ve ark 2008 yılında yaptıkları çalışmayla bu durumun böyle olmadığını hem deneysel hem de teorik olarak kanıtlamışlardı [29]. Yaptıkları deneylerinde farklı kalınlıkta dielektrik kaplı alttlıkların üzerinde tek tabaka grafenin görülebileceğini ispatladılar [23].



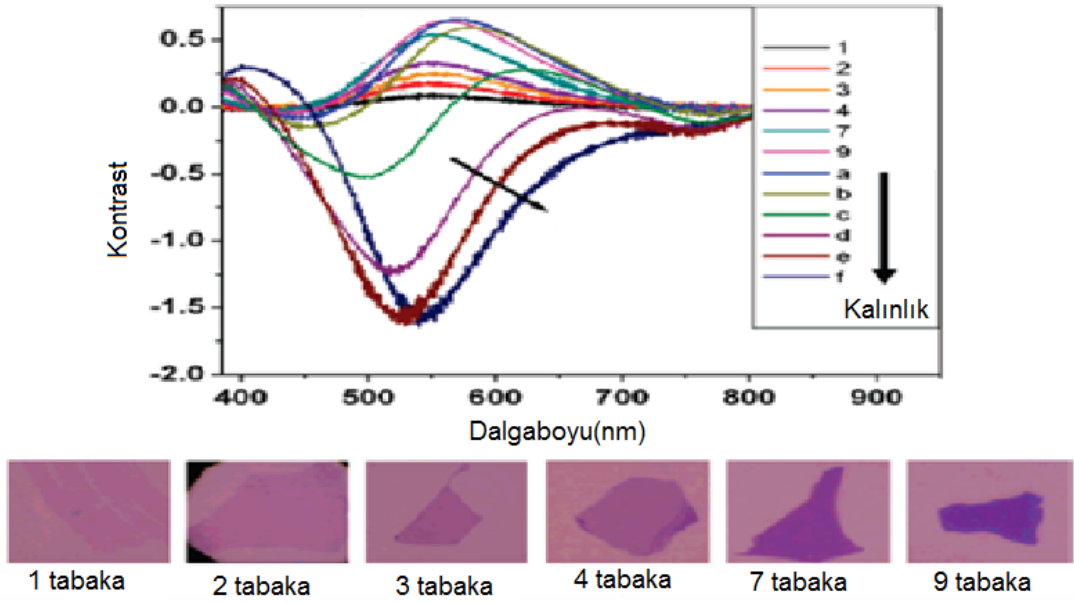
Şekil.2.7. Si/SiO₂ alttaşı üzerindeki grafen tabakadan ışığın yansıması [30].

Görülebilmenin esas nedeni, alanın yüzeyi ile alanda depolanan grafenin kontrast farklılığından kaynaklanmaktadır. Hatta yapılan deneysel gözlemlerde, tek tabaka grafenin çoğu yarıiletken ve metallerin üzerinde de görülebildiğini ortaya koymuştur. Grafenin sadece bir tek tabaka olmasına rağmen gelen ışığın % 2.3 ünü absorbe ettiği gözlemlenmiştir [23].

Tabaka sayısının artmasıyla ışığın Emilimi giderek artar ve her bir tabakanın Emilimini, Işık geçirgenliğinin (T) sadece dikey (k-koruyucu) geçişlere izin verdiği varsayılarak $GO = e^2/4h$ olduğu genel bir optiksel iletkenlik ile ince bir film, Fresnel denklemleri kullanılarak elde edilmiştir [32].

$$T = (1 + \pi\alpha/2)^{-2} \approx 1 - \pi\alpha \approx 0.977 \quad (2.16)$$

Burada $\alpha \approx 1/137$ değerinde olup ince yapı sabitidir. Grafenin görünebilirliği tabaka sayısının artmasıyla daha da artırmakta [33]. Grafenin yüzeyi üzerinde ışığın Emilimi, grafen içerisindeki elektron-boşluk çiftini oluşturmaktadır. Bir dış alan uygulandığı zaman bu elektron ve boşluklar ayrılarak foto akımı oluşturmaktadır. Bir iç alan uygulandığında da benzer bir davranış oluşmaktadır. [34]. Grafenin bir diğer özelliği de fotoışıldanım özelliğidir. Uygun bir bant aralığında grafenin ışıldanım yapması mümkündür [35].



Şekil 2.8. Farklı tabaka sayılarına sahip grafenin optik görüntüsü [26].

Grafenin optiksel ve elektriksel özelliklerinin birleştirilmesiyle, fotonik ve optoelektronik uygulamalar için yeni bir yol açılmıştır. Grafenin bu özellikleri sayesinde fotodetektör, ışık yayan devreler, dokunmatik ekran ve optik sınırlayıcılar gibi devrelerde kullanılması mümkün hale gelmiştir [29,36].

3. GRAFEN SENTEZLEME TEKNİKLERİ ve YÖNTEMLERİ

Grafen nanosheet'ler mikromekanik ayrılma, epitaksiyel, grafen oksit'in (GO) kimyasal ve termal indirgenmesi gibi birçok yaklaşım ile hazırlanabilir. [38]. Yukarıda belirtilen yöntemler ile karşılaştırıldığında, pul pul dökülmüş grafenin kimyasal indirgenmesi grafenin düşük maliyeti ve büyük ölçekli üretiminden dolayı oldukça umut vericidir. GO Brodie's yöntemi, Hummer's yöntemi ve Staudenmaier yöntemi gibi birçok mevcut yöntemlerle grafitin oksitlenmesi ile de üretilebilir [40]. Grafit gibi, aynı zamanda GO oksitlenmiş grafen yaprakları içeren tabakalı bir yapıya sahip, kenarlarında karboksil grupları ve karbonil, düzlemlerinde hidroksil ve epoksil gruplarına sahiptir. GO'de oksijenin bu fonksiyonları ara tabaka içine kolaylıkla eklenebilir, yapı ve su molekülleri daha hidrofilik hale gelebilir [41]. Grafen nanosheet'lerin belirgin fiziksel, kimyasal, optik ve elektronik özellikleri güçlü sentez yollarından etkilenen boyutuna ve yapısına bağlıdır. GO hidrazin hidrat, sodyum borohidrat ve biyolojik indirgeme maddesi glukoz, askorbik asit, galaktoz gibi uygun kimyasal indirgeyici maddeler kullanılarak grafen'e indirgenebilir [42,43]. Bu tür kimyasal indirgenme, hidrotermal yöntemi solvothermal yöntem ve mikrodalga ışınlama yöntemi olarak çeşitli yaklaşımlar grafen tabakalar içine GO indirgenmesi için kullanılabilir[44,45]. Grafen içinde GO ın indirgenmesi için birçok sentez yolları mevcut olmasına rağmen hala yüksek kalitede grafen yaprak sentezlemek için ucuz etkili bir teknik ile benzersiz bir yöntem kaydedilmemiştir. GO plakaların indirgenmesinde önemli parametreler grafendeki π - π bağının konjugasyonunun geri kazanımı ve aynı zamanda grafenin elektronik yapısının değiştirilebilir olduğundan, grafen üzerinde bağlanmış oksijenli fonksiyonel grupların uzaklaştırılmasına odaklanmak gerekir. Günümüzde, kimyagerlerin tek tabakalı grafenden plaka elde etmek için indirgeme reaksiyonunun üç adımını yada ikisini içeren birleşik indirgenme teknikleri aşağıdaki gibidir [39]. Bu yöntemler çok gelişmiş aletler, yüksek maliyet, zehirli gazların kullanımı ve uzun reaksiyon süresi gerektirir [46]. Bu nedenle, düşük maliyet ve hafif sentez yolları ile 2D grafenin sentezine yönelik yeni sentez stratejisinin keşfedilmesi gerekir ve geliştirilmesi büyük önem taşır.

Son yıllarda, sonochemical yöntem nanochalcogenides, metal ve metal oksit nanotanicikleri içeren nanomalzemelerin çeşitli sentezinde daha umut vericidir [47,48]. Sonokimyanın mekanizması akustik kavitasyon (boşluk oluşumu) olgusuna yani sıvı ortam

içinde kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve çökmesine dayanır [49,50]. Sıcak nokta teorisine göre oldukça yüksek sıcaklıkta yaklaşık 500 K civarı, 20 MPa civarı basınç ve yüksek soğutma hızı 10^{10} K s^{-1} civarında akustik kavitasyon sırasında dolayısıyla reaksiyon koşulları sağlanarak sentez parçacıklarının eşsiz özelliklerinden daha fazla sonuç ortaya çıkar [51,52]. Sonochemical yöntem, yüksek sıcaklık gibi aşırı reaksiyon koşullarından dolayı GO'nin indirgenmesi için daha uygun olmaktadır. Bilinen sentez yöntemlerinden ziyade genellikle erişilmez kimyasal reaksiyon aralığına izin veren sonokimyasal yöntem, hızlı soğutma süresi, basınç, yüksek sıcaklık gibi aşırı reaksiyon koşullarından dolayı GO'nin indirgenmesi için daha uygun olabilmektedir [53].

Grafen sentezleme teknikleri 4 ana yöntem altında toplanmak mümkündür.

1-Mekanik Ayrılma Yöntemi.

2- Alt Tabaka Temelli Metotlar.

➤ Epitaksial Büyütme.

➤ Kimyasal Buhar Depolama.

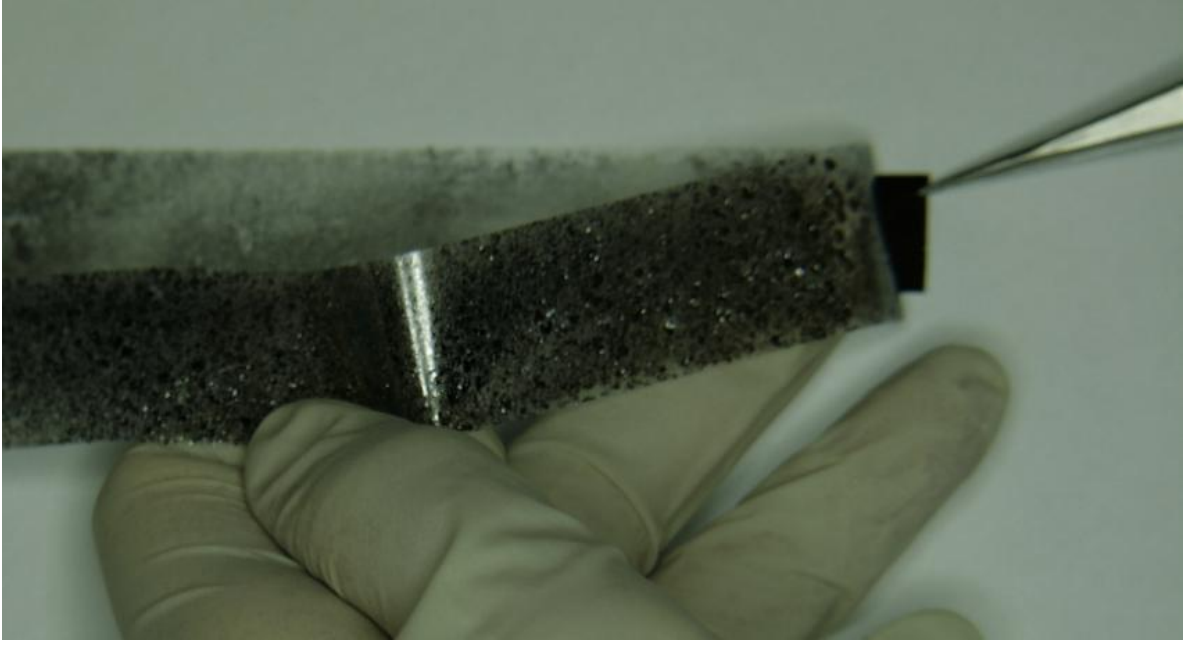
3- Çözelti Temelli Grafen Oksitinin İndirgenmesi.

4 -Seçilmiş Çözeltiler İçinde Grafenin Ultrasonik İşleme Ayrılması [23].

3.1. Grafit Kristalinin Mikromekaniksel Bölünmesi (Mekanik Ayrılma Yöntemi)

Tek tabaka grafen ilk önce yığın grafitten mekanik yöntem kullanılarak A. Geim ve ark tarafından elde edilmiştir. Bu tekniğin diğer bir adı da Selo band yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Bunun nedeni grafitin, tabakalarına ayrılması Selo band aracılığı ile yapılmış olmasıdır [23].

Aynı zamanda bu metod soyma olarak bilinir. Öncelikle grafitin ince tabakaları (genellikle kish grafit, doğal grafit, ve HOPG) cımbız yardımıyla izola band üzerine yerleştirilir. Banddaki grafitten emin olmak için şeritin her iki tarafına bastırılır, sonra band ince bir şekilde yapışmış olan grafit pul ortaya çıkar. Bu katlama ve açma işlemi birkaç kez tekrarlanır, bandda oluşan grafenin yüzü aşağıya bakacak şekilde SiO_2/Si alttaş üzerine bastırılır. Banddaki grafen pulların altında oluşan tabakaya dokunmak için parmaklar yada cımbız kullanılarak basılır. Son olarak band sıyrılır, kalınlıkları farklı olan çok sayıda pullar optik mikroskop altında incelenmek üzere silisyum disk üzerine yerleştirilir [13].



Şekil 3.1. SiO₂/Si tabaka üzerine grafenin aktarılması [54].

3.2. Alt Tabaka Temelli Metotlar

Alt tabaka temelli grafen sentezleme tekniklerinden biri, epitaksiyal büyütme yöntemidir [55]. Bu yöntemde, en üsteki silisyum atomlarının kaçışına izin vermek için bir vakum içerisinde silisyum karbür (SiC) ısıtılır. En üsteki kaçan silisyum atomlarının sonra geride kalan karbon atomları altıgen grafeni yeniden oluşturur. Bu yöntemle grafen üretimi ultra yüksek vakum altında gerçekleştirilmiş olur. Fakat bu yöntemin bazı dezavantajları mevcuttur. Yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık olarak 1500 °C) vakumu 10-10 torr luk ultra vakuma ulaştırmak çok zordur. Yinede epitaksiyel büyütülmüş grafen, altın/polyimide filmler kullanılarak Si/SiO₂ veya başka alttaşlar üzerine iletilebilir. Bu teknik deneysel koşulların zorluğundan ve üretilen grafenin niteliğinden dolayı çok tercih edilen bir yöntem değildir [23]. Son zamanlarda nikel filmler ve bakır folyo büyük ve yüksek kaliteli epitaksiyel grafen imal etmek için kullanılmaktadır.

Alt tabaka temelli grafen sentezleme tekniklerinden bir diğeri ise kimyasal buhar depolama yöntemidir [13]. Metal alttaşlar üzerine grafenin büyütülmesi, grafenin büyüme kaynağı için bir metal alttaşın atomik yapısını kullanan yöntem Kimyasal Buhar Depolama (CVD) yöntemi olarak bilinmektedir [13]. Grafenin kimyasal buhar depolaması, geniş alanlı birkaç tabaka grafen üretmek için basit ve kontrol edilebilir bir epitaksiyal büyütme yöntemi olmuş. Aynı zamanda bu yöntem çeşitli nano maddeler [56] ve karbon nanotüplerin [57] üretilmesinde de kullanılmıştır. Bu teknikte temel mekanizma, yüksek

sıcaklıklarda hidrokarbon gazına maruz bırakılan bir geçiş metali üzerinde, karbon doyuma ulaşarak filmin oluşması esasına dayanır.

3.3. Çözücü içerisinde Grafen Oksitin İndirgenmesi

Başka bir grafen üretme tekniği ise çözücü temelli grafen oksitin indirgenmesidir. Bu teknikte ham madde olarak grafit kullanılarak grafen oksitin kimyasal indirgenmesi sonucu büyük miktarlarda tek tabaka grafen üretilebilmektedir [58,59]. Bu metodda grafen oksit (GO), bir çözelti içerisinde kararlı grafen dağılımı oluşturmak için bir ortam olarak kullanılmış ve grafen oksit, grafitin oksitlenmesinden üretilen ve grafitin orijinal tabakalaşmış yapılarını içermektedir. Hidroksil, karbonil, karboksil işlevsel gruplarının büyük miktarda varlıklarından dolayı ana ve kenar düzlemler üzerine bağlanmışlardır [60,61]. Grafitoksit güçlü bir hidrofiliktir ve su içerisinde kararlı koloidal dağılım meydana getirmek için kolayca ayrılabilen [62]. Oksidasyon süresi boyunca hidrofiliklik giderek artmaktadır. Bu durumda grafen oksitin üstün elektriksel özellikleri gitgide kaybolup, sonunda elektriksel olarak yalıtkan hale gelmekte ve elektriksel iletkenliğini düzeltmek için grafenoksit, bir takım kimyasal süreçlerle grafene indirgenmeye çalışılmaktadır.

Grafit oksitin tek katmanlı filmlerinin indirgenmesi argon/hidrojen gazı içinde hidrazin veya tavlama ile grafen filmlere indirgenir. Bu yöntem ile üretilen grafenin kalitesi ``soyulma`` yöntemi ile karşılaştırıldığında daha düşük olmasına rağmen, sanayide seri üretim için daha uygun olduğu görülmektedir [13].

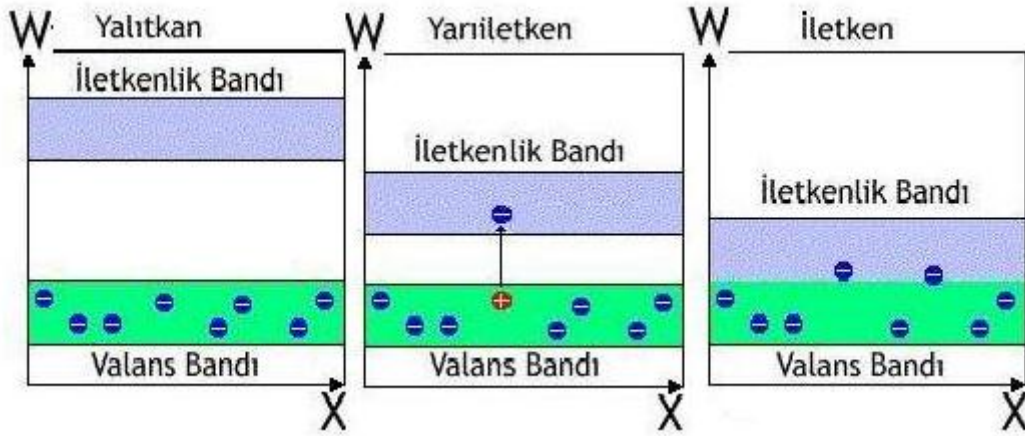
3.4. Seçilen Çözücü İçerisinde Grafen Üretimi

Bir diğer grafen sentezleme metodu ise, seçilen bir sıvı içerisinde grafenin direk olarak ayrılması yöntemi olup, 2008 yılında Y. Hernandez ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur.

Bu teknikte grafit kovalent olmayan çözelti fazının içerisinde patlatılarak grafen tabakalara ayrılır ki bu teknik oksitlenmemiş, kusursuz ve önemli ölçüde nitelikli grafen üretmeye izin vermektedir [63]. Belli organik çözücülerin içerisinde grafit, ultrasonik patlatma sonucunda direk olarak grafen tabakalara ayrılmaktadır. Daha önceleri bu iş kimyasal çözücüler kullanılarak yapılmış olmakla beraber Stanford üniversitesinden H. Dai ve ark. [64] sülfirik asit ve nitrik asiti kullanarak ultrasonik ortamda patlatma işlemini gerçekleştirmişlerdir.

4. YARIİLETKEN MALZEMELER

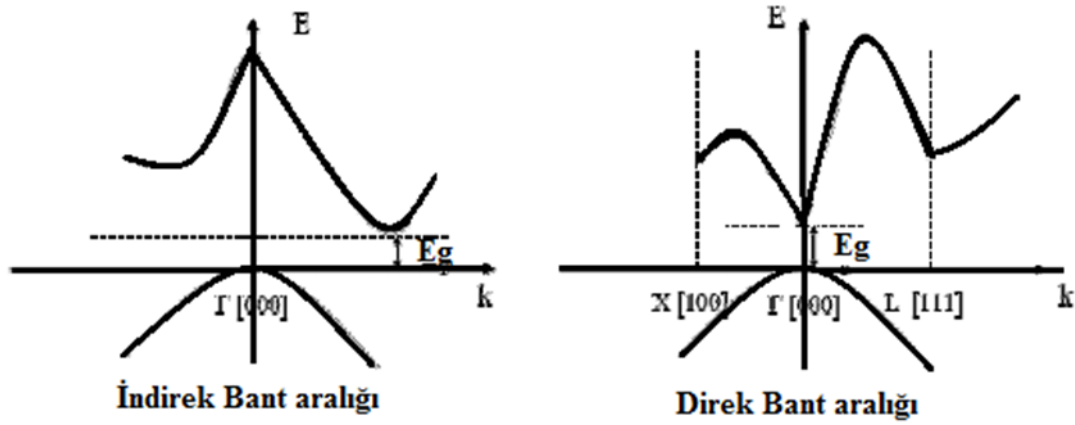
Katılar, elektriği iletme kabiliyetlerine göre iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olarak üç gruba ayrılabilir. Katıların bant teorisi bu farkı açıklar. Elektronlar en düşük enerji seviyesinden başlayarak üst seviyelere doğru enerji seviyelerini doldururlar. Bunun yanında katılardaki atomların dalga özelliklerinden ötürü bazı enerji seviyeleri yasaklıdır. İzinli olan enerji seviyeleri bant oluşturur. Yasak enerji aralığının üstünde bulunan banda iletkenlik bandı, altında bulunan banda ise valans bandı denir. Metallerde iletkenlik bandıyla valans bandı neredeyse çakışmıştır, bu durum iletme katılan serbest elektronların oluşmasını sağlar. Yasak enerji aralığı, yalıtkanlarda elektronun termal enerjisinden çok daha büyüktür. [65].



Şekil 4.1. Katıların bant yapısı.

Valans bandında bulunan elektronların ışık, sıcaklık ve basınç gibi etkenlerle iletim bandına geçmesiyle saf bir yarıiletkende elektriksel iletim gerçekleşmiş olur. Yarıiletkenlerde valans bandında bulunan elektronların, yasak enerji büyüklüğünde veya daha fazla enerji kazanarak iletim bandına geçmesiyle valans bandında bıraktıkları boşluklara hole adı verilir. Boşluklar pozitif yüklü tanecikler gibi davranırlar ve elektronları zıt yönde hareket ettirirler. Bu sebeple yarıiletkenlerde elektron ve hole olmak üzere iki tür taşıyıcı vardır [66]. Değerlik bandının maksimumu iletim bandının minimumunun tam üstünde yer alıyorsa bu yarıiletken malzeme direk bant aralığına sahiptir.

Değerlik bandının maksimumu iletim bandının minimumunun üzerine denk gelmiyorsa bu yarıiletken de indirek bant aralığına sahiptir [67].



Şekil 4.2. Yarıiletkenin direk ve indirek bant aralığı [67].

Oluşum biçimlerine göre yarıiletkenler, beş ana başlık altında toplanabilir; a-) *Elementsel Yarıiletkenler*: Si ve Ge, b-) *Bileşik Yarıiletkenler*: GaAs ve InP, c-) *Üçlü Yarıiletkenler*: $Al_xGa_{1-x}N$ ve $Ga_xIn_{1-x}As$, d-) *Dörtlü Yarıiletkenler*: $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, e-) *Alaşım Yarıiletkenler*: Üçlü ya da dörtlü yarıiletkenlerdir. Alaşım yarıiletkenlerde bant yapısı, örgü sabiti gibi fiziksel özellikler, kendisini meydana getiren ikili yarıiletkenlerden farklıdır. Ayrıca bileşik yarıiletkenler periyodik cetveldeki yerlerine göre adlandırılır (Örneğin III-V, II-VI) [68].

