



**DESENLENMİŞ Si ALTTAŞLAR ÜZERİNDEN
III-V GRUBU ESNEK GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Onur ŞENEL

Doktora Tezi

Eskişehir 2025

**DESENLENMİŞ Si ALTTAŞLAR ÜZERİNDEN III-V GRUBU ESNEK GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Onur ŞENEL

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2025

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 21DRP123 no.lu proje,
TÜBİTAK 120F222 no.lu proje ve YÖK 100/2000 kapsamında desteklenmiştir.*

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Onur ŞENEL'in DESENLENMİŞ Si ALTTAŞLAR ÜZERİNDEN III-V GRUBU ESNEK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışması 06/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN
Üye	: Prof. Dr. Mehmet PARLAK
Üye	: Doç. Dr. Erhan AYAS
Üye	: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Şahin COŞKUN

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

06/01/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Onur şENEL, DESENLENMİş Si ALTTAşLAR ÜZERİNDEN III-V GRUBU ESNEK GüNEş HÜCRELERİNİN GELİşTİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

ÖZET

DESENLENMİŞ Si ALTTAŞLAR ÜZERİNDEN III-V GRUBU ESNEK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Onur ŞENEL

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2025

Danışman: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Bu çalışmada, geniş yasak enerji aralığına sahip GaInP üçlü yarıiletken bileşiği, örgü uyumlu GaAs alttaşların aksine Si alttaşlar üzerine moleküler demet epitaksi sistemi ile büyütülmüş ve esnek tabanlara aktararak aygıt haline getirilmiştir.

Örgü uyumsuzluğu nedeniyle oluşabilecek kristal kusurların baskılanması için büyütme öncesinde Si alttaşlara düzenli ve düzensiz desenleme işlemi uygulanmıştır. Si alttaşlar, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak nanoküre litografisi ile düzenli ve AgNO_3 kullanılarak da düzensiz olacak şekilde iki farklı yöntem ile desenlenmiştir. Desenlenen alttaşlar üzerine büyütülen tampon GaAs katmanının yan-kesit taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, dislokasyonların desenlenmemiş Si alttaşına göre oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Büyütülen tek eklem GaInP güneş hücre yapıları, epitaksiyel lift-off yöntemi ile esnek tabanlara aktarılan aygıt haline getirilmiş ve yapısal/elektro-optik yöntemler ile incelenmiştir.

Desenlenmiş Si alttaşlar üzerine büyütülen GaAs tampon katmanının FWHM değeri ~ 180 arcsec, GaInP ise ~ 350 arcsec olarak ölçülmüştür. Epitaksiyel lift-off sonrasında esnek tabana aktarılan tek eklem GaInP güneş hücrelerinde, düzenli desenlemede %0,25 ve düzensiz desenlemede %0,39 elektriksel dönüşüm verimi elde edilmiştir. 4° miscut Si alttaş üzerinden geliştirilen hücrelerde ise %1,03 elektriksel dönüşüm verimi elde edilmiştir. Referans olması için GaAs alttaş üzerine büyütülen tek eklem GaInP güneş hücrelerinden ise %7,04 elektriksel dönüşüm verimi elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Esnek ince film güneş hücresi, MBE, Si alttaş desenleme, Epitaksiyel lift-off, GaInP ince film güneş hücresi

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF GROUP III-V FLEXIBLE SOLAR CELLS ON PATTERNED Si SUBSTRATES

Onur ŞENEL

Department of Physics

Programme in Solid State Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2025

Supervisor: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

In this study, a wide bandgap GaInP ternary semiconductor compound was grown on Si substrates by molecular beam epitaxy instead of lattice-matched GaAs substrates. Then the grown GaInP thin films were transferred to flexible carriers. Finally, solar cell devices were fabricated.

To suppress crystal defects due to lattice mismatch, ordered and disordered patterning was applied to the Si substrates prior to growth. The Si substrates were patterned by two different methods: ordered patterning using nanosphere lithography and disordered patterning using AgNO₃ with metal-assisted chemical etching. Cross-sectional scanning electron microscopy images of the buffer GaAs layer grown on the patterned substrates showed that the dislocations were significantly reduced compared to the growth on the bare Si substrate. The GaInP thin films were transferred to a flexible carrier by epitaxial lift-off method. Single junction GaInP solar cell devices characterized by electro-optic methods.

The FWHM of the GaAs buffer layer and GaInP thin films grown on patterned Si substrates were obtained as ~180 and ~350 arcsec, respectively. The electrical conversion efficiencies of ordered and disordered patterned single junction GaInP solar cell devices were obtained as 0.25 and 0.39%, respectively. Also, 1.03% electrical conversion efficiency was obtained from single junction GaInP solar cells grown on 4° miscut Si substrate. As for reference, 7.04% electrical conversion efficiency was obtained from single junction GaInP solar cells grown on GaAs substrate.

Keywords: Flexible thin film solar cell, MBE, Si substrate patterning, Epitaxial lift-off, GaInP thin film solar cell.

TEŞEKKÜR

Bana yıllar içinde aktardığı değerli bilgiler ve rehberliği sayesinde bakış açımı genişletmemi sağlayan, sunduğu imkânlarla kendimi geliştirmeme yardımcı olan, üzerimde çok büyük emeği bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Uğur SERİNCAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgi birikiminden yararlandığım, samimi, anlayışlı ve yardımseverliği sayesinde beni motive eden sayın hocam Doç. Dr. Mustafa KULAKCI'ya teşekkür ederim.

Hep yanımda olan, değerli katkıları ile çalışmalarımı destekleyen ve yardımlarını hiç esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Burcu ARPAPAY'a teşekkür ederim.

Değerli görüşleri ve yardımları için tezimin jüri üyeleri sayın Prof. Dr. Mehmet PARLAK, sayın Doç. Dr. Erhan AYAS ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Şahin COŞKUN'a teşekkür ederim.

Cana yakınlığı, dostluğu ve eksik kaldığım her noktada beni sürekli destekleyen sayın Melih KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Birlikte çalışma imkanı bulduğum ve yardım ve destekleriyle kendisinden çok şey öğrendiğim sayın Berker HÜSAM'a teşekkür ederim.

Bana kendimi asla yalnız hissettirmeyen canım dostlarım Hazal ZAIMLER'e ve Uğur YORULMAZ'a teşekkür ederim.

Samimi ve içten arkadaşlıkları, eksiklik ve ihtiyaç duyduğum her konudaki yardımları için Ayşe Aygül ERGÜRHAN ve Orkun ERGÜRHAN çiftine teşekkür ederim.

Birlikte çalışmaktan ve aynı ortamı paylaşmaktan keyif aldığım Muhammed AKTAŞ, Ali BÜYÜKPINAR, Azad Ozan KORKAN, Erinç ERENOĞLU, Bora ÇAKIROĞLU ve Aydın ÜNLÜ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinin her aşamasında mutlak yardımı olan, gece gündüz birlikte çalışmaktan keyif aldığım, her konuda desteğini hissettiğim ve yanımda olan canım arkadaşım Elif YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen ve bugünlere gelmemi sağlayan başta canım annem Saniye ŞENEL ve aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Onur ŞENEL

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Onur ŞENEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
GÖRSELLER DİZİNİ	XVI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Organizasyonu	3
2. YARIİLETKEN GÜNEŞ HÜCRELERİ.....	5
2.1. Altaş Tabanlı Yarıiletken Güneş Hücreleri.....	7
2.2. Esnek Yarıiletken Güneş Hücreleri.....	8
2.3. Güneş Hücresi ile İlgili Önemli Parametreler	9
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	12
3.1. Büyütme Öncesi Si Altaş Desenleme Çalışmaları.....	12
3.1.1. Düzensiz desenleme	13
3.1.2. Düzenli desenleme	15
3.2. Büyütme Çalışmaları	19
3.2.1. Moleküler Demet Epitaksi Sistemi	19
3.3. Büyütme Sonrası Çalışmalar	22
3.3.1. Yapısal karakterizasyon	23

3.3.1.1. HRXRD	23
3.3.1.2. PL	23
3.3.1.3. SEM.....	23
3.3.2. Epitaksiyel film kaldırma	24
3.3.3. Fotolitografi	25
3.3.4. Elektro-optik karakterizasyon	25
4. DENEYSEL YÖNTEM SONUÇLARI.....	28
4.1. Si Alttaş Desenleme Çalışmaları.....	28
4.1.1. Düzensiz desenleme	29
4.1.2. Düzenli desenleme	38
4.1.2.1. Langmuir-Blodgett yöntemi	38
4.1.2.2. Doctor Blade yöntemi	39
4.1.2.3. Kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi.....	40
4.1.2.4. Nanokürelerin küçültülmesi	47
4.1.2.5. Metal tabaka kaplama ve aşındırma	49
4.2. Büyütme Çalışmaları	51
4.2.1. GaInP güneş hücresi büyütülmesi	51
4.3. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları.....	55
4.3.1. HRXRD	55
4.3.2. PL	63
4.3.3. SEM	70
4.4. Aygıt Fabrikasyonu.....	75
4.4.1. Epitaksiyel film kaldırma sonuçları	75
4.4.2. Fotolitografi	78
4.5. Güneş Hücresi Karakterizasyon Sonuçları	82
4.5.1. Dönüşüm verimi sonuçları.....	82
4.5.2. Kuantum verimi ölçümü sonuçları	92
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKÇA.....	99
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Düzensiz Desenleme işlemi için örneklere uygulanan parametreler	29
Tablo 4.2. Farklı derişimlerde AgNO ₃ çözeltisi içerisinde düzensiz desenleme işlemi sonrasında alttaşlara ait sonuçlar	35
Tablo 4.3. Düzensiz desenlenmiş örneklerin ölçümlerinde FTIR cihazında kullanılan optik elemanlar	36
Tablo 4.4. Hassas lineer hareketli şırınga düzeneğinde farklı oranlarda nanoküre solüsyonu ve farklı alttaş tutucu malzemeler ile hazırlanan örnekler	44
Tablo 4.5. Büyütölmüş örneklere ait alttaş tipleri ve hücre yapıları	52
Tablo 4.6. Van der Pauw geometrisi örneklerinin ölçüm sonuçları	54
Tablo 4.7. İlk grup örneklere ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar	56
Tablo 4.8. İkinci grup örneklere ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar	58
Tablo 4.9. Üçüncü grup örneklerine ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar	60
Tablo 4.10. i-GaAs üzerine büyütölen katkı kalibrasyon örneklerine ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar	61
Tablo 4.11. GaAs ve Si alttaşlar üzerine büyütölen GaInP örneklerine ait HRXRD ölçüm sonuçları	62
Tablo 4.12. İlk grup örneklerde PL ölçüm verileri	64
Tablo 4.13. İkinci grup örneklerde PL ölçüm verileri	66
Tablo 4.14. GaAs alttaş üzerine büyütölen n ve p katkı kalibrasyon örneklerinde PL ölçüm verileri	67
Tablo 4.15. PL ölçümünden elde edilen değerler	68
Tablo 4.16. I-V ölçümü yapılmış örneklere ait işlemsiz ve tavlama işlemi sonrası ölçüm sonuçları	86
Tablo 4.17. I-V ölçümü yapılmış örneklere ait şapka katmanı aşındırma ve yansıtmasız kaplama işlemi sonrası ölçüm sonuçları	86
Tablo 4.18. %85 FF ile dönüşüm verimi değışimi	87
Tablo 4.19. Aygıt fabrikasyonunda farklı aşamalardaki kuantum verimi ölçüm sonuçları	95
Tablo 4.20. Çalışmada en iyi performans gösteren farklı alttaşlar üzerine büyütölmüş örnekler	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 1.1.** Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan yıllara göre farklı malzeme gruplarından elde edilen güneş hücresinin rekor verim değerleri [4] 1
- Şekil 2.1.** Yarıiletken tek eklem güneş hücrelerinde farklı bant aralığı için Schockley-Queisser teorik limit dönüşüm verimi bant aralığı eğrisi [24] 6
- Şekil 2.2.** Geniş dalgaboyu aralığındaki güneş spektrumunun çoklu eklem güneş hücresi tarafından soğurulması [25] 8
- Şekil 2.3.** Güneş hücresi için **(a)** ışık altında I-V eğrisi, **(b)** I-V eğrisi I_{SC} ve V_{OC} değerleri ve **(c)** I-V eğrisinin gösterim kolaylığı için kartezyen I. çeyrekte gösterimi 10
- Şekil 2.4.** Güneş hücresi için I-V eğrisi **(a)** maksimum elektriksel güç değerindeki I_{MP} ve V_{MP} değerleri ve **(b)** doluluk oranının gösterimi 11
- Şekil 3.1.** MACE yöntemi ile farklı şekillerdeki nanoyapıların oluşturulması [39] 13
- Şekil 3.2.** Düzensiz Desenleme işlemi, **(a)** $AgNO_3$ çözeltisi içerisine yerleştirilen oksiti temizlenmiş Si alttaşı, **(b)** yüzeye Ag kaplanması ve aşındırma işlemi, **(c)** aşındırma sonrası Ag kaplı Si alttaşı HNO_3 çözeltisi ile temizlenmesi ve **(d)** oksiti temizlenmiş büyütme işlemi için hazır düzensiz desenlenmiş alttaşı 14
- Şekil 3.3.** Nanoküre litografisi ile Düzenli Desenleme işlemine ait alt basamakların şematik gösterimi 16
- Şekil 3.4.** Yüzeyde tek katman hekzagonal dizilmiş nanokürelerin şematik gösterimi 16
- Şekil 3.5.** Langmuir-Blodgett yöntemi ile nanokürelerin yüzeye kaplanması şematik gösterimi: sıvı-gaz arafazında **(a)** rastgele dağılmış nanoparçacıklar, **(b)** bariyerin sıkıştırması ile tek katman dizilmiş nanoparçacıkların alttaşı yüzeyine kaplanması [43] 17
- Şekil 3.6.** Doctor Blade yönteminin şematik gösterimi: Çoklu katman halinde bulunan nanoparçacıkların ince bir uç ile yüzeyden süpürülmesi [44] 18

Şekil 3.7. Sıklıkla kullanılan farklı alttaş malzemeleri üzerine örgü uyumlu büyütülebilecek ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlere ait örgü sabiti-bant aralığı grafiği [46]	20
Şekil 3.8. $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ üçlü yarıiletken bileşiğe ait örgü sabiti bant aralığı grafiği	21
Şekil 3.9. Desenlenmiş Si alttaşlar üzerine büyütmek için tasarlanmış şematik GaInP tek eklem güneş hücre yapısı	22
Şekil 4.1. Derişimi farklı (a) MA3, (b) MA5 ve (c) MA8 örneklerine ait Ag kaplanmış yüzey SEM görüntüleri.....	30
Şekil 4.2. Düzensiz Desenleme sonrası (a) Ag kaplı yüzey ve temizlik sonrası yüzeyin (b) SEM görüntüsü ve (c) EDS analizi	31
Şekil 4.3. 5 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA1, (b) MA2 ve (c) MA3 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA1, (e) MA2 ve (f) MA3.....	32
Şekil 4.4. 10 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA4, (b) MA5 ve (c) MA6 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA4, (e) MA5 ve (f) MA6.....	32
Şekil 4.5. 20 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA7, (b) MA8 ve (c) MA9 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA7, (e) MA8 ve (f) MA9.....	33
Şekil 4.6. Farklı derişim ve sürelerde aşındırılan örnek yüzeylerinin açılı SEM görüntüleri (a) MA1, (b) MA2, (c) MA3, (d) MA4, (e) MA5, (f) MA6, (g) MA7, (h) MA8 ve (i) MA9	33
Şekil 4.7. Düzensiz Desenleme işlemi sonrası yüzeyden alınan AFM (üstte) ve yan-kesit SEM (altta) görüntüleri	34
Şekil 4.8. Farklı derişimlerde $AgNO_3$ çözeltisi içerisinde düzensiz desenlenmiş alttaşlara ait ortalama aşındırma derinliği grafiği	35
Şekil 4.9. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM $AgNO_3$ derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örnekler için 390-404 nm'deki yansıma grafikleri.....	37

Şekil 4.10. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM AgNO₃ derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örneklere ait kısa dalgaboylu kızılötesi bölgesindeki yansıma grafikleri	37
Şekil 4.11. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM AgNO₃ derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örneklere ait orta ve uzun dalgaboylu kızılötesi bölgesindeki yansıma grafikleri	37
Şekil 4.12. Langmuir-Blodgett yöntemi için kurulan düzenek ile yüzeye kaplanmış 1 µm’lik nanoküreler	39
Şekil 4.13. Doctor Blade yöntemi için kurulan düzenek ile kaplanmış U179 numaralı örneğine ait SEM yüzey görüntüsü.....	40
Şekil 4.14. Alttan damlatma yöntemi için kurulan düzenek ile yüzeye kaplanmış 1 µm’lik nanoküreler	41
Şekil 4.15. Kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi için üretilmiş 3D kaplar ile kaplanan 500 nm’lik nanoküreler	42
Şekil 4.16. Sırasıyla U223, U226 ve U231 örneklerine ait yüzey SEM görüntüleri.....	43
Şekil 4.17. Farklı alttaş tutucu malzeme ve solüsyon oranlarında denemelerde elde edilmiş en yüksek yüzey kaplamasına sahip örneklere ait yüzey SEM görüntüleri.....	45
Şekil 4.18. Nanoküre kaplanmış 2 inç Si alttaşa ait optik mikroskop görüntüsü	46
Şekil 4.19. 510 nm çapındaki nanoküre boyutlarının O₂ plazma uygulama süresine göre çaplarındaki küçülme grafiğı	48
Şekil 4.20. a) 10 dk, b) 7,5 dk ve c) 5 dk O₂ plazma işlemi yüzey SEM görüntüleri, (d-e-f) ImageJ kullanılarak siyah-beyaz formatına dönüştürülmüş görüntüler, (g-h-i) ImageJ programı ile uygun nanokürelerin belirlenmesi.....	48
Şekil 4.21. MACE sonrası düzenli desenlenmiş örneğe ait (a) üstten, (b) 45° açı ile alınmış SEM ve (c) 5×5 µm²’den alınmış AFM görüntüleri	50
Şekil 4.22. Piranha çözeltisi ile temizleme sonrası düzenli desenlenmiş Si alttaş SEM yüzey görüntüsü.....	51
Şekil 4.23. GaAs ve Si alttaşlar üzerine büyütülmüş GaInP tek eklem güneş hücresine ait katmanlar	53
Şekil 4.24. GaInP için farklı katkı yoğunluğu seviyelerine göre mobilite ölçüm sonuçları [57, 58].	54

Şekil 4.25. HRXRD için 2 inç (solda) ve 3 inç (sağda) alttaşlarda ölçüm noktaları.....	55
Şekil 4.26. İlk grup örneklerle ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları	56
Şekil 4.27. Si üzerine büyütülmüş GaAs (004) sallantı eğrisi.....	57
Şekil 4.28. İkinci grup örneklerle ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları	57
Şekil 4.29. NB868 ve NB869 örneklerine ait Gauss Fit işlemi uygulanmış ve normalize edilmiş Gauss Fit verilerinin (004) sallantı eğrileri	58
Şekil 4.30. Üçüncü grup örneklerle ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları	59
Şekil 4.31. NB865 örneğine göre GaAs alttaş üzerine alttaş tabanlı büyütülen örneklerin (004) sallantı eğrisi karşılaştırılması	60
Şekil 4.32. Üçüncü gruba ait örneklerin (004) sallantı eğrileri	60
Şekil 4.33. i-GaAs üzerine büyütülen p ve n katkı kalibrasyon örneklerine ait (004) sallantı eğrileri	61
Şekil 4.34. (a) Si alttaşlar üzerine büyütülen örneklerin ve (b) GaAs alttaş üzerine büyütülen örneklerin HRXRD eğrileri.....	62
Şekil 4.35. 9 K sıcaklıktaki ilk grup örneklerin PL eğrileri	63
Şekil 4.36. (a) Şapka katmanı aşındırılmamış NB865, (b) NB868 ve (c) NB869 300 K'de PL ışıma eğrileri.....	64
Şekil 4.37. NB865, NB868 ve NB869 örneklerinin normalize PL şiddet eğrileri	65
Şekil 4.38. (a) Şapka katmanı aşındırılmış NB865, (b) NB868 ve (c) NB869 300 K'de örnek ince filmlere ait PL eğrileri	65
Şekil 4.39. Şapka katmanı aşındırılmış üçüncü grup örneklerin PL eğrileri.....	66
Şekil 4.40. Katkı kalibrasyon örneklerinin normalize PL şiddeti eğrileri	67
Şekil 4.41. NB919 örneğine ait 190 K sıcaklıktaki PL eğrisi.....	69
Şekil 4.42. NB914 örneğinin tepe ışıma enerjisi sıcaklık grafikleri.....	70
Şekil 4.43. NB850 örneğinde GaAs tampon katmanı yan-kesit SEM görüntüsü.....	71
Şekil 4.44. NB850 örneğinde GaInP aktif hücre yapısı yan-kesit SEM görüntüsü.....	71
Şekil 4.45. NB895 örneğinin yan-kesit SEM görüntüsü	72
Şekil 4.46. NB916 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü.....	72
Şekil 4.47. NB919 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü.....	73
Şekil 4.48. NB918 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü.....	74
Şekil 4.49. (a) düzensiz desenlenmiş NB925, (b) düzenli desenlenmiş NB869, (c) GaAs üzerine NB919 ve (d) 4° miscut NB926 örneklerinin yüzey SEM görüntüleri.....	74

Şekil 4.50. Si üzerine büyütülmüş ve fabrikasyonu tamamlanmış esnek ince film güneş hücrelerinin AM1.5G altında I-V ölçüm sonuçları	83
Şekil 4.51. GaAs üzerine büyütülmüş ve fabrikasyonu tamamlanmış esnek ince film güneş hücrelerinin AM1.5G altında I-V ölçüm sonuçları.....	85
Şekil 4.52. İkinci grup örneklerle ait karanlık akım voltaj eğrileri	92
Şekil 4.53. Esnek ince film güneş hücresine ait iç kuantum verimi eğrileri	93
Şekil 4.54. Esnek ince film güneş hücresine ait dış kuantum verimi eğrileri.....	93
Şekil 4.55. NB915 örneğine ait farklı noktalardan alınan normalize edilmiş dış kuantum verimi eğrileri.....	93
Şekil 4.56. GaInP kaplamasız (solda) ve 50 nm ZnS/100 nm MgF ₂ (sağda) dalgaboyuna bağlı simülasyon eğrileri	94
Şekil 4.57. NB941 örneğine ait kaplamasız ve yansıtmasız kaplama işlemi sonrası dalgaboyuna bağlı kuantum verimi eğrileri	95

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu Veeco GEN20MC MBE sistemi.....	20
Görsel 4.1. İşlemsiz ve çeşitli işlemler ile “hidrofobik” ve “hidrofilik” hale getirilmiş 10×10 mm ² kesilmiş Si alttaşlar	28
Görsel 4.2. Düzensiz desenleme işleminden sonra yüzeyi Ag kaplı 2 inç Si alttaş (solda) ve Ag kaplama temizlendikten sonra düzensiz desenlenmiş alttaş (sağda)	37
Görsel 4.3. Langmuir-Blodgett Yöntemi için kurulan düzenek.....	39
Görsel 4.4. Doctor Blade yöntemi için kurulan düzenek	40
Görsel 4.5. Alttan damlatma yöntemi için hazırlanmış düzenek	41
Görsel 4.6. Hidrofobik kap içerisinde kurutma yöntemi için 3D yazıcı ile üretilmiş kaplar	42
Görsel 4.7. Kuru hava yardımıyla desikatör içerisinde kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi deney düzeneği	43
Görsel 4.8. Aynı anda 4 farklı konsantrasyonda nanoküre solüsyonu dökmek için hazırlanan hassas lineer hareketli şırınga düzeneği	44
Görsel 4.9. Üç farklı hidrofobik alttaş tutucu malzeme ile hazırlanan şırınga düzeneği	45
Görsel 4.10. Hassas lineer hareketli şırınga düzeneği ile 2 inç Si alttaşa nanoküre kaplanması	45
Görsel 4.11. İşlemsiz (solda) ve tek katman nanoküre kaplanmış (sağda) 2 inç Si alttaşlara ait görsel	46
Görsel 4.12. Nanoküre kaplı 2 inç tam alttaşların O ₂ plazma işlemi öncesi (solda) ve sonrası (sağda) görselleri.....	49
Görsel 4.13. Altın kaplama sonrası 2 inç Si alttaş görüntüsü	49
Görsel 4.14. MACE sonrası düzenli desenlenmiş büyütme işlemi için hazır 2 inç Si alttaş görüntüsü.....	51
Görsel 4.15. i-GaAs alttaş üzerine ayrı ayrı iki farklı n v p tipi GaInP büyütülmüş ve Van der Pauw geometrisi kalibrasyon örnekleri	54
Görsel 4.16. NB914 numaralı örneğin 10 K sıcaklıktaki ışıması	68
Görsel 4.17. Altın-altın yapıştırma işlemi için kullanılan pres düzeneği.....	76