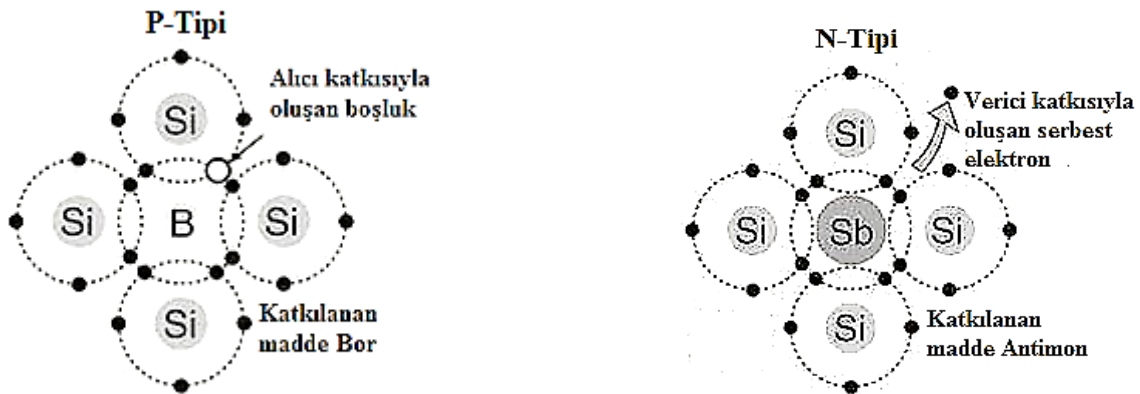
Yarıiletkenlerin sahip olduğu en önemli özelliklerden biri de; iletkenliklerinin, iletkenlerle yalıtkanlar arasında olması ve sıcaklık artışıyla iletkenliğinin artmasıdır.

Yarıiletkenler doğada saf olarak bulunmazlar fakat çeşitli kristal büyütme teknikleri yardımıyla yapay olarak büyütülebilirler. Bir kristal numune kullanılarak numunenin ebatlarının büyütülmesi işlemine kristal büyütme denir [69]. Bu tekniklerden önemli olan ikisi MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition) dir. MBE, laboratuvarlarda özellikle en çok tercih edilen bir tekniktir. Fakat ticari uygulamalar yönünden seri üretim yapan teknik MOCVD tekniğidir [65]. Tabaka tabaka büyütme epitaxial büyütme anlamına gelir. Genel olarak üçe ayrılır (Kittel, 1976). Bunlar:

1. CVD Kimyasal buhar depolama
2. LPE Sıvı fazda tabaka büyütme
3. MBE Molekül demeti kullanarak tabaka büyütme.

Epitaxial büyütmede tek bir kristal altlığın yüzeyi üzerine maddenin ince bir tabakası büyütülür. Yarıiletken devre elemanlarının çoğu epitaxial yöntemlerle üretilirler (Kittel, 1976) [69].

Teknolojide yarıiletkenleri bu kadar önemli kılan sebeplerden bir diğeri de elektriksel özelliklerinin dışarıdan yapıya eklenebilen atomlarla kontrol edilebilir olmasıdır. Kristal yapıda bulunmayan isteğe bağlı olarak dışarıdan yapıya farklı atomlar ekleme işine katkılama (dopping) denir. Bu katkılama işleminin yapıya kattığı enerji seviyesine göre veya yapıda oluşturduğu taşıyıcı yoğunluğuna göre yarıiletkenler n-tipi yarıiletken ve p-tipi yarıiletken olmak üzere ikiye ayrılır [69]. İletime elektronların daha çok katkı sağladığı yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken, iletme boşlukların daha çok katkı sağladığı yarıiletkenler ise p-tipi yarıiletken denir [70]. Yapılan bu katkılama işlemleri yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini belirli sınırlar içinde istenildiği gibi değiştirmeye yarar. Yani bir bakıma yarıiletkenlerdeki taşıyıcı konsantrasyonunu kontrol etme imkânını katkılama işlemi sağlar (Kittel, 1976) [69]. Bu gibi önemli özellikler yüklerin aktığı ve kontrol edilebildiği yapıların yapımında yarıiletkenlerin kullanılmasını sağlamıştır [66]. Bunların yanısıra yarıiletkenler, yeterli katkılama malzemesi ile neredeyse metaller kadar iletken hale getirilebilir [71]. Malzemenin özelliğine bağlı olarak yarıiletkenin katkılanmış bölgesi daha fazla elektron veya boşluk içerebilir [72].



Şekil 4.3. Katkılanan maddeye bağlı olarak oluşan P ve N tipi yarıiletkenler.

Mutlak sıfırda ($T=0K$) yarıiletkenler elektriksel iletkenlik bakımından tıpkı bir yalıtkan gibi davranırlar [70]. Yarıiletken malzemenin içerisine katkılanırılan katkı maddesi kendi doğal enerji band yapısını bozarak, yarıiletken içerisinde kendine özgü

enerji seviyeleri oluşturur. Buna göre yarıiletken katılan maddenin atomu, yarıiletken elektron vererek iyonlaşır maddenin atomu yarıiletken elektron olarak iyonlaşır (alıcı-akseptör) ve iletkenliğe katkıda bulunursa “p-tipi yarıiletken” olarak adlandırılır [70,65,68]. Katkı veya örgü kusuru içermeyen yarıiletkenler, katkısız (saf) yarıiletken malzeme olarak tanımlanır. [73]. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı artar ve bu nedenle serbest elektronların ve boşlukların konsantrasyonu da artar [74,71]. Katkısız yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu, değerlik bandındaki boşlukların yoğunluğuna eşittir [76,77]. Çünkü bir elektron uyarılma sonucu valans bandında bir boşluk bırakarak iletim bandına geçer [70].

1948 yılında Bell Telephone laboratuvarında transistör yapımında yarıiletkenlerin kullanılmasından sonra yarıiletken transistörler, elektronikte elektron tüplerinin yerini almış ve 1950-1960 yılları arasındaki katıhal elektronığının ilk gelişme döneminde yapılan araştırmalar daha çok temel devre elemanları üzerine olmuştur. Silisyum ve germanyum bu dönemde yarıiletken olarak önemli ölçüde kullanılmış ancak zaman içinde silisyumun kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. Bunun nedeni silisyum transistörlerin eklem sıcaklığı 125-200°C aralığındayken germanyum için bu sınır değer 60-100 °C aralığındadır, aynı zamanda silisyumun kristal yüzeyinde SiO₂ gibi tabii bir yalıtkan tabakanın elde edilebilmesi ve doğada bol miktarda bulunmasıdır. Silisyum dioksit kullanılarak 1960 sonrası alan etkili transistörler ve entegre devrelerin yapımı mümkün olmuştur. Ancak çok hızlı gelişen elektronik teknolojisinde silisyumun artan taleplere cevap veremez duruma gelmesi araştırmacıları yeni yarıiletkenler araştırmaya zorlamıştır [65].

Elektronların enerji seviyelerinin boş veya dolu durumları Fermi-Dirac dağılımı ile tanımlanır. Bu dağılım elektronların sıcaklık, Fermi enerjisi veya Fermi düzeyi ile karakterize edilir [76]. Mutlak sıfırın altındaki şartlarda Fermi enerjisi elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda Fermi enerjisi bir durumun işgal edilme olasılığının 0,5 eV’a düştüğü enerji olarak tanımlanabilir [72]. Herhangi bir T sıcaklığındaki sistemde enerjisi E olan bir seviyenin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/(k_B T)} + 1} \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada E_f Fermi enerji seviyesi (eV), k_B Boltzmann sabiti (k=1.308x10⁻²³J/K) ve T mutlak sıcaklıktır.

$T \rightarrow 0$ K iken $E < E_F$ için $E - E_F/k_B T \rightarrow -\infty$ olur. $E > E_F$ için $E - E_F/k_B T \rightarrow \infty$ olur. Bu durumda $f(E < E_F) = 1$ ve $f(E > E_F) = 0$ dır. Buna göre E_F 'nin altındaki tüm enerji seviyeleri dolu ve E_F 'nin üstündeki tüm enerji seviyelerinin boş olduğunu ifade eder. [70,78].

$T = 0$ K ve $E = E_F$ durumuna göre $f(E) = 1/2$ olur. Yani durumların dolu olma olasılığı yüzde ellidir.

Yarıiletkenlerde iletim bandının enerji seviyesi,

$$E_i = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (4.2)$$

bağıntısı ile verilir [28]. Burada E_i iletim bandının enerji seviyesi, E_g yasak enerji aralığı, k dalga vektörü, m_e^* elektronların etkin kütlesidir. Benzer şekilde yarıiletkenlerde valans bandının enerji seviyesi ise,

$$E_v = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada E_v valans bandının enerji seviyesi, k dalga vektörü, m_h^* boşlukların etkin kütlesidir [70,78].

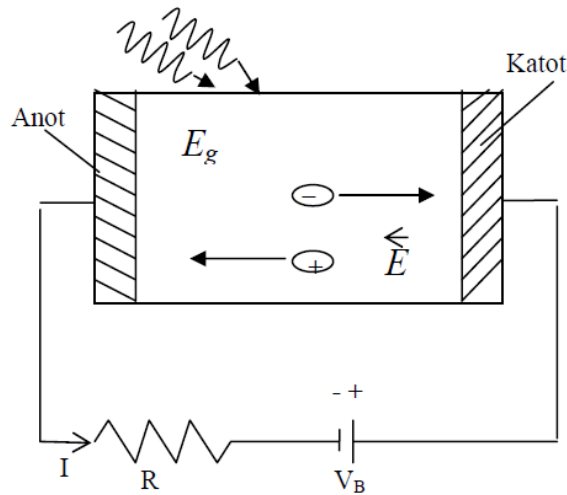
4.1. Fotodedektörler

Günümüz teknolojisinde çok önemli olan optoelektronik aygıtlar; ışık kaynakları, gösterge aygıtları, modülatörler, haberleşme sistemleri ve optik dedektörler gibi aygıtlardır. Bu aygıtlardan olan optik dedektörler ısı ve foton dedektörü olmak üzere ikiye ayrılır. Isıl dedektörlerde ışığın soğurulması cihazın sıcaklığını yükseltir ve böylece sıcaklığa bağlı olan parametrelerde bazı değişimler gerçekleşir. Buna örnek olarak elektriksel iletkenlik verilebilir. Isıl dedektörlerinin çıkışı, eğer soğurma verimi bütün dalga boylarında eşit olduğu varsayılırsa, ışığın dalga boyundan bağımsızdır ve dedektör tarafından birim zamanda soğurulan enerji miktarıyla orantılıdır. Ama foton dedektörlerinde soğurma işlemi bir dizi kuantum olayıyla gerçekleşir. Örnek olarak bir yüzeyden elektronların salınması verilebilir. Bundan dolayı foton dedektörlerinin çıkışı, ışık taneciklerinin soğurulma oranıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca burada ele alınan bütün foton işlemleri kendilerini başlatacak belirli bir minimum foton enerjisine ihtiyaç duyarlar. Bir tek fotonun enerjisi $E = h\nu / \lambda$ eşitliği ile hesaplanır [65].

Şekil 4.4 fotodiyot işleminin temel bir özetidir. Fotonun enerjisi yarıiletkenin band aralığı enerjisinden yüksek ($h\nu > E_g$) ise foton soğurulur. Başarılı soğurma süreci serbest elektron-boşluk çiftinin oluşumu ile sonuçlanır.

Eğer anottan daha düşük potansiyele sahip olmasını sağlayan ters besleme voltajı uygulanırsa, yarıiletken boyunca elektriksel alan oluşur. Elektriksel alan altında anot ve katot çevresinde foto taşıyıcılar toplanır. Anotta artı ve katot da eksi toplanır. Bu iletim süreci dış devre içinde elektrik akımına neden olur. Bu akıma da fotoakımı denir. Sonuç olarak 3 adımda açıklayabiliriz.

- yarıiletken içinde fotonun soğurulması ve taşıyıcıların üretimi
- bölgesel elektrik alan altında taşıyıcıların toplanması
- cihazın kontaklarında (anot ve katot da) taşıyıcıların toplanmasıdır [68].



Şekil 4.4. Fotodiyot'daki algılama olayının şematik gösterilmesi [68].

Fotodiyot'ların en önemli avantajları yüksek hızlarıdır. Çoğunun tepki süresi 200 ns'nin altındadır. Bu yüksek hız, fotodiyotların yüksek hızlı devrelerle beraber kullanılabilmelerini sağlar.

4.1.1. Metal Yarıiletken Foto Diyotlar

Bir metal ile bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde enerji-bant diyagramlarının farklı olmasından dolayı aralarında bir yük alışverişi olur. Bu olay denge durumuna ulaşıncaya kadar sürer. Isıl denge meydana geldiğinde her iki malzemenin Fermi enerjisi

seviyeleri aynı düzeydedir. Metal-yarıiletken kontak, iki malzemenin sıfır dirençle temas etmesi olarak ele alınır.

Yarıiletkenler ve metallerin kullanılmasıyla oluşturulan metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyotlar günümüz elektronik devre elemanları teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [79]. Metal-yarıiletken (MS) yapılar birçok elektronik ve optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamalarından dolayı yarıiletkenlerin performansında temel bileşen olarak kullanılır. Schottky diyotlar, alan etkili transistörler (FETs), mikrodalga diyotlar, hızlı anahtar (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilime göre değişen kondansatörler), güneş pilleri ve fotodedektör elektroniğinde kullanılan diyotun en yaygın türlerinden biridir [80]. Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli olduğu düşüncesi ilk defa Schottky tarafından ortaya konulduğu için bu kontaklara Schottky diyotlar denir [79]. Son birkaç on yıl içinde bazı bilim adamları organik üzerine elektronik tabanlı cihazlarla ilgili önemli çalışmalar yapmışlardır. Organik malzeme ile metal/yarıiletken bağlantısının arayüz durum yoğunluğunun kontrol edilmesi, organik elektroniği ile ilgili uygulamalarda en önemli yöntemlerden biridir. Bu schottky diyotlar için daha verimli kontakların gelişiminde çok önemlidir [80].

Schottky diyotların doğru ve verimli kullanılabilmesi, diyotun özelliklerinin iyi bilinmesine bağlıdır. Bu diyotların çalışması ve güvenilirliği kullanılan yarıiletkenin üretim parametrelerine, yalıtkan tabakanın oluşum sürecine, kullanılan metalin elektriksel özelliklerine, arayüzey durumlarının yarıiletken-yalıtkan gibi enerji aralığındaki dağılımına ve alınan kontakların homojenliğine bağlıdır. Bütün bunlar yarıiletkenin ideal durumdan sapmasına yol açabilir ve hesaplamalarda göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdir. Metal olarak genelde altın (Au), alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki metaller kullanılırken, yalıtkan olarak SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 , SrTiO_3 , Si_3N_4 , HfO_2 gibi malzemeler kullanılır. Özellikle SiO_2 en yaygın kullanılanıdır. Bunun sebebi, SiO_2 'nin doğada bol miktarda bulunması ve SiO_2 'in birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlamasıdır [79].

Metal-yarıiletken diyotlar, yüksek verimli foto detektörler olarak kullanılabilir. Foton enerjisine ve potansiyel farkı eğimine bağlı olarak değişik diyot çeşitleri düşünülebilir. Diyotun üç çalışma modu vardır. Bu modlar,

1. $E_g > h\nu > q\Phi_b$ ve $V < V_B$ için burada V_B engel asma (çığ bozulma) voltajıdır ve metal içinde foto uyarımlı elektronlar engel potansiyelini aşabilir ve yarıiletken içinde toplanırlar. Bu işlem, metal yarıiletken diyotlarda engel yüksekliğini belirlemede ve metal filmde sıcak-elektron geçişinde kullanılır [70,78].

2. $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için radyasyon, yarıiletkende boşluk-elektron çiftini üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n foto diyotunun şekline benzer [70,78].

3. $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ için diyot, foto diyot olarak çığ bozulma bölgesinde çalışabilir.

Foto diyotlar, diyotun yapısına ve kontakların tipine göre;

- p-n eklem diyotlar
- Schottky diyotlar
- p-i-n diyotlar
- heteroeklem diyotlar olarak dört gruba ayrılır [70,78].

Bir Schottky foto diyotunun doğru akımı analiz edilerek ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi diyot parametreleri elde edilebilir. I_0 (ters besleme doyma akımı) ve Φ_b (engel yüksekliği) $V=0$ 'da doğru besleme akımı fit edilerek bulunabilir. İdealite faktörü(n) doğru polarma I-V eğrisinin (dV/dI) eğimi ile belirlenir [70,78].Foto diyot, bir voltaj kaynağı veya bir akım kaynağı olarak kullanılabilir. Yani akım ve voltaj kaynağı olarak iki tür çalışma şekli vardır.

4.1.2. P-N Eklem Diyotlar

Basit pn eklemi fotodiyodunun iki büyük problemi vardır. Öncelikle eklem veya tükenme bölgesinin kapasitesi yüksek modülasyon frekanslarında foto algılamaya izin vermek için yeterince küçük değildir. Bu RC zaman sabiti kısıtlamasıdır. ikinci olarak, bu geçiş (tükenme) bölgesinde en fazla birkaç mikronluk yer almaktadır. Bu nüfuz etme derinliği geçiş bölgesi genişliğinden daha büyük olan uzun dalga boylarında, fotonların çoğunluğu EHP'yi (elektron boşluk çifti) ayırmak ve sürüklemek için bir alana sahiptir yani, tükenme bölgesinin dışında emilir. QE (kuantum verimliliği) uzun dalga boylarında buna uygun olarak düşüktür. Esas olarak bu sorunlar pin fotodiyotunda azalır [85].

4.1.3. Schottky Diyotlar

Schottky diyotlar bir metal ile yarıiletkenin kontak edilmesiyle oluşturulur. Bu diyotların yapısı çok basit görünmekle beraber gerçekte oldukça karmaşıktır. Metal-yarıiletken kontaklar, doğrultucu ve ohmik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Metal- yarıiletken kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (deşikler ve elektronlar) bir yönden başka bir yöne daha kolay iletiliyorsa bu gibi kontağa doğrultucu yada schottky kontak denir. Yani doğru beslem altında akım çok iyi iletilirken, ters beslem altında akımı hemen hemen hiç iletmemektedir. Ohmik kontakta ise taşıyıcılar her yönde kolay iletilir ayrıca ohmic kontak düşük dirençli kesişime sahiptir. Kontakın ohmik veya doğrultucu olmasını, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Φ_m metalin, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, metal-n tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise “doğrultucu kontak” ve $\Phi_m < \Phi_s$ olması durumunda ise “ohmik kontak” oluşur. Metal-p tipi kontaklarda ise $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur. Doğrultucu kontak Schottky diyottur [75].

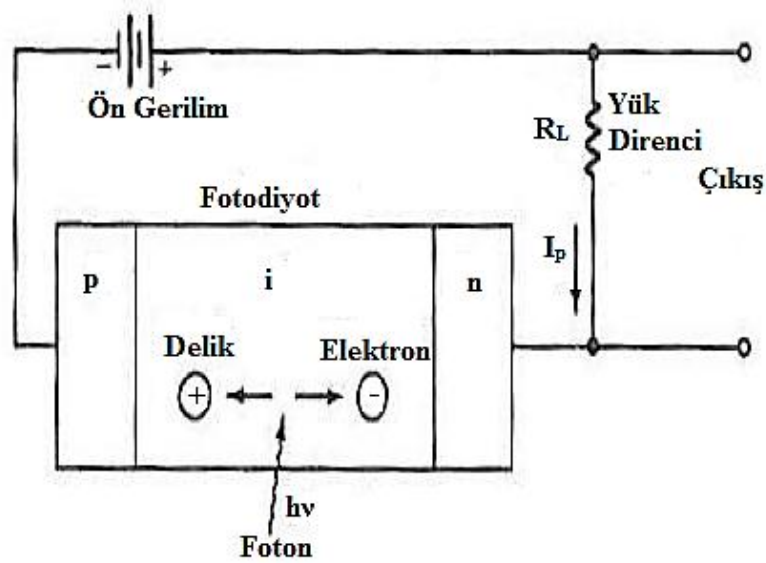
Tablo 4.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontaklar [75].

İş Foksiyonları İlişkisi	Yarıiletken Türü	Kontak Türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Ohmik
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Doğrultucu

Schottky fotodiyotları, çoğunluk taşıyıcı malzemeleri olarak bilinir. Bu özellik, yüksek hız deteksiyonunun ihtiyaç duyulduğu uygulamalar için Schottky fotodiyotlarına olan ilgiyi artırır. Foto cevap bakımından Schottky fotodiyotları, yüksek emici ve yansıtıcı metal Schottky tabakası yüzünden düşük verimden yoksundur. Bu durum, saydam kontak malzemelerin kullanılması veya daha karmaşık arka-aydınlatmalı heteroyapı dizaynının kullanılmasıyla çözülebilir. Tek kutuplu Schottky ve MSM (metal-yarıiletken-metal) fotodiyotları kolayca katkılamanın bir tipi ile geliştirilir [78].

4.1.4. P-İ-N Diyotlar

$p^+ - i - n^+$ yapıya sahip diyotlardır. p^+ ve n^+ bölgelerinin katkı maddesi oranları yüksek ise i bölgesi büyük dirençlidir. Düşük frekanslarda diyot bir p-n doğrultucu gibi çalışır. Frekans yükseldikçe i bölgesinin etkinliği artar. Yüksek frekanslarda i bölgesinin doğru yöndeki direnci küçük, ters yöndeki direnci ise büyüktür. Diyot'un direnci uygulama yerine göre iki limit arasında sürekli veya kademeli olarak değiştirilebilmektedir.



Şekil 4.5. Ters uygulamalı pin fotodiyot devrenin şematik gösterimi.

Cihazın yapısı çok az n tabanlı gerçek (i) bölgesi tarafından ikiye ayrılmış p ve n bölgelerinden ibarettir. Bu gerçek (i) bölgesinin elektron taşıyıcılarının tamamen boşaltılması amacıyla normal şartlar altında cihaza zıt ve yeterli derecede ters voltaj uygulanır. p-i-n diyotlar değişken dirençli eleman olarak, mikrodalga devrelerinde, zayıflatıcı, faz kaydırıcı, modülatör, anahtar gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır [68].

4.1.5. Heteroeklem Foto Diyotlar

Heteroeklem yapılar gelişmiş yarıiletken cihazların çoğunun temelinde yer almaktadır. Yüksek performanslı optik kaynaklar ve detektörler için vazgeçilmez önemli bir devre elemanıdır [84]. Yüksek hızlı ve yüksek frekanslı analog cihazların yapımında giderek gelişen bir uygulama alanına sahiptir. Heteroeklem yapılar farklı yasak enerji aralığına sahip iki yarıiletkenin birbiri üzerine büyütülmesiyle meydana gelir [81]. İletkenlikleri aynı olan yarıiletkenlerle oluşturulan heteroekleme isotype heteroeklem,

iletkenlikleri farklı olan iki yarıiletken ile oluşturulanlar ise anisotype heteroeklem olarak adlandırılmaktadır. Heteroeklem yapı özellikle Lazer, Led diyotlar, Foto diyotlar, güneş pilleri vb. birçok elektronik devre elemanı yapımında kullanılmaktadırlar [81,84].

Farklı band genişliklerine sahip iki yarıiletken arasında oluşturulan bir heteroeklem ile foto diyot meydana getirilebilir. Bu foto diyotların önemli avantajlarından biri kuantum veriminin yüzeyden eklem mesafesine bağlı olmamasıdır. Çünkü malzemenin geniş bir band aralığı gelen optik enerjinin geçirgenliği için saydam bir pencere olarak kullanılabilir [82]. Buna ek olarak heteroeklem yapı cevap hızı ve kuantum verimi için eşsiz bir malzeme kombinasyonu sağlayabilir ve verilen bir optik sinyalin dalga boyu için optimize edilebilir. Diğer bir avantajı ise karanlık akımının düşük olmasıdır [82,83].

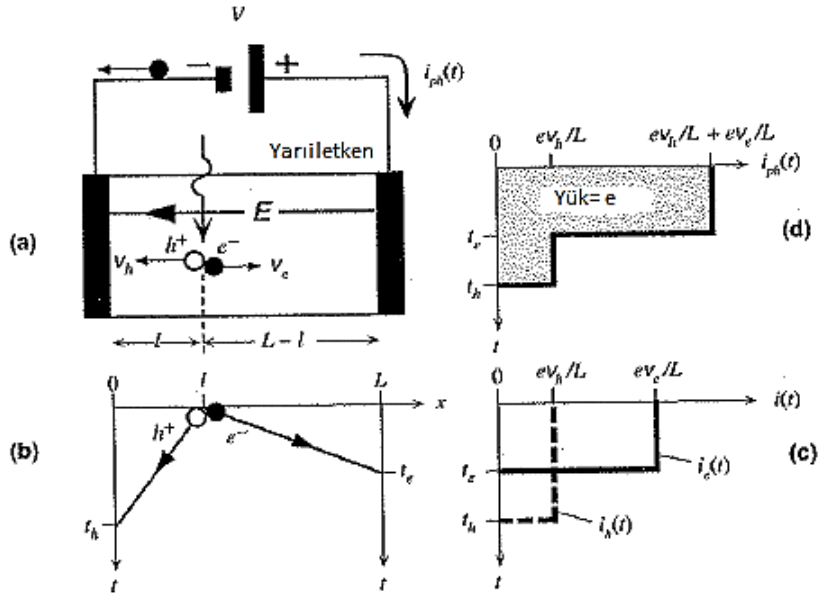
4.2. Ramos Teoremi Ve Dış Fotoakım

Şekil 4.6 (a) 'da gösterildiği gibi taraflı ve bir ihmal edilebilir karanlık iletkenliğe sahip yani elektrot yarı-iletken malzemeyi düşünün. Elektrotlarda taşıyıcılar katkılanmaz fakat fazla taşıyıcıların örneğe ulaşmasına ve pil tarafından toplanmasına izin verir. (Bunlar katkısız elektrotlar diye adlandırılır.) Örnekteki alan E düzgün olup, V / L 'dir. Bu durumun daha sonra ters taraflı pin fotodiyotunun gerçek(iç) bölgeden neredeyse aynı olduğunu göreceksiniz. Bir tek foton sol elektrottan $x = l$ gibi bir pozisyonda emilir ve anında bir elektron boşluk çifti oluştuğunu varsayalım. İlgili sürüklenme hızları ile ters yönde elektron ve boşluk sürüklenmesi $V_e = \mu_e E$ ve $V_h = \mu_h E$, μ_e ve μ_h sırasıyla elektron ve boşluk da sürüklenme hareketleri nerede vardır. Taşıyıcıların geçiş süresi, sürüklenmesi için bir taşıyıcı için gereken zamanı bu toplama elektrotun oluşma noktasıdır. Elektron ve boşluk çiftinin geçiş süreleri şekil 4.6 (b) deki diyagram üzerimde göze çarpar.

$$t = \frac{L - l}{V_e} \quad t_h = \frac{l}{V_h} \quad (4.4)$$

Önce sadece sürüklenen elektron kabul edelim. Bu elektronun hareketi nedeniyle bir dış $i_e(t)$ fotoakım olduğunu varsayalım. Elektron elektrik alanının eE kuvveti tarafından hareket ettirilir. Bir dx mesafesinde hareket ettiğinde, iş bir dış devre tarafından yapılmalıdır. Dolayısıyla,

$$\text{Yapılan iş} = eE dx = V i_e(t) dt$$



Şekil 4.6. (a) $x=l$ 'de ışık üreten elektron boşluk çifti, V_h ve V_e sürüklenme hızlarıyla zıt olarak elektron ve boşluğun sürüklenmesi, (b) elektronun $t_e = L-l/V_e$ zamanında ve boşluğun $t_h = l/V_h$ zamanında varması, (c) elektron ve boşluğun sürüklenmesi gibi oluşan her bir i_e ve i_h fotoakımını gösterir. (d) elektron ve boşluğun her birinin toplam süresi [85].

Kullanılan $E = V/L$ ve $V_e = dx/dt$ elektron fotoakımını buluruz.

Elektron fotoakımı,

$$i_{e(t)} = \frac{eV_e}{L} ; t < t_e \quad (4.5)$$

örnekte, elektron sürüklendikçe (V_e hızına sahip) bu akımın akmaya devam ettiği oldukça açıktır. Elektronun pile ulaşması sonunda t_e süresi boyunca sürer. Böylece elektron hemen ışıkla aydınlatılmış olmasına rağmen dış fotoakım anlık değildir ve bir süre yayılmıştır. Elektron fotoakımı $i_e(t)$ şekil 4.6 (c) de gösterilmektedir.

Şekil 4.6 da olduğu gibi verilen dış devredeki bir boşlukta fotoakım $i_h(t)$ üretilecek aynı zamanda boşluğa sürüklenen benzer parametreler uygulayabiliriz

Boşluk fotoakımı,

$$i_{h(t)} = \frac{eV_h}{L} ; t < t_h \quad (4.6)$$

Toplam dış akım yani toplamı şekil 4.6 (d) de gösterildiği gibi $i_e(t)$ ve $i_h(t)$ olacaktır. Toplanan Q_{toplanan} yükü değerlendirmek için I_{ph} dış akımını entegre edersek bulabiliriz.

$$Q_{\text{collected}} = \int_0^{te} i_e(t) dt + \int_0^{th} i_h(t) dt = e \quad (4.7)$$

Bu sonuç, Şekil 4.6 (d) 'de $I_{ph}(t)$ eğrisi altındaki alan değerlendirilmesi ile doğrulanabilir. Bu durumda, Şekil 4.6 (d) 'de gösterildiği gibi alanda toplanan yük $2e$ ama sadece bir elektron değildir. Ramo 's teoremi için (4.5) den (4.7) denklemi oluşturulur. Bir q yükü L ile ayrılmış iki taraflı elektrot arasında bir alan tarafından bir $V_d(t)$ hızı ile sürükleniyor ise, o zaman q 'nun bu hareketi ile verilen bir dış akımı üretir.

$$i(t) = \frac{qV_d(t)}{L} ; t < t_{\text{transit}} \quad \text{Ramos Teoremi} \quad (4.8)$$

Elektrotlar arasında bütün sürüklenen yüklerden, Toplam harici akım Denklem (4.8) deki tüm akımların toplamıdır [85].

4.3. Absorpsiyon Katsayısı İle Fotodiyot Malzemeleri

Fotojenerasyon için foton emme işlemi, yani EHPS oluşturulması, Valans bandından (VB) iletim bandına (CB) bir elektronu uyarmak için yarıiletken malzemenin enerji band aralığı E_g ye en azından eşit olan foton enerjisi gerekir. Işık üretiminin emilmesi için λ_g üst kesim dalga boyu (yada eşik dalga boyu) $h(c/\lambda_g)$ yarıiletkenin Ek enerji bant aralığı tarafından belirlenir yada,

$$\lambda_g(\mu m) = \frac{1.24}{E_g(eV)} \quad \text{Dalga boyu kesimi yada band aralığı} \quad (4.9)$$

Örneğin, Si için $E_g = 1.12$ eV ve $\lambda_g = 1.11 \mu m$ iken Ge için buna karşılık gelen $E_g = 0.66$ eV ve $\lambda_g = 1.87$ dir. Ge fotodiyotlar bu dalgaboylarında kullanım için ticari olarak temin edilebilir oysa Si fotodiyotlar 1.3 ve $1.55 \mu m$ de optiksel iletişimde kullanılmadığı oldukça açıktır. Tablo 5.1 deki listeler, bazı tipik bandaralıklı enerjiler ve çeşitli yarı iletken fotodiyot malzemelerine karşılık gelen kesim dalga boylarını göstermektedir.

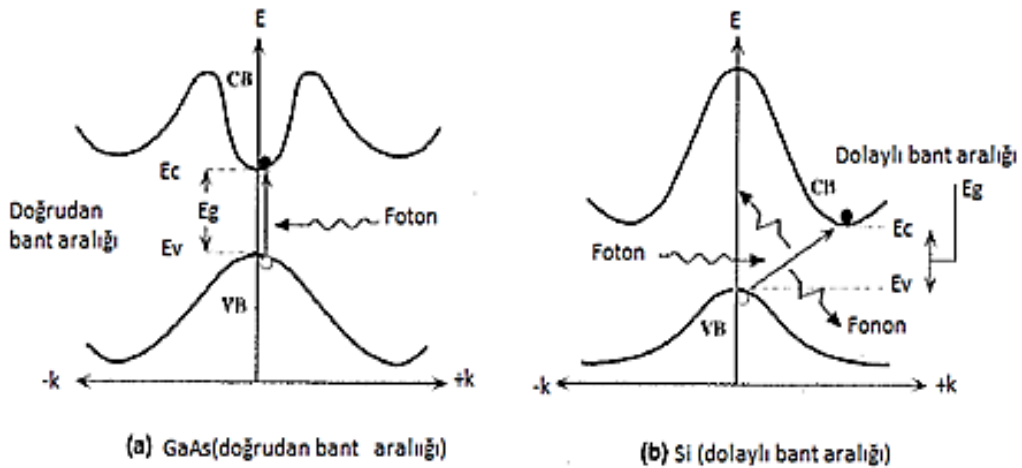
Foton olayında, λ_g den daha kısa boylu dalga boyu ile emilmiş olması yarıiletkenin ve ışığın şiddetindeki hareketler gibi fotonların sayısıyla orantılıdır, bu oran, yarıiletkenin

içindeki mesafe ile üstel olarak azalır. Yarı iletken yüzeyinden bir x mesafesinde ışık şiddeti I ile verilir.

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad \text{emilim katsayısı} \quad (4.10)$$

Gelen ışımının şiddeti I_0 dır ve emilim katsayısı dalga boyu λ yada bir fotonun enerjisine bağlıdır. Absorpsiyon katsayısı malzemenin bir özelliğidir. Foton emiliminin çoğu bir $1/\alpha$ mesafesinde oluşur ve nüfuz etme derinliği $1/\alpha$ olarak adlandırılır şekil 5.3 de gösterilir. Çeşitli yarıiletkenlerde λ dalga boyu'nun genel özellikleri yarı iletken malzemeye bağlıdır. III-V yarıiletkenleri gibi (örn. GaAs, InAs, InP) doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde ve alaşımlarda (örn. InGaAs, GaAsSb) foton emilimi sürecine örgü titreşimlerinin doğrudan bir katkısı yoktur. Foton momentumu çok küçük olduğu için (yada kristal momentumu $\hbar k$ dir.) foton emilir ve elektron valans bandından ileitm bandına k -vektöründe bir değişiklik olmaksızın doğrudan yayılır. Elektron mometumundaki değişiklik ≈ 0 dır. Bu süreç E-diyagramında dikey bir geçişe karşılık gelmektedir, yani elektronun enerjisi E vs.dir. Örgü titreşimlerinin frekansı ν ise fononun enerjisi $\hbar\nu$ 'dür. Fotonun frekansı ν ise fotonun enerjisi $\hbar\nu$ 'dür. Enerjinin korunumunu gerektiren,

$$\hbar\nu = E_g \pm \hbar\nu \quad (4.11)$$



Şekil 4.7. a. doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkende foton emilimi b. dolaylı bant aralıklı bir yarıiletende foton emilimi (VB valans bandı, CB iletim bandı) [85].

Şekil 4.7 (a) da kristalde elektron momentumu ($\hbar k$). Si ve Ge gibi doğrudan bant aralıklı yarı iletkenlerde yakın foton enerjileri E_g için foton Emilimi, Şekil 4.7 (b)'de gösterildiği gibi yani fononlar, emilme süreci boyunca örgü titreşimlerinin emilimini ve salınımını gerektirir. Bir örgü dalgasının (kristaldeki örgü titreşimlerinin hareketi) dalga vektörü K ise, o zaman böyle bir dalga vektörü ile ilgili momentumu $\hbar k$ temsil eder, yani bir fononun momentumu $\hbar k$ 'dır. Valans bandındaki bir elektron iletim bandına uyarıldığında, kristaldeki momentumlarında bir değişim olur ve bu momentumdaki değişim, çok küçük olarak gelen fotonun momentumu tarafından sağlanamaz. Bu nedenele, momentum farkı bir fononun momentumu tarafından dengelenmelidir.

$$\hbar k_{CB} \sim \hbar k_{VB} = \text{fonon momentumu} = \hbar k \quad (4.12)$$

Emilim sürecinin sıcaklığa bağlı eğilimi olan örgü titreşimlerine dolaylı olarak bağlı olduğu söylenir. Değerlik elektronu ile bir foton etkileşimi üçüncü bir cisim, bir örgü titreşim ihtiyacı olduğundan Fotonun emilme olasılığı doğrudan geçişte olduğu kadar yüksek değildir. Ayrıca, eşik dalga boyu doğrudan bandaralıklı yarı iletkenler kadar keskin değildir. Emme işlemi sırasında bir fonon emilir ya da yayılabilir. Böylece emilimin başlangıcı E_g ile tam olarak uyuşmamaktadır fakat $\hbar \theta$ küçük olduğu için ($< 0.1 \text{ eV}$) tipik olarak E_g çok kapalıdır..Fotodiyot için malzeme seçimi, foton enerji E_g 'den daha büyük olacak şekilde olması gerekir. Ayrıca radyasyonun dalga boyunda emilimi elektrotlarda toplanan ve alan tarafından yayılabilen EHP nin ışık üretmesi için tükenme tabakasını kapsayan bir derinlik içinde oluşur. Soğurma katsayısı çok büyük ise, o zaman emilim tükenme tabakanın dışında olan p^+ tabakanın yüzeyine çok yakın oluşacaktır. İlk olarak, bir alanın olmaması, ışık üreten elektronun sadece difüzyonla n tarafına geçmesi için tükenme katmanına bunu yapması anlamına gelir. İkinci olarak, yüzeye yakın fotojenerasyon nedeniyle her zaman yeniden birleştirme merkezleri olarak hareket yüzey kusurları hızlı rekombinasyona neden olur. Diğer yandan emilim katsayısı çok küçükse, fotonların çok küçük bir kısmı tükenme tabakasında emilir ve EHP sadece sınırlı sayıda foto ışıklandırılabilir [85].

4.4. Foto Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

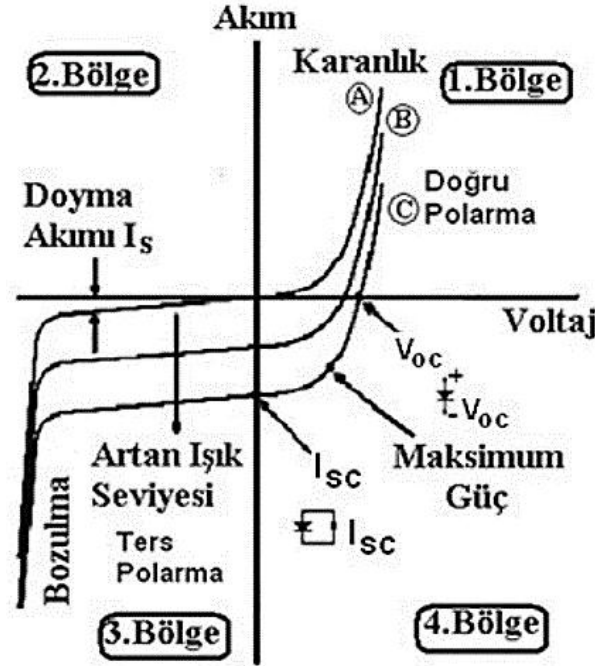
Foto diyotların akım-voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma mekanizmaları ile belirlenir. Farklı akım taşıma mekanizmaları metal-yarıiletken eklemleri (Schottky, MSM foto diyotlar) ve p-n eklemlerine bağlı olarak meydana gelebilir [70]. Foto diyotun akım-voltaj karakteristiği şekil olarak normal bir diyotunkine benzemektedir. Sekil.4.8’de foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristiğini göstermektedir. Foto diyotun duyarlı yüzeyine ışık düşmüyorsa foto diyot üzerinden akan akım, termal yoldan azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akımdır. Bu akıma karanlık akımı denir [78]. Sekil 4.8’deki A eğrisi foto diyotun karanlık altındaki, B ve C eğrileri ise foto diyotun ışık altındaki akım-voltaj karakteristiğini göstermektedir. Şekil de görüldüğü gibi foto diyotun karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci (1) bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölgede foto diyot doğru polarmalandırılmıştır ve bu bölge foto diyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede çalıştırılan foto diyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. İkinci (2) bölgede foto diyotun cevabı yoktur. Üçüncü (3) bölgede sadece çok küçük bir I_s akımı akar [70]. Foto diyotun aktif alanı üzerine gelen ısığın şiddeti artırıldığında bu bölgedeki eğriler bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı I_{sc} ’yi verir. Sıfır akım noktalarında eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık-devre voltajı V_{oc} ’yi verir [78]. Çok yüksek ters polarma voltajlarında akım hızlıca artar ve diyotun bozulması söz konusu olabilir. Bu ters bozulma bölgesidir. Bu nedenle üçüncü (3) bölge, ters polarma voltajının uygulandığı bölge olup ısıyı algılamak için uygun olan bölgedir [70]. Dördüncü (4) bölge ise foto diyotun foto voltaik bölgesidir.

Foto diyotlar üç ana karakteristiğe sahiptirler;

- a. Akım-voltaj karakteristiği
- b. Kuantum verimi karakteristiği
- c. Band genişliği (çalışma hızı) karakteristiği

Bir foto diyotun performansı bu üç karakterizasyon ile ölçülür. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı, daha yüksek duyarlılık anlamına gelir ve foto diyota ısı uygulanmaksızın ters polarma altında diyot içinde akan akımdır [78]. Bu ters polarma voltajının değeri bozulma

voltajına karşılık gelir ve foto diyotun çalışması için uygulanabilen ters polarma voltajı sınırını belirler. Bu değerden sonra, kazanç ve çarpma mekanizmaları diyotun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [70].



Şekil 4.8. Foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri [70,78].

Bir Schottky foto diyotunun doğru akımı analiz edilerek ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi diyot parametreleri belirlenebilir. I_0 ve ϕ_b , $V=0$ 'da doğru besleme akımı fit edilerek bulunabilir. İdealite faktörü (n) doğru polarma I-V eğrisinin (dV/dI) eğimi ile elde edilir [70].

Schottky diyotlarda doğru besleme gerilimi çok yüksek olmadığı sürece akım-iletimi termiyonik emisyon teorisine göre olur ve akım -gerilim ilişkisi [75],

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.13)$$

şeklindedir. Burada V_d engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. Pratikte Schottky diyotların, doğru beslem I-V karakteristikleri ideal durumdan bazı sapmalar gösterebilir. Yani saf termiyonik emisyon teorisinde boyutsuz olan idealite faktörü birden büyük olabilir. Bu nedenle Eş. (4.13)' deki akım yoğunluğu ifadesi,

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.14)$$

şeklini alır. Burada $\exp(qV/nkT) \gg 1$ durumu göz önüne alınır ve diyoda uygulanan V geriliminin bir kısmı diyoda bağlı seri direnç üzerine düşeceğinden (IRs) ilavesiyle,

$$I = AA_n^{**} T^2 \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] \quad (4.15)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada $V_d = V - IR_s$ dir, V ise uygulanan dış gerilimdir [75].

MY (Metal-Yarıiletken) doğrultucu kontaklarda yük taşıyıcılarının (elektron ve hol) metal ve yarıiletken arasında yeniden dağılımı sonucunda, yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan (n-tipi yarıiletken için) veya hollerden (p-tipi yarıiletken için) arınma ve yüksek dirence sahip bir tüketim tabakası meydana gelir. Bu tüketim bölgesinin genişliği (WD) uygulanan dış gerilim ile değişir. Bu tür metal-yarıiletken Schottky diyetun yapısı kondansatörün yapısına benzer ve ara bölgede bir kapasite meydana gelir.

4.5. Foto Diyotların Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{2}{\epsilon_o \epsilon_s q N d A^2} \right] \left[V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right] \quad (4.16)$$

ϵ_o , Boşluğun dielektrik geçirgenliği ϵ_s , Dielektrik sabiti q, yük d, donör konsantrasyonu $N = N_{Si}$ V_{bi} , difüzyon voltajı (Build function voltage) `dır.

4.6. Fotovoltaik Parametreler

Foto diyotların veya güneş pillerinin yük özellikleri çeşitli parametrelerin analizi ile yapılır. Bu parametreler; spektral kuantum verimi (η), açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum çıkış gücü (P_m), seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}), arayüz durumları (N_{ss})`dir [70,78].

4.6.1. Açık-Devre Voltajı

Aydınlatma altındaki diyotun akım-voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj eksenini kestiği değere açık-devre voltajı (V_{oc}) denir. Akımın sıfır olduğu durumda belirlenir.

Buda,

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right] \quad (4.17)$$

ifadesi ile verilir [70]. Denklem 3.1'de anlaşılabacağı gibi n 'nin yüksek değerleri ile yüksek açık-devre voltajları elde edilebilir fakat bu her zaman geçerli olan bir durum değildir. Çünkü yüksek n , genelde I_s 'nin yüksek değerleri ile mümkündür.

4.6.2. Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı (I_{sc}) çıkış akımı olup uygulanan voltaj ile ideal durumda (R_s ve R_{sh} dirençlerinin etkileri yok olduğu zaman) aydınlatma altında oluşmaya başlar. Bu akım gelen foton sayısı ve aydınlanma şiddeti ile orantılıdır [78].

4.6.3. Spektral Cevap

Spektral cevap, belirli dalga boylarında yüzeye gelen fotonların sayısı ile bağlantılı olup her bir dalga boyundaki toplam fotoakım, bir malzemenin spektral cevabını belirler [78]. Bir iç spektral cevap $SR(\lambda)$ numuneye gelen fotonların sayısı ile ilgili kısa-devre şartları altında oluşan elektron-bosluk çiftinin sayısıdır ve,

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (4.18)$$

bağıntısı ile verilir [70]. Toplam fotoakım yoğunluğuna katkı sağlayan bu terimler, $J_p(\lambda)$ bosluk difüzyon akım yoğunluğu, $J_n(\lambda)$ elektron difüzyon akım yoğunluğu, J_{dr} sürüklenme akım yoğunluğudur [70].

4.6.4. Seri Direnç

Seri dirençler, fotovoltaiik durumdaki foto diyotun doğrusallığını tanımlamak için kullanılır.

Bir foto diyodun seri direnci,

$$R_s = \frac{(W_o - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (4.19)$$

bağıntısı ile hesaplanır [78]. İfade de W_o altlık kalınlığı, W_d tüketim bölgesinin genişliği, A_j eklem yayıldığı alan, ρ altlığın öz direnci ve R_c kontak direncidir. İdeal foto diyotların seri dirence sahip olmaması gerekir [70].

4.6.5. Şönt Direnci

Bir foto diyotun şönt direnci bir akım kaynağı olarak gösterilebilir. Şönt direnç başlangıcı $V=0$ 'da olan foto diyotun akım-voltaj eğrisinin eğimidir. İdeal bir foto diyot için şönt direnci sonsuz ($R_{sh}=\infty$) ve seri direnci sıfır ($R_s=0$) olmalıdır. Ancak gerçekte şönt direnç birkaç mega ohm ile giga ohm arasında değişen değerler alır. Şönt direnç foto diyota besleme voltajı uygulanmadığı durumlardaki gürültü akımını tanımlamak için kullanılır. Şönt direnç deneysel olarak foto diyota ± 10 mV uygulanarak foto diyotun etkin direnci hesaplanarak elde edilir. Bir foto diyot ne kadar yüksek bir şönt dirence sahip olursa o kadar ideal olur [78].