Görsel 4.18. Altın-altın yapıştırma işlemi ve ELO sonrasında elde edilen esnek ince film görüntüsü	77
Görsel 4.19. Kaldırılmış esnek ince film ve alttaşın hassas tartı sonuçları.....	77
Görsel 4.20. GaAs veya Si alttaşa büyütülmüş ELO yapıdaki filmlerin polyamide aktarıldıktan sonra kenarlarına ait kırık ve çatlaklarına ait mikroskop görüntüleri.....	78
Görsel 4.21. Kenar aşındırma işleminde fotorezist ile korunan $8 \times 8 \text{ mm}^2$ alan (solda) ve aşındırma sonrası korunmuş aygıt alanı (sağda)	79
Görsel 4.22. Fotolitografi ile metal deseni aktarılmış esnek ince film (solda) ve lift-off işlemi sonrası oluşturulmuş üst ızgara metal kontak katmanı.....	80
Görsel 4.23. Gölge maske ile esnek ince film üzerine ızgara metal kontak oluşturulması.....	80
Görsel 4.24. Fabrikasyon işlemi tamamlanmış esnek ince film güneş hücresi.....	81
Görsel 4.25. Şematik alttaş tabanlı aygıt yapıları (üstte), Alttaş tabanlı güneş hücresi aygıtlarına ait görseller (altta)	82
Görsel 4.26. Yansıtmasız kaplama yapılmamış esnek ince film güneş hücresi (üstte) ve 50 nm ZnS/100 nm MgF_2 yansıtmasız kaplama yapılmış esnek ince film güneş hücresi (altta).....	89
Görsel 4.27. Altın kaplama işlemi sonrası farkedilir olan poliyamid yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar.....	90
Görsel 4.28. Zımpara sonrası (solda) ve zımparalanmış poliyamid altın kaplama sonrası (sağda) yüzey mikroskop görüntüleri	90
Görsel 4.29. Lokal metal üst kontak aktarılmış esnek ince film güneş hücreleri	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

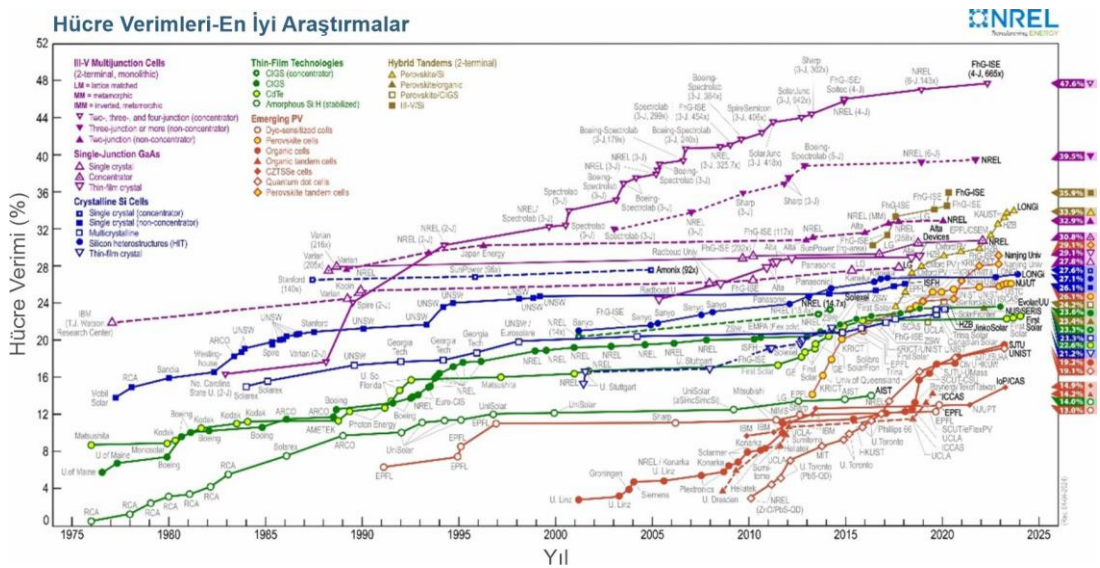
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic Force Microscopy)
Ag	: Gümüş
AgNO ₃	: Gümüş Nitrat tuzu
AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik bileşiği
AM1.5G	: 1.5 Küresel hava kütlesi (Air Mass 1.5 Global)
APD	: Anti faz bölgeleri (Anti Phase Domains)
As	: Arsenik
Au	: Altın
Be	: Berilyum
C ₆ H ₈ O ₇	: Sitrik asit
DLARC	: Çift katman yansıma önleyici kaplama (Double Layer Anti-Reflection Coating)
DLD	: Düzenli desenleme
DZD	: Düzensiz desenleme
EDS	: Enerji dağılım spektrumu (Energy Dispersive Spectrum)
ELO	: Epitaksiyel film kaldırma (Epitaksiyel Lift-off)
EQE	: Dış kuantum verimi (External Quantum Efficiency)
eV	: Elektron volt
FF	: Dolum faktörü (Fill Factor)
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
FWHM	: Tam tepe yarı genişliği (Full Width Half Maximum)
Ga	: Galyum
GaAs	: Galyum Arsenik bileşiği
GaInP	: Galyum İndiyum Fosfat bileşiği
GaSb	: Galyum Antimoni bileşiği
Ge	: Germanyum
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
H ₃ PO ₄	: Fosforik asit

HCl	: Hidroklorik asit
HEMT	: Yüksek elektron mobiliteli transistor (High-electron-mobility transistor)
HF	: Hidroflorik asit
HNO ₃	: Nitrik asit
HRXRD	: Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (High Resolution X-Ray Diffraction)
I	: Akım
I _L	: Işık altında oluşan foto akım
I _{MP}	: Maksimum güçteki akım
In	: İndiyum
InGaAs	: İndiyum Galyum Arsenik bileşiği
IQE	: İç kuantum verimi (Internal Quantum Efficiency)
I _{SC}	: Kısa devre akımı
J _{SC}	: Kısa devre akım yoğunluğu
k	: Boltzman sabiti
LASER	: Işığın uyarılmış radyasyon ile yükseltilmesi (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LED	: Işık yayan diyot (Light Emitting Diode)
MACE	: Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi (Metal Assisted Chemical Etching)
MBE	: Moleküler demet epitaksi (Molecular Beam Epitaxy)
MgF ₂	: Magnezyum Florür bileşiği
n	: İdealite faktörü
η	: Elektriksel dönüşüm verimi
NH ₄ OH	: Amonyum Hidroksit
NREL	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)
P	: Fosfor
P _{IN}	: Gelen ışık güç yoğunluğu
PL	: Fotoluminesans spektroskopisi (Photoluminescence spectroscopy)
PLA	: Polilaktik asit
P _{MAX}	: En yüksek elektrik gücü

Pt	: Platin
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition)
q	: Elektron yükü
R	: Yansıma (Reflection)
R _{SE}	: Seri direnç
R _{SH}	: Shunt direnci
Sb	: Antimon
SDS	: Sodyum Dodesil Sülfat tuzu
SE	: İkincil elektron (Secondary electron)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
Si	: Silisyum
V	: Voltaj
V _{MP}	: Maksimum güçteki voltaj
V _{OC}	: Açık devre voltajı
ZnS	: Çinko Sülfür bileşiği

1. GİRİŞ

Günümüz şartlarında teknolojinin gelişmesi ile çoğu öncelikli alanda hem enerji üretimi hem de tüketimi artmaktadır. Enerji üretiminde, verimin artırılması, maliyetin düşürülmesi ve fonksiyonelliğin geliştirilmesi önemlidir. Bu anlamda, fosil yakıtlara alternatif ve yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin kullanımı yıllar içerisinde artarak yaygınlaşmaktadır. Artışın sebebi sadece çevreci sebepler değil, güneş enerjisinin dönüştürülmesinde kullanılan teknolojinin de olgunlaşması ve ulaşılabilir hale gelmesidir. Böylece, düşük maliyetli, yüksek verimli ve işlevsel malzemeler ile enerji üretimi yapılabilmektedir. Olgunlaşmış Silisyum (Si) güneş hücreleri teknolojisi, günümüz şartlarında, ~1 \$/Watt ile elektrik enerjisi üretiminde maliyet açısından pazarda lider konumdadır [1, 2]. 1970'lere dayanan fotovoltaik uygulamalarında kullanılan amorf Si güneş hücreleri ile başlayan süreç, bugün, teknolojinin gelişmesi ile birlikte, tek kristal Si güneş hücrelerinden, %25'lerin üzerinde verim elde edilebilir hale gelmesi ile devam etmektedir [3]. Tıpkı Si güneş hücreleri gibi, üzerinde yapılan yoğun araştırmalar sonucunda, III-V grubu yarıiletkenler, perovskite ve organik malzemelerden üretilen güneş hücrelerinin verimlilik değerleri de gün geçtikçe artmaktadır. Yıllara göre elde edilen en yüksek dönüşüm verimlerinin farklı malzeme gruplarına göre çizelgesi Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory, NREL) tarafından sağlanmaktadır ve Şekil 1.1'de görülmektedir [4].



Şekil 1.1. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayınlanan yıllara göre farklı malzeme gruplarından elde edilen güneş hücresinin rekor verim değerleri [4]

Şekil 1.1'den farklı malzeme gruplarının dönüşüm verimlerinin sürekli artış içerisinde olduğu görülmektedir. Bu malzemeler arasında en yüksek verime III-V grubu yarıiletken güneş hücreleri sahiptir. Özellikle, III-V grubu yarıiletkenlerinden ikili GaAs bileşiği, yüksek elektron mobilitesi, doğrudan bant aralığı, ısı, nem ve radyasyon dayanımı gibi özellikleri ile güneş hücresi için en uygun adaylardan biridir. Tek eklem GaAs güneş hücrelerinin dönüşüm verimi Si güneş hücrelerinden daha fazladır. Ayrıca, özel teknikler kullanılarak iki veya daha fazla yarıiletken katmanın bir araya getirilmesiyle çoklu eklem güneş hücreleri de üretilebilmektedir. GaAs tabanlı çoklu eklem III-V grubu güneş hücreleri ile günümüzün en yüksek rekor dönüşüm verimi değerleri elde edilebilmektedir [3, 5, 6]. Yüksek verim elde edilmesine karşılık, üretimleri özel ekipmanlar, yüksek maliyet, karmaşık ve zorlu süreçler içeren III-V grubu güneş hücreleri, Si güneş hücreleri kadar yaygın kullanıma sahip değildirler. Ancak, uydu, uzay ve askeri alanlar gibi stratejik uygulamalarda bu hücreler kendilerine yer bulmaktadırlar.

GaAs tabanlı çoklu eklem ve esnek güneş hücreleri için alttaş ve/veya soğurucu katman olarak kullanılabilmesi de GaAs ikili yarıiletken bileşiğini ön plana çıkarmaktadır. Güneş hücresi gibi düşük üretim maliyetinin çok önemli olduğu bir uygulamada, günümüz Si tabanlı güneş hücreleri gibi GaAs tabanlı güneş hücrelerinin de yaygınlaşması için maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesi gerekmektedir. III-V grubu güneş hücrelerinin üretim maliyetinin %80-85'i örgü uyumlu pahalı GaAs alttaştan gelmektedir. Üretilmiş aktif güneş hücresi için çoğunlukla sadece bir altlık görevi gören GaAs alttaşın başka güneş hücrelerinin üretiminde tekrar tekrar kullanılabilmesi, üretim maliyetlerini oldukça aşağı çekebilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, büyütülmüş güneş hücre yapısı alttaştan ayrılıp başka tabanlara özel teknikler kullanılarak aktarılabilir. Aktarma işlemi sonrasında pahalı GaAs alttaş temizlenip tekrar kullanılabilir. Bununla birlikte, güneş hücreleri ile örgü uyumlu GaAs alttaşların geniş çapta üretiminde alttaş kaynaklı homojensizlik gibi sorunlar yaşanabilmektedir. Ayrıca, GaAs alttaşların tekrar kullanılması öncesinde fiziksel ve kimyasal temizliğe ihtiyaçları vardır. Bu durumda, GaAs yerine maliyetleri düşürmek için başka alttaşlar kullanılabilir. Örneğin, 4 inç çapa sahip GaAs ve Si alttaşlar arasındaki 10-15 katlık maliyet farkı, 6 inç gibi geniş ölçeklerde 100 katın üzerine çıkmaktadır.

İnce film büyütme teknikleri kullanılarak Si alttaş üzerine III-V grubu yarıiletken tabanlı LED [7], LASER [8], kızılötesi fotodetektör [9], transistor [10] gibi aygıtların

üretimi yapılabilmektedir. Bu sayede, yüksek verimli III-V grubu yarıiletken güneş hücreleri de Si alttaşı üzerinden üretilmektedir [11]. Ancak, Si alttaşlar üzerine III-V grubu yarıiletkenlerin büyütülmesinde bazı zorluklar bulunmaktadır. Si alttaşların a-polar, III-V grubu bileşiklerinin ise polar yapıları nedeniyle büyütülen katmanlarda anti faz bölgeleri (anti phase domains, APD) oluşmaktadır [12]. Öte yandan, alttaş/katman arasındaki örgü sabiti uyumsuzlukları ve termal genleşme katsayısı farkı, büyütülen ince filmin kristal kalitesine, dolayısıyla da aygıt performansına etki eden ana unsurlardır. Bahsedilen zorlukların üstesinden gelmek için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan bazıları, gözenekli Si [13, 14], süperörgü katmanlar [15, 16], grafen katmanı [17], oksit ve oksit hendekleri [18, 19], Ge/Si katmanları [20] ve çeşitli III-V grubu quantum nokta katmanı/katmanlarının [8], [21, 22, 23] kullanılmasıdır. Literatürde bahsedilen yaklaşımlarda uygulanmış yöntemler için büyütme cihazlarında çeşitli ek özel donanım ve işlemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Si ve III-V grubu entegrasyonunda her bir ek özel donanım ve işlem ekstra maliyet ve araştırmacılar tarafından erişilebilirliğin sınırlandırılması anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada, literatürdeki yaklaşımlardan farklı olarak, büyütme yapılacak Si alttaşın uygulanabilirliği kolay yöntemler ile desenlenmesi ve bu sayede epikristal katmanın kristal kalitesinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Buradaki amaç, 10-20 nm ölçeğindeki nanoyapıların alttaş yüzeyine aktarılması ve örgü uyumsuzluğundan gelecek olan stresin baskılanmasıdır. Si alttaş yüzeyinde nanoyapıların oluşturulma şekline göre düzenli ve düzensiz olmak üzere iki farklı yaklaşım denenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların öncelikle III-V grubu güneş hücreleri için geniş çapta üretim kolaylığı sağlaması ile üretim maliyetlerinin azaltılması, Si ve III-V grubu entegrasyonunun geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.1. Tez Organizasyonu

Tezin ikinci bölümünde, yarıiletken güneş hücreleri ile ilgili temel bilgilere, Si ve III-V grubu için alttaş tabanlı, esnek ve tandem yapılar ile ilgili bilgilere ve temel güneş hücresi parametrelerine yer verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümü, büyütme öncesinde, büyütme sırasında ve büyütme sonrasında yapılan işlemlerin anlatıldığı bölümdür. Büyütme öncesinde Si alttaşlara ait

desenleme işlemleri, büyütme ile ilgili parametreler ve büyütme sonrası karakterizasyon çalışmaları bölümün devamında yer almaktadır. Son olarak, büyütülmüş örneklerin aygıt haline getirilme süreçleri anlatılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde, sistematik olarak yapılan deneysel çalışmalara ait bulgular ve analiz sonuçları bulunmaktadır. Büyütme sonrası farklı parametrelerin karşılaştırılması ve en iyileştirme süreçleri bu bölümde yer almaktadır.

Tezin beşinci ve son bölümünde, elde edilen sonuçlar değerlendirilip gelecek çalışmalar için öneriler belirtilmiştir.



2. YARIİLETKEN GÜNEŞ HÜCRELERİ

Güneş hücresi veya güneş pili, güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren aygıtlara verilen isimlerdir. Güneş hücreleri genellikle altaş adı verilen yapıların üzerine çeşitli yöntemler ile oluşturulmaktadır. Altaş, büyütme veya biriktirme yöntemi ile oluşturulduğu aktif hücrenin fiziksel olarak üstünde bulunduğu taşıyıcıdır. Altaş, güneş hücresi yapılarında, taşıyıcılığın yanı sıra elektriksel kontak ve soğurucu katman olarak da görev yapabilmektedir. Günümüzde, çeşitli malzeme grupları ile güneş hücreleri üretilmektedir. Organik güneş hücreleri, perovskit güneş hücreleri ve yarıiletken güneş hücreleri, büyütme veya biriktirme yöntemi ile oluşturulabilecek güneş hücrelerine örnek olarak verilebilir.

Yarıiletken güneş hücreleri, bir p ve n tipi iki yarıiletkenin monolitik olarak birleştirilmesi ile oluşurlar. p-n eklemi veya diyot olarak adlandırılan bu yapılar, katkılı yarıiletkenin azınlık taşıyıcısı difüzyon uzunluğunu temel alarak çalışmaktadır. p-katkılanmış bir yarıiletkenin azınlık taşıyıcısı olan elektronlar, yüksek mobilité, uzun yaşam süresi ve düşük etkin kütle gibi özellikleri ile daha fazla difüzyon uzunluğuna sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde, yeniden birleşme öncesi veya kristal kusurlarda tuzaklanmadan önce güneş hücresinin aktif bölgesinden kontaklara ulaşabilirler. Güneş hücresi üzerine ışığın düşmesi ile p-n ekleminin birleşim bölgesinde bulunan yoksunluk bölgesine (depletion region) doğru hareket eden azınlık taşıyıcıları sayesinde dış devrede akım oluşmaktadır. Güneş hücresinde kullanılacak p-katkılı yarıiletkenin n-katkılı bölgeye göre daha kalın olması ışığın daha fazla soğurulabilmesini sağlamaktadır. Bu bölge, birbirine bağlı olan mobilité ve difüzyon uzunluğunun azalmaması için görece düşük seviyede katkılanmaktadır. n-katkılı bölge ise ışığın geldiği katman olduğu için ince yapılmakta ve ışık ile birlikte oluşan azınlık taşıyıcısı deşiklerin yeniden birleşme öncesi aktif bölgeye ulaşabilmesine olanak tanımaktadır.

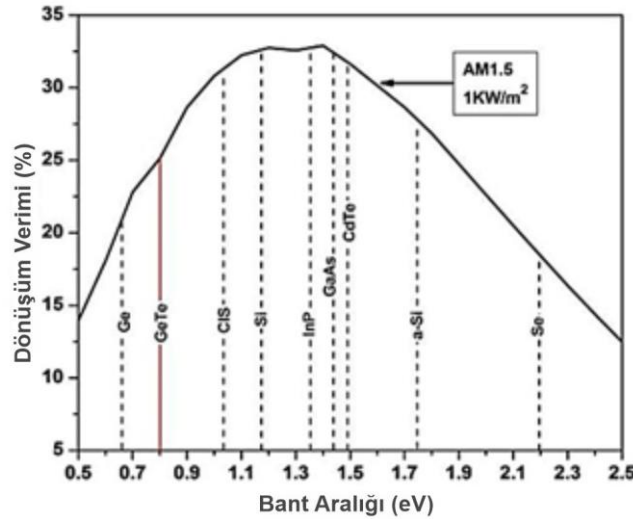
Yarıiletken güneş hücrelerinin en bilinen üyesi Si güneş hücreleridir. Tek kristal ve polikristal altaş tabanlı Si güneş hücreleri, fotovoltaiik ekosisteminin teknolojisi en olgun ve en yaygın üyesi konumundadır. Si yarıiletken güneş hücreleri, bir p-n veya p-i-n eklemi diyottan oluşmaktadır. Güneş hücresi olarak kullanılacak yarıiletken diyot üzerine ışık düşürüldüğü zaman fotovoltaiik etki, diyotun uçları arasında bir elektriksel potansiyel fark oluşturmaktadır. Eğer diyot uçlarına bir yük bağlanacak olursa dış devrede

fotovoltaik etki ile bir elektrik akımı meydana gelir. Bu sayede ışık enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur.

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilen Si güneş hücreleri, seri ve paralel bağlantı ile ihtiyaca yönelik akım ve voltaj değerlerinde paneller haline getirilebilirler. Gün içerisinde, güneşten alınan enerji, çeşitli yöntemler ile depolanarak veya doğrudan kullanım ile enerji ihtiyacının olduğu bölgelerde kullanılabilirler.

Öte yandan, gelişmekte olan III-V grubu yarıiletken güneş hücreleri, yüksek radyasyon dayanımı, yüksek dönüşüm verimi, hibrit ve çoklu eklem oluşturabilme potansiyeli, doğrudan bant aralığına sahip olması nedeniyle ince katmanlar ile daha fazla ışık soğurabilme kapasitesi ve esnek tabanlara aktarım imkanı gibi birçok avantaja sahiptirler. Bununla birlikte, III-V grubu yarıiletken güneş hücrelerinin üretimi, yüksek maliyet ve karışık ekipman gerektirmektedir. Bu nedenle, Si güneş hücreleri gibi yer yüzü uygulamaları için uygun değildirler.

Tek eklem yarıiletken güneş hücrelerinden elde edilebilecek teorik en yüksek dönüşüm verimi Shockley–Queisser limiti olarak bilinmektedir [24]. En uygun bant aralığı ve tek eklem güneş hücresinden elde edilebilecek en yüksek dönüşüm verimi grafiği Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Yarıiletken tek eklem güneş hücrelerinde farklı bant aralığı için Shockley-Queisser teorik limit dönüşüm verimi bant aralığı eğrisi [24]

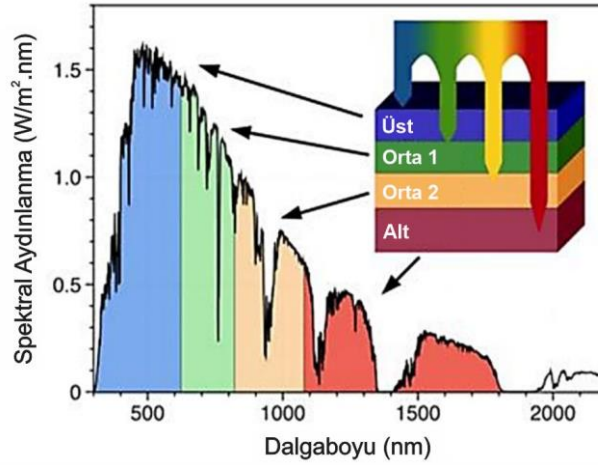
Şekil 2.1’de görülen bant aralığı – dönüşüm verimi grafiği incelendiğinde, GaAs ve InP en yüksek teorik dönüşüm verimini tek eklemde sağlayabilen ikili yarıiletken olduğu görülmektedir. Belirtilen yarıiletken ikili bileşikler haricinde, bant aralığı değeri bilinen başka yarıiletken alaşım gruplarının da Shockley–Queisser teorik dönüşüm verimi değeri bu grafik ile öngörülebilmektedir.

Genel olarak yarıiletken güneş hücreleri alttaş tabanlı ve esnek tabanlı olarak ikiye ayrılırlar. Sonraki kısımlarda, ayrı başlıklar altında bu iki farklı tip hücre yapısı ayrıntılandırılacaktır.

2.1. Alttaş Tabanlı Yarıiletken Güneş Hücreleri

Tıpkı Si güneş hücreleri gibi alttaş tabanlı GaAs hücreleri üretilmesi de mümkündür. Bu bağlamda, p-GaAs alttaş üzerine epitaksiyel büyütme teknikleri kullanılarak ve n-GaAs katmanları oluşturularak homoecklem bir GaAs güneş hücresi tasarlanabilir. Ayrıca, GaAs alttaş ile örgü uyumlu (GaAs tabanlı) III-V grubu güneş hücrelerinin de epitaksiyel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmaktadır. Bu süreçler, yüksek verimlilik ve performans sağlayan güneş hücreleri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Farklı bant aralıklarına sahip katmanların üst üste monolitik olarak büyütülmesi çoklu eklem güneş hücresi olarak adlandırılmaktadır. Düşük enerjili fotonlar için geçirgen (şeffaf) geniş bant aralıklı katmanlar, çoklu eklem güneş hücrelerinin üst katmanlarında konumlandırılmaktadır. Buna karşılık, dar bant aralığına sahip malzemeler ise yüksek enerjili fotonların soğurulmasını engellemek amacıyla çoklu eklem güneş hücrelerinin alt katmanlarında yer almaktadır (Şekil 2.2). Çoklu eklem güneş hücreleri, güneş spektrumunun geniş bir aralıktaki fotonlarını, farklı bant aralığına sahip yarıiletken katmanlarda soğurarak, tek eklem hücrelere kıyasla daha yüksek dönüşüm verimliliği sunmaktadır.



Şekil 2.2. Geniş dalgaboyu aralığındaki güneş spektrumunun çoklu eklem güneş hücresi tarafından soğurulması [25]

Şekil 2.2’de üst üste oluşturulmuş temsili bir çoklu eklem güneş hücre yapısı ve geniş dalgaboyu aralığına sahip güneş spektrumu görülmektedir. Çoklu eklem hücreler ile farklı dalgaboyuna sahip fotonlar güneş hücresinin farklı katmanlarında soğurulabilmektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kısa dalgaboylu (yüksek enerjili) fotonlar hücrenin üst katmanlarında, uzun dalgaboylu (düşük enerjili) fotonlar alt katmanlarında soğurulmaktadır.

2.2. Esnek Yarıiletken Güneş Hücreleri

GaAs tabanlı güneş hücreleri, en yaygın kullanılan epitaksiyel film kaldırma (epitaxial lift-off, ELO) gibi özel teknikler kullanılarak, esnek ve hafif tabanlara aktarılabilmektedir. Esnek ve alttaştan çok daha hafif güneş hücreleri, çoğunlukla maliyet etkinliğinin ikinci planda tutulduğu yüksek Watt/Ağırlık gerektiren uydu, uzay ve askeri alanlarda kendilerine yer bulabilmektedirler [26, 27, 28]. Alttaş tabanlı güneş hücreleri gibi esnek güneş hücreleri de çoklu eklem olarak üretilebilmektedir. Esnek güneş hücreleri, esnek tabana aktarıldıktan sonra ışığın güneş hücresine geleceği katmanın konumu değişeceği için genelde ters olarak üretilmektedir. Bu tip güneş hücrelerinde, yüzeye gelen ışık hücrede tamamen soğurulamazsa arka metal kontak katmanı bir ayna görevi görerek ışığı geri yansıtacak ve ışığın tekrar soğurulmasını sağlayacaktır. Böylece, katman kalınlıklarının daha ince yapılmasına olanak tanıyarak üretimi daha hızlı, daha az maliyetli ve kusur toleransı yüksek yarıiletken ince film güneş hücreleri

üretilebilmektedir. Ayrıca, esnek güneş hücreleri, alttaş tabanlı hücrelere göre onlarca kat daha hafiftir ve esnekliğin verdiği imkanlar ile aerodinamiği bozmadan çeşitli uygulamalarda kullanılması mümkündür. Örneğin, hem düşük ağırlık hem de düşük hacme sığdırılabilmesi ile uzay uygulamalarında esnek güneş hücreleri maliyet etkin rol oynamaktadır.

GaAs üzerine tek eklem GaAs, ELO yapısında büyütülebilir ve ELO sonrası büyütülmüş filmin kaldırılmasıyla geride kalan GaAs alttaş temizlik işlemlerinin ardından tekrar kullanılabilir. Tek eklemli yapının yanı sıra GaAs alttaş, ELO veya alttaş tabanlı çoklu eklemli InGaAs/GaAs/GaInP yapılarında, örgü uyumlu bir alttaş olarak kullanılabilir. GaInP üçlü yarıiletken bileşiğinin bant aralığı, GaP ve InP bileşiklerinin bant aralığı arasında, Ga ve In elementlerinin elemental konsantrasyonları değiştirilerek ayarlanabilmektedir. GaInP, yüksek elektron hızı ve mobilitelerinden dolayı HEMT yapılarında kullanılmaktadır [29]. Kırmızı, turuncu renklere LED yapımında ve uzay uygulamalarında güneş hücresi olarak diğer kullanım alanları da bulunmaktadır [30, 31, 32, 33]. GaInP, Ga ve In elemental konsantrasyonlarının yarı yarıya oranda ayarlanması ile GaAs ile örgü uyumlu olarak büyütülebilmektedir. 1,89 eV bant aralığına sahip GaInP, güneş spektrumunun GaAs güneş hücresi tarafından nispeten daha az foto akım üreten yüksek enerjili bölgesini soğurmaktadır. Bu nedenle, çoklu eklem güneş hücrelerinin en üst katmanında yer alırlar.

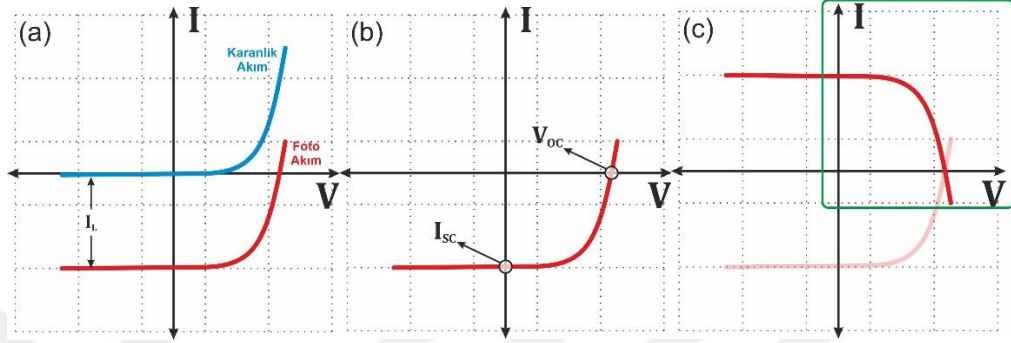
2.3. Güneş Hücresi ile İlgili Önemli Parametreler

Standart bir p-n ekleminde, soğurulan fotonların oluşturduğu foto akım ters yönde ortaya çıkmaktadır. Denklem 2.1’de bir p-n ekleminde ideal diyot denklemi ve foto akım ifadesi görülmektedir.

$$I = I_0 \left[e^{qV/nkT} - 1 \right] - I_L \quad (2.1)$$

Burada, I toplam akımı, q elektron yükünü, V uygulanan voltajı, n idealite faktörünü, k Boltzman sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ve I_L ise ışık altında oluşan foto akımı temsil etmektedir.

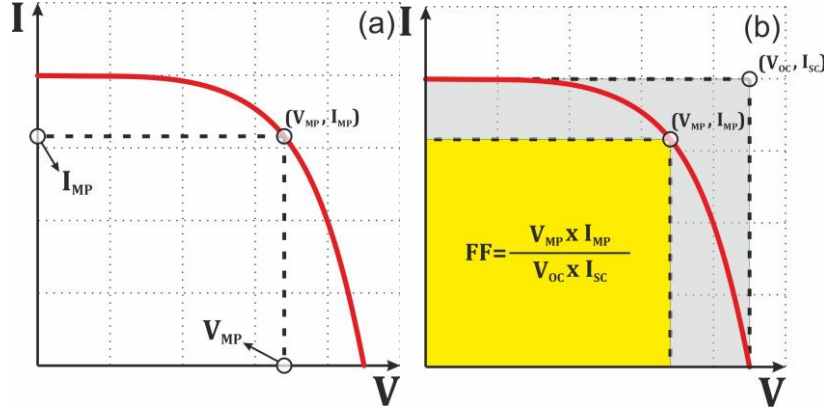
Fotovoltaik bir aygıtın akım-voltaj karakteristiği incelendiğinde, ışık altında aygıtın ters yönde bir foto akım üretmesi nedeniyle, karakteristik eğri, karanlık koşullardaki eğriye göre ters yönde bir kayma göstermektedir (Şekil 2.3a).



Şekil 2.3. Güneş hücresi için (a) ışık altında I-V eğrisi, (b) I-V eğrisi I_{sc} ve V_{oc} değerleri ve (c) I-V eğrisinin gösterim kolaylığı için kartezyen I. çeyrekte gösterimi

Akım voltaj grafiğinin (I-V) akım eksenini kestiği değer, kısa devre akımı (I_{sc}), voltaj eksenini kestiği değer ise açık devre voltajı (V_{oc}) olarak adlandırılmaktadır. I_{sc} değeri, ışık altında üretilen maksimum foto akımı ve V_{oc} değeri de ışık altında üretilen ters yöndeki foto akımın dengelendiği noktadaki voltajı temsil etmektedir (Şekil 2.3b). I_{sc} değeri güneş hücresinin alanı ile orantılı olduğu için genellikle alan bağımsız kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) da yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.3'teki foto akım gösteriminde, kartezyen IV. çeyrekteki eğri, güneş hücresinin parametrelerinin incelenmesi için yeterlidir. Bu sebeple, gösterim kolaylığı sağlaması açısından akım voltaj eğrilerinin voltaj eksenine göre simetrisi alınarak kartezyen I. çeyrekteki gösterimi daha yaygındır (Şekil 2.3c).

Güneş hücresinin ürettiği maksimum güçteki akım değeri I_{MP} , voltaj değeri ise V_{MP} olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.4a). Güneş hücresinin üretebildiği maksimum elektriksel gücün, I_{sc} ve V_{oc} değerleri ile üretilebilecek gücüne oranı ise doluluk oranı (fill factor, FF) olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.4b). Güneş hücrelerinde FF elektriksel performansın bir göstergesi olarak değerlendirilir. İdeal değeri 1 olan FF, idealden sapmanın bir ölçütüdür.



Şekil 2.4. Güneş hücresi için I-V eğrisi (a) maksimum elektriksel güç değerindeki I_{MP} ve V_{MP} değerleri ve (b) doluluk oranının gösterimi

Güneş hücrelerindeki elektriksel performansın en önemli unsuru dönüşüm verimidir (η). η elde edilen elektrik enerjisinin ışık enerjisine oranı olarak ifade edilir.

Güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) karakteristiğindeki V_{OC} ve I_{SC} noktalarındaki eğim değerlerinden, sırasıyla seri direnç (R_{SE}) ve shunt direnç (R_{SH}) değerleri elde edilmektedir. R_{SE} , güneş hücrelerinin elektrotlarının direnci ve elektrotlar ile yarıiletken arayüzeyinde oluşan direnci, shunt direnç (R_{SH}) ise güneş hücresinin çoğunlukla içsel dinamiklerini yansıtmaktadır.

R_{SE} değeri, güneş hücresi verimi üzerinde oldukça etkilidir. R_{SE} 'nin düşük olması, kontaklar üzerinde oluşacak ısı enerjisinin dolayısıyla, güç kayıplarının azalması için gereklidir. R_{SE} 'nin yüksek olması FF değerinin düşmesine sebep olarak güneş hücresinin dönüşüm verimini düşürmektedir.

R_{SE} gibi R_{SH} de FF değeri üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Kristal kalitesinin yüksek olması, etkili yüzey pasivasyonu ve optimize edilmiş fabrikasyon süreçleri, alternatif foto akım kanallarını azaltarak R_{SH} değerini artırmaya yönelik önemli adımlardır.

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tezin temelini oluşturan deneysel çalışmaların metodolojisi detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Si alttaşların desenlenmesiyle başlayan ve büyütme, fabrikasyon ve karakterizasyon adımlarıyla devam eden süreç, alt başlıklar altında açıklanmaktadır.

3.1. Büyütme Öncesi Si Alttaş Desenleme Çalışmaları

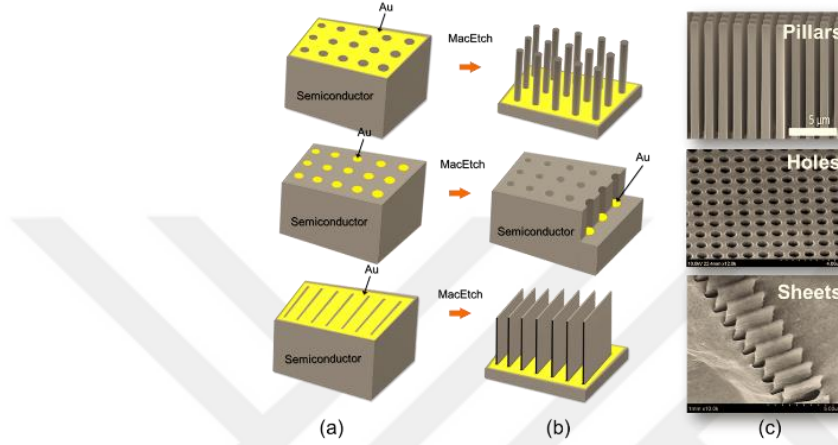
Birinci bölümde, Si alttaşların III-V grubu yarıiletkenlere entegre edilmesi, hem maliyet hem de fonksiyonellik açısından değerlendirilerek araştırma alanındaki önemi vurgulanmıştır. Olgunlaşmış Si teknolojisi ve maliyet etkinliği, bu entegrasyon çalışmalarını kritik bir araştırma alanı haline getirmiştir.

III-V grubu yarıiletkenleri ile Si alttaşların entegrasyonu, polar-apolar yapı ve örgü parametresi uyumsuzluğu gibi temel problemler barındırmaktadır. Bu temel problemlere çözüm olarak çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Si üzerine örgü uyumsuz III-V yarıiletkenlerini yüksek kristal kalitesi ile büyütme için kuantum nokta ve/veya katmanları, dislokasyon filtresi süperörgü yapıları [34, 35, 36, 37], grafen tampon yapıları [38] gibi yaklaşımlar denenmiştir. Bu sayede, III-V grubu, çeşitli LED [7], LASER [8], dedektör [9] ve güneş hücresi [11] gibi optoelektronik aygıtlar Si alttaş üzerinden geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşımlarda, kullanılan büyütme cihazlarına ek modüllerin kullanılması ve özel teknikler uygulanması gerekmektedir.

Si ve III-V grubu entegrasyonunda bahsedilen çalışmalara alternatif olarak bu tez çalışması kapsamında Si alttaş yüzeyinde nanoyapılar oluşturulmuştur. Si yüzeyinde oluşturulmuş nanoyapılar ile III-V grubu yarıiletkenler ve Si arasındaki örgü uyumsuzluğu nedeniyle oluşan stres baskılanmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, Si alttaşlar üzerindeki nanoyapıların oluşturulması, *desenleme işlemi* olarak adlandırılan bir süreçle gerçekleştirilmiştir. Si alttaş yüzeylerinin desenlenmesi için yüksek güçlü lazerler, elektron demeti litografisi, mekanik yöntemler veya çeşitli aşındırıcı kimyasallar gibi farklı teknikler bulunmaktadır. Bu çalışmada ise, metal destekli kimyasal aşındırma (metal assisted chemical etching, MACE) yöntemi tercih edilerek Si yüzeyinde nanoyapıların üretimi hedeflenmiştir. MACE, bir dizi çeşitli indirgeme ve yükseltgeme reaksiyonları ile gerçekleşen ıslak aşındırma işlemidir. MACE işlemi standart aşındırma işleminin aksine yüzeye kaplanan bir soy metali katalizör olarak

kullanarak yarıiletken yüzeylerini metal kaplamanın altından aşındırma işlemi için kullanılmaktadır. Bu özelliği sayesinde, özellikle Si yüzeyinde nanoteller, nano delik ve sütun yapıları oluşturulabilmektedir (Şekil 3.1). MACE yöntemi, Si yüzeyini porlu yapılar haline getirebilmektedir ve güneş hücresi uygulamalarındaki ışık tuzaklamada da kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. MACE yöntemi ile farklı şekillerdeki nanoyapıların oluşturulması [39]

MACE işleminin uygulanabilmesi için önce Si yüzeyine bir soy metal kaplanmalıdır. Metal kaplanmış Si alttaşı, HF ve H₂O₂'den oluşan bir çözelti içerisinde aşındırılmaktadır. Si yüzeyin aşındırma derinliği, kullanılan kimyasalların derişimleri ve sıcaklık gibi parametrelerine bağlı olarak değışkenlik göstermektedir.

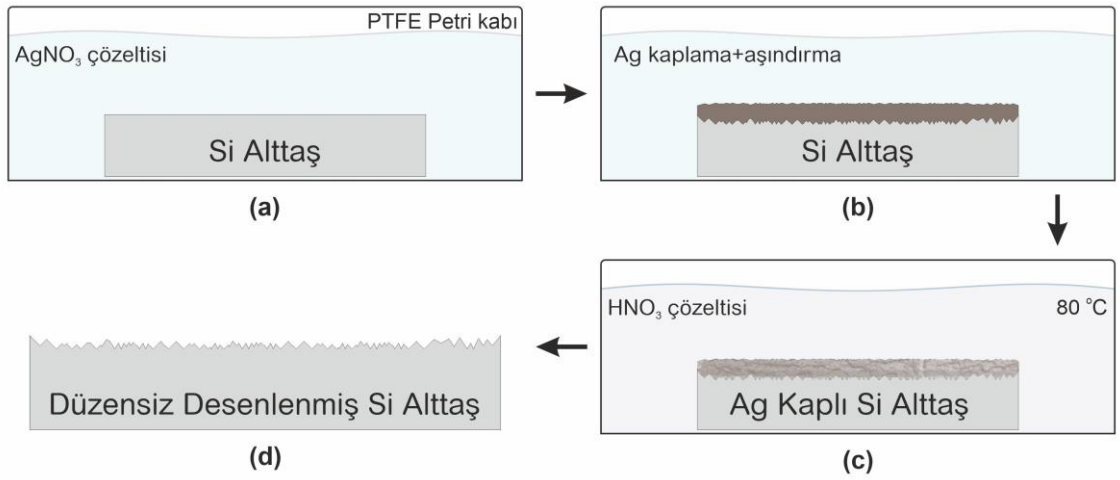
Desenleme işlemi, MACE kullanılarak Si yüzeyinde uygulama yöntemine bağlı olarak *düzensiz desenleme (DZD)* ve *düzenli desenleme (DLD)* olarak iki gruba ayrılmaktadır. Desenleme etkisinin tespiti için her iki yöntem de tez kapsamında kullanılmıştır.

3.1.1. Düzensiz desenleme

Si alttaşı üzerindeki düzensiz desenleme işlemi sonucu elde edilen yapılar, hem yüzeyde hem de derinlikte rastgele bir dağılım göstermektedir. Bu rastgelelik, yüzey morfolojisinde homojen olmayan aşınma sonucunda çukurların oluşmasına yol açmaktadır. Bu çalışmada, Si ve III-V grubu yarıiletkenleri epitaksiyel olarak

birleştirileceği için, yüzeyde yaklaşık 10-20 nm derinliğinde sık ve düzensiz nanoyapıların elde edilmesi hedeflenmiştir.

MACE yöntemi ile Si nanotel yapıları oluşturmak için AgNO_3 sıklıkla kullanılan bir tuzdur. Bu çalışmada, AgNO_3 yüzeyde nanotel benzeri yapılar oluşturmak ve düzensiz desenleme için kullanılmıştır. Bu işlem için, AgNO_3 tuzu Si alttaş yüzeyine Ag kaplamak için kullanılmıştır. Şekil 3.2’de düzensiz desenleme işleminin şematik gösterimi sunulmaktadır.



Şekil 3.2. Düzensiz Desenleme işlemi, (a) AgNO_3 çözeltisi içerisinde yerleştirilen oksiti temizlenmiş Si alttaş, (b) yüzeye Ag kaplanması ve aşındırma işlemi, (c) aşındırma sonrası Ag kaplı Si alttaşın HNO_3 çözeltisi ile temizlenmesi ve (d) oksiti temizlenmiş büyütme işlemi için hazır düzensiz desenlenmiş alttaş

Ticari olarak temin edilen AgNO_3 bileşiği su içerisinde çözünabilmektedir. MACE tekniği ile Si nanoyapılar oluşturmak için kullanılan AgNO_3 çözeltisi hem Si yüzeyine Ag kaplamakta hem de aşındırma işlemini bir arada yapmaktadır. Böylece, nanoyapılar Si üzerinde oluşturulabilmektedir [40, 41, 42]. Desenleme işleminde nanometre ölçülerinde yüzey desenlenmesi hedeflendiği için aşındırma süresi hem kısa tutulmuş hem de çözelti içerisine H_2O_2 eklenmemiştir. Düzensiz desenleme işlemine başlamadan önce Si alttaşlar aseton ve iso-propil alkol içerisinde ultrasonik banyoda mekanik olarak temizlenmiştir. Daha sonra yıkanıp kurutulduktan sonra Piranha çözeltisi (3:1 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$) ile temizlenmiştir. Yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşan Si alttaş, HF içerisinde bekletilerek oksit tabakası temizlenmiştir. AgNO_3 çözeltisi içerisinde yerleştirilen Si alttaş üzerine Ag kaplanmış ve MACE ile yüzeyde desenleme işlemi de

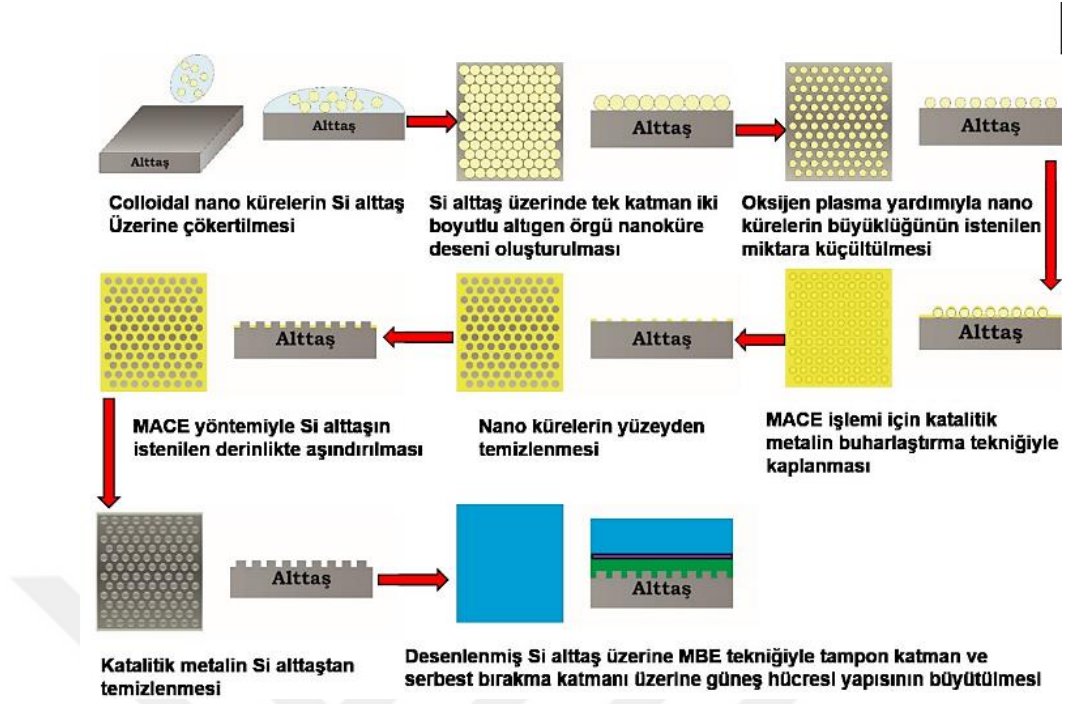
bu sırada gerçekleşmiştir. Desenleme işlemi sonrasında Si yüzeyindeki Ag kaplama sıcak HNO_3 ile temizlenmiştir. Si yüzeyinde oluşan oksit tabakası tekrar HF ile temizlendikten sonra alttaşın desenleme işlemi tamamlanmıştır.