4.6.6. Kuantum Verimliliği ve Duyarlılığı

Bir foto diyotun kuantum verimi, fotoakımı sağlayan ve foto diyota gelen foton sayısının yüzdesidir. Yani foto diyotun gelen ısıık enerjisini elektrik enerjisine çevirme yeteneğine kuantum verimi denir ve yüzde (%) olarak ifade edilir [70,78]. Gelen fotonların bir kısmı elektron-boşluk çifti oluşturmak için toplanabilir ve bir foto akım meydana getirmek için emilir. Kuantum verimi (QE) η olarak tanımlanan detektörün ölçülen serbest EHP (Elektron boşluk çifti) için alınan fotonların dönüşüm işleminin verimliliği,

$$\eta = \frac{\text{Toplanan ve oluşturulan EHP sayısı}}{\text{Gelen fotonların sayısı}} \quad (4.20)$$

Harici devresinde ölçülen fotoakım I_{ph} 'ın fotodiyot terminallerinde saniyede elektronların akışından kaynaklanmaktadır. Saniyede toplanan elektron sayısı I_{ph} / e , P_o olay optik güç ise, saniyede gelen foton sayısı $P_o / h\nu$ 'dır. Daha sonra η , QE tarafından da tanımlanabilir.

$$Q.E(\text{kuantum verimliliği}) \quad \eta = \frac{I_{ph}/e}{P_o/h\nu} \quad (4.21)$$

Emilen fotonların bir kısmı toplanabilir serbest EHP'i oluşturabilir. Bazı EHP'ler fotoakıma katkıda bulunmadan rekombinasyonla (yeniden birleşme) kaybolur ya da hemen tutulabilir. Yarı iletkenin uzunluğu penetrasyon (nüfuz etme) derinliği $(1 / \alpha)$ ile karşılaştırılabilir daha fazla ise o zaman fotonun bir kısmı emilir. Dolayısıyla QE eğilimi her zaman birden daha azdır. Bu ilgili dalga boyunda, yarı iletkenin emilim katsayısı α 'ya ve cihazın yapısına göre değişir. Yarıiletken yüzeylerde yansımaların azaltılmasıyla, tükenme tabakası içinde emilim artırılarak ve daha önce toplanan taşıyıcıları yakalamayı engelleyerek yada yeniden birleştirerek fotoduyalılık artırılabilir. Denklem 4.20'de tanımlanan QE bütün eğilimler içindir. Daha özel olarak, bu dış kuantum verimi olarak bilinir. İç Kuantum Verimliliği emilen foton başına serbest ışık üreten (photogenerated) EHP'nin sayısıdır ve genellikle birçok cihazlar (eğilimler) için oldukça yüksektir. Denlem 4.20'deki QE tüm cihazlar için geçerli olan iç kuantum verimliliğini tanımlar. Bir fotodiyotun duyarlılığı R , verilen bir dalga boyunda gelen (P_o) optik güç başına oluşturulan fotoakım açısından performansını karakterize etmektedir.

$$R = \frac{\text{Fotoakım}(A)}{\text{Optik güç Olayı}(Eğilimi)(W)} = \frac{I_{ph}}{I_o} \quad (4.22)$$

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (4.23)$$

Denklem 4.23'de η dalga boyuna bağlıdır. Bu nedenle dalga boyu açıkça duyarlılığa bağlıdır. R , ayrıca spektral duyarlılık veya ışın hassasiyeti olarak da adlandırılır. λ nın

özellikleri genel R fotodiyotunun spektral (ışık tayfı) yanıtını temsil eder ve genel olarak üretimine göre sağlanır. Bir Si fotodiyotun QE % 90-95'e yakın olabilir [85].

4.6.7. Doldurma Faktörü

Doldurma Faktörü (FF),

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4.24)$$

bağıntısı ile verilir. Yüksek band aralıklı malzemelerin ve bu malzemelerin daha yüksek açık-devre voltajlarından dolayı yüksek doldurma faktörlerini oluştururlar [70,78].

4.6.8. Arayüzey Durumları

Arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Bir arayüzey durumu verici veya alıcı tipinde olabilir. Alıcı, enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Bir gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla oluşur. Bu yükün değişimi MYY kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MYY eğrisini değiştirir. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisinde bulunurlar [79].

Arayüz durum yoğunlukları Hill-Coleman denklemi kullanılarak bulunur.

$$Dit(Nss) = \frac{2}{qA} \frac{\left(\frac{G_c}{\omega}\right)_{max}}{\left(\left(\frac{G_m}{\omega}\right)_{max} C_{ox}\right)^2 + \frac{1 - C_m}{C_{ox}})} \quad (4.25)$$

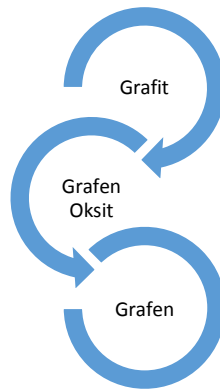
Bu bağıntıda, C_m ölçülen kapasite, C_{ox} yalıtkan tabakanın kapasitesi, A diyotun kontak alanı, ω açısal hız'dır [86].

5. MATERYAL VE METOD

Hummer's yöntemi kullanılarak grafen oksit ve grafen üretilmiş ve üretilen grafen oksit ve grafen tozlarının yapısal özellikleri analiz edilerek GO tozu Methylene Blue içerisine 0.1, 0.05, 0.03, 0.01, 0.005 oranlarında katkılanarak ince filmler ve diyotlar hazırlanmıştır. İnce filmler sol jel yöntemi kullanılarak elde edilmiş olup, Mikroskop camı üzerine hazırlanan ince filmlerin optiksel ve morfolojik özellikleri incelenmiş, P-Si üzerine hazırlanmış olan bu schootky diyotların ise elektriksel karakterizasyonları yapılmış ve elde edilen verilerden yararlanılarak diyodun çeşitli parametreleri hesaplanmıştır.

5.1. Deneysel İşlemler ve Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada, 1 gr grafit kullanılarak Hummer's yöntemi ile grafen elde edildi. Grafit tozuna 0.5 gr NaNO_3 ve 23 ml H_2SO_4 eklenerek yarım saat buz banyosunda bekletildikten sonra çözelti manyetik karıştırıcıda karıştırırken 3 gr KMnO_4 yavaş yavaş çözelti üzerine eklenerek 40°C 'de 2 saat karıştırıldı, 100ml su eklenerek 1 saat daha karıştırıldı. Daha sonra 2 ml H_2O_2 eklenerek 2 saat karıştırıldı elde edilen çözültiden inorganik anyonları ve diğer safsızlıkları çıkarmak için çözelti rengi açık kahverengiden koyu renge ulaşana yani $\text{Ph}\approx 7$ olana kadar bir dizi yıkama işlemi gerçekleştirildi. Bu işlemlerden sona 100 ml su eklenerek $\text{Ph}\approx 7$ olduğunda çözelti süzgeç kağıdı yardımıyla süzülerek yada santrifüj ile çöktürülerek elde edilen malzeme 24 saat boyunca 50°C 'de kurutularak, Grafen oksit tozu elde edilir.

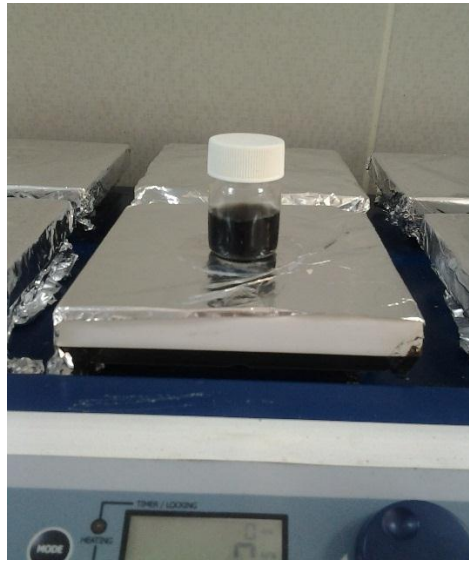


Şekil 5.1. Grafen Oluşumu



Şekil 5.2. Grafen oksit çözeltisi ve santrifüj edilmesi

Elde edilen GO tozu, Hydrazine Monohydrate kullanılarak, 100mg GO doğrudan hyrazine monohydrate içinde 10 dk dispers edildikten sonra 48 saat boyunca 60°C`de kurutularak GO, grafen`e indirgendi.



Şekil 5.3. Hydrazine Monohydrate içinde GO`ın dispersi

5.1.1. GO Katkılı Methylene Blue (MB) Filmlerin Üretilmesi

0.02 gr Methylene Blue 1 ml su içerisinde dispers edilerek, $\frac{GO}{MB}$ oranı 0.1, 0.05, 0.03, 0.01, ve 0.005 olacak şekilde GO miktarları belirlenip, GO'da 1 ml su içerisinde ayrı ayrı dispers edilerek, MB çözeltisine katkılıdır. Sol jel yöntemiyle hazırlanmış olduğumuz bu jeller'den film oluşturulmadan önce mikroskop camları aşağıda belirtilen işlem sırasına göre kimyasal olarak temizlendi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri belirli sürelerde ultrasonik banyo içerisinde gerçekleştirilirken, ultrasonik tankında saf su kullanıldı. Mikroskop camlarının temizleme işlemi;

a. Belirli ebatlarda kesilen mikroskop camları uygun beherlerin içerisine yerleştirildi. Her bir beherin içerisine yaklaşık 30 ml Etanol konularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

b. Beherlerdeki Etanol boşaltılarak beherlere yaklaşık 30 ml De-iyonize su doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

c. Beherlerdeki De-iyonize su boşaltılarak beherlere yaklaşık 30 ml Aseton doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

d. Beherlerdeki Aseton boşaltılarak beherlere yaklaşık 30 ml De-iyonize doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

e. Ultrasonik karıştırıcıdaki kimyasal temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra mikroskop camları Azot gazı ile kurutuldu.

Bu şekilde kimyasal temizleme işlemi tamamlandıktan sonra MB+GO filmlerin hazırlanmasına geçildi, hazırlanmış olduğumuz jel'ler mikroskop camı üzerine damlatarak 60 °C'de 1 gün tavlandı ve MB+GO filmler elde edildi.

5.1.2. GO Katkılı Methylene Blue (MB) Diyotlarının Üretilmesi

Öncelikle p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için p-Si tabakaya kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. Kimyasal temizleme işlemleri;

a. Temizleme işlemi için ilk olarak kullanılacak beherlerin De-iyonize su ile ön temizliği yapılır.

b. Bütün kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde RCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ultrasonik banyo tankı için saf su kullanıldı.

c. p-Si aseton (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.

d. p-Si etil alkol (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.

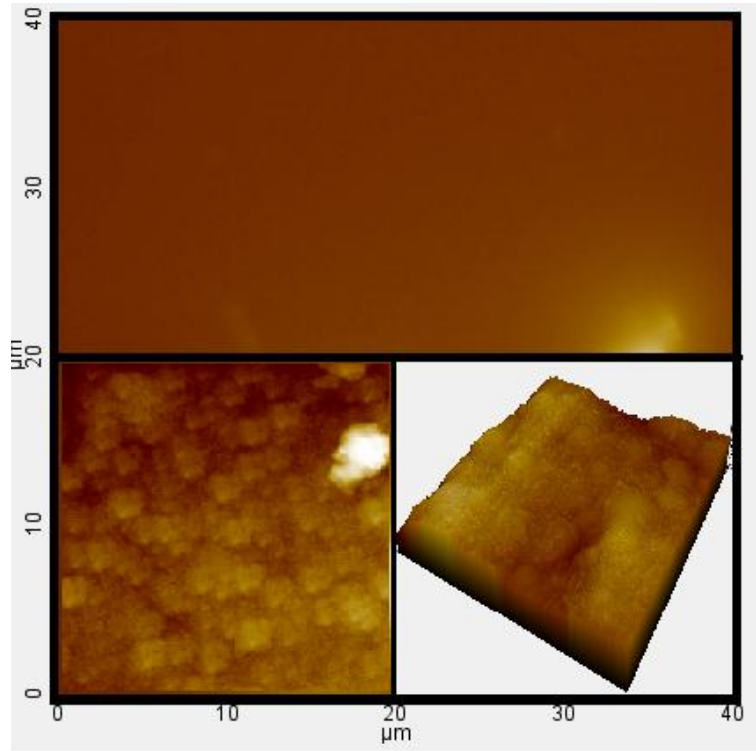
e. p-Si HF:H₂O (1:10ml) çözücüsü içerisine 30 saniye daldırılıp bekletildikten sonra, 30 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda yeniden 5 dakika yıkandı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra p-Si numuneleri azot gazı ile kurutuldu.

Kimyasal temizleme işleminden sonra, p-Si üzerine omik kontak oluşturmak için Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nano Teknoloji2 Laboratuvarındaki p-Si VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi ile 3×10^{-5} Torr basınç altında vakumlandı. Vakum bu basınca ulaştığında %99.999 saflıkta olan Al p-Si yüzeyine ince film şeklinde buharlaştırılarak kaplandı. Buharlaştırma yapılırken buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal yüzeyine yapışmasını önlemek için başlangıçta kesici kapak (metal perde) kapalı tutuldu ve püskürtme başladıktan kısa bir süre sonra kapak açılarak kaplama yapıldı. Buharlaştırma 2-4 Å/s hızında yapılarak p-Si'nin mat yüzeyine 100 nm kalınlığında omik kontak ince film şeklinde oluşturuldu. Bu işlemde sonra Al/p-Si yapısı 570 °C sıcaklıkta 3 dakika argon gazı ortamından ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Daha sonra p-Si üzerine GO katkılı MB ince filmler oluşturuldu. Bu işlemde her bir numune için p-Si'ler üzerine her bir numunenin jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) p-Si üzerine dökülerek 60 °C sıcaklıkta hotplate üzerinde 24 saat kurutuldu. Omik kontak ve MB+GO jel ile ince film oluşturulduktan sonra Fırat Üniversitesi Fizik Bölümünde Bulunan Denton Vacuum Desk-V sistemi ile üst Altın kontak oluşturuldu. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların üretimi tamamlandı.

5.1.3. MB+GO Filmlerinin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Görüntüleri ve Yüzey Analizi Sonuçları

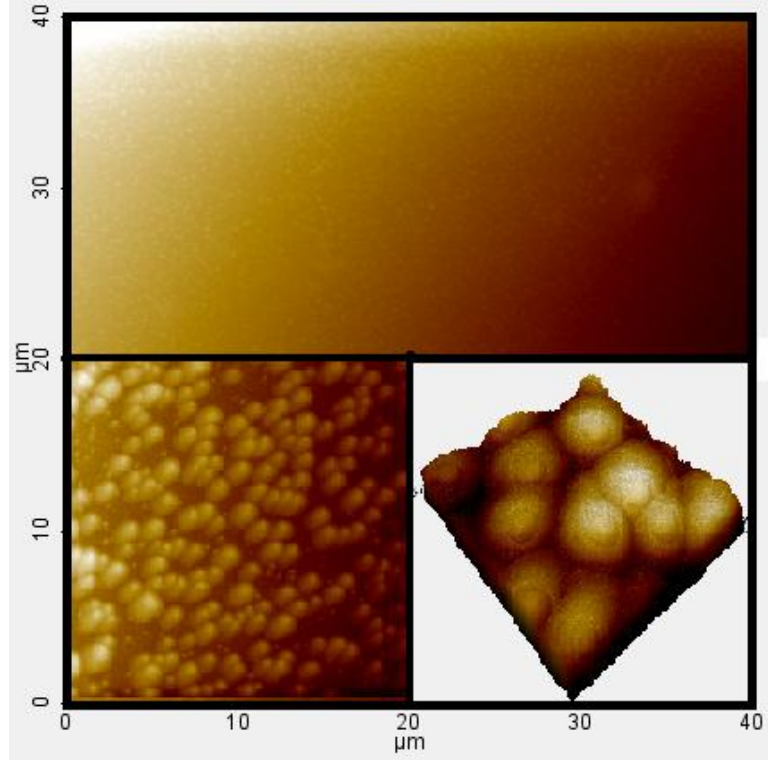
Görüntü esaslı veriler elde etmek için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile numunelerin kristal yüzeylerinin uygulanan işlemler sonucu değişen yüzey morfolojisi araştırılmış ve yüzey analizleri yapılmıştır.

MB+GO ince filmlerin AFM görüntüleri PARK SYSTEM XE-100E AFM cihazı ile alındı.

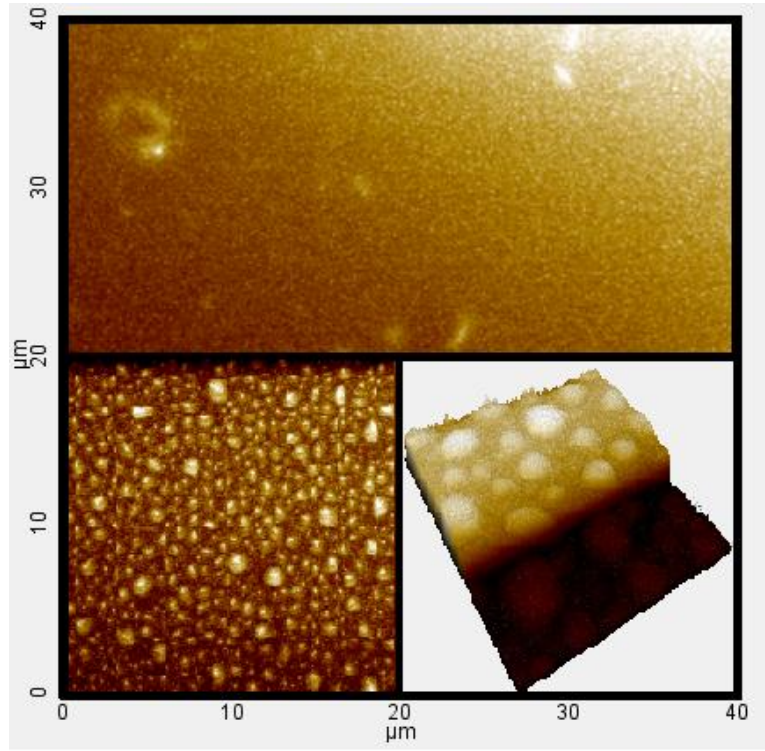


Şekil 5.4. 0.005 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü

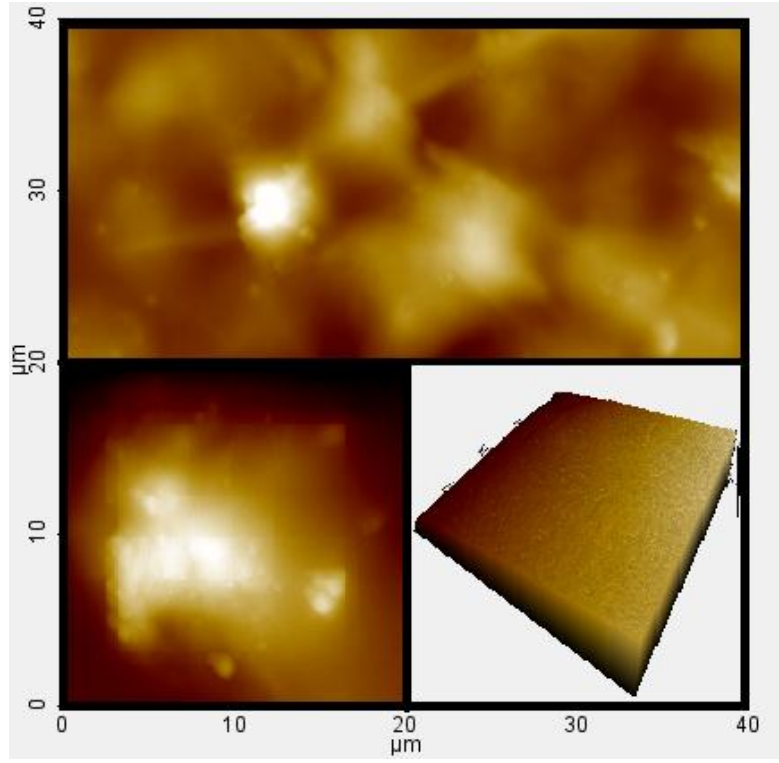
Sekil 5.4'te 0.005 GO katkılı MB filminin 40x40, 5x5 ve 1x1'lik tarama alanlarında ayrı ayrı AFM görüntüsü verilmiştir. Filmin ortalama tanecik boyutu 135.417nm, yüzey pürüzlülüğü ise 6.534 nm olarak analiz edilmiştir.



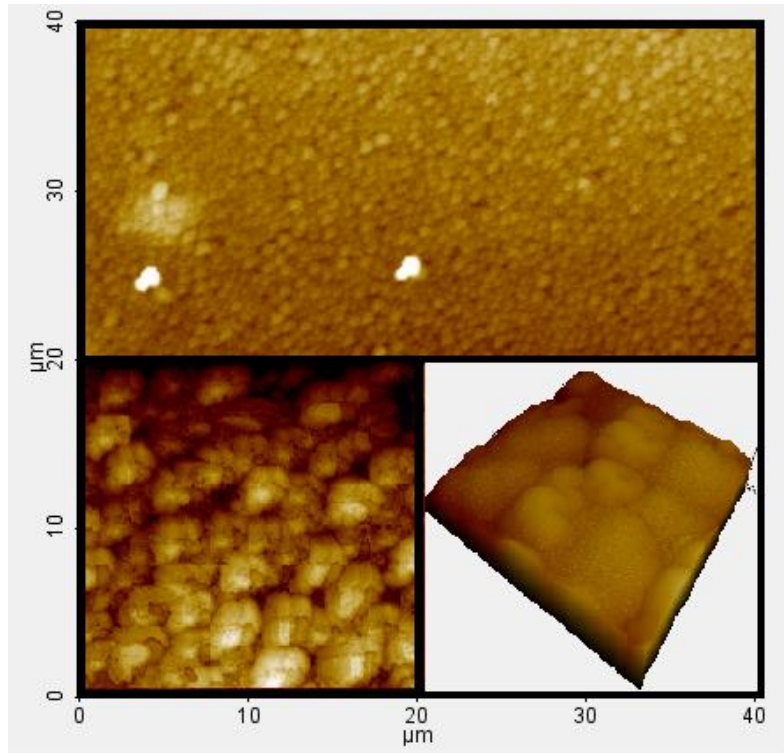
Şekil 5.5. 0.01 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü



Şekil 5.6. 0.03 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü



Şekil 5.7. 0.05 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü



Şekil 5.8. 0.1 GO katkılı MB filminin AFM görüntüsü

Tablo 5.1. AFM de Ölçülen Filmlerin Ortalama Ölçüm Sonuçları.

Numune	Tanelerin Ortalama boyutu (nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
0.005 GO katkılı	135.417	6.534
0.01 GO katkılı	252.604	20.314
0.03 GO katkılı	184.896	9.848
0.05 GO katkılı	156.250	5.142
0.1 GO katkılı	247.396	7.500

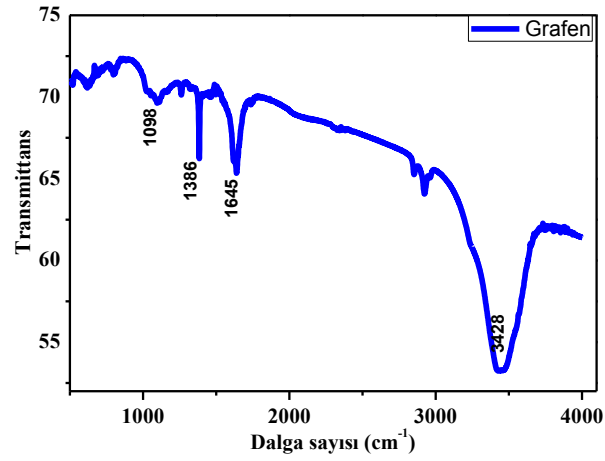
Tablo 5.1’de gösterildiği gibi mikroskop camı üzerine yapılan, GO katkılı Methylene Blue filmlerin AFM görüntülerinden elde edilen sonuçlarda, tanelerin ortalama büyüklükleri ve yüzey pürüzlülüğü nano boyutta ölçülmüştür.

5.1.4. MB+GO Filmlerinin FT-IR Ölçümleri ve Sonuçları

Hummer’s yöntemiyle elde edilen GO ve Grafen tozlarının Firat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Lab’ında bulunan Thermo FT-IR-ATR spektrum cihazı ile ölçümleri yapıldı.

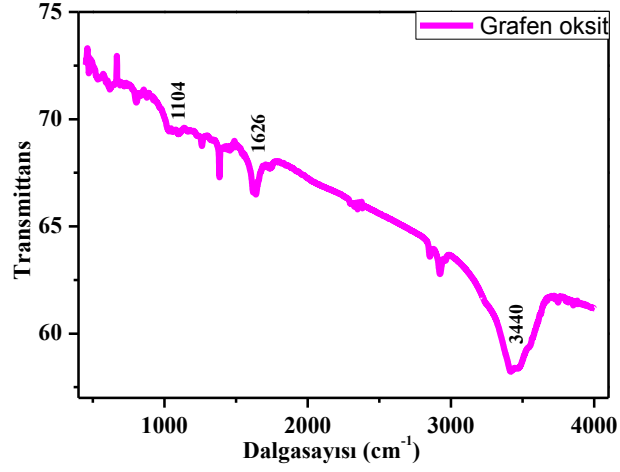


Şekil 5.9. FT-IR-ATR analiz cihazı



Şekil 5.10. Grafen FT-IR ölçüm sonucu

Şekil 5.10 da gösterilen FT-IR spektrumu sonucu, elde etmiş olduğumuz Grafen tozunun 3428, 1098, 1386 ve 1645 noktalarında güçlü pikleri gözlenmiştir.

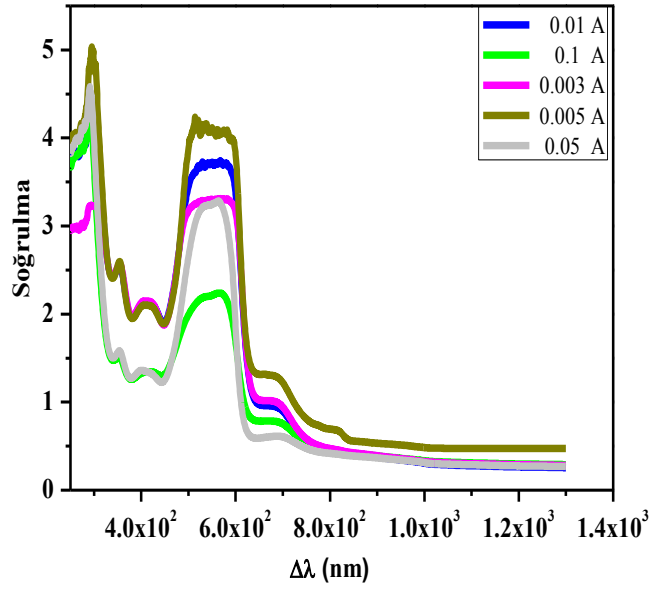


Şekil 5.11. GO FT-IR ölçüm sonucu

Şekil 5.11 da gösterilen FT-IR spektrumu sonucu, elde ettiğimiz GO tozunun 1104, 1626 ve 3440 noktalarında güçlü pikler gözlenmiştir.

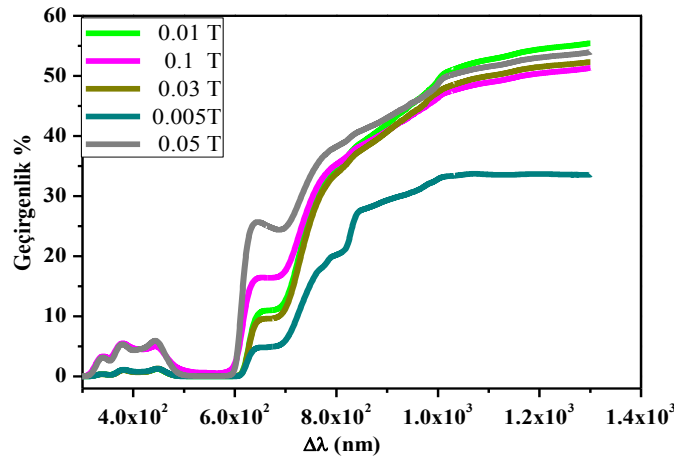
5.1.5. MB+GO Filmlerinin Optik Ölçüm Sonuçları (UV)

Sol Jel yöntemi ile 0.1, 0.05, 0.03, 0.01 ve 0.005 GO katkılı Methylene Blue filmleri hazırlandı. Hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophotometer cihazı ile yapıldı. UV ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ince filmlerin soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı (E_g) grafikleri çizildi.



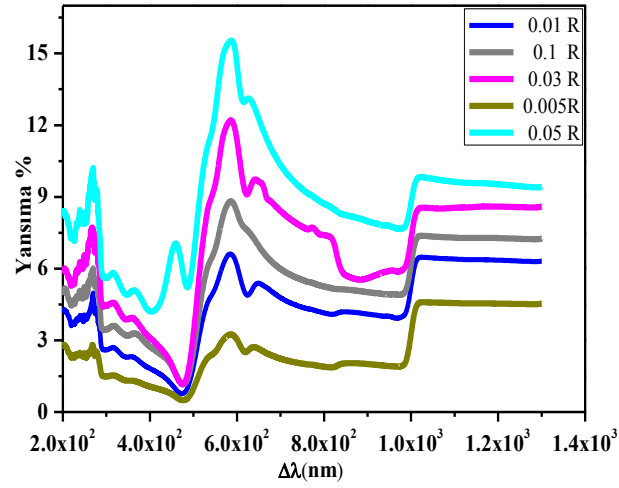
Şekil 5.12. GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin geçirgenlik eğrileri

Şekil 5.12`de görüldüğü gibi GO katkılı MB filmler 600 nm gibi düşük dalgaboylarında bir absorbsiyon sınırı göstermektedirler.



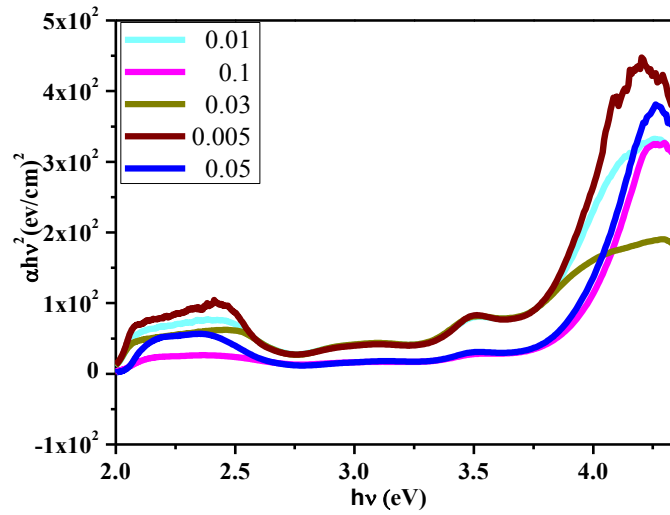
Şekil 5.13. GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin geçirgenlik eğrileri

Şekil 5.13`de GO katkılı MB filmler 1000-1400 dalga boyu aralığında transparenttirler.



Şekil 5.14 GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin yansımaya eğrileri

Şekil 5.14'de Grafen oksit katkılı MB numunelerinin yansımaya spektrumları verilmiştir. Şekil 5.14'de görüldüğü gibi yansımaya GO'nun katkı miktarı ile değişmektedir. Numunelerin yansımaya eğrileri 580-590 nm dalgaboyu aralığında en büyük pikini göstermektedir. Pikin pozisyonu GO katkılama ile değişmektedir. Bu da filmlerin yasak enerji aralıklarının GO katkısı ile değiştiğini göstermektedir.



Şekil 5.15. GO katkılı Methylene Blue ince filmlerin $\alpha h\nu^2$ - $h\nu$ eğrileri

GO katkılı MB filmlerinin yasak enerji aralığı,

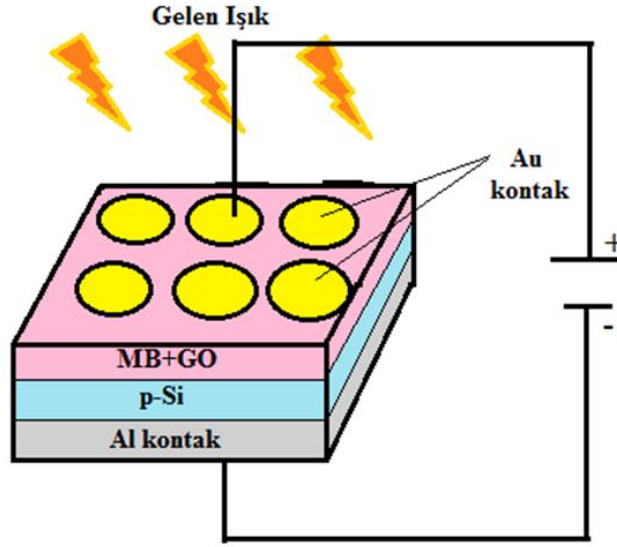
$$(\alpha h\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g) \quad (5.1)$$

denkleminde ve Şekil 5.15 deki kesim noktalarından faydalanılarak hesaplandı [70,94,95]. Burada A geçiş olasılığına bağlı bir sabit, n optik absorpsiyon sürecini tanımlayan bir indistir [94,95]. Böylece $(\alpha h\nu)^{1/n}$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği bu parametreler kullanılarak çizilir. Grafiğin lineer olduğu kısımdan çizilen doğrunun $(\alpha h\nu)^{1/n}=0$ da $h\nu$ eksenini kestiği nokta $(h\nu=E_g)$ 'dan numunelerin yasak enerji aralık değerleri hesaplanmaktadır. Doğrudan bant geçişlerine sahip malzemelerde n sayısı ½ değerini alırken, dolaylı bant geçişlerine sahip malzemelerde n=2 değerini alır [94,95]. Grafiklerden bulunan yasak enerji aralığı değerleri Tablo 5.2' de verilmiştir. Tabloda verilen yasak enerji aralığı değerlerine bakılırsa, yasak enerji aralığı değerlerinin 3,83 eV ile 3,30 eV aralığında olduğu ve MB yapısına GO katkılanmasının, önemli bir değişime neden olmadığı görülmüştür. MB katkılı GO numuneleri içerisinde en büyük yasak enerji aralığı değerine sahip numunenin Katkı oranı 0.1 olan numune olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2. MB+GO ince filmlerin Enerji band aralığı.

Katkı Oranı	E_g(EV)
0.005	3.6882
0.01	3.6184
0.03	3.3035
0.05	3.7984
0.1	3.8366

5.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto Diyotların Elektriksel Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.16. Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun devresi

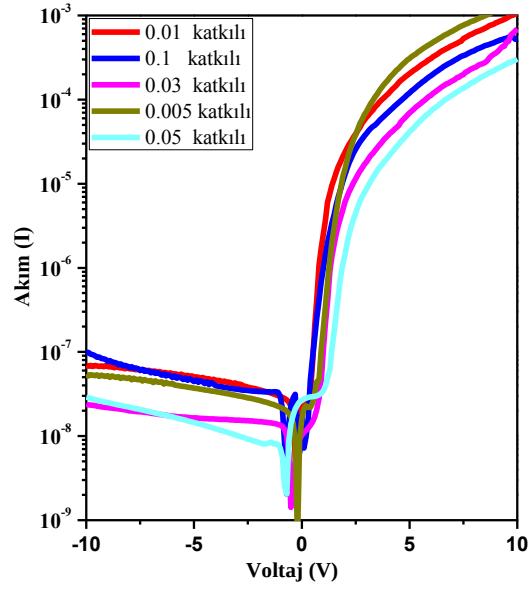
Şekil 5.16 daki diyot devresi kullanılarak, Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının I-V, C-V, I-t, C-t ve R(s)-V ölçümlerinin karakterizasyonu yapılmış, bu karakterizasyonlar yardımıyla G(S)-V, $C^{-2}(F^{-2})$ -V, I(ph)-P, Cadj-V, Gadj-V grafikleri elde edilmiştir.

5.2.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların elektriksel karakterizasyonu için, akım-voltaj (I-V) ölçümleri çeşitli aydınlanma şiddetleri ve karanlık altında incelendi. Akım-voltaj karakteristiklerinin belirlenmesi için I-V ölçümleri Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarındaki KEITHLEY 4200 SCS akım-voltaj kaynağı ile alındı. I-V özellikleri kullanılarak çeşitli eklem parametreleri bulundu.



Şekil 5.17. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının I-V ve C-V ölçümleri için kullanılan deney düzeneği



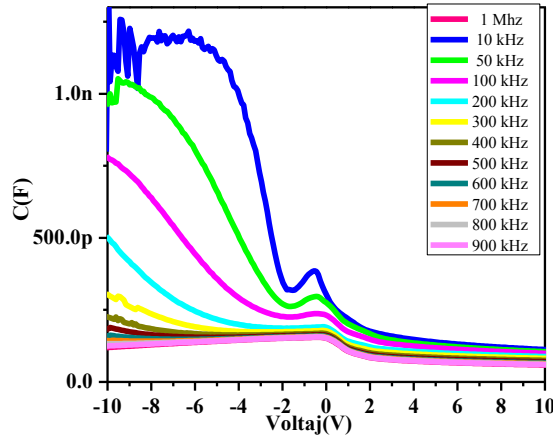
Şekil 5.18. GO katkılı MB filmlerinin karanlık altındaki I-V grafiği

Şekil 5.18 de MB+GO diyotlarının sadece karanlık altında ters besleme bölgesindeki I-V eğrisi gösterilmiştir. Katkı miktarına bağlı olarak Akım değerlerinin değiştiği gözlenmiştir.

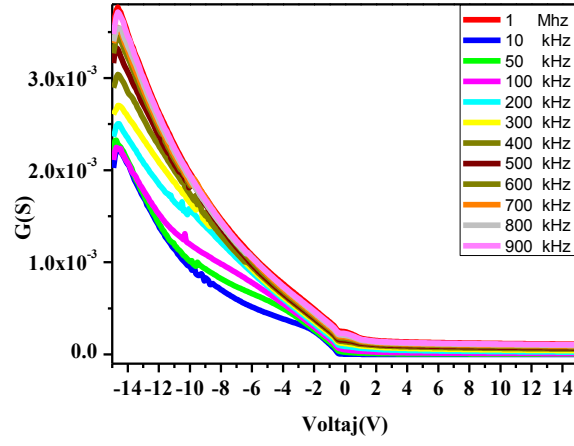
5.2.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Kapasite- İletkenlik-Voltaj Karakteristikleri

Aşağıda C-V, $C^{-2}(F^{-2})$ -V, G(S)-V grafikleri verilmiştir. Diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmezken, negatif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmektedir. Diyotların C-V grafiği, ara yüzey durum yoğunluğu, silikon üzerindeki oksit tabaka ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir.

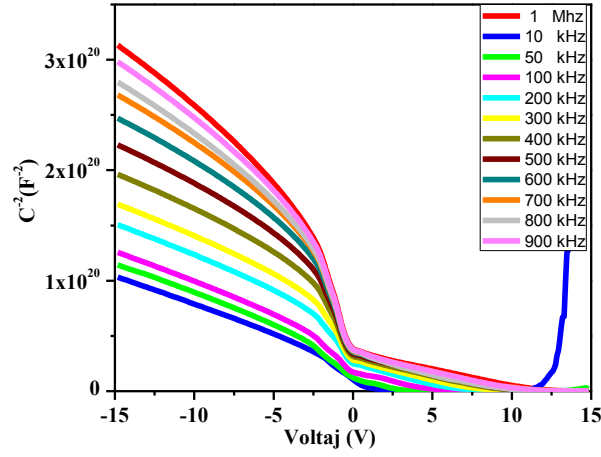
Diyotların elektriksel parametrelerini hesaplamak için Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların 1MHz altındaki C^{-2} -V grafiğinin eğiminden yararlanılarak akseptör taşıyıcı konsantrasyonu (Na) ve difüzyon potansiyel (V_{bi}) değerleri bulunarak denklem 5.5 yardımıyla C^{-2} -V grafiğinin bariyer (engel) yüksekliği hesaplandı. Hesaplanan bu değerler tablo 5.3`de gösterilmiştir.



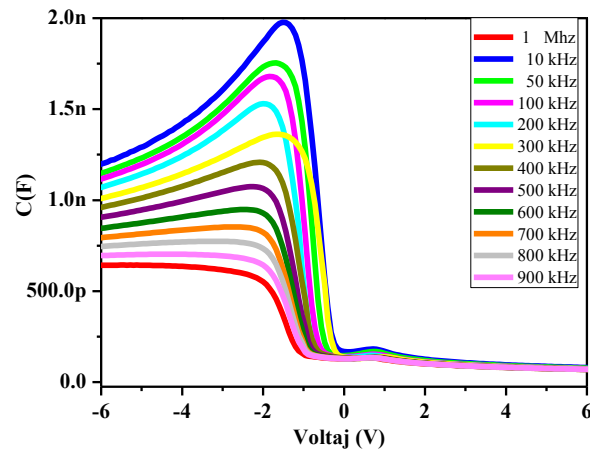
Şekil 5.19. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi



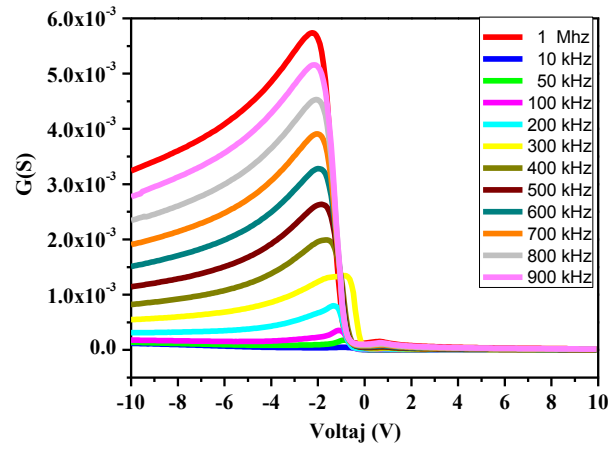
Şekil 5.20. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun $G(S)$ -V eğrisi



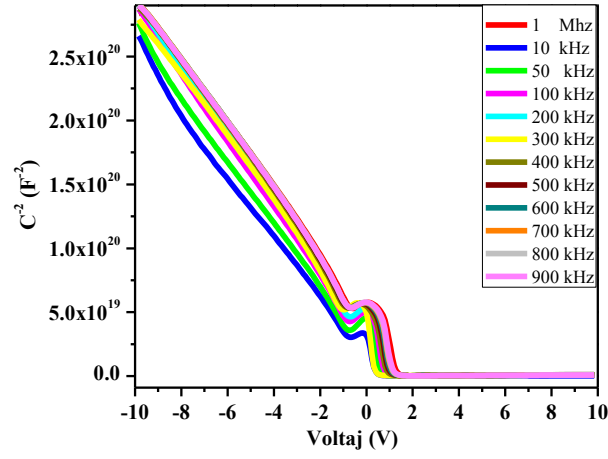
Şekil 5.21. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^2 -V eğrisi



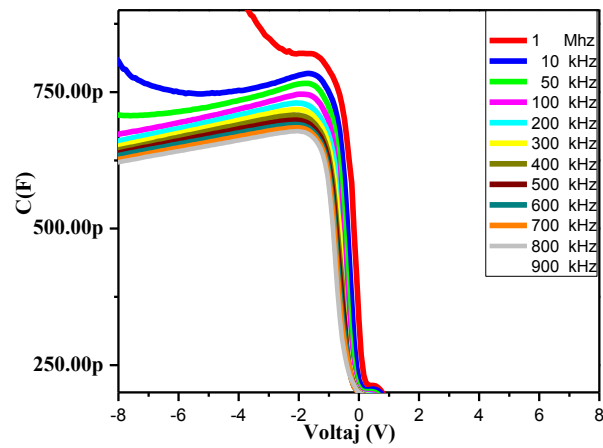
Şekil 5.22. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi



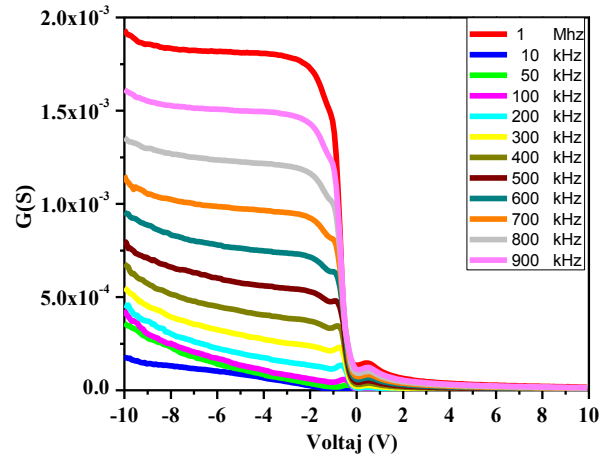
Şekil 5.23. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun G(S)-V eğrisi



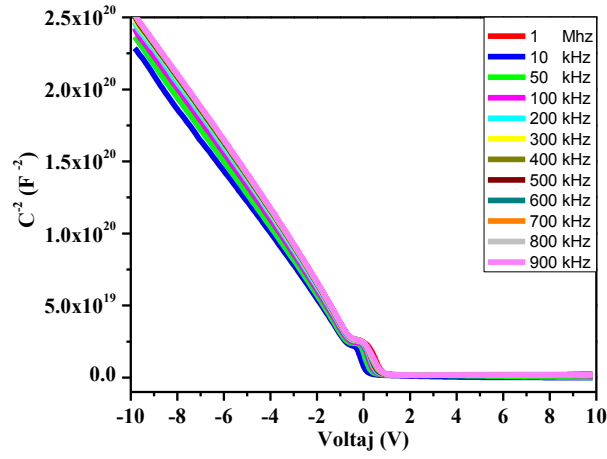
Şekil 5.24. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^{-2} -V eğrisi



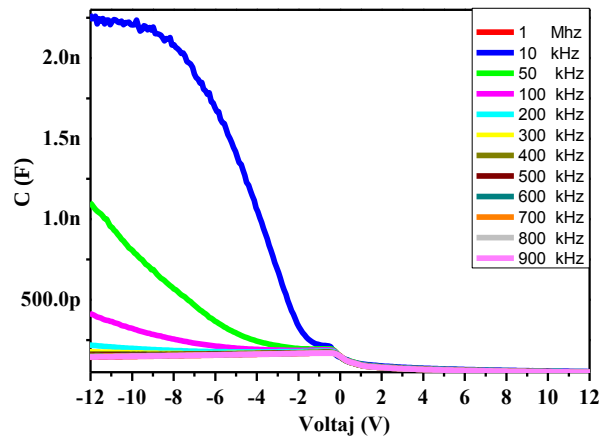
Şekil 5.25. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi



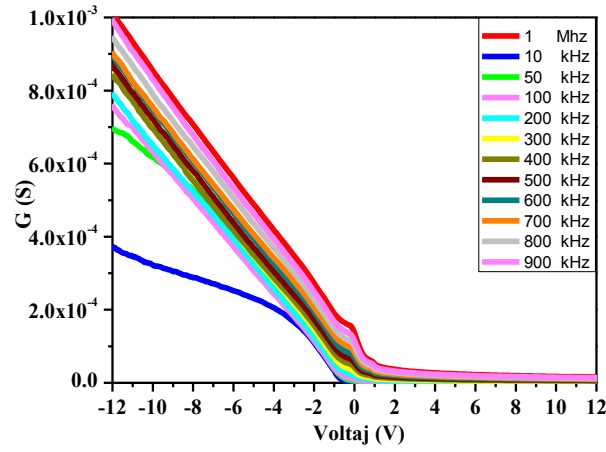
Şekil 5.26. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun $G(S)$ -V eğrisi



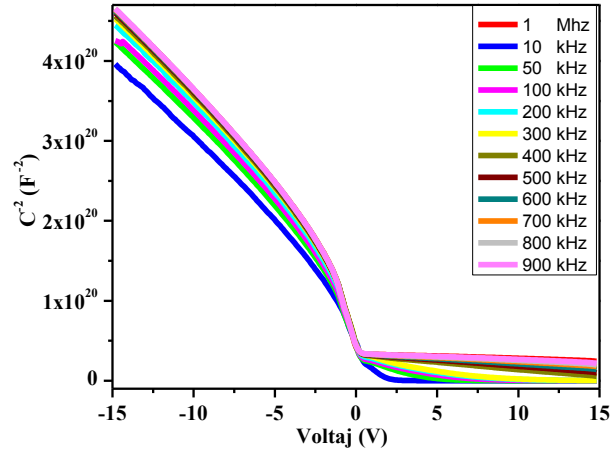
Şekil 5.27. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C^{-2} -V eğrisi



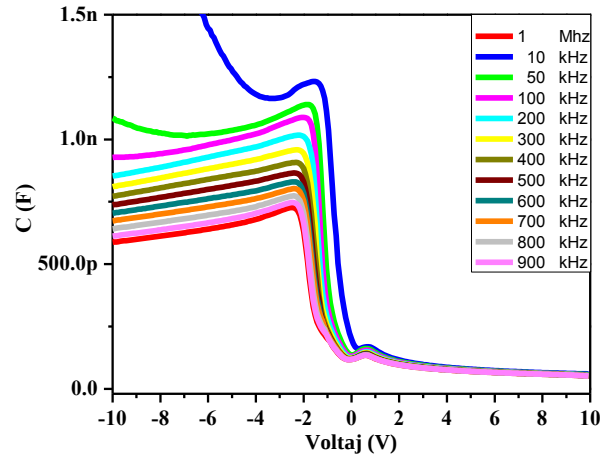
Şekil 5.28. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C-V eğrisi



Şekil 5.29. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $G(S)$ -V eğrisi

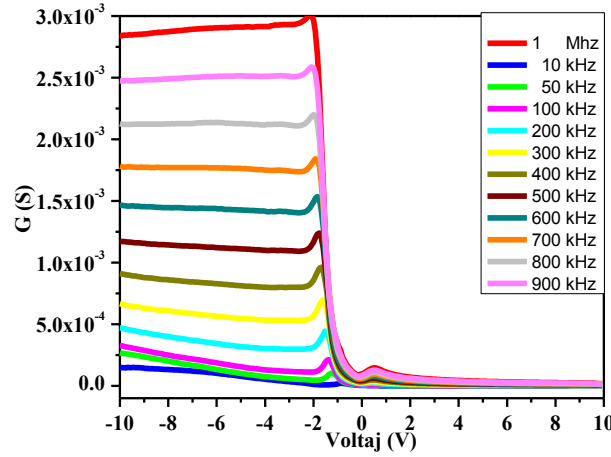


Şekil 5.30. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C^2(F)$ -V eğrisi



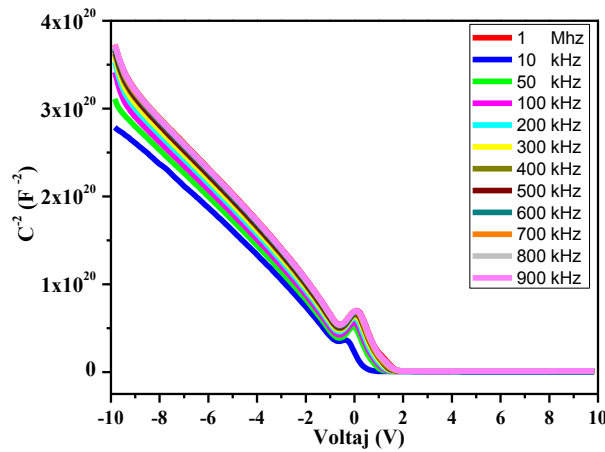
Şekil 5.31. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C(F)$ -V eğrisi

Şekil 5.31, 5.28, 5.25, 5.22 ve 5.19`da frekans ve voltaj`a bağlı olarak gösterilen C-V grafiklerinde frekansın artmasıyla kapasitansın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum diyotun arayüz durum yoğunluğundan ve seri direnç`den kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.32. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki G(S)-V eğrisi

Şekil 5.32, 5.29, 5.26, 5.23 ve 5.20`de verilen iletkenlik-voltaj grafiğinde voltaj`a ve frekansa bağlı olarak iletkenliğin değiştiği gözlenmiştir. Frekans`a bağlı olarak yani frekansın artmasıyla iletkenliğin arttığı saptanmıştır.