3.1.2. Düzenli desenleme

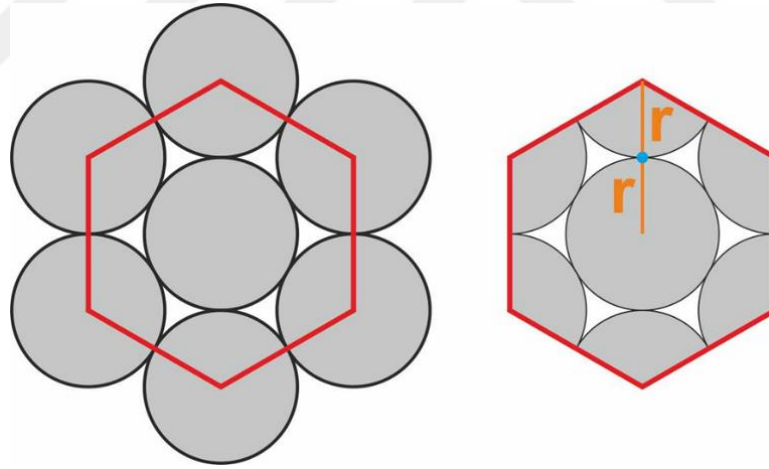
Nano ölçekte düzenli ve düzgün yapılar elde etmek için elektron demet litografisi yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, büyütme işlemi yapılacak, özellikle büyük yüzey alanlarına ($\sim 20 \text{ cm}^2$) sahip alttaşlar üzerinde bu tekniğin uygulanması, uzun uygulama süresi ve maliyetli olması nedeniyle pratik değildir. Bu çalışmada Si alttaşlar üzerinde düzenli nanoyapılar oluşturmak amacıyla geniş yüzeylerde uygulanabilirliği daha kolay nanoküre litografisi kullanılmıştır. Si yüzeyine düzenli olarak dizilmiş tek katmanlı nanoküreler ile birleştirilen MACE yöntemi sayesinde, istenen düzenli nanoyapılar oluşturmak mümkündür.

Bu süreçte, ticari olarak temin edilen, 510-1000 nm arasında farklı çaplarda ve de-iyonize su içerisinde %2,5 (mg/ml) oranında olan polistiren nanoküreler kullanılmıştır. Düzenli nanoyapıların oluşturulması, düzensiz desenlemeye kıyasla ek adımlar gerektiren nanoküre litografisi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, hidrofilik hale getirilen Si alttaşın yüzeyine tek katmanlı nanoküreler kaplanmış ve ardından nanoküre küçültme, metal kaplama ve MACE işlemleri uygulanarak istenen nanoyapılar elde edilmiştir. Nanoküre litografisi süreci, Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmektedir.

Nanoküre litografisi sürecinde, nanoküreler alttaş altıgen bir örgü şeklinde kaplayarak tek katman oluştururlar. İdeal bir altıgen dizilimde, nanoküreler arasındaki temas noktası bir noktadan olduğundan, yüzey kaplaması Şekil 3.4'te görüldüğü gibi oldukça düzenli bir yapı sergiler.



Şekil 3.3. Nanoküre litografisi ile Düzenli Desenleme işlemine ait alt basamakların şematik gösterimi



Şekil 3.4. Yüzeyde tek katman hekzagonal dizilmiş nanokürelerin şematik gösterimi

$$YÜZEY KAPLAMASI_{MAX} (\%) = \frac{1 + 6 * \frac{1}{3} * NANOKÜRE ALANI}{ALTİGEN ALANI} = \frac{3(\pi * r^2)}{3(2 * r)^2 \sqrt{3}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx \%90,7 \quad (3.1)$$

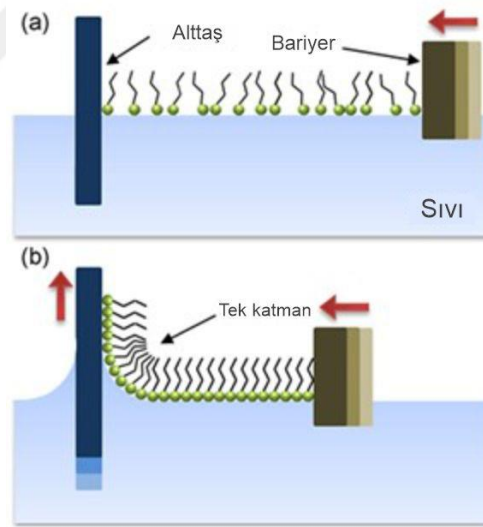
Denklem 3.1 ile ifade edilen teorik hesaplamalara göre, 2 boyutlu bir altıgen örgüde en yüksek yüzey kaplaması %90,7 olarak elde edilmektedir. Bu değer, ideal koşullarda altıgen bir dizilimde küresel parçacıkların yerleşimiyle elde edilebilecek maksimum yüzey kaplamasını temsil eder.

Nanoküre litografisi, farklı yöntem ve yaklaşımlar ile güncelliğini koruyan bir çalışma başlığıdır. Farklı markaların ürettiği, farklı çapta ve konsantrasyondaki nanoküre solüsyonları için uygulanabilecek tek bir yöntem bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında nanoküre kaplama için denenmiş başlıca yöntemler şunlardır: Langmuir-Blodgett yöntemi, Doctor Blade yöntemi ve kendiliğinden buharlaştırma yöntemidir.

Düzenli desenleme işlemlerinde ortalama çapı 500 nanometre olan polistiren nanoküreler kullanılmıştır. Nanokürelerin su yüzeyinde tek katman ve düzenli bir dağılım oluşturmak amacıyla, 1:3 oranında hazırlanan nanoküre-etanol çözeltisi kullanılmıştır.

a) Langmuir-Blodgett Yöntemi

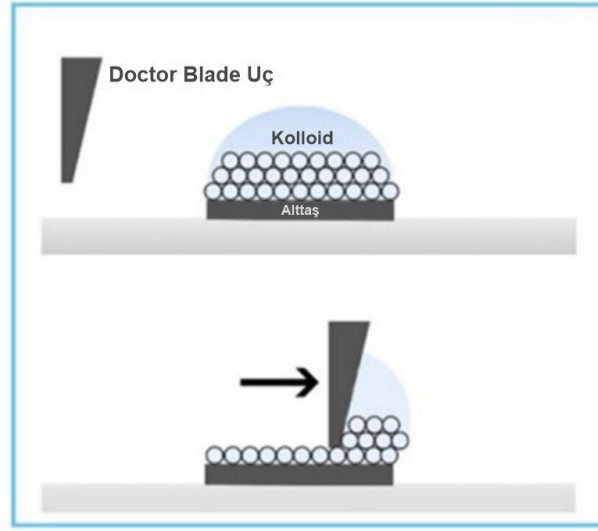
Bu yöntemde, havuz içerisinde bulunan su-hava arafazına dökülen nanoparçacıklar, bir bariyer yardımıyla hidrofilik alttaşların üzerine ittirilir ve aynı zamanda alttaş yavaşça dik yerleştirildiği havuzdan yukarı doğru çekilir. Bu sayede, tek katman dizilen nanoparçacıklar hidrofilik alttaş yüzeyine yapışırlar (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Langmuir-Blodgett yöntemi ile nanokürelerin yüzeye kaplanması şematik gösterimi: sıvı-gaz arafazında (a) rastgele dağılmış nanoparçacıklar, (b) bariyerin sıkıştırması ile tek katman dizilmiş nanoparçacıkların alttaş yüzeyine kaplanması [43]

b) Doctor Blade Yöntemi

Bu yöntemde, nanoküre çözeltisi ile kaplanan alttaşın üzerinden, bıçağa benzer bir uç yardımıyla fazla çözelti sıyrılarak tek katman bir nanoküre tabakası elde edilir. Şekil 3.6’da Doctor Blade yönteminin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.6. Doctor Blade yönteminin şematik gösterimi: Çoklu katman halinde bulunan nanoparçacıkların ince bir uç ile yüzeyden süpürülmesi [44]

c) Kendiliğinden buharlaştırma yöntemi

Bu yöntemde, nanoküre solüsyonu alttaş yüzeyine yavaşça dökülmektedir. Alttaşın içinde bulunduğu kaptaki solventin ya kendiliğinden buharlaşması beklenir ya da bir kanal aracılığıyla solventin alttaştan uzaklaşması sağlanır. Gao ve ark. [45] tarafından, 0,5 ml/saat hızında enjekte edilen nanoküre solüsyonu ile oldukça büyük alanlara homojen tek katman nanoküre kaplama işlemi yapılmıştır. Suyu yatırılan alttaşların üzerine nanoküre solüsyonu şırınga ucundan su yüzeyine enjekte edilerek nanoküreler Marangoni etkisiyle bütün su yüzeyine yüzey gerilimi farkından dolayı yayılmaktadır. Yüzeye yayılan nanokürelerin bulunduğu su, ya boşaltılarak ya da alttaş yavaşça yukarı yükseltilerek nanokürelerin alttaş yüzeyine yapışması ve capillary kuvveti ile bir araya gelmesiyle tek katman düzenli nanoküre dizilimi sağlanır. Düzenli desenleme işlemine başlamadan önce Si alttaşlar benzer temizleme aşamalarından geçmiştir. Sonrasında, aseton ve iso-propil alkol içerisinde ultrasonik banyoda mekanik olarak temizlenmiştir. Ardından, yıkanıp kurutulduktan sonra Piranha çözeltisi (3:1 $H_2SO_4:H_2O_2$) ile temizlenmiştir. Bu adımda, temizliğin yanı sıra Piranha çözeltisi yüzeyi hidrofilik hale getirmektedir. Nanoküre solüsyonunun hazırlanması ve nanoküre kaplama işlemi çeşitli yöntemler ile yapılmıştır. Nanoküre kaplama sonrası nanokürelerin boyutları O_2 plazma işlemi ile küçültülmüş ve çekirdeklenme görevi görece Au yüzeye kaplanmıştır.

Takiben, MACE işlemi ile desenleme yapılmış ve Aqua Regia çözeltisi (3:1 HNO₃:HCl) ile Au ve nanokürelerin yüzeyden temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada, HF ile Si alttaşı üzerindeki doğal oksit tabakası temizlenmiştir.

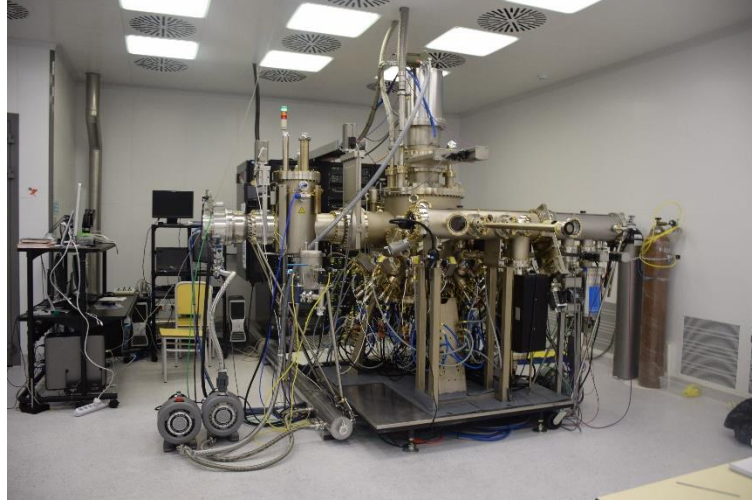
Düzenli ve düzensiz desenleme işlemlerinden sonra Si alttaşlar büyütme işlemi için hazır hale gelmektedirler.

3.2. Büyütme Çalışmaları

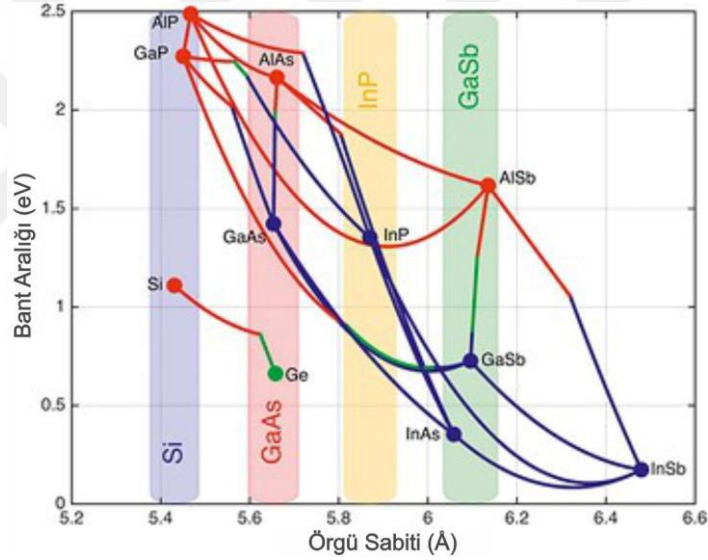
İnce film III-V grubu yarıiletken aygıtların üretilmesinde epitaksiyel yöntemler oldukça popülerdir. Bu çalışmada, yüzeylerinde nanoyapılar oluşturulmuş Si alttaşların üzerine III-V grubu yarıiletken yapılar büyütülmüştür. Nanoyapıların örgü uyumsuzluğu, termal genleşme katsayı farkı, apolar-polar etkileşimlerinin baskılaması için yapıldığı düşünüldüğünde epitaksiyel ince film büyütme teknikleri, Si ve III-V grubu hibrit yapıların kaliteli olarak oluşturulabilmesi için uygun tekniklerdir.

3.2.1. Moleküler Demet Epitaksi Sistemi

Moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) sistemi ultra yüksek vakum şartlarında, atomik katman hassasiyetinde, homojen katkılama, tekrarlanabilirlik ile yüksek kristal kalitesine sahip yarıiletken ince filmlerin büyütülebildiği bir sistemdir (Görsel 3.1). Yüksek saflıkta kaynak malzemelerinin kullanıldığı MBE sisteminde genellikle, II-VI ve III-V grupları gibi yarıiletken bileşikler, büyütülecek filme altlık görevi gören alttaşı malzemesinin üzerine büyütülür. Kullanılan alttaşlar ile büyütülecek filmin örgü uyumlu olması, büyütülen filmin stressiz büyümesi ve yüksek kristal kalitesi elde edilmesi için büyük önem teşkil etmektedir. Şekil 3.7’de çeşitli yarıiletken örgü sabitleri ve örgü uyumlu ($\pm 5\%$ strain) büyütülebileceği alttaşı grupları görülmektedir.



Görsel 3.1. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu Veeco GEN20MC MBE sistemi

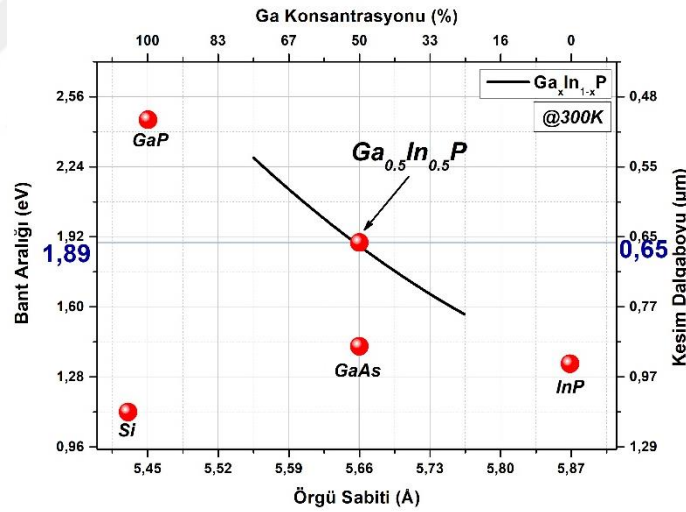


Şekil 3.7. Sıklıkla kullanılan farklı alttaş malzemeleri üzerine örgü uyumlu büyütülebilecek ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlere ait örgü sabiti-bant aralığı grafiği [46]

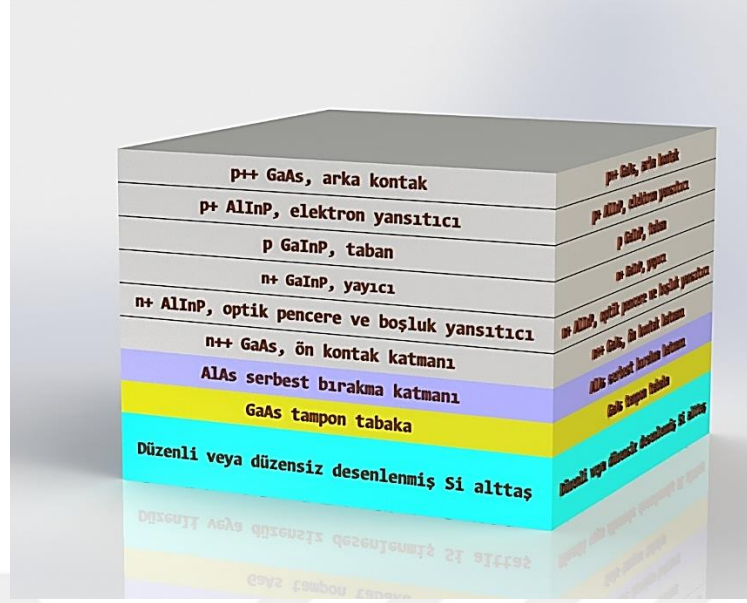
Şekilde ikili bileşiklerin arasındaki çizgiler bu iki bileşik arasındaki oluşturulabilecek üçlü yarıiletken alaşımlarını temsil etmektedir. Alaşım kompozisyonuna göre örgü sabiti ve yasak enerji aralığı değişimi de şekilden görülebilmektedir. Örneğin, GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kuantum kuyulu yapılar için GaAs, InAs/GaSb süperörgü kızılötesi fotodetektör yapılar için GaSb, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ külçe fotodetektör yapıları için InP veya $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ / $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs çoklu eklem güneş pili yapıları için GaAs alttaşlar örgü uyumlu olarak büyütülebilmektedir. Kullanılacak alttaş malzemesinin örgü uyumsuz olduğu durumlarda, çeşitli dislokasyonlar, anti faz alanları,

nokta kusurlar oluşmakta ve bu kusurlar ince filmin kristal kalitesini düşürmektedir. Aygıt yapıları için performans kayıplarına neden olan bu kusur mekanizmalarının, çeşitli yöntemler ile azaltılması sağlanabilmektedir. Örgü uyumsuz alttaş ile büyütülecek filmin arasına, IMF kuantum nokta yapıları [47, 48], dislokasyon filtresi olarak görev yapacak süperörgü yapıları [49] ve kalın büyütülebilecek bir tampon katman [37] gibi yaklaşımlar literatürde raporlanmıştır.

Bu çalışmada, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu Veeco GEN20MC marka/model MBE sistemi kullanılmıştır (Görsel 3.1). Sistemde yüklü III grubu Al, In ve Ga, V grubu As, Sb ve P, katkılar Si ve Be kaynaklar 7N5 saflığındadır. Büyütme haznesinin taban vakum değeri ise 3×10^{-11} Torr'dur. GaAs ile örgü uyumlu $Ga_xIn_{1-x}P$ tek eklem güneş hücresi örgü uyumsuz Si alttaşlar üzerinden desenleme işlemleri sonucunda MBE yöntemi ile büyütülmüştür (Şekil 3.8). Ayrıca, büyütmek için tasarlanmış GaInP tek eklem güneş hücresi yapısının şematik görünümü Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.8. $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ üçlü yarıiletken bileşiğe ait örgü sabiti bant aralığı grafiği



Şekil 3.9. Desenlenmiş Si alttaşlar üzerine büyütmek için tasarlanmış şematik GaInP tek eklem güneş hücre yapısı

Referans olması için Şekil 3.9’de gösterilen yapı GaAs alttaşlar üzerine de büyütülmüştür. Büyütme işlemi çeşitli basamaklardan oluşur. Öncelikle, büyütme yapılacak desenlenmiş Si alttaşlar yükleme haznesine yerleştirilir. Kademe kademe 150 °C’ye ısıtılır ve 10^{-8} Torr basınca kadar yükleme haznesi vakumlanır. Sonrasında, alttaş orta hazneye aktarılır. Alttaş yüzeyinde kalmış kimyasalların kusturulması için 450 °C’ye ısıtılır ve 10^{-10} Torr basınca kadar orta hazne vakumlanır. Büyütme işlemi için alttaş büyütme haznesine aktarılır. Si alttaş oksit kaldırma sıcaklığına ısıtılır ve RHEED ekranından yüzey oksidinin kalkması gözlemlenir. Termal oksit kaldırma sürecinde RHEED desenleri belirdikten sonra alttaş büyütme sıcaklığına indirilir ve katkısız GaAs tampon tabaka büyütülür. ELO işlemi için AlAs bırakma katmanı büyütülür. GaInP tek eklem güneş hücresi yapısı, AlInP optik pencere ve taşıyıcı yansıtıcı katman ve GaAs kontak katmanları büyütülür. Büyütme sonrası örnek, önce orta hazneye oradan da yükleme haznesine transfer edilerek MBE sisteminden dışarı çıkartılır.

3.3. Büyütme Sonrası Çalışmalar

Büyütme işleminden sonra MBE sisteminden çıkarılan alttaşlar ile yapılan işlemler bu bölümde anlatılmaktadır. Sistemden çıkarılan alttaşların kristal kalitesinin anlaşılması ve büyütme parametrelerinin iyileştirilmesi için yapısal karakterizasyon işlemleri

yapılmaktadır. Bu işlemler, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (high resolution X-ray diffraction, HRXRD), fotoluminesans spektroskopisi (photoluminescence, PL) ve taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope) cihazları ile gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Yapısal karakterizasyon

3.3.1.1. HRXRD

HRXRD, büyütülen ince filmlerin yapısal karakterizasyonunda kullanılan ve yıkıcı olmayan bir tekniktir. HRXRD ile büyütülmüş filmin kristal kalitesi, bileşik kompozisyonu, örgü uyumsuzluğu, katman rahatlığı ve periyot kalınlığı gibi parametreler tespit edilebilmektedir. Kırınım eğrilerinden elde edilen kırınım tepe açısı ve tam tepe yarı genişliği (full width half maximum, FWHM), büyütülen filmlerin alaşım kompozisyonu ve kristal kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışmada, HRXRD, örgü sabiti, örgü uyumsuzluğu, alttaş boyunca homojenlik ve kristal kalitesinin incelenmesinde kullanılmıştır.

3.3.1.2. PL

PL, büyütülen yarıiletken ince filmlerin elektronik yapısının incelenmesinde kullanılan yıkıcı olmayan bir tekniktir. Yarıiletken ince filmin yüzeyine, yasak enerji aralığından daha yüksek enerjili harici bir ışık odaklanır ve değerlik bandında bulunan elektronların iletkenlik bandına uyarılması sağlanır. Uyarılmış durumdaki elektronlar, değerlik bandına geçişleri sırasında, yarıiletkenine ait yasak enerji aralığı, kusur veya izinli enerji seviyeleri ile ilgili bilgi veren daha düşük enerjili fotonlar yayarlar. Işımanın yapıldığı dalgaboyu, şiddeti ve elde edilen eğrinin simetrik özellikleri büyütülmüş yarıiletken filmin opto-elektronik performansı hakkında değerli bilgiler vermektedir. Bu çalışmada, PL yöntemi ile büyütülmüş ince filmleri bant aralıkları, kristal kalitesi ve alttaş boyunca homojenliği incelenmiştir.

3.3.1.3. SEM

SEM, görünür ışık ile çözölemeyecek küçüklükteki unsurları görüntülemek için kullanılan bir tekniktir. Bir yarıiletken film üzerine odaklanmış elektronların yüzeyden

saçılmaları ile elde edilen bilgiler sayesinde yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Yüzeyde oluşmuş morfolojik yapıların görüntülenmesi ile çalışılan malzeme hakkında numerik analizlerin yapılmasına olanak sağlayan görüntü işleme programları vardır. ImageJ gibi açık kaynaklı görüntü işleme programı kullanılarak SEM görüntüleri incelenerek yarıiletken ince film hakkında bilgi edinilebilmektedir.