Şekil 5.33. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C⁻²(F)-V eğrisi

Şekil 5.33, 5.30, 5.27, 5.24, 5.21`de verilen C<sup>-2</sup>-V grafiklerinde bir pik gözlemlendikten sonra frekansın artmasıyla C<sup>-2</sup>`nin lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.3. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların elektronik parametreleri

Foto Diyot	Katkı Oranı	V _{bi} (V)	N _a (m ⁻³)	Φ _b (eV)
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.005	0.576	0.537 x10 ²¹	0.488
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.01	0.601	0.798 x10 ²¹	0.503
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.03	0.862	1.604x10 ²¹	0.747
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.05	1.656	1.262x10 ²¹	0.547
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.1	1.694	1.487x10 ²¹	1.58

Diyotların C-V grafiği, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bundan dolayı C-V ve G-V eğrileri,

$$C_{adj} = \frac{(G_m^2 + (WC_m)^2)C_m}{a^2 + (WC_m)^2} \quad (5.2)$$

ve

$$G_{adj} = \frac{(G_m^2 + (WC_m)^2)a}{a^2 + (WC_m)^2} \quad (5.3)$$

ifadeleri ile yeniden hesaplandı. ifadelerde G_m ve C_m ölçülen iletkenlik ve kapasite değerleri, w açısal frekans, a ise G_m, C_m ve R_s 'ye bağlı bir parametredir [70]. Elde edilen C_{adj}-V grafikleri şekil 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43'te verildi. C_{adj} grafiklerde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu göstermektedir.

Heteroeklem diyotlar için C-V karakteristikleri için tükenme tabakasının kapasitansı,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V_t - \frac{kT}{q})}{q\epsilon_s\epsilon_o A^2 N_a} \quad (5.4)$$

olarak ifade edilir. Burada V_{bi} difüzyon potansiyeli, V_t ters besleme voltajı, A diyotun kontak alanı, ε_o= 8.85x10⁻¹² F/m, ε_s= 11.8 (p-Si için) dielektrik sabiti, N_a akseptör taşıyıcı konsantrasyonu, q elektron yükü.

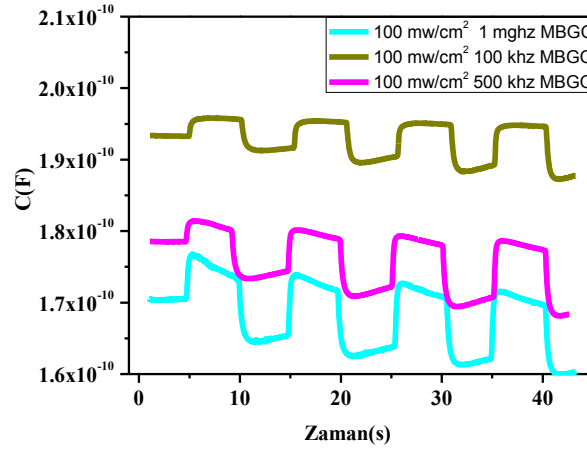
Kapasitansdan belirlenen bariyer yüksekliği,

$$\phi_B = V_{bi} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_v}{Na}\right) \quad (5.5)$$

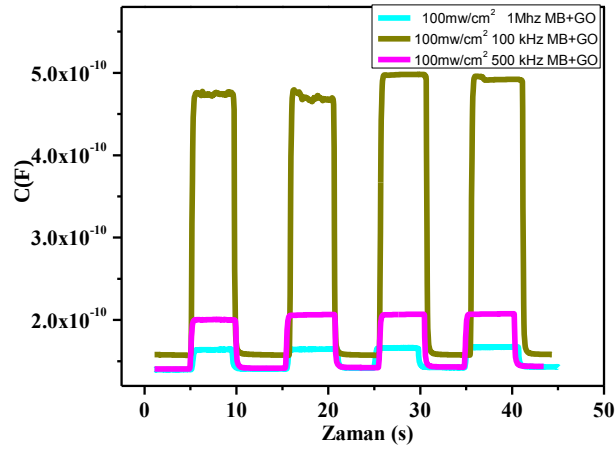
ifadesi ile belirlenir. Burada Φ_B bariyer (engel) yüksekliği, $N_v=1.82 \times 10^{19}$ valans bandındaki taşıyıcı konsantrasyonu, $T=298$ dir.

Çizilen C-V grafiklerinde, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir. Bu durum p-Si kullanımından kaynaklanmaktadır. C-V grafikleri ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bu durumu düzeltmek için denklem 5.2 kullanılarak C_{adj} grafikleri çizildi.

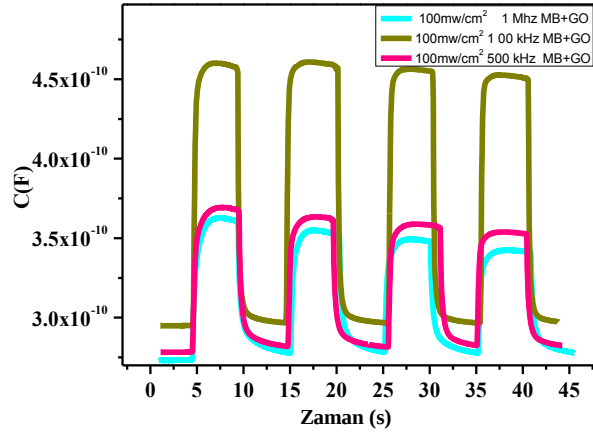
5.2.2.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Kapasite-Zaman Karakteristikleri



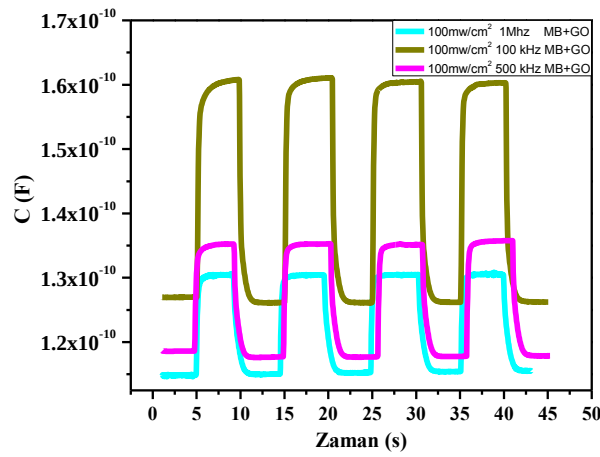
Şekil 5.34. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi



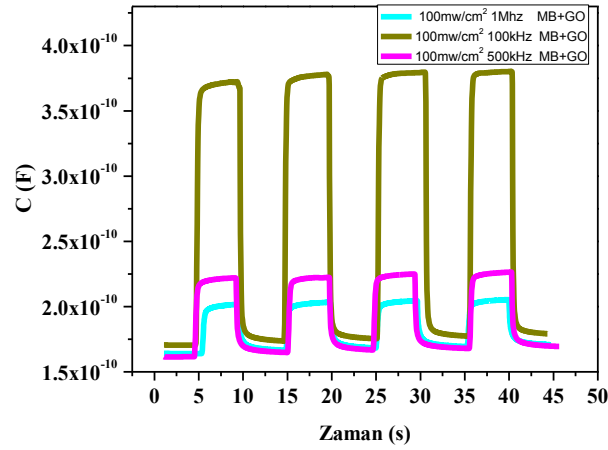
Şekil 5.35. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi



Şekil 5.36. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun C(F)-t eğrisi



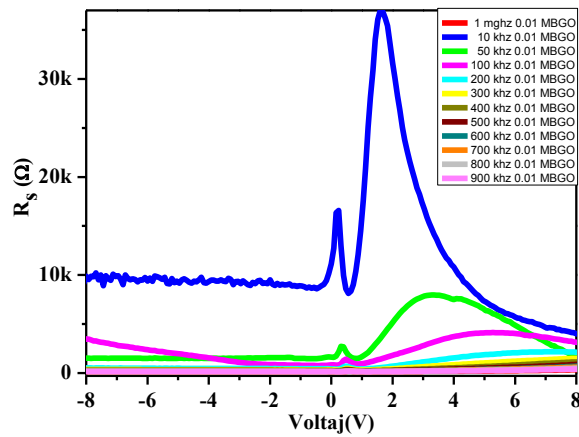
Şekil 5.37. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C(F)-t eğrisi



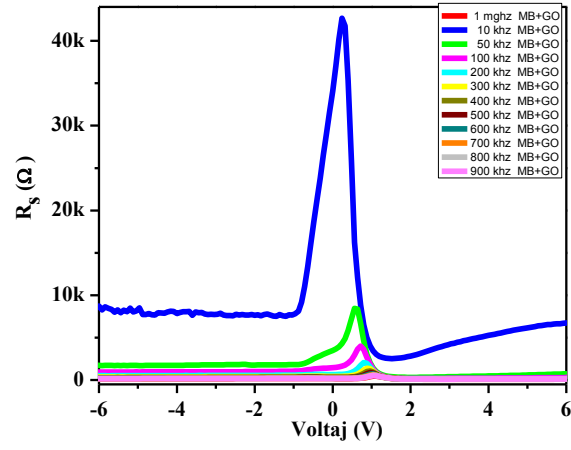
Şekil 5.38. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki C (F)-t eğrisi

Şekil 5.34-5.38`de verilen kapasite-zaman grafikleri, yaklaşık 5 sn aralıkları 100 mW/cm<sup>2</sup>`lik aydınlatma ve karanlık altında farklı frekanslarda analiz edilmiştir. Aydınlatma`ya ve frekansa bağlı olarak C-t eğrisi değişir. Şekillerde görüldüğü gibi Aydınlatma ile kapasitans`daki değişim artan frekans ile azalır. Bu değişiklik artan frekans ile doyuma ulaşır. Bu durum, arayüz durumlarının dolum işlemini tamamlandığını doğrular.

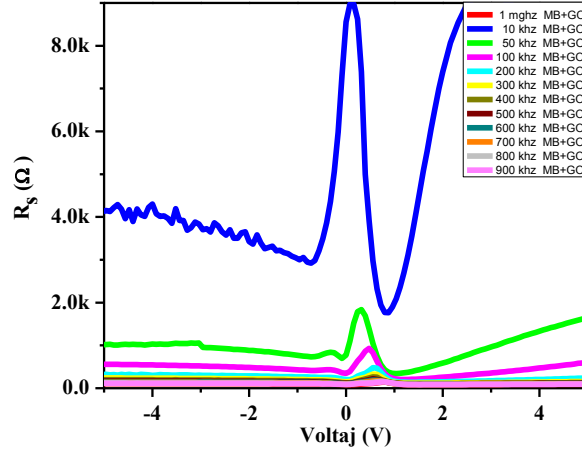
5.2.3. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotların Seri Direnç Ölçüm Karakteristikleri



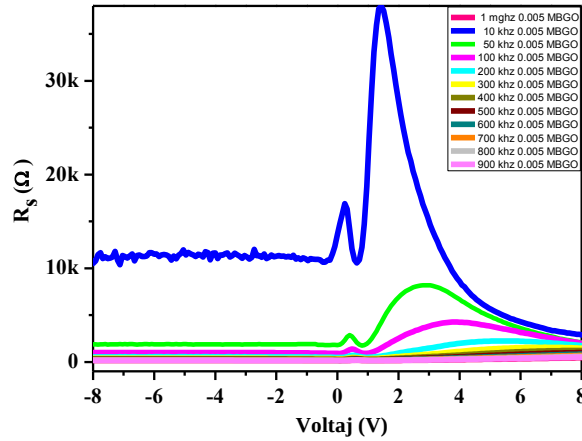
Şekil 5.39. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi



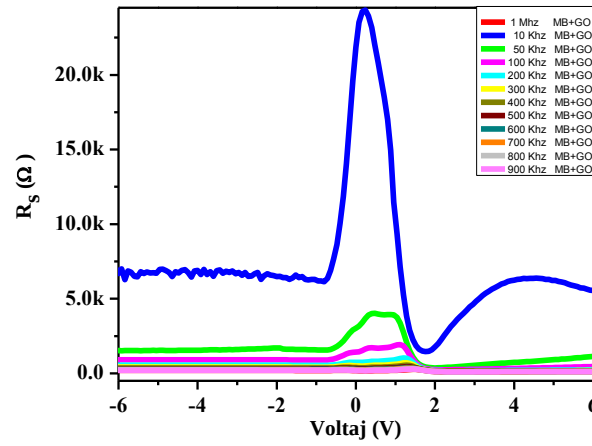
Şekil 5.40. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi



Şekil 5.41. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun R(S)-V eğrisi



Şekil 5.42. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Rs-V eğrisi

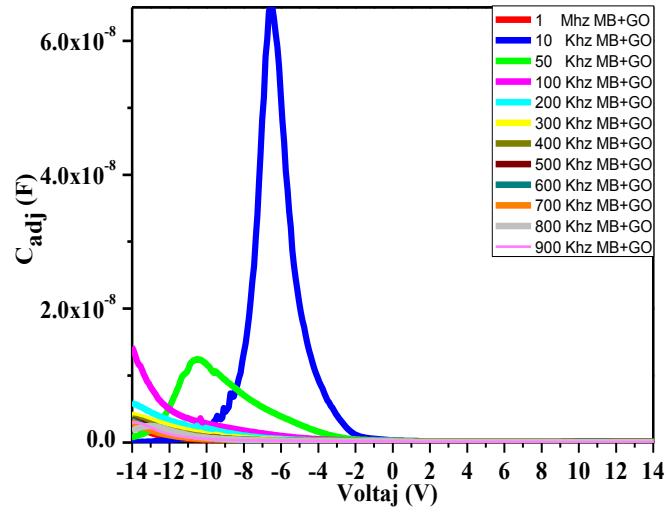


Şekil 5.43. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki R_s (ohm)-V eğrisi

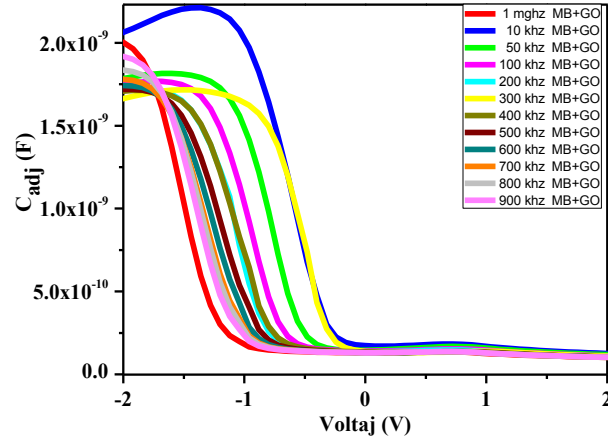
$R(s)$ -V grafiklerinde seri direncin frekans ve voltaj'a bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Ölçümler 10kHz-1Mhz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.39-5.43'deki grafiklerde görüldüğü gibi artan frekansa bağlı olarak seri direnç'te azalma görülmüştür.

5.2.4. Al/p-Si/MB+GO/Au Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri

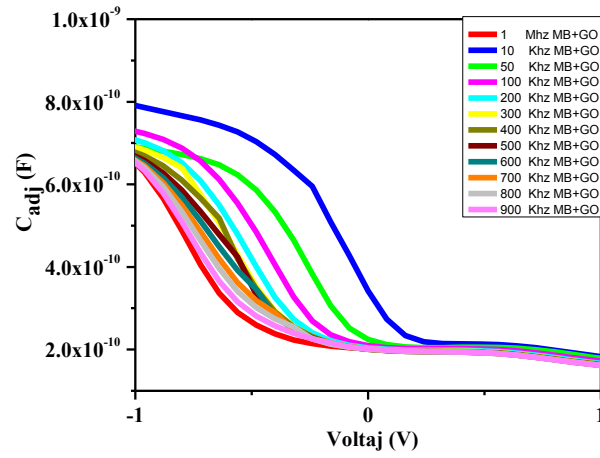
$C_{adj}(F)$ -V grafiklerinde kapasitansın frekans ve voltaj'a bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi frekansa bağlı olarak düzeltilmiş kapasitansın (C_{adj}) azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.44-5.48'de C_{adj} grafiklerinde bir pik gözlenmiştir. Uygulanan frekans ile pikin pozisyonu kayar. Bunun nedeni seri direnç ve arayüz durum yoğunluğundan kaynaklanıyor olabilir.



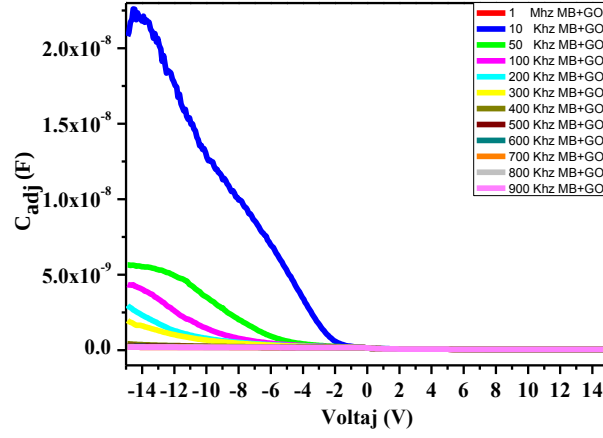
Şekil 5.44. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj-V eğrisi



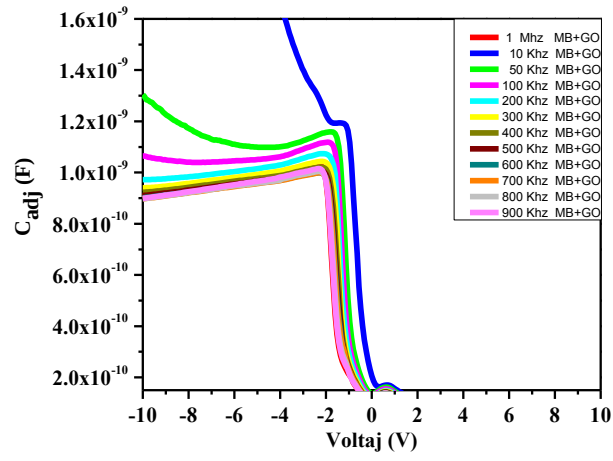
Şekil 5.45. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj-V eğrisi



Şekil 5.46. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Cadj(F)-V eğrisi

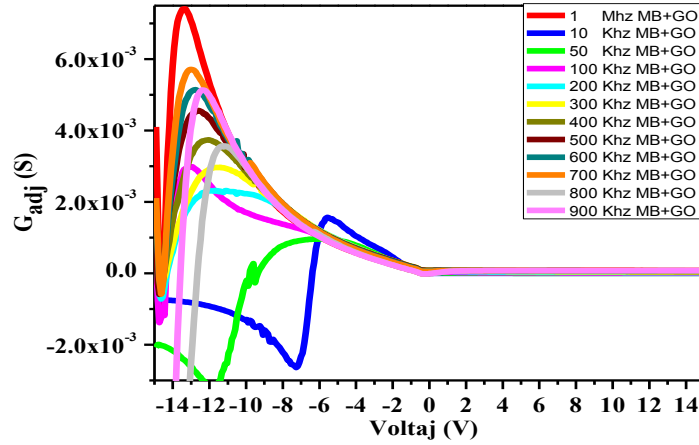


Şekil 5.47. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C_{adj}(F)$ -V eğrisi

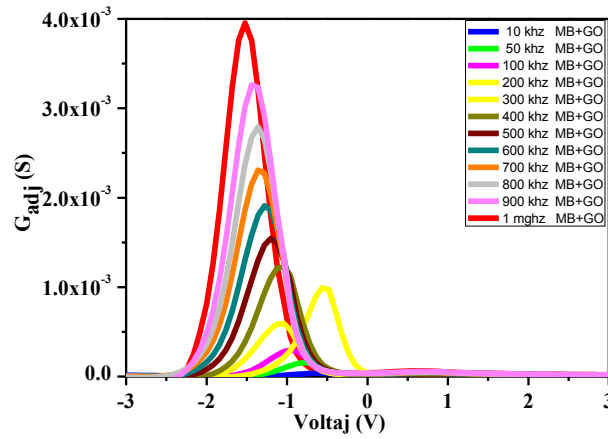


Şekil 5.48. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $C_{adj}(F)$ -V eğrisi

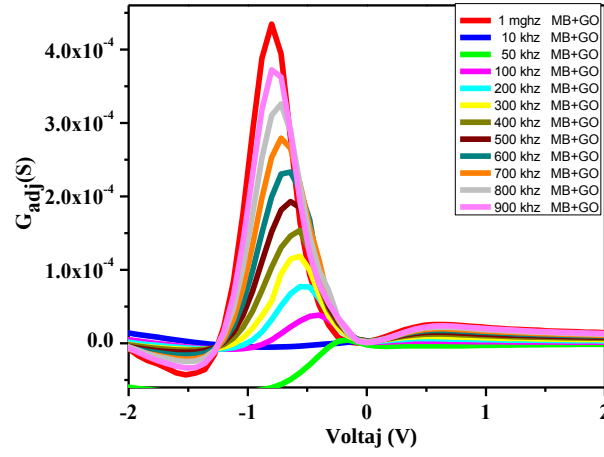
$G_{adj}(S)$ -V grafiklerinde iletkenliğin frekans ve voltaj'a bağılı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen grafiklerden de görüldüğü üzere frekansa bağılı olarak düzeltilmiş iletkenliğin (G_{adj}) arttığı gözlemlenmiştir. Uygulanan frekansa bağılı olarak pik'in maksimum noktası kayar.



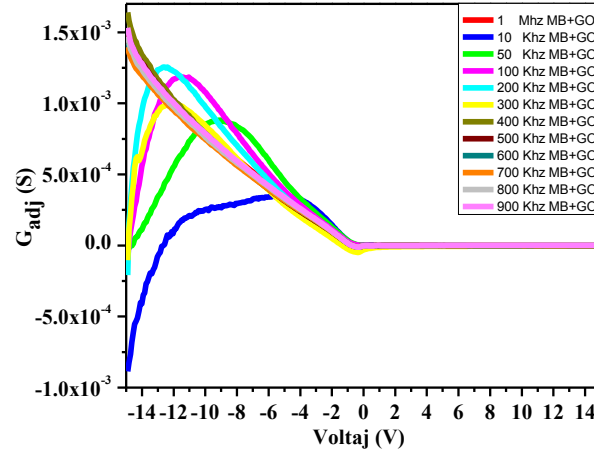
Şekil 5.49. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $G_{adj}(S)$ -V eğrisi



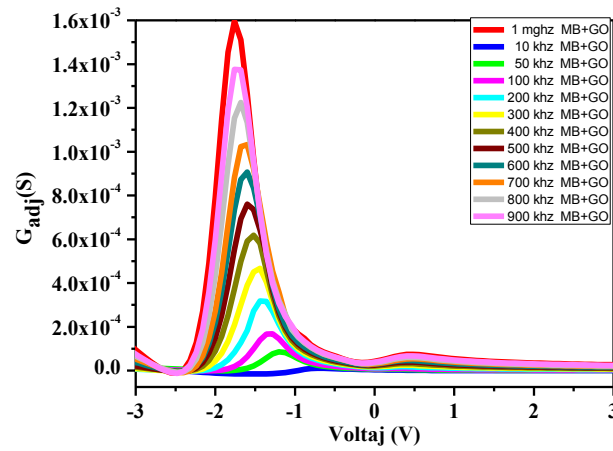
Şekil 5.50. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki $G_{adj}(S)$ -V eğrisi



Şekil 5.51. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(S)-V eğrisi



Şekil 5.52. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(S)-V eğrisi



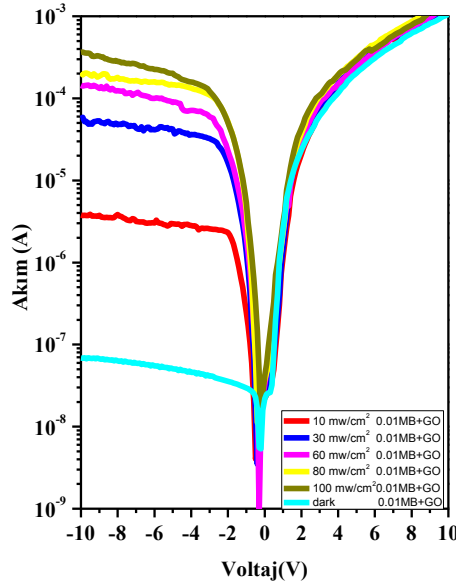
Şekil 5.53. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki Gadj(S)-V eğrisi

Şekil 5.49-5.53`te GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların farklı frekanslar için çizilen Gadj grafikleri verilmiştir. Negatif bölgede eğrilerde oluşan pik değerleri diyotun ara yüzey durumlarını göstermektedir.

5.3. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının Fotoduyarlılık Ölçüm Sonuçları

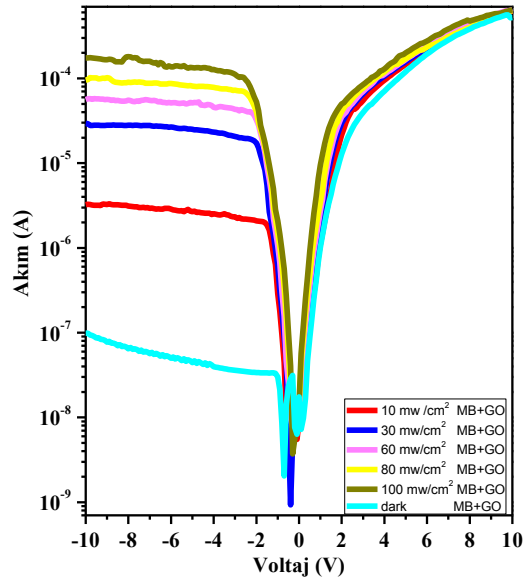
5.3.1. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Farklı Aydınlatmalar Altında I-V Karakteristikleri

Hazırlanan Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj karakteristikleri ölçümü yapıldı. Aşağıda verilen şekillerde görüldüğü gibi ışık şiddeti arttıkça diyotun ters besleme akımı artmaktadır.



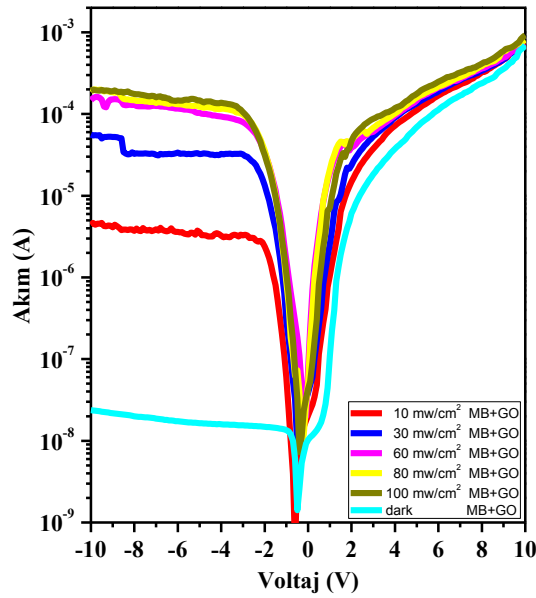
Şekil 5.54. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi

Şekil 5.54`de diyotun karanlıktaki akım değeri  $6.62 \times 10^{-8}$  A. iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $3.59 \times 10^{-4}$  A.`dir. ışık şiddetinin artışına bağlı olarak ters besleme akımının artması diyotun fotoiletken olduğunu gösterir.



Şekil 5.55. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi

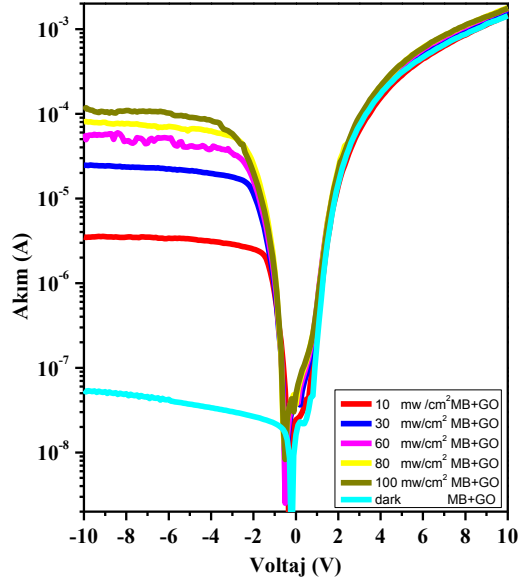
Şekil 5.55`de diyotun karanlıktaki akım değeri  $9.62 \times 10^{-8}$  A iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $1.69 \times 10^{-4}$  A`dır. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır, bu da diyotun fotoiletken olduğunu gösterir.



Şekil 5.56. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I-V eğrisi

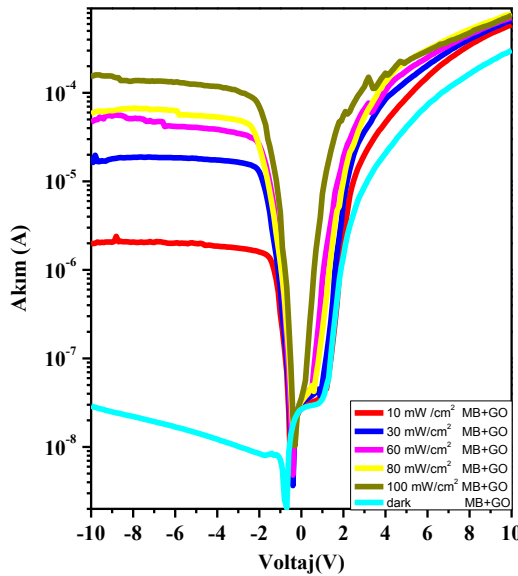
Şekil 5.56`da diyotun karanlıktaki akım değeri  $2.33 \times 10^{-8}$  A. iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $1.96 \times 10^{-4}$  A.`dır. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme

akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu durum diyotun fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.



Şekil 5.57. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I-V eğrisi

Şekil 5.57’de diyotun karanlıktaki akım değeri 5.31×10^{-8} A. iken 100 mW/cm^2 ışık altında ölçülen akım değeri 1.11×10^{-4} A.’dır. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu da diyotun fotoiletken olduğunu gösterir.



Şekil 5.58. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I-V eğrisi

Şekil 5.58’de diyotun karanlıktaki akım değeri 2.81×10^{-8} A. iken 100 mW/cm^2 ışık altında ölçülen akım değeri 1.55×10^{-4} A.’dır. Karakteristik eğride görüldüğü gibi diyotun

ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu durum diyotun fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.

Düşük voltajlarda, diyotların akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edilebilir. Termiyonik emisyon teorisi eşitlik 4.15 de verilmiştir. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların akım-voltaj grafiklerinden ters besleme doyma akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlar için idealite faktörü değerleri, her bir diyotun karanlık durumundaki $\ln I-V$ grafiğinin lineer kısmının eğiminden ve kesim noktasından hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü değerleri ve engel yüksekliği değerleri Tablo 5.4’de verilmistir. Al/p-Si/MB+GO/Al diyotların idealite faktörlerinin 1’den büyük olduğu görüldü. Bu durum, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. Yapılan hesaplamalarda 0.1 GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Al diyotun idealite faktörü değeri diğer diyotlarınkinden daha küçüktür. Al/p-Si/MB+GO diyotların herhangi bir voltaj altında doğrultma oranı ise,

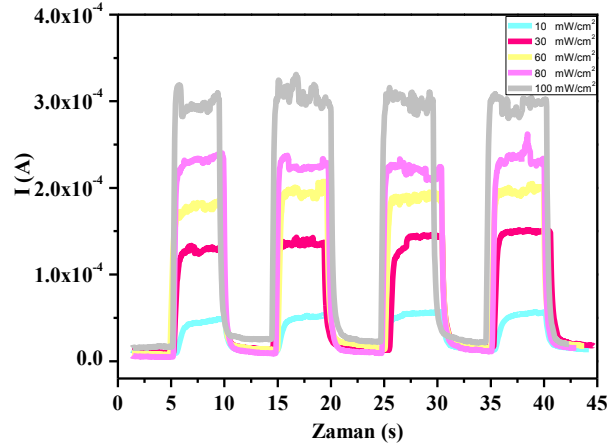
$$RR = \frac{I_f}{I_R} \quad (5.6)$$

ile ifade edilir. Burada RR doğrultma oranı, I_f doğru besleme akımı, I_R ters besleme akımıdır. GO katkılı Methylene Blue diyotların ± 10 V’ta hesaplanan doğrultma oranı değerleri tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Al/p-Si/MB+GO/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri.

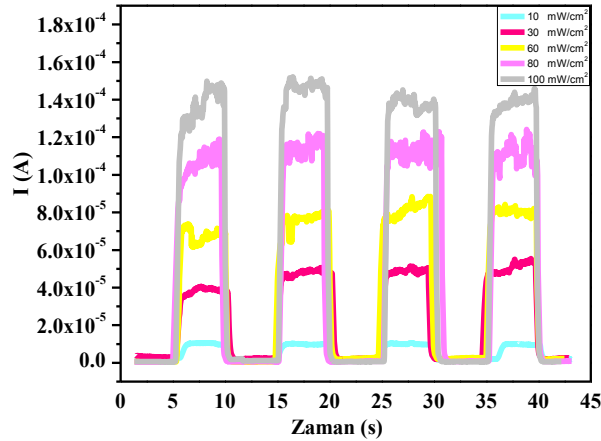
Foto Diyot	Katkı Oranı	n	Φ_B (ev)	RR
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.005	5.8	0.631	2.09×10^3
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.01	4.8	0.584	1.44×10^4
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.03	5.4	0.656	8.44×10^3
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.05	7.83	0.653	5.53×10^3
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.1	4.6	0.582	5.58×10^3

5.3.2. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Foto Akım- Zaman Karakteristikleri



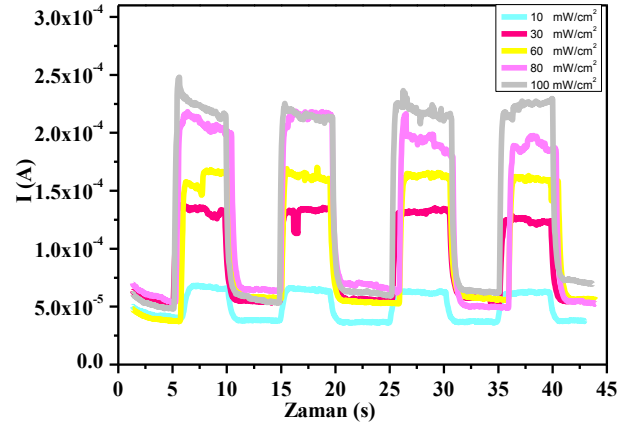
Şekil 5.59. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -t eğrisi

Şekil 5.59’da 0.01 GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Al foto diyotun farklı aydınlatma altında I_{ph} -t grafiği verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi akım artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı 9.09 olarak bulunurken 80 mW/cm²’deki 7.57, 60 mW/cm²’deki 6.45, 30 mW/cm²’deki 4.32, 10 mW/cm²’deki 1.98 olarak bulunmuştur.



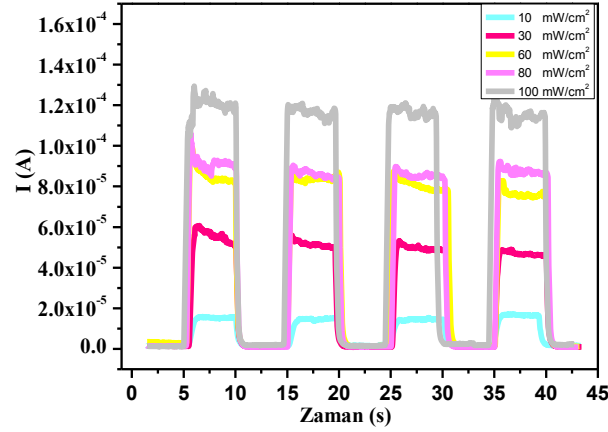
Şekil 5.60. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph} -t eğrisi

Şekil 5.60’da diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı 23.12 olarak bulunurken 80 mW/cm²’deki 18.89, 60 mW/cm²’deki 10.89, 30 mW/cm²’deki 5.89, 10 mW/cm²’deki 3.70 olarak bulunmuştur.



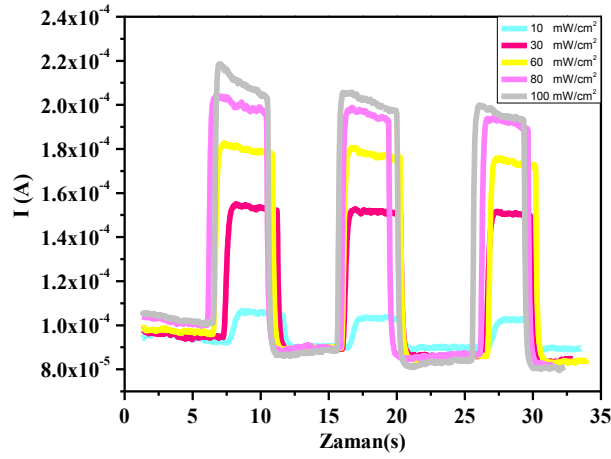
Şekil 5.61. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 6V`da Iph-t eğrisi

Şekil 5.61`de diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altındaki Iaçma/ Ikapama oranı 3.14 olarak bulunurken 80 mW/cm<sup>2</sup>`deki 2.86, 60 mW/cm²`deki 2.45, 30 mW/cm<sup>2</sup>`deki 1.94, 10 mW/cm²`deki 1.64 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.62. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 15 V`daki Iph-t eğrisi

Şekil 5.62`de diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altındaki Iaçma/ Ikapama oranı 16.4 olarak bulunurken 80 mW/cm<sup>2</sup>`deki 15.65, 60 mW/cm²`deki 13.01, 30 mW/cm<sup>2</sup>`deki 6.66, 10 mW/cm²`deki 3.25 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.63. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun 5V'daki I_{ph}-t eğrisi

Şekil 5.63'de diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki I_{açma}/ I_{kapama} oranı 2.37 olarak bulunurken 80 mW/cm²'deki 2.14, 60 mW/cm²'deki 2, 30 mW/cm²'deki 1.65, 10 mW/cm²'deki 1.12 olarak bulunmuştur.

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların fototransient akım ölçümleri diyotların fotoiletim mekanizmasını anlamak için Şekil 5.59-5.63'de gösterilmiştir. Fototransient (geçici foto akım) in incelenmesi herhangi bir foto diyotun iletim mekanizmasını incelemek için bilinen iyi bir tekniktir. Şekillerde de görüldüğü gibi 5'er sn aralıklarla açma/kapama yapılan diyotun, foto akımı aydınlatma altında artar ve sabit bir değere ulaşır. Işık ilk kapatıldığı andan itibaren ise azalır, akım ilk değerine ulaşır.

I_{ph}-t grafiklerinden yararlanılarak, 100 mW/cm²'lik aydınlatma altında diyotların fotoduyarlılığı (R) ve fotoiletkenlik hassasiyeti aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplandı.

Fotodiyotlar için fotoiletkenlik hassasiyeti,

$$S_{ph} = \frac{\left(\frac{I_{ph}}{V}\right) d}{PA} \quad (5.7)$$

Fotoduyarlılık,

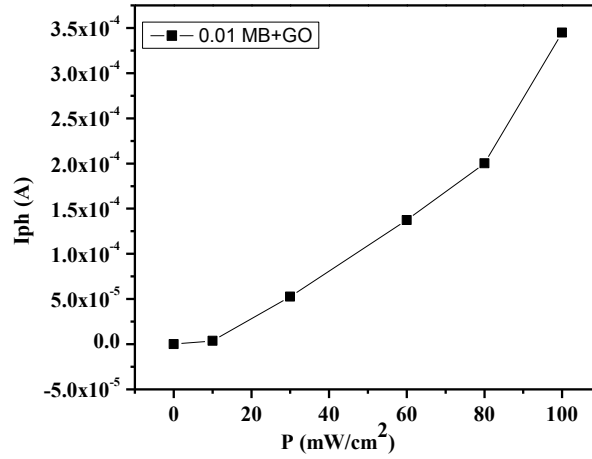
$$R = \frac{I_{ph}}{PA} \quad (5.8)$$

Burada d ince filmin kalınlığı, P gelen ışığın şiddeti, A diyotun aydınlanma alanı ve V uygulanan voltaj'dır. Şekil 5.59-5.63, deki grafiklerden yararlanılarak elde edilen değerler Tablo 5.5'de verilmiştir.

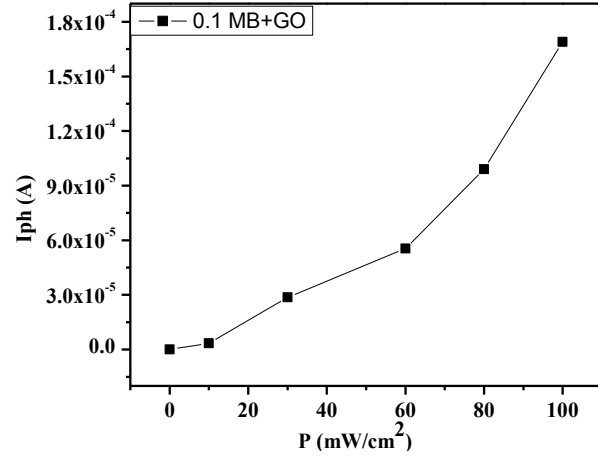
Tablo 5.5. Hazırlanan fotodiyotlar için fotoakım (I-t ölçümüyle), fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik hassasiyet değerleri.

Fotodiyotun katkı oranı	$I_{ph} (A) \times 10^{-4}$	$R (A/W) \times 10^{-2}$	$S_{ph} (m/\Omega W) \times 10^{-7}$
0.005	1.114	0.35	1.91
0.01	3.598	1.14	0.43
0.03	1.968	0.62	5.53
0.05	1.558	4.9	0.7
0.1	1.690	0.53	0.6

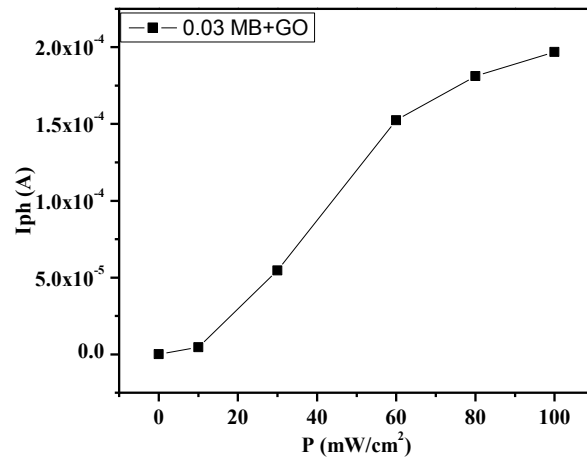
5.3.3. Al/p-Si/MB+GO/Au Diyotlarının Foto Akım -İletim Mekanizması



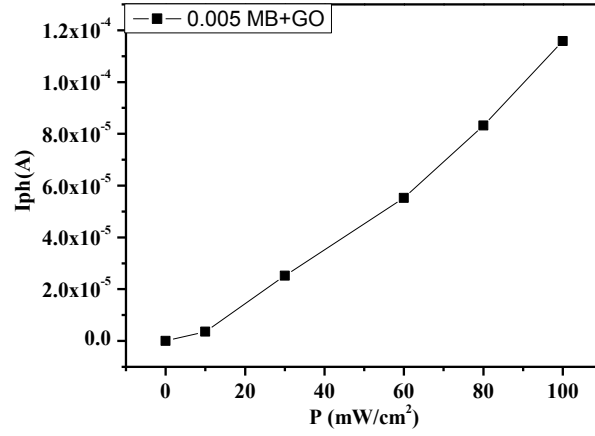
Şekil 5.64. 0.01 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph}-P eğrisi



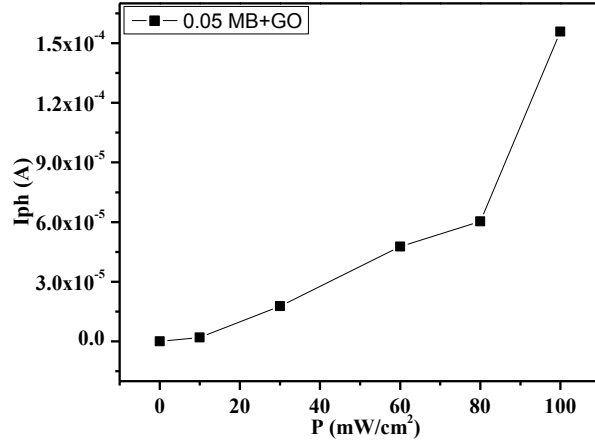
Şekil 5.65. 0.1 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph}-P eğrisi



Şekil 5.66. 0.03 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun I_{ph}-P eğrisi



Şekil 5.67. 0.005 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I_{ph}-P eğrisi



Şekil 5.68. 0.05 GO katkılı MB, Al/P-Si/MB+GO/Au diyotunun farklı frekanslardaki I_{ph}-P eğrisi

Heteroeklem diyotun foto duyarlılığını belirlemek amacıyla fotoakım, ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak şekil 5.64-5.68`de gösterilmektedir. Foto algılamanın niteliği yani fotoakım ve ışık yoğunluğu arasındaki ilişki,

$$I_{ph} = BP^\gamma \quad (5.9)$$

olarak yazılır. Burada I_{ph} fotoakım, B bir sabit, γ üssel katsayı, P ise ışık şiddeti dir. γ nın değeri I_{ph} ın P ye karşı eğiminden elde edilir.

Tablo 5.6 Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlar için elde edilen γ değerleri

Foto Diyot	Katkı Oranı	γ değerleri
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.005	1.481
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.01	1.914
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.03	1.673
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.05	1.777
Al/p-Si/MB+GO/Al	0.1	1.622

1.914 ile 1.481 arasında elde edilen γ değerleri engel seviyelerinin sürekli dağılımının varlığını göstermektedir. (Yakuphanoglu ve Senkal 2009; Gupta ve Yakuphanoglu, 2012).