Bu çalışmada SEM yöntemi, Si alttaşların desenleme çalışmalarının incelenmesinde, MBE’de büyütülmüş ince katmanların kalınlıklarının incelenmesinde ve SEM cihazına eklenmiş enerji dağılım spektrumu (energy dispersive spectrum, EDS) kullanılarak elemental analiz için kullanılmıştır.

3.3.2. Epitaksiyel film kaldırma

ELO, büyütülen yarıiletken ince filmlerin büyütüldüğü tabandan ayrılıp başka bir tabana aktarılmasıdır. Büyütme sürecinde, büyütülen film ile alttaş arasına ayırma katmanı eklenmektedir. Bu katman, seçici aşındırıcı çözelti içerisinde çözünerek alttaş ve ince filmin birbirinden ayrılmasını sağlamaktadır. Kaldırılan filmler sayesinde, esnek LED, transistör, fotodedektör ve güneş hücreleri [50, 51, 52, 53] üretilmektedir.

ELO işlemi, esnek güneş hücrelerinin üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. GaAs tabanlı tek eklem veya çoklu eklem güneş hücre yapılarında AlAs bileşiği ayırma katmanı olarak GaAs alttaşın üzerine büyütülmektedir. Devamında, aktif hücre yapısı, alttaş tabanlıya göre ters olacak şekilde büyütülmektedir. HF, AlAs ve güneş hücresi yapısı arasında seçici aşındırıcıdır. HF içerisinde, AlAs’ın aşınması ile birlikte güneş hücre yapısı GaAs alttaştan ayrılmaktadır. ELO sonrasında, fiziksel ve kimyasal temizlik işlemleri ile GaAs alttaş defalarca büyütme sisteminde kullanılabilir. Kaldırılan film hem daha hafif olmakta ve esnek bir tabana aktarılabilir hem de GaAs alttaş defalarca tekrar tekrar kullanılarak üretim maliyetleri oldukça aşağı çekilebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan, çok daha ucuz ve üzerinde desenleme işlemleri yapılmış Si alttaşlar da kimyasal temizleme işleminden sonra defalarca kullanılabilir. ELO işlemi sonrasında, Si+GaAs yapay alttaş, seçici aşındırıcı ile temizlenebilir. Temizleme işlemi sonrasında desenlenmiş Si alttaş tekrar tekrar kullanılabilir.

Epitaksiyel film kaldırma işleminde öncelikle esnek taşıyıcı poliyamid yüzeyine Pt/Au kaplanmıştır. Büyütme sonrasında arka kontağı oluşturan üst p-kontak yüzeyine

Pt/Au kaplanmıştır. Au-Au yapıştırma işlemi için pres makinesi kullanılmış ve poliyamid ile büyütülen yapı sıcaklık ve basınç altında birbirine kaynaştırılmıştır. Sonrasında, HF içerisinde serbest bırakma katmanını aşındırılmıştır. Serbest bırakma katmanının aşınması ile birlikte büyütülmüş aktif hücre ince film yapısı poliyamid yüzeyine aktarılmıştır. Sonraki fabrikasyon basamaklarında film, zarar görmemesi için geçici olarak cam lamel üzerine kapton bant ile yapıştırılmıştır.

3.3.3. Fotolitografi

Fotolitografi tekniği ile ışığa duyarlı fotorezist kullanılarak örnek yüzeylerine istenilen geometrik desen bir maske ile aktarılabilir. Örnek yüzeylerinin temizlenmesi ile başlayan fotolitografi aşamaları sırasıyla fotorezist kaplama, maskeleme ve banyolama (develop etme) gibi aşamaların bir veya daha fazla kez tekrarından oluşur. Geçici katman olarak kullanılan fotorezist katmanını, aşındırma işlemlerinde, yüzey koruyucu veya örneklerin üzerine tekrar kaplama yapılacağı zaman koruyucu maskeleme katmanını görevi görmektedir. Kaplama işlemleri bütün örnek yüzeyine yapıldığı için önceden kaplanan fotorezistin temizlenmesi ile sadece belli bölgelerde kaplama kalmaktadır. Bu işleme lift-off işlemi adı verilir. Bu çalışmada, AZ5214E ve AZ9260 fotorezistleri örneklerde aşındırma ve metal kaplama işlemlerinde kullanılmıştır.

Fotolitografi işlemlerinde önce örnek yüzeyleri aseton ve iso-propil alkol ile temizlenmiş ve yüzeye döner kaplama cihazı ile fotorezist kaplanmıştır. Hafif ısıtma, ıslama ve develop işlemlerinin ardından kimyasal aşındırmaya daha dayanıklı hale gelmesi için sert ısıtma işlemi uygulanmıştır. Islak aşındırma yöntemi kullanılarak kenar aşındırma işlemi uygulanmıştır. Üst kontak metalinin kaplanması için fotorezist kaplama, ıslama ve develop işlemleri tekrar edilmiştir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ve sonrasında lift-off yöntemi ile üst ızgara metal kontak desenleri oluşturulmuştur. Son aşamada uygun kalınlıklarda yansıtma önleyici katmanlar, metal ızgara kontak desenini açıkta bırakacak şekilde desenlenerek kaplanmıştır.

3.3.4. Elektro-optik karakterizasyon

Desenleme çalışmaları, güneş hücresinin büyütülmesi, yapısal karakterizasyon, ELO süreci ve ardından fotolitografi işlemleri ile güneş hücreleri, elektriksel ve optik ölçümler için hazır hale gelmektedir. Elektriksel ve optik karakterizasyon işlemleri ile

nihai güneş hücresinin performansı incelenebilmektedir. Elektro-optik karakterizasyon ile büyütme ve fabrikasyon basamaklarının iyileştirilmesi sağlanmaktadır.

Elektriksel karakterizasyon ile güneş hücrelerinin dönüşüm verimleri incelenmiştir. Güneş hücresi karakterizasyonlarının önemli parametrelerinden biri olan dönüşüm verimi (η), ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirme verimini temsil etmektedir. AM1.5G güneş spektrumunun altında kalan alanın dalgaboyuna bağlı integrali alındığında toplam miktar 100 W/cm^2 'lik enerji yoğunluğuna denk gelmektedir. Güneş hücresinin dönüşüm verimi, AM1.5G standartlarında güneş hücresinden elde edilecek maksimum elektriksel gücün ölçülmesi ile elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ABET 2000 Solar Simulator cihazı ile dönüşüm verimi ölçümleri yapılmıştır. AM1.5G standardına uygun 100 mW/cm^2 ile aydınlatılan güneş hücrelerine $-0,5 - 1,4 \text{ V}$ aralığında voltaj uygulanmış ve akım ölçümleri yapılmıştır. Akım voltaj eğrilerinden türetilen parametreler ve matematiksel temsilleri aşağıdaki denklemlerde (3.2-3.9) verilmiştir.

$$J_{SC} (\text{mA} / \text{cm}^2) = I_{SC} / A \Big|_{V=0} \quad (3.2)$$

$$V_{OC} (V) = V \Big|_{I=0} \quad (3.3)$$

$$I_{MP} (\text{mA}) = I \Big|_{P_{MAX}} \quad (3.4)$$

$$V_{MP} (V) = V \Big|_{P_{MAX}} \quad (3.5)$$

$$FF = I_{MP} \cdot V_{MP} / I_{SC} \cdot V_{OC} \quad (3.6)$$

$$\eta = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF / P_{IN} \cdot A \quad (3.7)$$

$$R_{SE} (\Omega) = dV / dI \Big|_{V=V_{OC}} \quad (3.8)$$

$$R_{SH} (\Omega) = dV / dI \Big|_{V=0} \quad (3.9)$$

Burada J_{SC} kısa devre akım yoğunluğunu, A güneş hücresinin alanını, V_{OC} açık devre voltajını, η dönüşüm verimini, P_{MAX} en yüksek elektrik gücü, P_{IN} AM1.5G enerji yoğunluğunu, FF dolum faktörünü (fill factor), I_{MP} maksimum güçteki akımı, V_{MP} maksimum güçteki voltajı, R_{SE} seri direnci ve R_{SH} shunt direncini temsil etmektedir.

Bir diğerkarakterizasyon yöntemi olan optik karakterizasyon, üretilen güneş hücresinin güneş spektrumunun farklı dalgalıboyları ile etkileşiminin incelenmesidir. Güneşten yayılan geniş spektrumdaki fotonlar (morötesi, görünür ve kızılötesi bölgelerindeki ışımlar) dünyaya gelmektedir. Kuantum verimi, gelen fotonların elektrik sinyaline çevrilmesinin orantısıdır. Bu sayede, hangi dalgalıboyundaki ışımanın ne kadar foto akım oluşturduğı anlaşılabilmektedir.

Kısa ve uzun dalgalıboylarının kuantum verimleri incelendiğinde, güneş hücresinin kesim dalgalıboyu ve yüzey yansımalarının etkisi gibi optik incelemeler yapılabilmektedir.

Kuantum verimi ölçümünde ölçülen foto akım, dış kuantum verimi (external quantum efficiency, EQE) olarak tanımlanmaktadır. Dış kuantum verimi, güneş hücresi ile ilgili tüm unsurların kümülatif toplamının sonucudur. Yüzey yansıması ile kaybedilen her fotonun, güneş hücresinde soğurularak, elektron hol çifti oluşturduğı kabul edilirse, elde edilecek sonuç, iç kuantum verimi (internal quantum efficiency, IQE) olarak tanımlanmaktadır. Denklem 3.10’da iç ve dış kuantum verimi arasındaki ilişki görölmektedir.

$$IQE = \frac{EQE}{(1 - R)} \quad (3.10)$$

Burada IQE, EQE ve yansıma (reflection, R) dalgalıboyuna bağılı bir niceliklerdir. Bu çalışma kapsamında Newport Quantax300 kuantum verimi cihazı ile 350 – 750 nm dalgalıboyları arasında güneş hücrelerinin dış kuantum verimi ölçümleri yapılmıştır.

4. DENEYSEL YÖNTEM SONUÇLARI

Üçüncü bölümde bahsedilen deneysel yöntemlerin sonuçları bu bölümde verilmektedir.

4.1. Si Altaş Desenleme Çalışmaları

Bu çalışmada, GaInP yapılarının üstüne büyütüleceği (100) 2 inç p-Si tek tarafı parlatılmış altaşlar kullanılmıştır. Bütün deneysel çalışmalar 100 ve 1000 sınıfı temiz odalarda yapılmıştır. Altaşlar, desenleme çalışması öncesinde organik ve inorganik kirlerden arındırılmak için öncelikle aseton, isopropil ve de-iyonize su (18,2 MΩ.cm seviyesinde öz direnç) ile temizlenmiştir. Ultrasonik titreştirici kullanılarak sırasıyla aseton ve isopropil dolu beherlerde mekanik temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Organik ve inorganik kirlerinden arındırılmış altaşlar teflon cımbız yardımıyla HF içerisine daldırılmıştır. Yüzey oksiti temizlenen Si altaşlar hidrofobik yüzey özelliği kazanmaktadır. Sonrasında altaşlar, de-iyonize su ile yıkanıp N₂ gazı ile kurutulmuştur. 80 °C’deki Piranha çözeltisi (3:1 H₂SO₄:H₂O₂) içerisinde 30 dk boyunca örnekler tekrar olası organik kirlerden arındırılmıştır. Bu süreç, Si altaş yüzeyini hidrofilik hale getirmektedir. Düzenli desenleme çalışması için Si altaş hidrofilik olarak kullanılmıştır. Ancak, düzensiz desenleme çalışması için HF kullanılarak yüzey hidrofobik hale getirilmiştir.

Yapılan denemeler için 10×10 mm² büyüklüğünde kesilmiş (100) p-Si altaşlar kullanılmıştır. Görsel 4.1’de işlemsiz, hidrofobik ve hidrofilik Si altaşlar görülmektedir.



Görsel 4.1. İşlemsiz ve çeşitli işlemler ile “hidrofobik” ve “hidrofilik” hale getirilmiş 10×10 mm² kesilmiş Si altaşlar

4.1.1. Düzensiz desenleme

Düzensiz desenleme çalışmasında hedef, yüzeyde oluşturulacak nanoyapıların sık olmasıdır. Yapılan ilk denemeler sonrasında, yüzeyde oluşturulan yapıların AgNO_3 çözelti derişimine ve aşındırma süresine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Sistematik olarak oluşturulan örnek grubu Tablo 4.1’de görölmektedir.

Tablo 4.1. *Düzensiz Desenleme işlemi için örneklere uygulanan parametreler*

Örnek Kodu	AgNO_3 Derişim (mM)	Aşındırma Süresi (dk)
MA1	5	5
MA2	5	10
MA3	5	15
MA4	10	5
MA5	10	10
MA6	10	15
MA7	20	5
MA8	20	10
MA9	20	15

AgNO_3 ’ün molar kütlesi 169,87 g/mol’dür. 5 mM derişim için 85 mg, 10 mM derişim için 169 mg ve 20 mM derişim için 340 mg AgNO_3 , 100 ml suya eklenmiş ve teflon çubuk ile karıştırılmıştır.

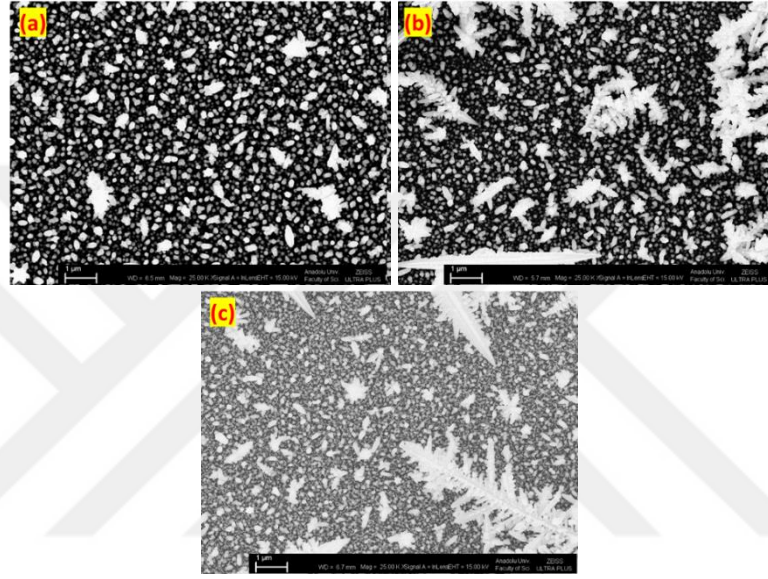
Kullanılan çözelti: AgNO_3 / 100 ml H_2O / 10 ml HF

Ag’nin Si yüzeyine kaplanması sırasında çözeltinin içerisindeki Ag^+ derişimi değişecektir. Bu nedenle, farklı sürelerde yapılacak örnekler için ayrı ayrı ve aynı hacimdeki çözelti kapları kullanılmıştır. Çözelti içerisine yüzey oksiti kaldırılmış Si alttaşlar teflon cımbız ile yerleştirilmiştir. Aşındırma süresi sonunda de-iyonize su ile örnekler yıkanıp kurutulmuştur. Kaplanmış Ag’nin temizlenmesi için örnekler 50 °C’deki HNO_3 çözeltisi içerisinde 30 dk bekletilmiştir. HF ile temizlenip kurutulmuş örnekler SEM ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) yöntemleri ile incelenmiştir.

Çözelti içerisine yerleştirilen örneklerde, ilk 30 - 60 s arasında, Ag’nin yüzeye kaplanması gözlenebilmektedir. Kaplama işlemi ile birlikte örnekler aşınmaya başlamaktadır. Ag’nin yüzeye nasıl dağıldığının incelenmesi için örneklerin 10×5 mm²’lik parçası kesilerek ayrıca SEM ile incelenmiştir. 5, 10 ve 20 mM derişim kullanılan çözeltelerde aşındırılan örneklere ait Ag dağılımları birbirine kendi içerisinde

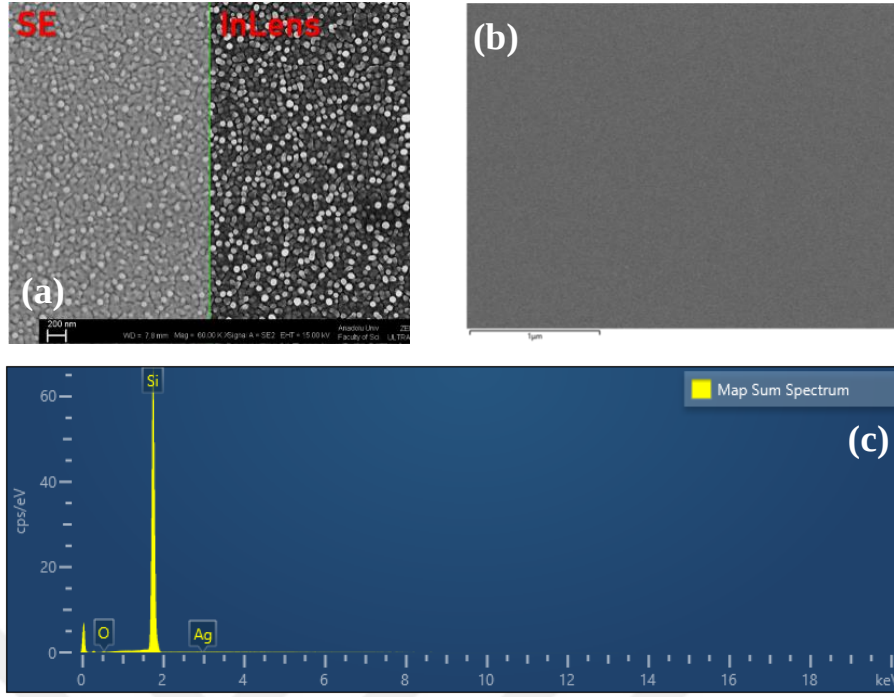
benzerdir. Bu sebeple, Şekil 4.1’de, her bir derişim grubuna ait yalnızca bir örneğin Ag kaplanmış yüzey resmi verilmiştir.

Şekil 4.1’de yüzeyde Ag kaplamasının boşluk içermeyen tüm yüzeyde bulunduğu görülmektedir. SEM görüntüsünde daha beyaz olarak görülen bölgeler üst üste binmiş Ag kaplamasıdır. Düzensiz desenlenmiş alttaş için Ag kaplamasının homojen dağılım sergilediği söylenebilir.



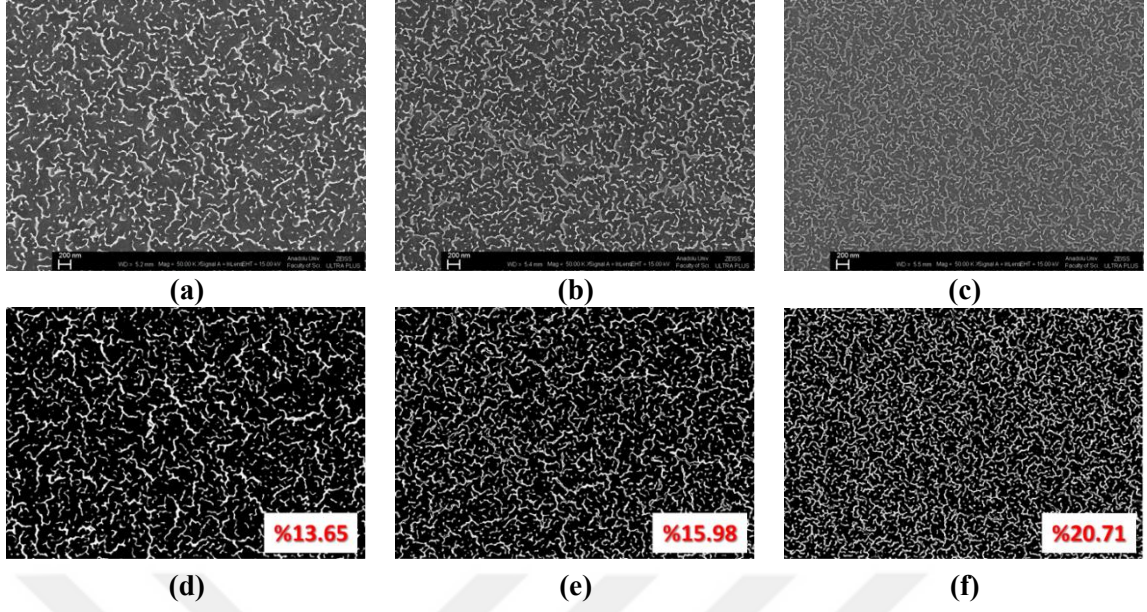
Şekil 4.1. Derişimi farklı (a) MA3, (b) MA5 ve (c) MA8 örneklerine ait Ag kaplanmış yüzey SEM görüntüleri

Şekil 4.2’de solda ikincil elektronlar (secondary electrons, SE) ve sağda InLens dedektör ile elde edilmiş 1 dk aşındırılmış ikinci grup örneklerde Ag kaplamanın dağılımının homojen olduğu görülmektedir. InLens dedektör görüntüsünden anlaşılacağı üzere, bazı Ag kümeleri seyrek de olsa alttaki Ag kaplı yüzeyin üstünde durmaktadır. HNO₃ ile temizleme sonrasında, Ag’nin yüzeyden tamamen temizlendiği EDS analizleri sonucunda anlaşılmıştır.