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Grafen oksitten yararlanılarak GO katkılı ince filmleri ve Al/p-Si/MB+GO/Au diyotları üretildi. Öncelikle üretilen grafen ve GO tozunun FT-IR ölçüm analizleri yapıldı, yapılan analizler neticesinde elde edilen pikler grafen oksit ve grafen sentezinin kimyasal yapısını doğrulamaktadır. GO'da gözlenen 1626 cm^{-1} piki esnek karboksil gruplarına benzerken, 1104 cm^{-1} piki C=O alkoksi esneme titreşimidir. 3440 cm^{-1} deki pik ise OH gruplarından kaynaklanan esneme titreşimidir [87-90]. GO'nun hidrazine ile kimyasal indirgenmesinden sonra oksijen içeren fonksiyonel grupların karakteristik absorpsiyon bantları önemli ölçüde azalır. Bu durum GO'nun grafene indirgenmiş olduğunu gösterir. Grafitle ilişkili olan grafenin yapısında 1626 cm^{-1} deki keskin absorpsiyon bandının şiddeti önemli ölçüde dikkat çekicidir [91].

GO katkılılandırılarak mikroskop camı üzerine yapılan GO+MB ince filmlerinin, AFM resimlerinden faydalanılarak filmlerin yüzey özellikleri belirlendi. Filmlerin yüzey pürüzlülüğü 6.534 nm ile 20.314 nm arasında değişirken ortalama tanecik boyutları 135.417 nm ile 252.604 nm arasında değiştiği görülmüştür. $252,604\text{ nm}$ ile ortalama tanecik boyutu en büyük olan numunenin 0.01 GO katkılı Methylene Blue olduğu saptanırken en küçük olan 0.005 katkılı MB+GO'dır.

Hazırlanan MB+GO filmlerin UV ölçümleri yapılarak soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı grafikleri çizildi. İnce filmlerin optiksel özellikleri herhangi bir fotodiyotun üretimi için araştırılan çok önemli parametrelerden biridir. Optiksel özellikler ve bu sayede ince filmlerin yasak enerji aralığı fotodiyotların elektriksel özelliklerini etkileyebilir. İnce filmlerin optiksel özellikleri 200 nm ile 1400 nm arasında gösterilmiştir. Optiksel ölçümlerde GO katkı miktarına bağlı olarak düzenli bir değişim gözlenmedi bu durum filmlerin tanecik boyutundaki değişimden kaynaklanmış olabilir. MB+GO ince filmlerinin yasak enerji aralığı absorpsiyon eğrisi kullanılarak hesaplandı. İnce filmlerin absorpsiyon esası valans bandından iletim bandına elektronların uyarılmasına karşılık gelir. MB+GO filmlerin yasak enerji aralıkları $3,83\text{ eV}$ ile $3,30\text{ eV}$ aralığındadır [92].

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotunun elektriksel karakterizasyonu için akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların karanlıkta yapılan ölçümlerinde alınan veriler ile çizilen akım-voltaj

karakteristik grafikleri, foto diyotların fotoiletken olduğunu göstermektedir. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların doğru akımı analiz edilerek, doğrultma oranları, idealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. foto diyotların idealite faktörü değerleri, her bir foto diyotun karanlık durumdaki $\ln I-V$ grafiğinin lineer kısmının eğiminden hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü değerleri, 1'den büyüktür. Bu durumun nedeni ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. Al/p-Si/MB+GO/Au diyotlarının akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edildi. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotlarının idealite faktörleri 4.6 ile 7.8 arasında değişmekle birlikte en düşük idealite faktörü değeri 0.01 GO katkılı foto diyotununudur. foto diyotların engel yüksekliği değerleri 0.631 eV ile 0.656 eV arasında değişirken en yüksek engel yüksekliği değeri 0.03 GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotununudur. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların doğrultma oranları 1.44×10^4 ile 2.09×10^3 arasında değişmekle birlikte en iyi doğrultma oranını 0.01 GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotu gösterdi.

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların farklı frekanslara C-V grafikleri çizildi. Grafiklerde Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasitelerinin değişmediği fakat negatif voltaj bölgesinde kapasitelerin değiştiği görüldü. C-V grafiklerinin ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösteremediği tespit edildi [93]. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için paralel model kapasite oluşturularak C_{adj} grafikleri çizildi. Çizilen C_{adj} grafiklerinde oluşan pik değerleri diyotların arayüzey durum yoğunluğuna sahip olduklarını gösterdi. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların farklı frekanslar için G_{adj} grafikleri çizildi. G_{adj} grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan pik değerleri Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların arayüzey durum yoğunluğunun varlığını doğrulamaktadır.

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotlarının farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda optik cevap analizi yapılarak $I_{ph}-t$ grafikleri çizildi. $I_{ph}-t$ grafikleri ışığın açık olduğu durumda akımın bazı diyotlarda hızlı bir şekilde bazı diyotlarda ise kademeli olarak max değere yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıçtaki değere düştüğü görüldü. Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların karanlık ile 100 mW/cm^2 aydınlanma altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri 2.37 ile 23.12 arasında değişirken, en yüksek $I_{açma}/I_{kapama}$ değeri 0.1 GO katkılı Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotununudur. 0.1 katkılı numune hariç, Al/p-Si/MB+GO/Au diyotların $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri diyotların optik

duyarlılıklarının iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca I-t grafiğinden yararlanılarak diyotların fotoakım, fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik gibi elektriksel parametreleri hesaplandı. Fotoakım değerleri 1.114-3.598 arasında değişirken fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik hassasiyeti değerleri sırasıyla 0.35×10^{-2} - 1.14×10^{-2} , 0.43×10^{-7} - 5.53×10^{-7} arasında değişim göstermektedir. Bu durum göstermektedir ki, diyotun fotoiletkenlik hassasiyeti ışık şiddetinin artmasıyla azalır. Akım foto aydınlatmaya bağlı ters yönde artar [93].

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların farklı frekanslara 100 mW/cm^2 'lik aydınlatma şiddeti altında C-t grafikleri çizildi. 100 kHz, 500 kHz ve 1 Mhz frekans altında çizilen kapasite zaman grafiklerinde frekansın artmasına bağlı olarak kapasitenin azaldığı gözlemlendi. Ayrıca diyotların Rs-V grafikleri de 1 Mhz ile 10 kHz arasındaki farklı frekanslar altında analizi yapıldı, yapılan analizler sonucunda frekansa bağlı olarak seri direncin değiştiği yani frekans arttıkça seri direnç pik noktasının düştüğü gözlemlendi.

Al/p-Si/MB+GO/Au foto diyotların I-V ve C-V ölçümleri sonucu hesaplanan engel yükseklikleri birbirlerine yakın değerde bulunmuş olup sadece 0.005 GO katkılı diyotun C-V ölçümünden elde edilen engel (bariyer) yüksekliği ile I-V ölçümünden elde edilen engel yüksekliği arasında büyük bir fark meydana gelmiştir.

Sonuç olarak, elde ettiğimiz grafikler GO katkılmasına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermeyip diyotun optimum katkılama miktarını bulmak için ayrı bir önem arz etmektedir. Ayrıca gerek çeşitli karanlık ve aydınlık altında aldığımız I-V ölçümleri gerekse aldığımız diğer elektriksel ölçümler GO katkılı organik yarıiletken Al/p-Si/MB+GO/Au diyotunun iyi bir fotodedektör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **M. Heyns and W. Tsai.**, 2009. Emerging Research Devices," (The International Technology Roadmap for Semiconductors), Moore, G., Electronics 38, 1965.
- [2] **Bahar, KOZAL.**, 2012. Karbon Tabanlı Petek Örgülerin Elektronik Özellikleri, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- [3] **Kevin, Bullis.**, 2008. Graphene Transistors, Predicted electronic properties that have made researchers excited about a new material have now been demonstrated experimentally, MIT Technology Review.
- [4] **Meltem, BABAYİĞİT.**, 2013. Polikristalin Bakır Folyo Üzerinde Büyütülmüş Grafenin Elektriksel Karakterizasyonu , *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü.
- [5] **Aybey, Moğulkoç.**, 2008. Grafende Kütlesiz Dırac Fermiyonları Gazı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [6] **Mehmet, ERDEM.**, 2012. Karbonun Yeni Hali: Grafen, Ekoloji Magazin, Sayı:35 (Temmuz-Eylül).
- [7] **Coşkun, Kocabaş.**, 13. Ulusal Optik, Elektro Optik ve Fotonik Toplantısı, Grafenin Optik ve Optoelektronik Uygulamaları, Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü, Ankara.
- [8] **D,-T. Phan., R,K. Gupta., G,-S. Chung., A,A. Al-Ghamdi., Omar A, Al-Hartomy., F, El-Tantawy., F, Yakuphanoglu.**, 31 July 2012. Photodiodes based on graphene oxide-silicon junctions, *Solar Energy*, 86, 2961-2966.
- [9] **A,K. Geim.**, 2009. Graphene: Status and Prospects, *Science*, 1530-1534, No:5934
- [10] **A,K. Geim., K,S. Novoselov.**, 2007. The Rise of Graphene, *Mat.Matter*, 183-191
- [11] **D,R. Dreyer., S. Park., C,W. Bielawski., R,S. Ruoff.**, 2010. The Chemistry of Graphen Oxide, *Chem. Soc. Rew*, 228.
- [12] **L. Ravognan., et al.**, 2002. Cluster-Beam Deposition and in Situ Characterization of Carbyne-Rich Carbon Films, *Phys-Rev.Let*, 285506.

- [13] **LU. Jianming.**, 2011. Transport properties of graphene and its application, The Hong Kong Univ. Of Science and Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Physics, Hong Kong.
- [14] **A. Fatih Kuloğlu.**, 2012. Kenarları Paladyum ile Sonlandırılmış Grafen Nano Şeritlerin Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Ankara.
- [15] **Meltem Babayiğit.**, 2013. Polikristalin Bakır Folyo Üzerinde Büyütülmüş Grafenin Elektriksel Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilimdalı.
- [16] **Wallace,P.R.**, 1947. ``The band Theory of Graphite``, *Physical Review*, 71(9):622-634
- [17] **Castro Neto, A.H., Guinea.F., Peres,N.M.R., Novoselov,K.S., Geim, A.K.**, 2009. ``The Electronic Properties of Graphene``, *Review of Modern Physics*, 81(1):109-162.
- [18] **Semenoff, G. W.**, 1984. ``Condensed-Matter Simulation of a Three-Dimensional Anomaly``, *Physical Review Letters*, 53 (26): 2449-2452.
- [19] **Haldane, F. D. M.**, 1988. ``Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the "Parity Anomaly"`` , *Physical Review Letters*, 61 (18): 2015-2018.
- [20] **Novoselov, K. S., Jiang, D., et. al.**, 2005. Two-dimensional atomic crystals, *PNAS*, 102, (30): 10451-10453.
- [21] **Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V.**, 2004. " Electric field effect in atomically thin carbon flims", *Science* 306, 666-669.
- [22] **Baughman, R.H., Zakhidov, A.A., de Heer, W.A.**, 2002. Sience., **297**, 787.
- [23] **Muhittin, Öztürk.**, 2011. Grafen Transistörlerin Elektriksel Parametrelerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilimdalı, Yozgat.
- [24] **Jung, I.**, 2007. Optical and Electrical Characterization of Graphene-Based Material, *Degree Doctor of Philosop*, Northwestern University.

- [25] **Zhang, Y., et. al.,** 2005. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene, *Nature*, **438**, 201-204.
- [26] **Ni, Z. H., Wang, H. M., et. al.,** 2007. Graphene Thickness Determination Using Reflection and Contrast Spectroscopy, *Nano Lett*, NL071254M.
- [27] **Geim, A. K., Novoselov, K. S.,** 2007. The rise of graphene, *Nature materials*, Vol: **6**,
- [28] **Geim, A. K., et. al.,** 2007. Making Graphene Visible, *Applied Physics Letters*, Vol. **91**, pp. 063124-063128.
- [29] **Teo, G., Wang, H.,** 2008. Visibility study of graphene multilayer structures, *Journal of Applied Physics*, **103**, 124302.
- [30] **Donal, A. N.,** 2002. SEMICONDUCTOR PHYSICS AND DEVICE, S. 157-180, Sydney, Australic.
- [32] **Phaedon, Avouris.,** 2010. Graphene: Electronic and Photonic Properties and Devices, *Nano Letters*, 4285-4294
- [33] **Park, J.S., et al.,** 2009. G band Raman Spectra of single double and triple layer graphene carbon, **47**, 1303.
- [34] **Xia, F., et al.,** 2009. Photocurrent imaging and efficient photon detection in graphene transistor, *Nano Lett*, **9**, 1039.
- [35] **Mueller, T., et. al.,** 2009. Role of contacts in graphene transistor: a scanning photocurrent study. *Phys. Rev. B.*, **79**, 245430.
- [36] **Singh, V., Joung, D.,** 2011. Graphene based materials: Past, present and future. *Progress in Materials Science.*, **56**, 1178-1271,
- [38] **S, Park., R. S, Ruoff.,** 2009. *Nat. Nanotechnol.* **4**, 217
- [39] **W, Gao., L.B, Alemany., L, Ci., P.M, Ajayan.,** 2009. *Nat. Chem*, **1**, 403.
- [40] **D.R, Dreyer., S, Park., C.W, Bielawski., R.S, Ruoff.,** 2010. *Chem. Soc. Rev*, **39**, 228.
- [41] **K, Krishnamoorthy., R, Mohan., S.J, Kim.,** 2011. *Appl. Phys. Lett*, **98**, 244101 (1–3).

- [42] **J, Gao., F, Liu., Y, Liu., N, Ma., Z, Wang., X, Zhang.,** 2010. *Chem. Mater*, 22, 2213.
- [43] **C, Zhu., S, Guo., Y, Fang., S, Dong.,** 2010. *ACS Nano*, 4 ,2429.
- [44] **Y, Zhou., Q, Bao., L.A.,L. Tang., Y, Zhong., K.P, Loh.,** 2009. *Chem. Mater*, 21, 2950.
- [45] **A.V, Murugan., T, Muraliganth., A, Manthiram.,** 2009. *Chem. Mater*, 21,5004.
- [46] **J, Zhang., H, Yang., G, Shen., P, Chen., J, Zhang., S, Guo.,** 2010. *Chem. Commun*, 46,1112.
- [47] **A, Gedanken.,** 2004. *Ultrason. Sonochem*, 11 (2004) 47, 15.
- [48] **M, Veerapandian., R, Subbiah., G.S, Lim., S.-H, Park., K.S. Yun., M.H, Lee.,** 2011. *Langmuir* 27,8934.
- [49] **C, Deng., H, Hub., X, Ge., C, Han., D, Zhao., G, Shao.,** 2011.*Ultrason. Sonochem*, 18, 932.
- [50] **D.V, Pinjari., A.B, Pandit.,** 2011. *Ultrason. Sonochem*, 18, 1118.
- [51] **V, Safarifard., A, Morsali.,** 2012. *Ultrason. Sonochem*, 19,823.
- [52] **A, Ramadoss., S.-J, Kim.,** 2012. *J. Alloys Compd*, 54,115.
- [53] **Karthikeyan, Krishnamoorthy., Gui-Shik, Kim., Sang Jae, Kim.,** 2012. Graphene nanosheets: Ultrasound assisted synthesis and characterization, *Ultrasonics sonochemistry*, 644-649
- [54] **Manukyan, S.,** 2008. Mechanically Exfoliated Single and Multilayer Graphene Sheets and Graphene Field Effect Transistor, Degree Master of Science, B.S., Physics, Boğaziçi University.
- [55] **Huang, H., Chen, W., Chen, S., Wee, A. T. S.,** 2009. Bottom-up Growth of Epitaxial Graphene on 6H-SiC (0001), *Acs Nano.*, 2, 2513-2518.
- [56] **Kocabas, C., Dunham, S., Cao, Q., Cimino, K., Ho, X. N., Kim, H. S., Dawson, D., Payne, J., Stuenkel, M., Zhang, H., Banks, T., Feng, M., Rotkin, S. V., and Rogers, J. A.,** 2009. "High-Frequency Performance of Submicrometer Transistors That Use Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes," *Nano Letters.*, 9, 1937-1943.

- [57] **LiU, Z. Y., Srot, V., and Yang, J. C.,** 2010. Self-assembled crystalline silicon carbide Y junctions by coalescence of nucleated iron catalysts, *Applied Physics Letters.*, **90**.
- [58] **Stankovich, S., Piner, R. D., et. al.,** 2006. Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly, *Journal of Materials Chemistry.*, **16**, 155-158.
- [59] **Stankovich, S., Dikin, A., et.al.,** 2006. Graphene-based composite materials, *Nature.*,**42**, 282-285.
- [60] **He, H., Riedl, T., et. al.,** 1996. Solid-State NMR studies of the structure of graphite oxide, *J. Phys. Chem.*, **100** : 19954-8.
- [61] **Lerf, A., He, H., et. al.,** 1997. ¹³C and ¹H MAS MNR studies of the graphite oxide and its chemically modified derivatives. *Solid-State Ionics.*, **101-103** (Pt.2): 857-862.
- [62] **Lerf, A., He, H., et. al.,** 1998. Structure of Graphite Oxide Revisited, *J. Phys. Chem. B.*, **102**, 4477-4482.
- [63] **Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., et al.,** 2008. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite *Nat.Nanotechnol.*, **3**, 563-568, Sep.
- [64] **Dai, H., et. al.,** 2008. *Science.*, **319**, 1229-1232.
- [65] **Mehmet, Şeftalici.,** 2010. Al_{0.47}Ga_{0.53}n Schottky Fotodedektör Yapının Optik ve Morfolojik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilimdalı, Ankara.
- [66] **Türkoğlu, A.,** 2007. “GaAs-Al_xGa_{1-x}As Heteroyapı ve Çoklu Kuantum Kuyu IR Fotodedektörün Elektro-Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 4-5.
- [67] **Mustafa, Yüksek.,** 2010. Selenyum Bileşikli Bazı Yarıiletkenlerin Çigisel Olmayan Optik Özellikleri, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilimdalı, Ankara.

- [68] **Burcu, Yıldırım.,** 2007. $\text{Al}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ Schottky Fotodetektör Yapının Optiksel ve Yüzeysel Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İleri Teknolojiler, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [69] **Elif, Ayaz.,** 2012. Gözenekli Silisyum Kristali, Bazı Yarıiletkenler ve Doğal Kristallerin Kütle Soğurma Katsayılarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fizik Anabilimdalı, Rize.
- [70] **Mehmet, Çavaş.,** 2011. Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Metaluji Eğitimi Anabilimdalı, Elazığ.
- [71] **Demirci, B.,** 2006. İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskisehir.
- [72] **Sarı, H.,** 2008. Yarıiletken Fizigi: Elektronik ve optik özellikler, *ders notları*, Ankara Üniv. Fizik Mühendisliği, Ankara.
- [73] **Kırmızıgül, F.,** 2008. CdO İnce filmlerin püskürtme yöntemi ile hazırlanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [74] **Yazıcı, D.,** 2007. Fosfor metal komplekslerinin fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [75] **İdris, Kaya.,** 2010. Metal-yarıiletken schottky diyotların elektriksel karakteristiklerin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi
- [76] **Bilgen, Y.,** 2008. Sol-gel yöntemi ile üretilen nano kristal ZnO:Ga ince filmlerinin optik ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [77] **Eren, O.,** 2006. Alüminyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskisehir.
- [78] **Bayram, Gündüz.,** 2007. Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilimdalı, Elazığ.
- [79] **Sefa Burak, Kaya Aydın.,** 2013. Al/TiO₂/P-si Schottky Diyotların Akım-Voltaj (I-V) ve Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilimdalı, Yozgat.

- [80] **M, Soylu., Omar A. Al-Hartomy., Said A. Farha, Al Said., Ahmed A. Al-Ghamdi., I.S, Yahia., Fahrettin, Yakuphanoglu.,** 2013. Controlling of conduction mechanism and electronic parameters of silicon-metal junction by mixed Methylene Blue/20-70-dichlorofluorescein, *Microelectronics Reliability*, 53, 1901-1906.
- [81] **Kılıç, L.,** 2006. Seçici katkılı In_{0.48}Al_{0.52} As/In_{0.57} Ga_{0.43}As Heteroeklemlı yapılarında Saçılma mekanizmaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [82] **S.M.,Sze, Kwok K. Ng.,** 2007. Physics of Semiconductor Device, Wiley Interscience, New Jersey.
- [83] **Bütün, S.,** 2006. The Growth fabrication and characterization of high performance Al_xGa_{1-x} N metal-semiconductor-metal photodiodes, *Yüksek Lisans Tezi*, Bilkent Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [84] **Cafer, T.,** 2000. Katı Hal Elektronik, İstanbul.
- [85] **S.O, Kasap.,** Optoelectronics and Photonics Principles and Practices, Professor of Electrical Engineering University of Saskatchewan, Canada.
- [86] **S, Karataş., F, Yakuphanoglu., F.M, Amanullah.,** 2012. Capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics of Ag/n-CdO/p-Si MIS structure prepared by sol-gel method, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 46–51
- [87] **R.K, Gupta., Z. A, Alahmed., F.Yakuphanoglu.,** 2013. Graphene oxide based low cost battery, *Materials Letters*, 112, 75-77.
- [88] **Ahmed A.Al-Ghamdi., R.K,Gupta., P.K, Kahol., S, Wageh., Y.A.Al-Turki., W, Elshirbeeney., F, Yakuphanoglu.,** 2014. Improved solar efficiency by introducing grapheneoxide in purple cabbage dye sensitized TiO₂ based solarcell, *Solid State Communications*, Volume 183, 56-59.
- [89] **Karthikeyan, Krishnamoorthy., Gui-Shik, Kim., Sang. Jae, Kim.,** 2013. Garphene nanosheets: Ultrasound assisted synthesis and characterization, *Ultrasonics Sonochemisrty*, Volume 20, 644-649.
- [90] **Kyoung. Hoon, Lee., Sang-Wook, Han., Ki-Young, Kwon., Joon B. Park.,** 2013. Systematic analysisof palladium-graphene nanocomposites and their catalytic

applications in Sonogashira reaction, *Journal of Colloid and interface Science*, Volume 403, 127-133.

- [91] **Xinmeng, Zhang., Kezhi, Li., Hejun, Li., Jinhua, Lu., Qiangang, Fu., Yanhui, Chu.,** 2014. Graphene nanosheets synthesis via chemical reduction of graphene oxide using sodium acetate trihydrate solution, *Synthetic Metals*, 193, 132-138.
- [92] **R.K, Gupta., A.A, Hendi., M. Cavas., Ahmed A. Al-Ghamdi., Omar A. Al-Hartomy., R.H. Aloraini., F, El-Tantawy., F, Yakuphanoglu.,** 2014. "Improvement of photoresponse properties of NiO/pSi photodiodes by copper dopant " *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Volume 56, Pages 288-295.
- [93] **Murat, Soylu., M, Cavaş., Ahmed A. Al-Ghamdi., Z.H, Gafer., F, El-Tantawy.,** 2014. Photoelectrical characterization of a new generation diode having GaFeO₃ interlayer, *Solar Energy Material & Solar Cells*, 124, 180-185.
- [94] **Han, S., Lin, J., Satjapipat, M., Baca. A, J., Zhou, F.,** 2001. A three dimensional heterogeneous DNA sensing surface formed by attaching oligodeoxynucleotide-capped gold nanoparticles onto a gold coated quartz crystal, *Chem. Commun*, 7, 609-610.
- [95] **Maiti. U,N., Ghosh. P,K., Nandy, S., Chattopadhyay. K, K.,** 2007. Effect of Mn doping on the optical and structural properties of ZnO nano/micro-fibrous thin film synthesized by sol-gel technique, *Physica B*, 387, 103-108.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Adı : Ayşegül
Soyadı : Dere
Doğum Tarihi : 25.07.1986
Doğum Yeri : Elazığ
Uyruğu : T.C
Medeni Hali : Bekar

Eğitim Bilgileri:

İlköğretim : 1993-1998 Mehmet Zeki İlköğretim Okulu
Ortaöğretim : 1998-2000 Tevfik Yaramanoğlu İlköğretim Okulu
Lise : 2000-2003 Fatih Lisesi
Lisans : 2008-2011 Fırat Üniversitesi
Yüksek Lisans: 2012- 2014 Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Katıhal Fiziği, Elazığ.