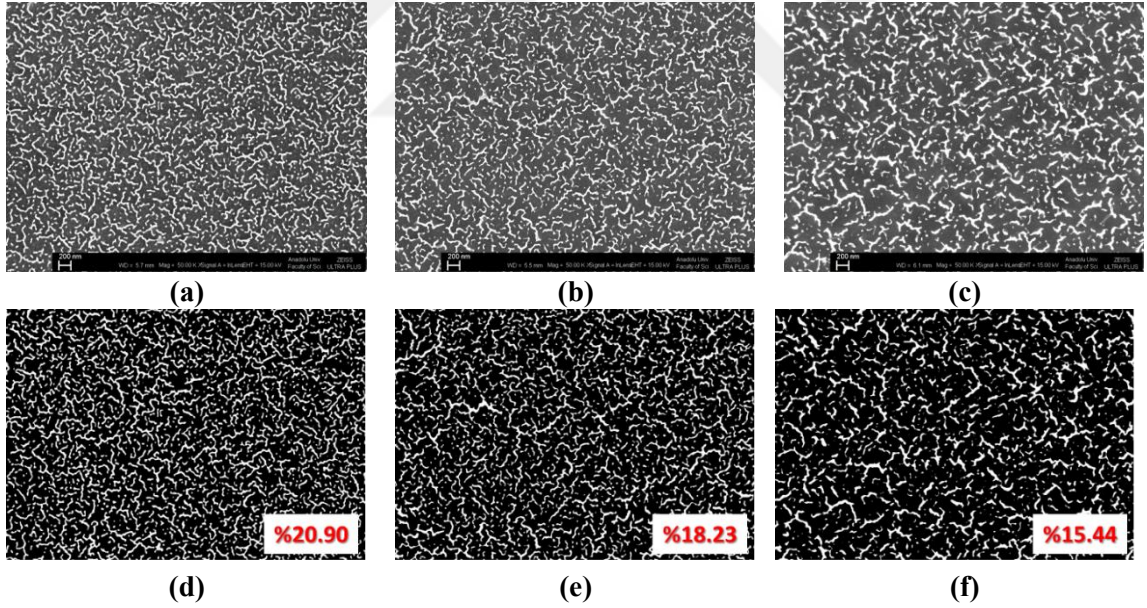


Şekil 4.2. Düzensiz Desenleme sonrası (a) Ag kaplı yüzey ve temizlik sonrası yüzeyin (b) SEM görüntüsü ve (c) EDS analizi

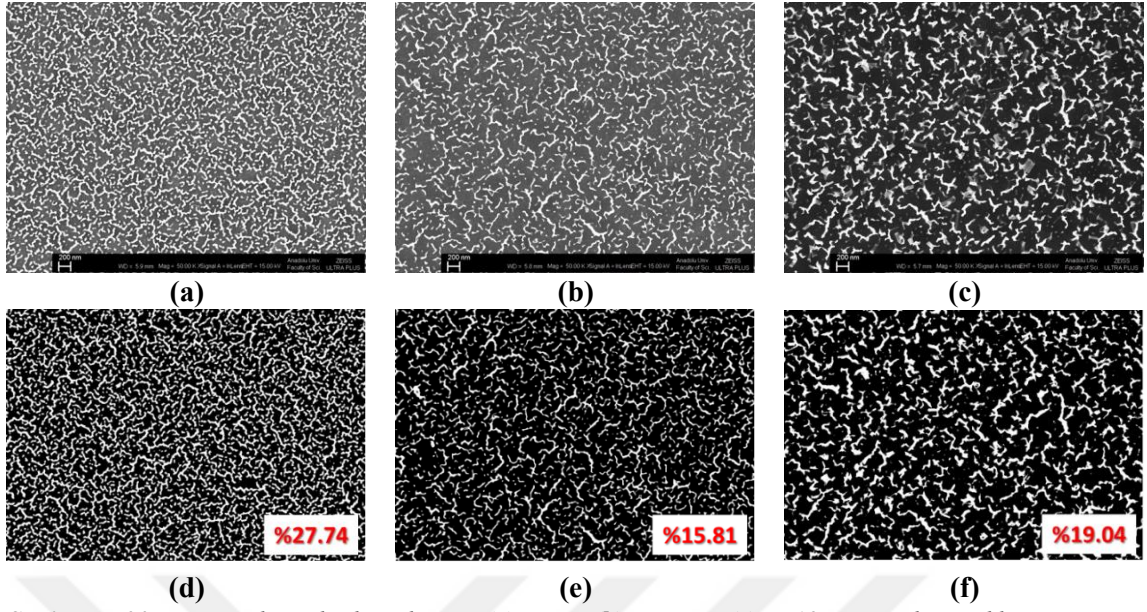
Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te düzensiz desenlenmiş alttaşlara ait aşındırma işlemi sonrası görüntüler görülmektedir. Bu görüntülerden, en yüksek yoğunluklu yüzey kaplamasına, MA7 numaralı örneğin (Şekil 4.5a) sahip olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen görüntülerden, konsantrasyonun artmasının yüzeydeki yapıların şeklini değiştirmedeği görülmektedir. Öte yandan, nanoyapıların sıklığı aşındırma süresiyle birlikte artmaktadır. Ancak, yüksek konsantrasyonda bu durum tam tersi olmuştur. Bu sebeple, düşük konsantrasyon ve düşük aşındırma süresi ideal bulunmuştur. Venkatesen ve ark. [54] tarafından yapılan çalışmada farklı derişimlerde AgNO_3 çözeltilerinin yüzey kaplaması ile ilgili olarak AgNO_3 derişiminin azalmasıyla yüzey kaplamasının arttığı raporlanmış ve en iyi yüzey kaplaması 4 mM ile elde edildiğini belirtmiştir. Şekil 4.2a'da görülen Ag kaplamanın öbeklenmesi aşındırma sonrası yapılan yüzey temizliğinden sonra görülmemektedir. Bu durum, öbeklenmenin aşındırma profilini etkilemediğini göstermektedir. Şekil 4.6'da ise yüzeylerine açı ile bakılan örneklerin SEM görüntüleri görülmektedir.



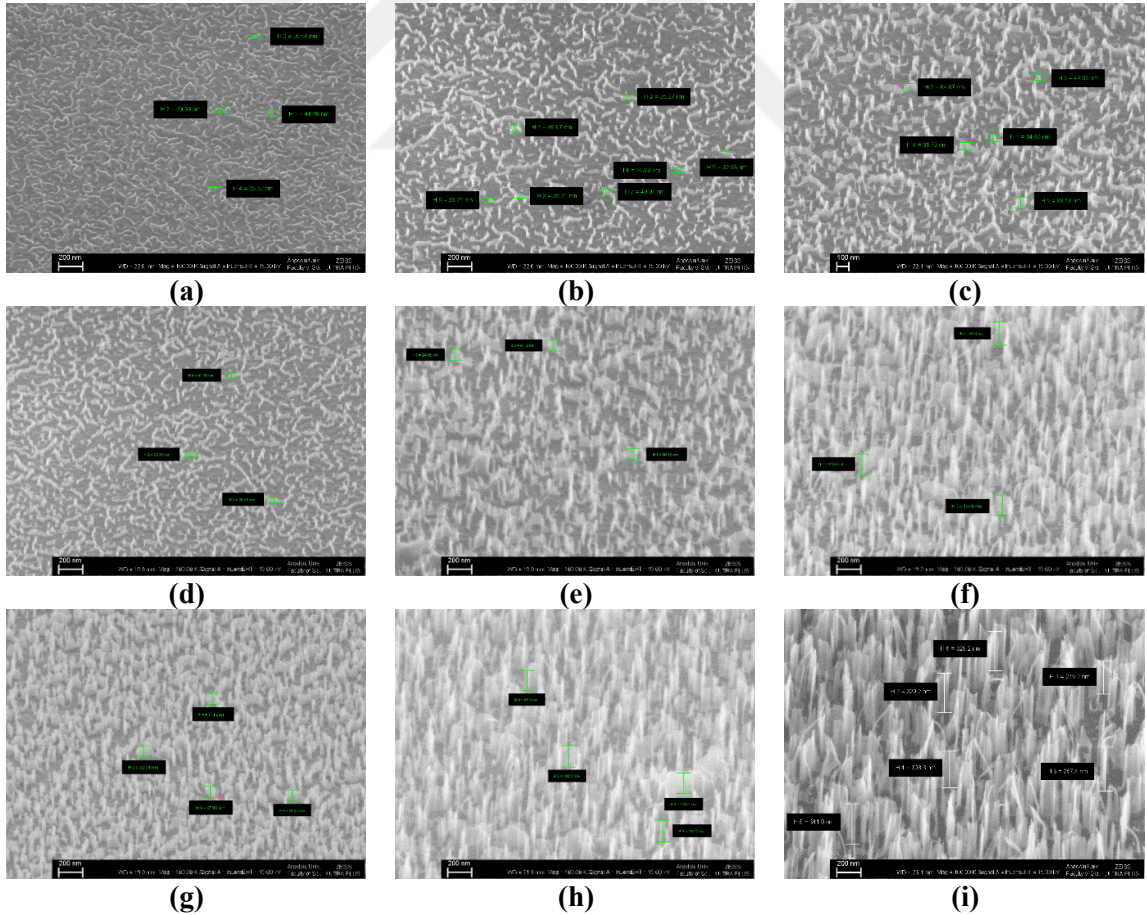
Şekil 4.3. 5 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA1, (b) MA2 ve (c) MA3 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA1, (e) MA2 ve (f) MA3



Şekil 4.4. 10 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA4, (b) MA5 ve (c) MA6 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA4, (e) MA5 ve (f) MA6



Şekil 4.5. 20 mM çözeltisinde desenlenmiş (a) MA7, (b) MA8 ve (c) MA9 numaralı örnekler için yüzey SEM görüntüsü, ImageJ programı ile siyah beyaza çevirilerek işlenmiş ve kaplama yoğunluğu ölçümü yapılmış görüntüler (d) MA7, (e) MA8 ve (f) MA9



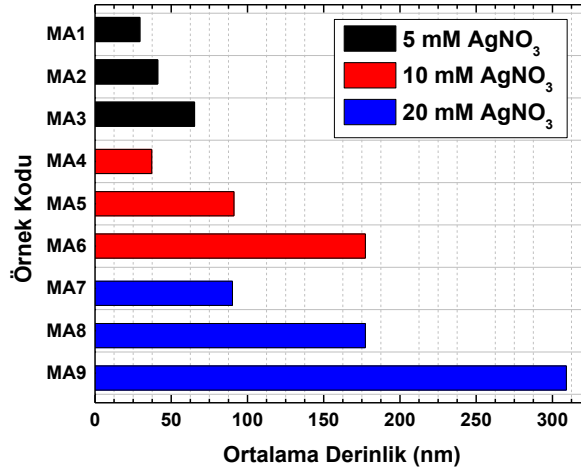
Şekil 4.6. Farklı derişim ve sürelerde aşındırılan örnek yüzeylerinin açılı SEM görüntüleri (a) MA1, (b) MA2, (c) MA3, (d) MA4, (e) MA5, (f) MA6, (g) MA7, (h) MA8 ve (i) MA9

Yüzeyin daha ayrıntılı incelemesi için MA1 örneğine AFM analizi de yapılmış ve yan-kesit SEM görüntüsü ile birlikte Şekil 4.7’de sunulmuştur. Yüzeyde oluşan rastgele nanoyapıların homojen olarak dağıldığı AFM görüntüsünden anlaşılmaktadır.

Örneklere ait elde edilen aşındırma derinlikleri Şekil 4.8’deki grafikte görülmektedir. Tablo 4.2’de ise düzensiz desenlenmiş alttaşlara ait parametreler ve sonuçlar verilmektedir.



Şekil 4.7. *Düzensiz Desenleme işlemi sonrası yüzeyden alınan AFM (üstte) ve yan-kesit SEM (altta) görüntüleri*



Şekil 4.8. Farklı derişimlerde AgNO₃ çözeltisi içerisinde düzensiz desenlenmiş alttaşlara ait ortalama aşındırma derinliği grafiğı

Tablo 4.2. Farklı derişimlerde AgNO₃ çözeltisi içerisinde düzensiz desenleme işlemi sonrasında alttaşlara ait sonuçlar

Örnek kodu	AgNO ₃ Derişim (mM)	Aşındırma Süresi (dk)	Düzensiz Desenin Alan Yüzdesi (%)	Ortalama Aşındırma Derinliği (nm)
MA1	5	5	13,65	29,40
MA2	5	10	15,98	41,15
MA3	5	15	20,71	65,26
MA4	10	5	20,90	37,23
MA5	10	10	18,23	91,12
MA6	10	15	15,44	177,30
MA7	20	5	27,74	90,14
MA8	20	10	15,81	177,30
MA9	20	15	19,04	309,10

Elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Aşındırma derinliği süre ile yaklaşık doğru orantılı artmaktadır.
- Düzensiz desenin alanca yüzdesi derişim arttıkça artmaktadır.

- Şekillere ve Tablo 4.2'ye göre en iyi düzensiz desenin alan yüzdesi, yüksek derişim ve kısa sürenin kullanıldığı MA7 kodlu numuneden elde edilmiştir. Ancak, derinliğin de artması ile birlikte MA1 numaralı örnek, düzensiz desenleme işlemi için daha uygun bulunmuştur.

Yüzeyde oluşturulan nanoyapıların farklı dalgaboyu bölgelerinde yansıma analizleri FTIR ile yapılmıştır. Yansıma ölçümünde kullanılan optik elemanlar Tablo 4.3'te görülmektedir.

Tablo 4.3. *Düzensiz desenlenmiş örneklerin ölçümlerinde FTIR cihazında kullanılan optik elemanlar*

Yansım Spektrum Bölgesi	Dedektör	Işık Kaynağı	Demet Kıyıcı
UV (390-404 nm)	GaP	405 nm LED	CaF ₂
SWIR-NIR (1-2,5 µm)	InGaAs	Tungsten Filaman	CaF ₂ (Ge Kaplı)
MWIR-LWIR (3-25 µm)	DLaTGS (Pyroelektrik dedektör)	SiC (Globar)	KBr

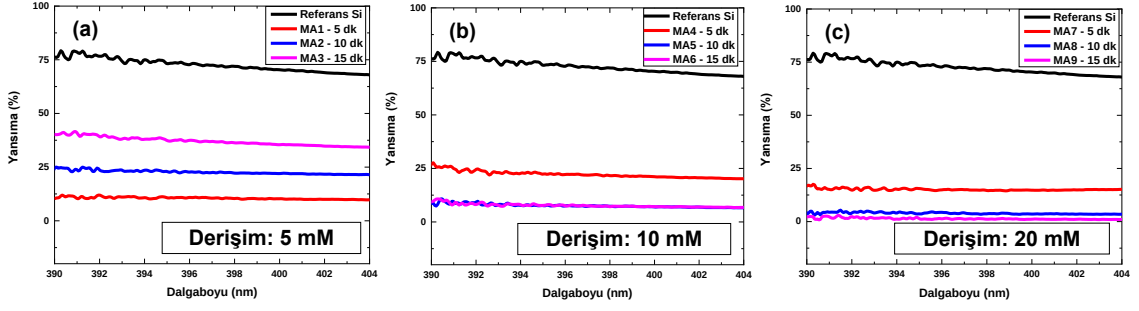
FTIR cihazında, görünür bölge için kullanılan Tungsten Filamanın 650 nm’den kısa dalgalaboylarında şiddeti oldukça düşmektedir. Bu sebeple, görünür bölgede ışık kaynağı kullanmak yerine harici olarak 405 nm UV-LED kullanılmıştır.

Yüzeyleri düzensiz desenlenen numunelerin nano ölçekte karakterler içermesinden dolayı yansıma ölçümleri geniş spektrum aralığında incelenmiştir. Şekil 4.9’da 390-404 nm’de, Şekil 4.10’da kısa dalgalaboylu kızılötesi bölgesinde, Şekil 4.11’de orta ve uzun dalgalaboylu kızılötesi bölgede numunelere ait yansıma grafikleri verilmiştir.

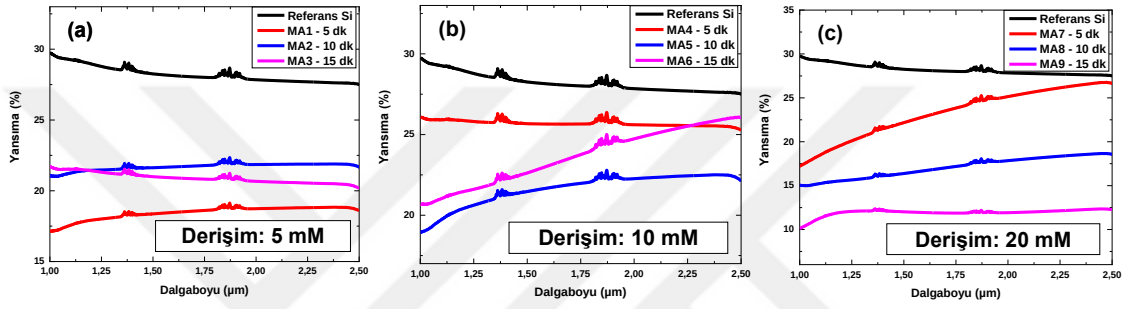
Uzun dalgalaboylarında (Şekil 4.11a-c), farklı derişim ve süre kullanılan numuneler arasında neredeyse fark bulunmazken, daha kısa dalgalaboylarında (Şekil 4.10a-c ve Şekil 4.9a-c) artık yansımanın azaldığı fark edilmektedir. Özellikle, UV bandına doğru giderken, yansımanın etkilendiği görülmektedir. Bu durum, yansımanın aşındırma derinliğinin artması ile kısa dalgalaboyları ile etkışiminin çok daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

10×10 mm² örnek çalışmalarında ortalama derinliğin daha da azaltılması için sürenin 30 s ve derişimin 5 mM yapılmasına karar verilmiştir. 2 inç altaş ile yapılan düzensiz desenleme çalışmasında, AgNO₃ ile 10×10 mm² Si altaşların aşındırma işleminde kullanılan çözelti miktarı ve çözelti konulan kap, altaş boyutu için hacimsel orantılı olacak şekilde artırılmıştır.

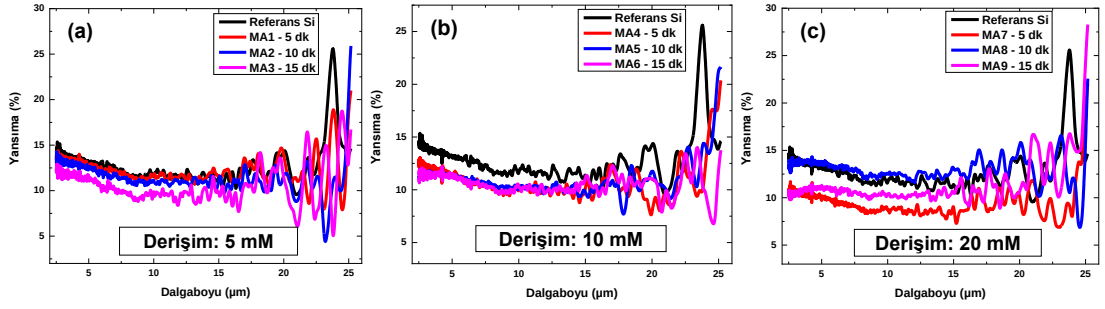
Görsel 4.2’de aşındırma sonrası altaş yüzeyindeki Ag kaplama yüzeyde kahverengi bir görünüm bırakmaktadır. Aşındırma sonrasında ise Ag kaplama %65’lik HNO₃ çözeltisi içerisinde temizlenmekte ve MBE sistemine yükleme öncesinde HF ile yüzey oksidi temizlenmektedir.



Şekil 4.9. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM AgNO_3 derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örneklere ait 390-404 nm'deki yansımagrafikleri



Şekil 4.10. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM AgNO_3 derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örneklere ait kısa dalgaboylu kızılötesi bölgesindeki yansımagrafikleri



Şekil 4.11. (a) 5 mM, (b) 10 mM ve (c) 20 mM AgNO_3 derişimindeki çözelti içerisinde aşındırılmış örneklere ait orta ve uzun dalgaboylu kızılötesi bölgesindeki yansımagrafikleri



Görsel 4.2. Düzensiz desenleme işleminden sonra yüzeyi Ag kaplı 2 inç Si alttaş (solda) ve Ag kaplama temizlendikten sonra düzensiz desenlenmiş alttaş (sağda)

4.1.2. Düzenli desenleme

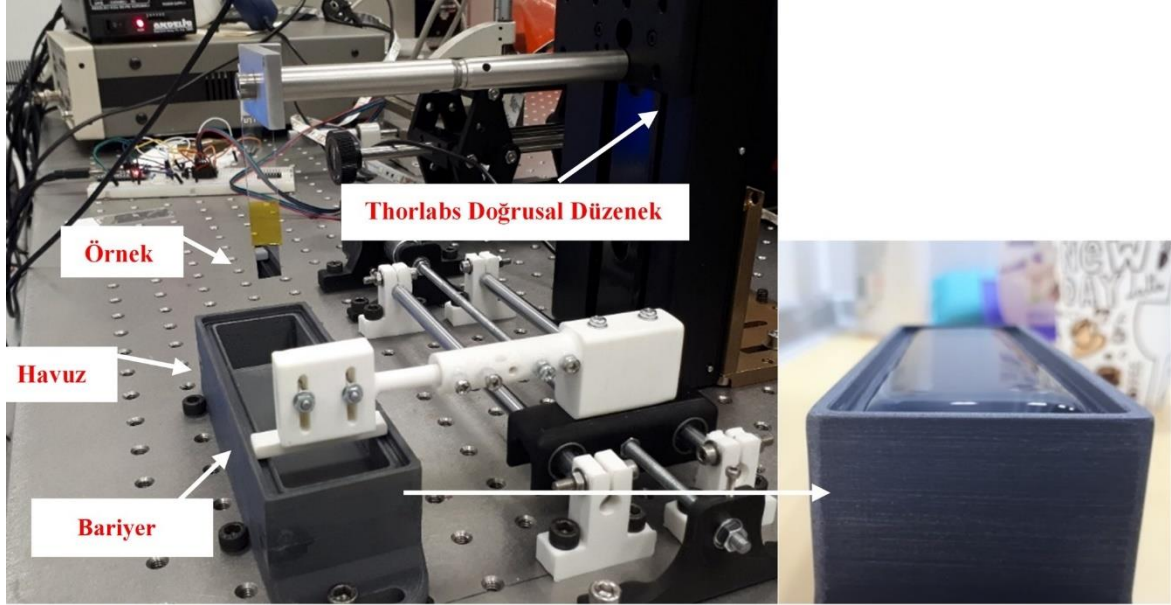
Düzenli desenleme çalışmasında hedef, nanokürelerin en az boşluk kalacak şekilde ve tek katman olarak yüzeye kaplamaktır. Farklı kaplama yöntemleri ile nanoküre kaplama çalışmaları bu bölümde anlatılacaktır.

Nanokürelerin, kaplama sırasında, boşluksuz ve tek katman olarak yüzeye kaplanabilmesi için Si alttaşların yüzeylerinin hidrofilik hale getirilmesi gerekmektedir. Hidrofilik alttaş elde etme çalışmasında, Piranha çözeltisi ile hidrofilik yapılan Si alttaşların, atmosfer koşullarında bekletildiğinde 3-4 gün içerisinde özelliğini yavaş yavaş yitirdiği görülmüştür. Bunun üzerine, hidrofilik özellik kazandırılan örnekler, düzenli desenleme çalışması yapılan kadar de-iyonize su içerisinde bekletilmiştir. Bu durumda örnekler, 7 güne kadar hidrofilik özelliğini korumuştur. Hidrofilik yapma çalışmasına ek olarak Si alttaşlara, RCA (1:1:5 $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$) çözeltisi ve O_2 plazma işlemleri uygulanmış ve hidrofilik özelliği kazandırılmıştır. HF ile doğal oksit katmanı temizlenip yıkandıktan sonra RCA çözeltisi içerisinde 60 °C’de 40 dk tutularak Si alttaşın yüzeyi hidrofilik özellik kazanmıştır. Si alttaşlara, Piranha çözeltisine üçüncü alternatif olarak oksijen plazma işlemi uygulanmıştır. HF ile oksit katmanı kaldırılan alttaşlara, 10 sccm O_2 ve 50 W güç ile 3 dk boyunca plazma uygulanmıştır. Hazne basıncı yaklaşık 3×10^{-3} Torr mertebesinde yapılan oksijen plazma işlemi sonrasında örneğin yüzeyinin hidrofilik özellik kazandığı görülmüştür. Ayrıca, örnekler hidrofilik özelliğin farklı yöntemlerle kazandırılmasının desenleme işlemine etki etmediği görülmüştür. Bu çalışma boyunca, Si alttaş yüzeyleri Piranha ile hidrofilik özellik kazandırılmıştır. Farklı nanoküre kaplama yöntemleri alt başlıklar halinde bölümlere ayrılmıştır.

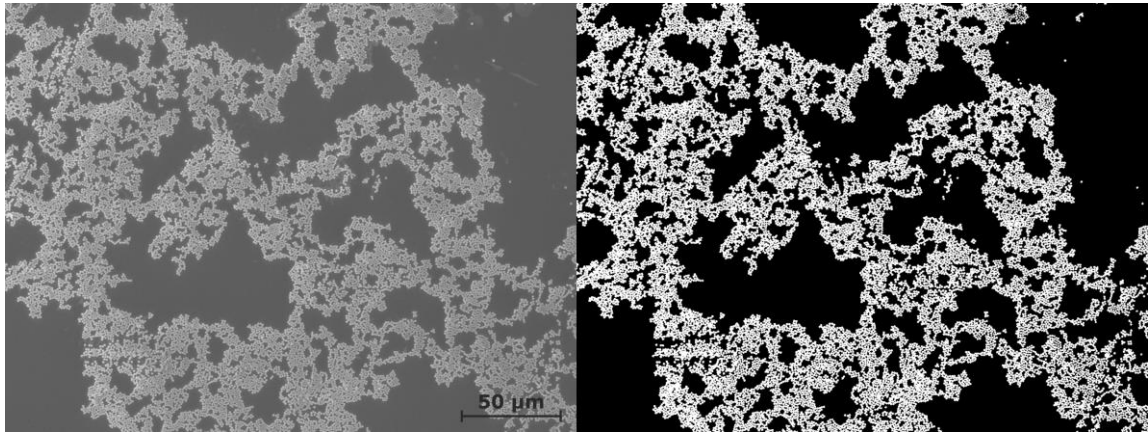
4.1.2.1. Langmuir-Blodgett yöntemi

Langmuir-Blodgett yöntemi için ticari olarak satılan cihazlar bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmada, Tough PLA kullanılarak 3D yazıcı ile üretilen bir havuz ve Thorlabs LTS 150 lineer kızaklı motor kullanılarak ticari cihazlara benzer bir düzenek tasarlanmış ve üretilmiştir (Görsel 4.3). Bu yöntemde, 1:3 hazırlanan nanoküre etanol solüsyonunda 500 nm’lik nanoküreler yüzdürülememiştir. Su yoğunluğunun arttırılması için sodyum dodesil sülfat (SDS) organik tuzu havuzdaki suda çözdürülse de 500 nm’lik nanoküreler su yüzeyinde kalamamış ve batmışlardır. Son olarak, suyun sıcaklığı 22 °C’den 8 °C’ye düşürülerek yüzey geriliminin arttırılması denenmiştir. Ancak, tüm

denemelere rağmen 500 nm'lik toprak yüzeyde yüzdürülemedi. Öte yandan, 1 μm 'lik nanoküreler SDS olmadan da suda batmamışlardır. Bu nedenle, 1 μm 'lik nanoküreler ile kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama sonrası elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.12'de görülmektedir.



Görsel 4.3. Langmuir-Blodgett Yöntemi için kurulan düzenek

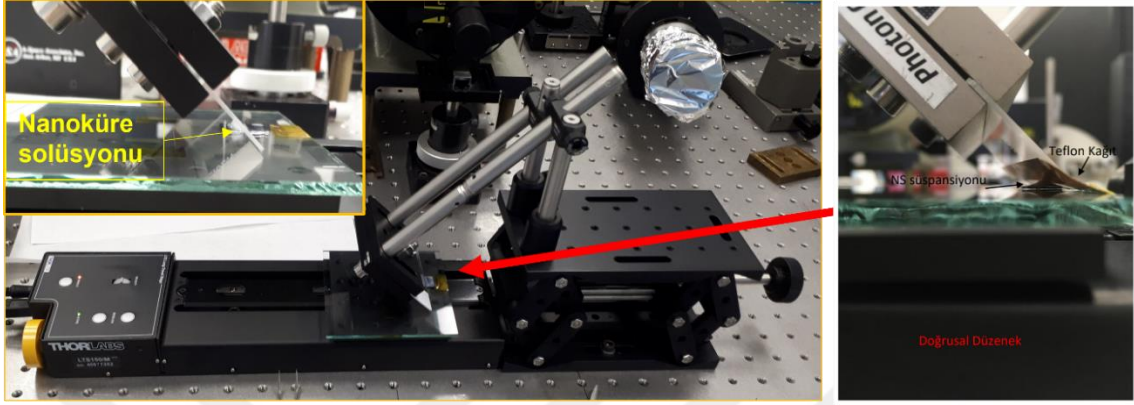


Şekil 4.12. Langmuir-Blodgett yöntemi için kurulan düzenek ile yüzeye kaplanmış 1 μm 'lik nanoküreler

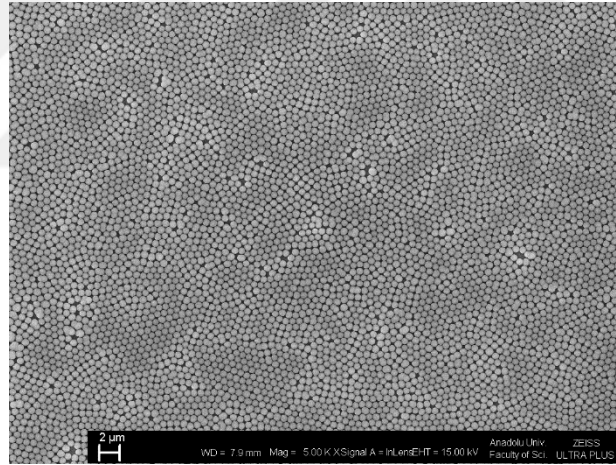
4.1.2.2. Doctor Blade yöntemi

Görsel 4.4'te örneklerin üzerine aç ile dokundurulan teflon kağıt ve örnek yüzeyi arasında nanoküre solüsyonu dökülmüştür. Lineer kızaklı motor hareketi ile de örnek teflon kağıttan uzaklaştırılmıştır. Bu sayede kaplama işlemi yapılabilmektedir. Şekil 4.13'te

kaplama sonrası SEM görüntüsü görülmektedir. Yüksek kaplama yoğunluğu ve hegzagonal dizilimde Doctor Blade yöntemi, Langmuir-Blodgett yöntemi ile denenen örneğe göre daha iyi sonuç vermiştir.



Görsel 4.4. Doctor Blade yöntemi için kurulan düzenek



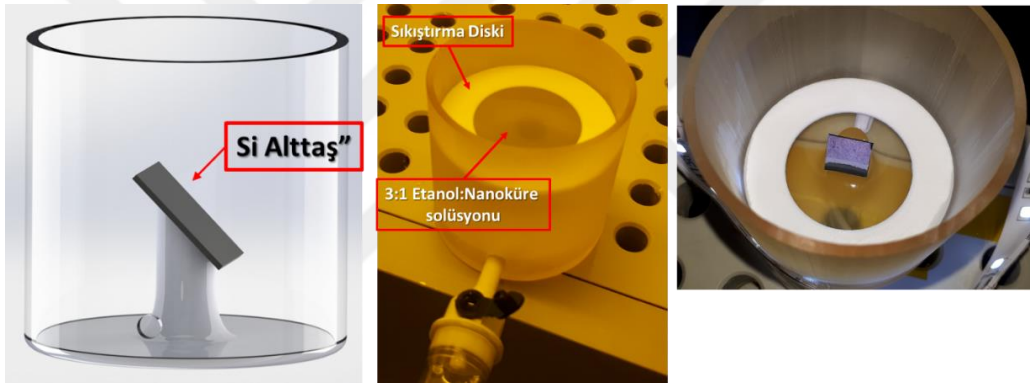
Şekil 4.13. Doctor Blade yöntemi için kurulan düzenek ile kaplanmış U179 numaralı örneğine ait SEM yüzey görüntüsü

4.1.2.3. Kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi

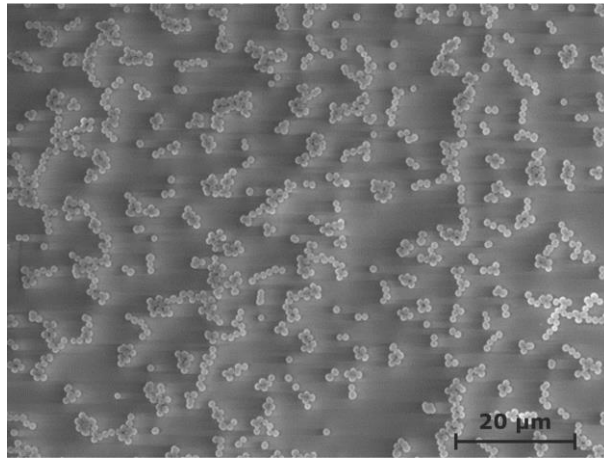
Kendiliğinden solvent buharlaştırma yönteminde elde edilen ön sonuçlar, hem Langmuir-Blodgett hem de Doctor Blade yöntemine göre bu yöntemin daha kullanışlı olduğunu göstermiştir. Günümüze kadar, literatürde kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi için farklı yaklaşımlar denenmiştir [55, 56]. Bu yaklaşımlar, alttan damlatma yöntemi, hidrofobik kap içerisinde kurutma yöntemi ve şırınga düzeneği gibi farklı deney düzeneklerinden oluşmaktadır. Temelde, nanoküre kaplama ve sonrasında nanoküre solüsyonunun kuruması sağlanarak Si alttaşlara nanoküreler kaplanmıştır.

a. Alttan damlatma yöntemi

Bu yöntem, Langmuir-Blodgett yönteminde nanokürelerin seyrek olarak kaplanmasından sonra sıvı-gaz arafazındaki nanokürelerin sıkıştırılması ve Si alttaşı yüzeyine daha yoğun şekilde ulaşması için kullanılmıştır. Bu yöntemde alttaşlar su içerisinde tutulmuştur. Nanoküreler su yüzeyinde yüzerken, alttaşın bulunduğu kabın altından serum hortumu yardımıyla damla damla su boşaltılmış ve nanokürelerin hepsinin örnek üzerine gelmesi olasılığını artırmak için hidroforik sıkıştırma diski adı verilen parça da kullanılmıştır (Görsel 4.5). Alttan serum hortumu ile dakikada 30 damla su boşaltılmıştır. Böylece, suyun seviyesi azaldıkça örnek üzerine gelen nanokürelerin alttaş üzerinde tek katman halinde kaplanması sağlanmıştır. Bu yöntem için hazırlanan düzenek Görsel 4.5'te görülmektedir. Şekil 4.14'te ise kaplama sonrası SEM görüntüsü görülmektedir.



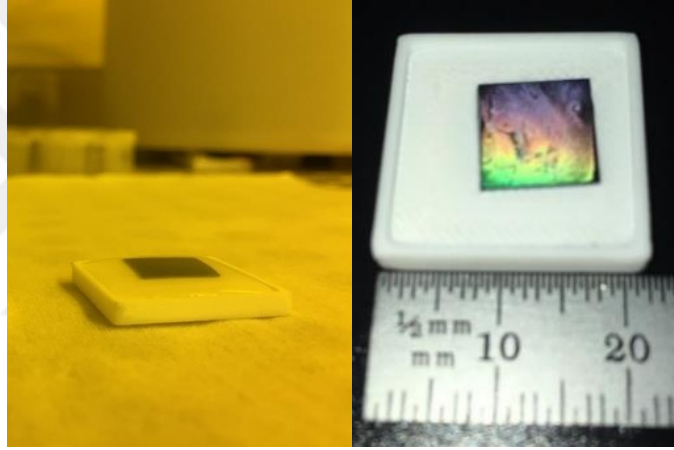
Görsel 4.5. Alttan damlatma yöntemi için hazırlanmış düzenek



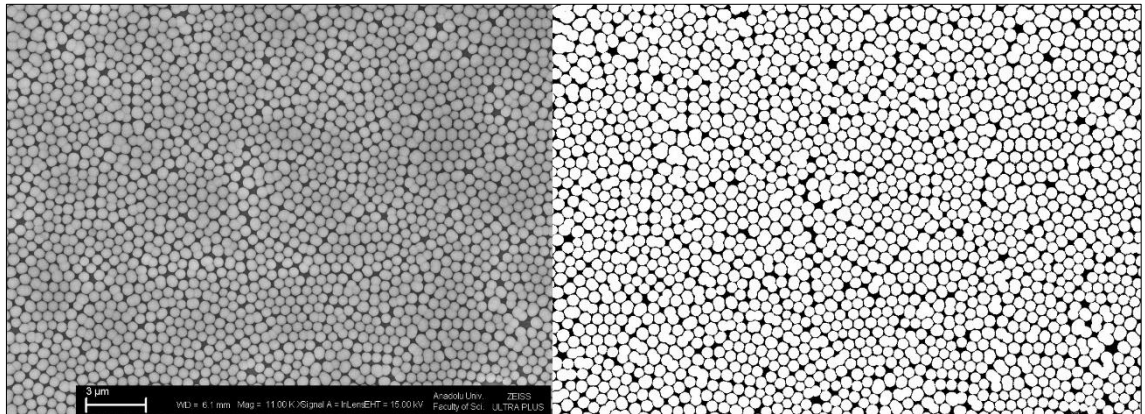
Şekil 4.14. Alttan damlatma yöntemi için kurulan düzenek ile yüzeye kaplanmış 1 µm'lik nanoküreler

b. Hidrofobik kap içerisinde kurutma yöntemi

Bu yöntemde nanokürelerin kap kenarlarından uzak durması için hidrofobik ABS malzemesi ile 3D yazıcıdan 1 mm derinlikte yuvarlak ve kare kaplar üretilmiştir. Kullanılan Si alttaşların ortalama kalınlığı 525 μm 'dir. 10×10 mm² Si alttaş kap içerisine yerleştirildikten sonra kap su ile doldurulmuştur. Su dolu kap üzerine mikro pipetor ile 60 μL 1:3 nanoküre:su solüsyonu eklenmiştir. Sonrasında örnekler, hem temiz oda (Görsel 4.6) hem de kuru hava atmosferinde desikatör içerisinde (Görsel 4.7) kurumaya bırakılmıştır. Şekil 4.15'da uygun miktarda nanoküre solüsyonu ve hidrofobik kap ile hekzagonal yapıların geniş yüzeylerde daha fazla oluşması ve yüksek kaplama oranlarına ulaşılmıştır.



Görsel 4.6. Hidrofobik kap içerisinde kurutma yöntemi için 3D yazıcı ile üretilmiş kaplar



Şekil 4.15. Kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi için üretilmiş 3D kaplar ile kaplanan 500 nm'lik nanoküreler



Görsel 4.7. *Kuru hava yardımıyla desikatör içerisinde kendiliğinden solvent buharlaştırma yöntemi deney düzeneği*

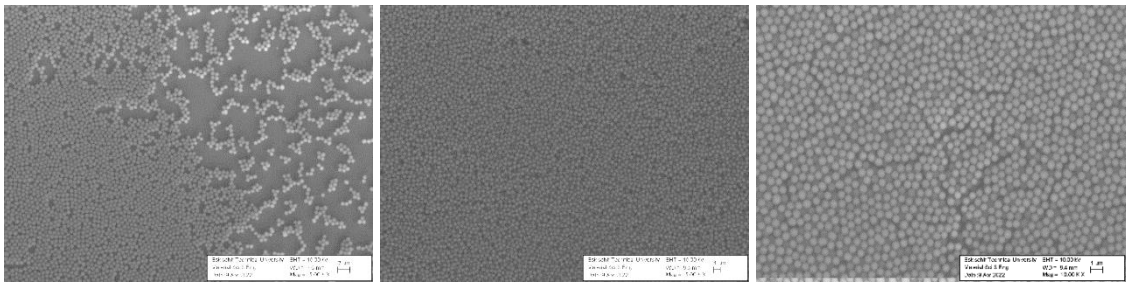
Farklı denemeler yapılan örnekler için bilgiler şöyledir:

U223: 120 μ l çözelti, 2 cm çaplı 3D yuvarlak kap, 5 μ l etanol, kuru hava

U226: 1:2 etanol:nanoküre, 15 μ l, kuru hava + soğuk su

U231: 10 μ l çözelti, kuru hava

Farklı parametrelerin denendiği bu yöntemde SEM resimleri (Şekil 4.16) incelendiğinde çoklu katman ve düşük yüzey kaplaması elde edilmiştir.



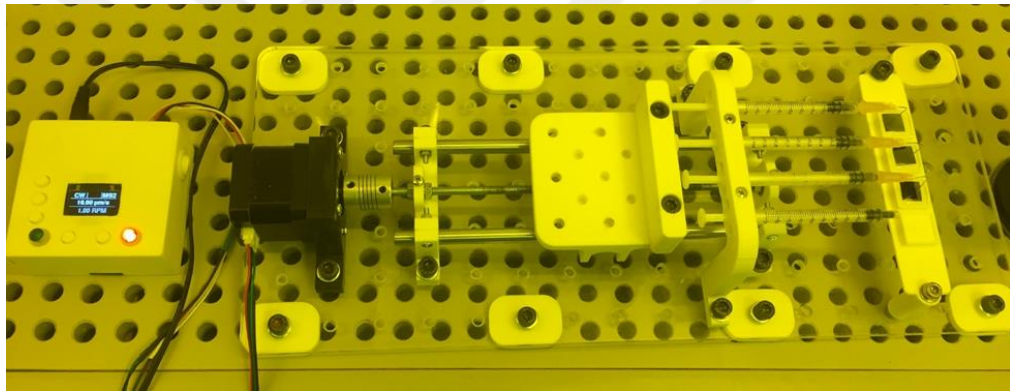
Şekil 4.16. *Sırasıyla U223, U226 ve U231 örneklerine ait yüzey SEM görüntüleri*

c. Şırınga düzeneği

Bu yöntemde, nanoküre solüsyonu, hassas lineer hareketli motor düzeği ($\sim 8 \mu\text{m/s}$) ile şırınga içerisinden hidrofobik kap içerisindeki örneklerin üzerine yavaşça damlatılmaktadır. Oldukça yavaş damlatma sonucunda nanokürelerin üst üste yığılması engellenmiştir. Nanoküre solüsyonunun dökme hızı ve miktarı, kaplama ve kuruma

süreçlerinin Time-Lapse özellikli kamera ile izlenmesi sonucunda optimize edilmiştir. Oluşturulan düzende farklı tipte alttaş tutucu ve farklı nanoküre derişimleri aynı anda denenebilmektedir (Görsel 4.8). Böylece, hidrofobik kap içerisinde ve temiz oda şartlarında buharlaştırma yöntemi ile yüksek kaplama oranı elde edilmiştir.

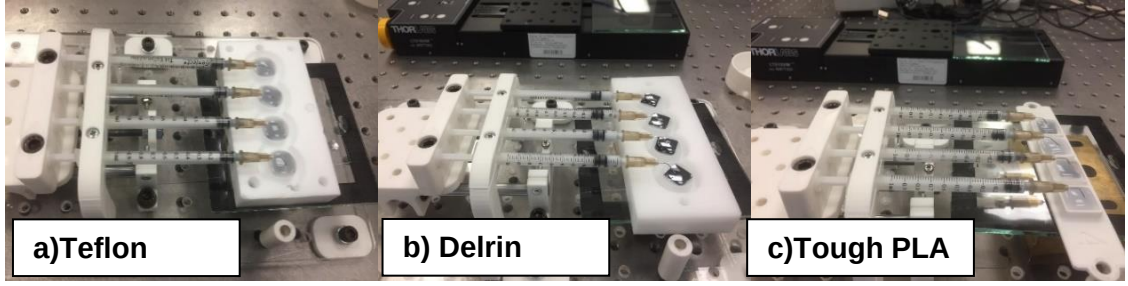
Şırınga düzeneğinde, toplam 60 µl nanoküre solüsyonunun 8,45 µm/s hız ile akıtılmış ve farklı hidrofobik alttaş tutucu ve solüsyon oranlarına göre denenmiş parametreleri Tablo 4.4'te görölmektedir. Hidrofobik özellik gösteren teflon, delrin ve Tough PLA malzemelerinden 10×10 mm² örnek için üretilmiş alttaş tutucuların kullanıldığı şırınga düzeneğine ait görseller Görsel 4.9'da görölmektedir. Görsel 4.9'daki düzeneklerle kaplanmış nanokürelere ait en yüksek yüzey kaplamalarının olduğu SEM görüntüleri ise Şekil 4.17'de görölmektedir.



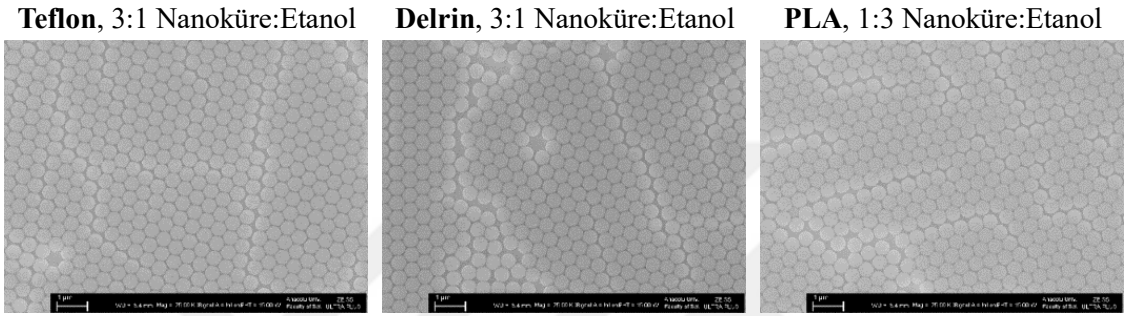
Görsel 4.8. Aynı anda 4 farklı konsantrasyonda nanoküre solüsyonu dökmek için hazırlanan hassas lineer hareketli şırınga düzeneği

Tablo 4.4. Hassas lineer hareketli şırınga düzeneğinde farklı oranlarda nanoküre solüsyonu ve farklı alttaş tutucu malzemeler ile hazırlanan örnekler

Örnek Kodu	Solüsyon Oranı (Nanoküre:Etanol)	Alttaş Tutucu Malzemesi
T1	1:1	Teflon
T2	2:1	
T3	3:1	
T4	1:3	
D1	1:1	Delrin
D2	2:1	
D3	3:1	
D4	1:3	
P1	1:1	Tough PLA
P2	2:1	
P3	3:1	
P4	1:3	

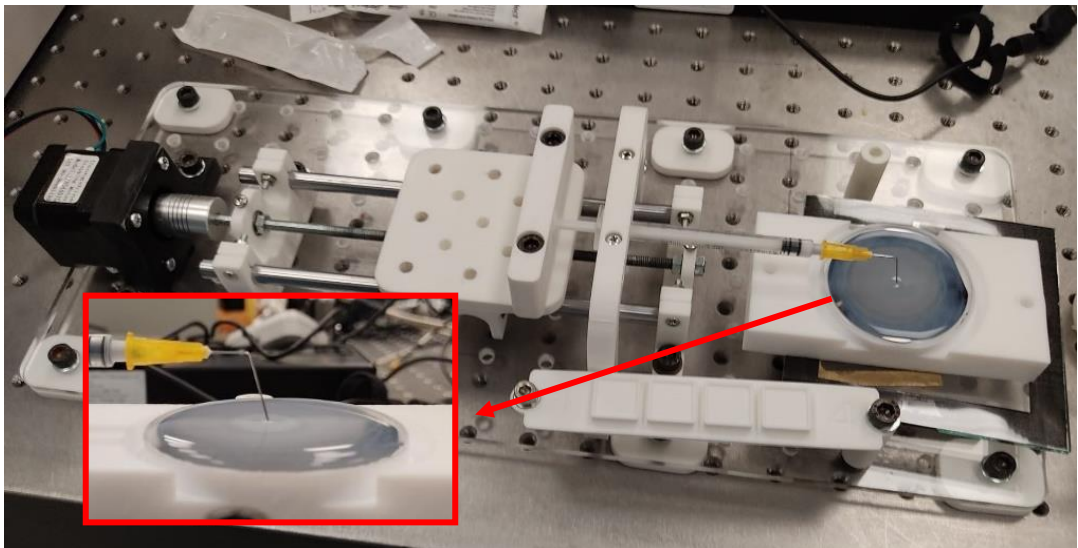


Görsel 4.9. Üç farklı hidrofobik alttaş tutucu malzeme ile hazırlanan şırınga düzeneği



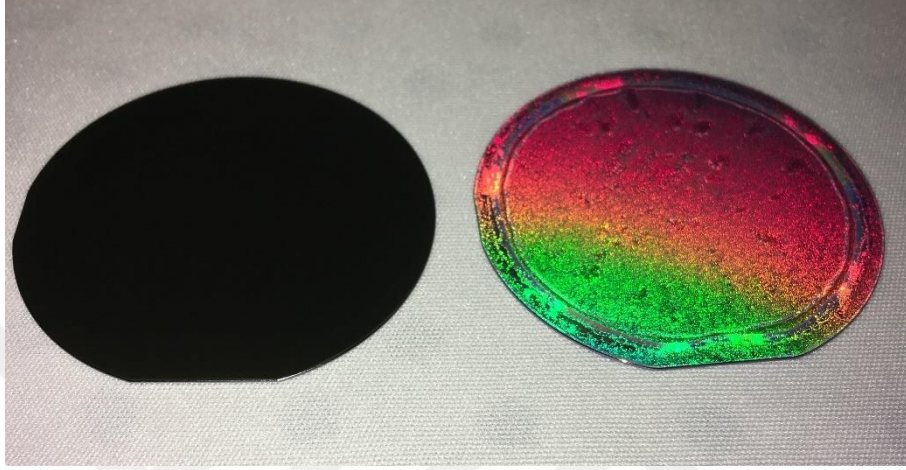
Şekil 4.17. Farklı alttaş tutucu malzeme ve solüsyon oranlarında denemelerde elde edilmiş en yüksek yüzey kaplamasına sahip örneklere ait yüzey SEM görüntüleri

Şekil 4.17’den anlaşıldığı kadarıyla, teflon alttaş tutucu ve 3:1 nanoküre:etanol solüsyon oranı yüksek yüzey kaplaması ve tek katman özellikleri açısından en uygun ve en iyi sonuçları vermiştir. 2 inç Si alttaş için de teflon alttaş tutucu üretilmiş ve kesilmemiş 2 inç Si alttaşlar düzenli desenleme çalışmasında kullanılmıştır (Görsel 4.10).

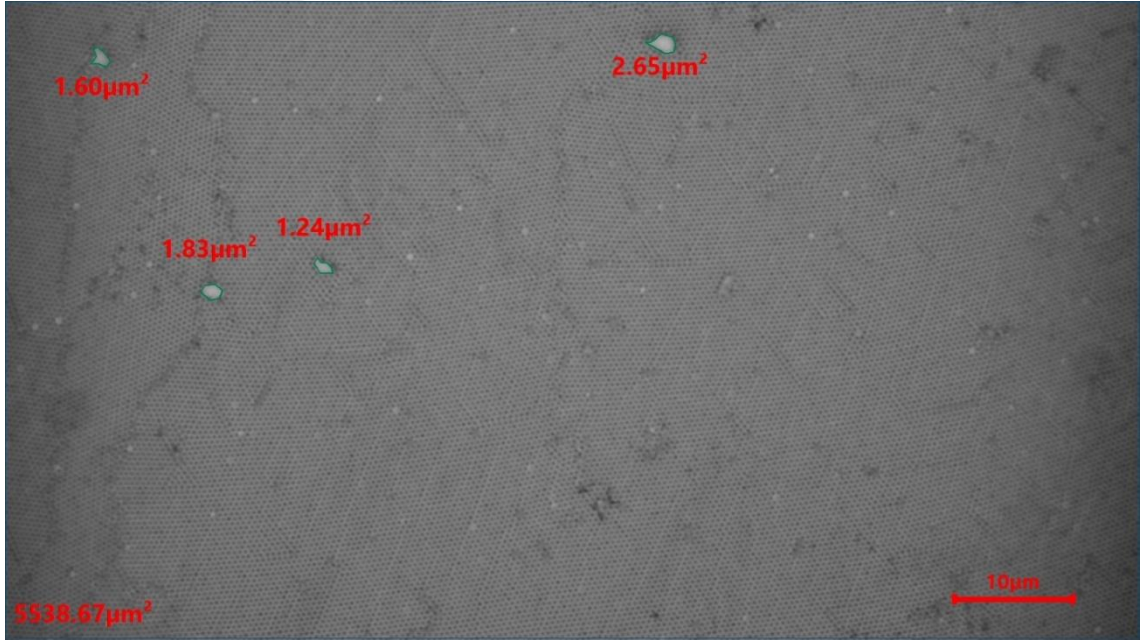


Görsel 4.10. Hassas lineer hareketli şırınga düzeneği ile 2 inç Si alttaşa nanoküre kaplanması

Görsel 4.11’de şırıngalı düzenekte nanoküre kaplanmış örnek ve kaplanmamış örnek görülmektedir. Flaş ışığı ile çekilen fotoğrafta, tek katman kaplanmış nanokürelî örnek, beyaz flaş ışığının kırılmasından dolayı farklı renklerde görülmektedir. Kaplanmış alttaşın optik mikroskop altındaki görüntüsü ise Şekil 4.18’de görülmektedir.



Görsel 4.11. İşlemsiz (solda) ve tek katman nanoküre kaplanmış (sağda) 2 inç Si alttaşlara ait görsel



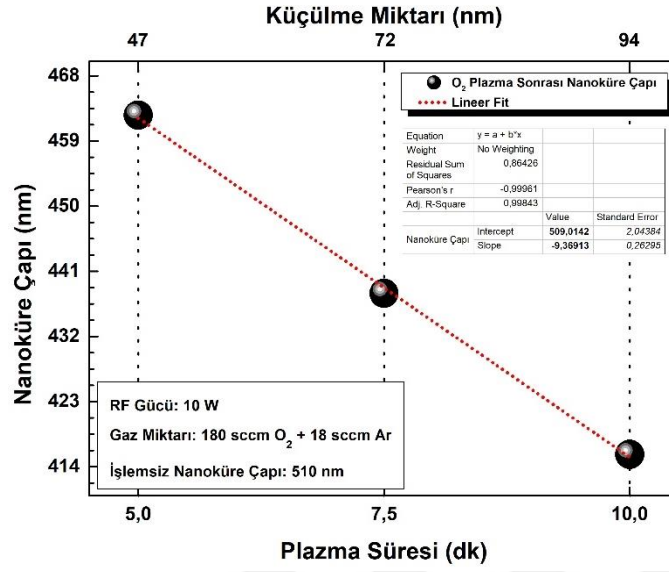
Şekil 4.18. Nanoküre kaplanmış 2 inç Si alttaşın optik mikroskop görüntüsü

Nanoküre kaplanmış tam alttaşın optik mikroskop görüntüsündeki toplam alan $\sim 5539 \mu\text{m}^2$ 'dir. Bu alan içerisindeki yaklaşık $\sim 7 \mu\text{m}^2$ alan boş kalmıştır. Şırıngalı düzeneğin,

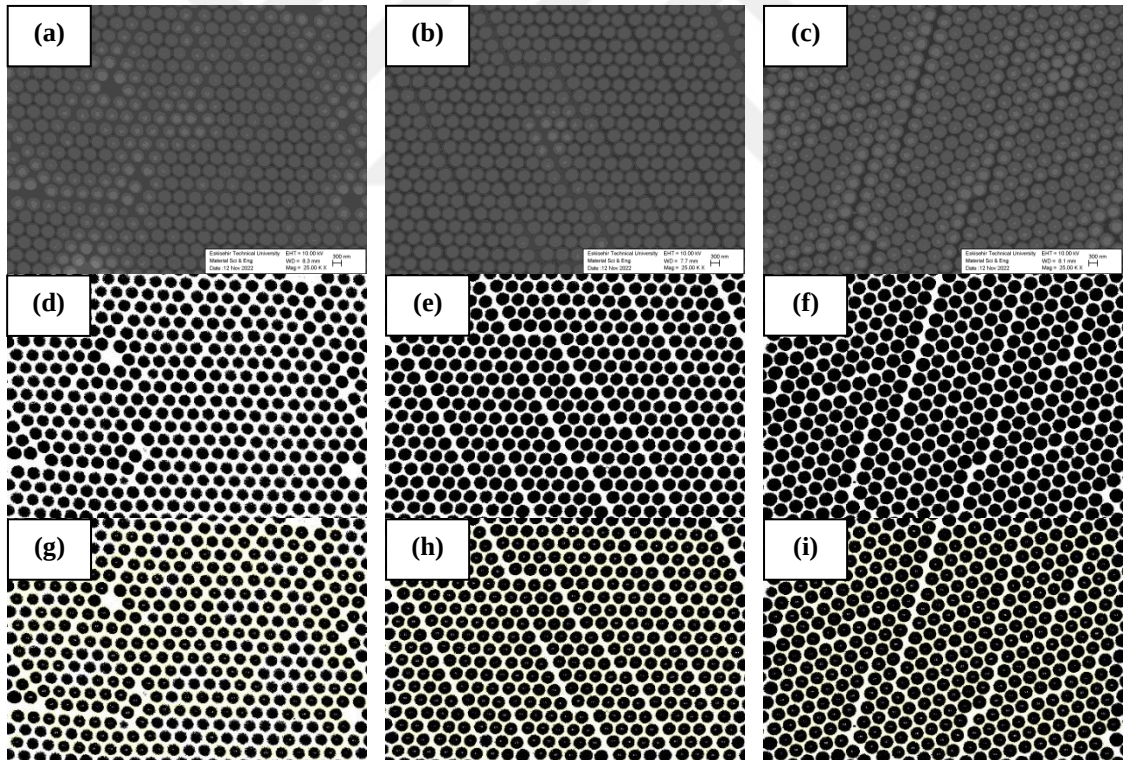
Şekil 4.18'den de anlaşılacağı üzere, 2 inç tam alttaşlara kadar olan alanlar için yüksek yüzey kaplaması eldesinde kullanılabileceği anlaşılmıştır.

4.1.2.4. Nanokürelerin küçültülmesi

Alttaş yüzeyine kaplanan nanokürelerin küçültülmesi işlemi PVD kaplama cihazında nanoküreler üzerine O₂ plazma uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın termal buharlaştırma haznesinde yer alan yatay tutucu üzerine tam alttaş yerleştirilmiş ve alttaş üzerine O₂ plazma uygulanarak nanoküre boyutları küçültülmüştür. Nanokürelerin çaplarının küçülmesi sonrasında aralarındaki boşluklar artmıştır. Bu işlem, MACE yöntemiyle yüzeyin desenlenmesini sağlamak için yapılmıştır. O₂ plazma uygulanan alttaşlardaki nanoküre küçültme oranlarının belirlenmesi için alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri çekilmiştir. ImageJ programında görüntülerin işlenmesi ile nanokürelerin boyutları istatistiksel olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.19'da O₂ plazma uygulama süresine karşılık nanokürelerin boyutlarının değişimi grafiği görülmektedir. Nanoküre çapının her dakikada yaklaşık 10 nm küçüldüğü elde edilen lineer fit işlemi ile anlaşılmıştır. Uygun küçültme oranları elde edildiğinde tüm örnekler aynı parametrelerde O₂ plazma uygulanmıştır. Bütün örnekler, 180 sccm O₂ ve 18 sccm Ar ortamında, 10 W güç uygulanarak 5 dk süresince O₂ plazma işlemine maruz bırakılmıştır. Plazma oluştururken, O₂'den daha ağır Ar gazı ilavesi, daha düşük güç değerleri ile aynı küçültme miktarını elde etmek için kullanılmıştır. Şekil 4.20a-c'de farklı sürelerde O₂ plazma uygulanmış örneklerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.20d-f'de ImageJ programı ile incelenen SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.20g-i'de ise ImageJ programı ile uygun nanokürelerin seçimi yapılmıştır.



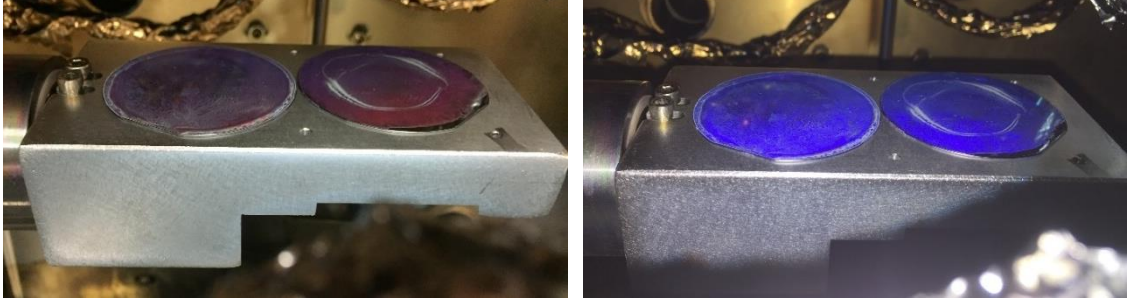
Şekil 4.19. 510 nm çapındaki nanoküre boyutlarının O₂ plazma uygulama süresine göre çaplarındaki küçülme grafiği



Şekil 4.20. a) 10 dk, b) 7,5 dk ve c) 5 dk O₂ plazma işlemi yüzey SEM görüntüleri, (d-e-f) ImageJ kullanılarak siyah-beyaz formatına dönüştürülmüş görüntüler, (g-h-i) ImageJ programı ile uygun nanokürelerin belirlenmesi

Yüzeydeki nanokürelerin çapına bağlı olarak yüzeyden yansiyacak/kırılacak ışığın dalgaboyu değişmektedir. Görsel 4.12’de O₂ plazma işlemi öncesi ve sonrası alttaşların

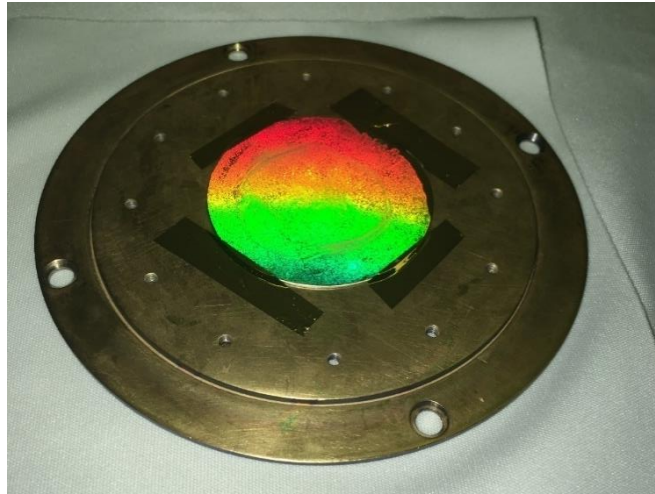
renk yansıtma karakterinin değişimi görülmektedir. Nanokürelerin boyutlarının küçülmesi ile yansıyan dalgaboyunda maviye kayma görülmektedir.



Görsel 4.12. Nanoküre kaplı 2 inç tam alttaşların O₂ plazma işlemi öncesi (solda) ve sonrası (sağda) görselleri

4.1.2.5. Metal tabaka kaplama ve aşındırma

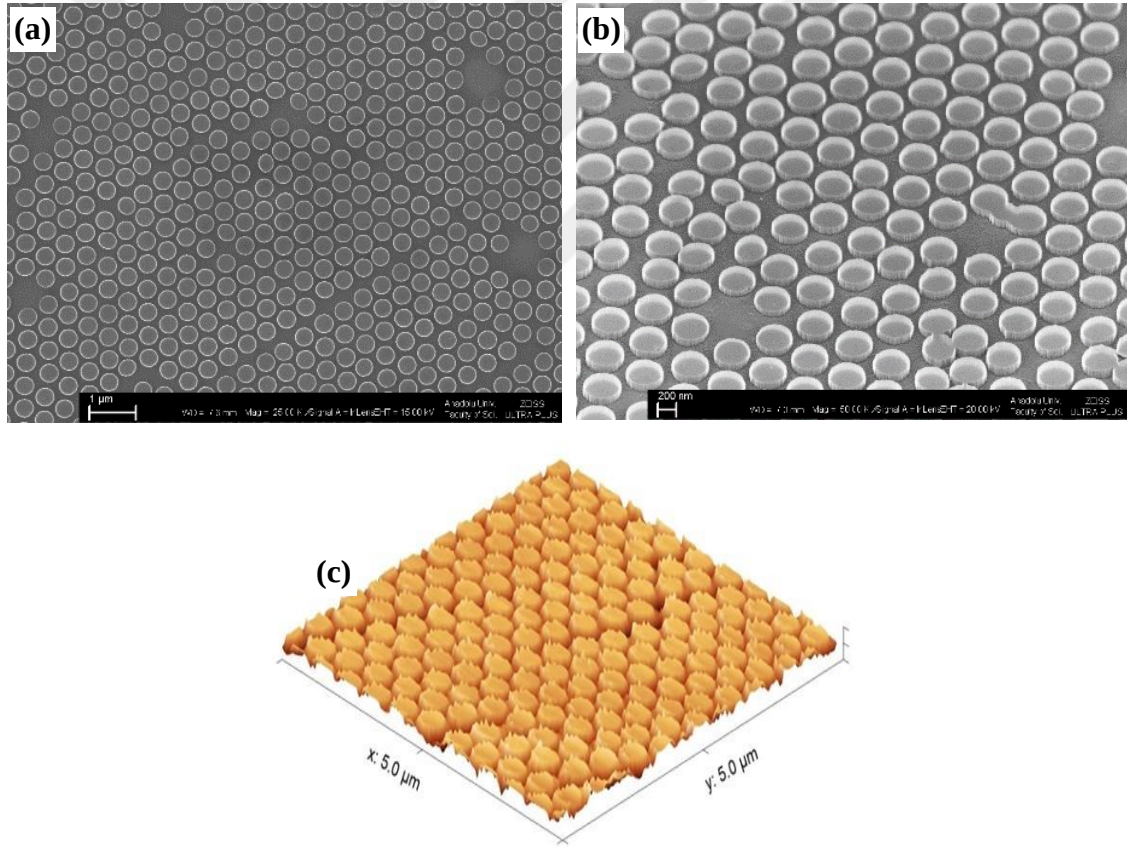
Optimum Au tabaka kalınlığını belirlemek için sistematik çalışmalar yapılmış ve 45 nm kaplama kalınlığı en uygun kalınlık olarak belirlenmiştir. Nanoküre kaplı tüm örneklerin yüzeyine, O₂ plazma işlemi sonrası, yaklaşık 45 nm kalınlığında Au tabaka elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile kaplanmıştır (Görsel 4.13). Kaplanan bu metal, MACE işleminde çekirdeklenme görevi görerek Si yüzeyinin aşınmasını sağlamaktadır.



Görsel 4.13. Altın kaplama sonrası 2 inç Si alttaş görüntüsü

MACE işlemi altın kaplı alttaşa uygulanmıştır. MACE işlemi ile alttaş üzerinde istenilen aşındırma derinliğini elde etmek için; çözelti sıcaklığı, çözeltideki kimyasalların oranı ve alttaşın çözelti içinde tutulma süresi gibi parametreler optimize edilmiştir. Au

kaplı örnekler, $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1:10) çözeltisi ile 10 s boyunca aşındırılmıştır. Aşındırma işleminden sonra, yüzeyde kalan nanokürelerin ve altın kaplamanın kaldırılması için örnekler önce aseton içerisinde ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Sonrasında örnekler, kalan Au kaplamanın tamamen temizlenmesi için, 80 °C'deki kral suyu çözeltisi (3:1 $\text{HNO}_3:\text{HCl}$) içerisinde yarım saat bekletilmiştir. MBE sistemine yükleme işlemi öncesinde HF ile alttaşın yüzey oksidi temizlenip büyütme işlemi için alttaş hazır hale getirilmiştir. Aşındırma miktarının takibi için AFM analizi yapılmış ve aşındırma derinliğinin ortalama 40 nm olduğu görülmüştür. Aşındırma sonrası örnek yüzeyinin SEM ve AFM görüntüleri Şekil 4.21'de ve 2 inç tam alttaşa ait aşındırma sonrası görüntü Görsel 4.14'te görülmektedir.

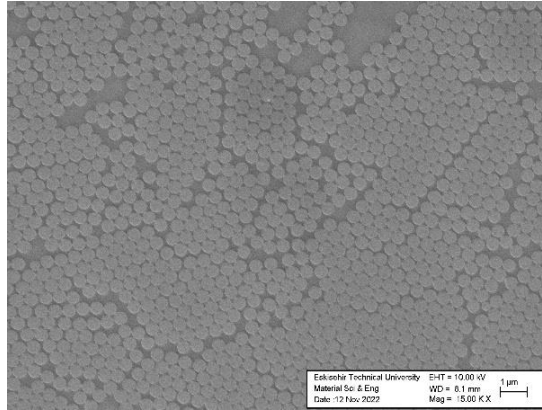


Şekil 4.21. MACE sonrası düzenli desenlenmiş örneğe ait (a) üstten, (b) 45° açı ile alınmış SEM ve (c) 5×5 μm^2 'den alınmış AFM görüntüleri



Görsel 4.14. MACE sonrası düzenli desenlenmiş büyütme işlemi için hazır 2 inç Si alttaş görüntüsü

Desenlenmiş bir Si alttaşın ELO işlemi sonrasında ihtiyacı olan tek temizlik, üzerinde büyütülmüş III-V grubu bileşiği olan GaAs tampon katmanının Piranha çözeltisi ile temizlenmesi ve tekrar MBE sistemine yüklenmeden önce HF ile yüzey oksitinin temizlenmesidir. Piranha ve HF işlemleri önceden Si alttaş üzerine oluşturulmuş nanoyapılara zarar vermemektedir. Bu sayede tekrar tekrar desenleme işlemine gerek kalmamaktadır. Şekil 4.22’de, düzenli desenlenmiş alttaş üzerine büyütülmüş bir örneğin Piranha çözeltisi ile temizlendikten sonra Si alttaş üzerinde desenleme işleminin hala kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.22. Piranha çözeltisi ile temizleme sonrası düzenli desenlenmiş Si alttaş SEM yüzey görüntüsü

4.2. Büyütme Çalışmaları

4.2.1. GaInP güneş hücresi büyütülmesi

MBE sisteminde büyütülecek GaInP güneş hücresi yapılarının karşılaştırılabilmesi için düzenli ve düzensiz desenlenmiş Si alttaşlar, 4° miscut Si alttaş ve GaAs alttaşlara

aynı yapılar büyütülmüştür. Büyütülmüş yapıların örnek kodu, alttaş tipi ve hücre yapısı Tablo 4.5’te görülmektedir.

Tablo 4.5. *Büyütülmüş örneklerle ait alttaş tipleri ve hücre yapıları*

Örnek Kodu	Alttaş Tipi	Hücre Yapısı
NB848	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB849	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB850	Si	ELO
NB861	GaAs	ELO
NB865	GaAs	ELO
NB868	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB869	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB885	GaAs	Alttaş tabanlı
NB886	GaAs	Alttaş tabanlı
NB887	DZD-Si (AgNO ₃)	Alttaş tabanlı
NB891	GaAs	ELO-kalibrasyon
NB892	GaAs	ELO-kalibrasyon
NB893	GaAs	ELO
NB894	GaAs	Alttaş tabanlı
NB914	GaAs	ELO
NB915	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB916	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB917	Si	ELO
NB918	Si (Miscut)	ELO
NB919	GaAs	ELO
NB920	Si (Miscut)	ELO
NB921	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB923	GaAs	ELO
NB924	GaAs	ELO
NB925	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB926	DLD-Si (Miscut)	ELO
NB927	GaAs	Alttaş tabanlı
NB941	GaAs	ELO
NB942	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB943	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB944	Si (Miscut)	ELO
NB945	Si (Miscut)	ELO
NB946	GaAs	ELO
NB947	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB948	DZD-Si (AgNO ₃)	ELO
NB949	Si (Miscut)	ELO
NB950	Si (Miscut)	ELO
NB951	Si (Miscut)	ELO
NB952	GaAs	ELO
NB953	Si (Miscut)	ELO
NB954	DLD-Si (Nanoküre)	ELO
NB955	DLD-Si (Nanoküre)	ELO

GaInP büyütme çalışmaları aygıt yapısı dahil olmak üzere farklı gruplara ayrılmıştır. Büyütme parametrelerin çok ciddi farklar bulunmasa da, gruplar arasında büyütme yaklaşımı, katman farklılıkları ve kalınlıkları bulunmaktadır. Her büyütülen örnek, karakterizasyon işlemleri sonucunda bir sonraki büyütülecek örnek için altyapı oluşturmuştur. Ayrıca, 2 inç Si alttaşlarda testler için yeterli örnek olmadığı durumlarda benzer örnekler küçük değişiklikler ile yeniden büyütülmüştür. Bu tez çalışması boyunca büyütülmüş örnekler (NB891, NB892 ve NB895 hariç) aygıt yapısında büyütülmüştür.

Büyütülen örnekler için alaşım konsantrasyonu, büyütme sıcaklığı, V/III oranı, kalınlık ve katkı kalibrasyonu işlemleri katkısız i-GaAs alttaşlar üzerine yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Büyütme sıcaklığı, GaAs tampon ve kontak katmanları için 620 °C, AlAs için 600 °C, GaInP ve AlInP için 550 °C olarak uygulanmıştır. V/III oranı GaAs katmanlar için 10, GaInP katmanlar için 15 olarak ayarlanmıştır. Alttaş tabanlı güneş hücresi aygıt yapıları p-GaAs üzerine, ELO tabanlı yapılar i-GaAs üzerine büyütülmüştür. Si üzerine büyütülmüş yapılar için önce GaAs tampon katmanı oluşturulmuş ve devamında GaInP hücre yapısı Si+GaAs hibrit alttaş üzerine büyütülmüştür. Şekil 4.23'te GaAs ve Si üzerine büyütülmüş GaInP nihai tek eklem güneş hücresi yapısı görülmektedir.

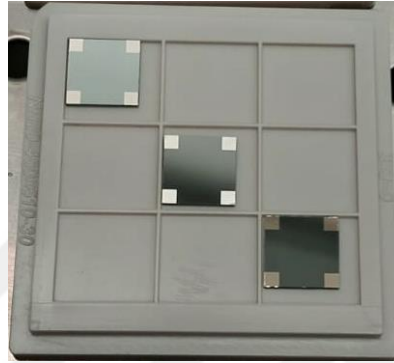
p++ GaAs Kontak Katmanı	p++ GaAs Kontak Katmanı
p GaInP Taban	p GaInP Taban
n+ Yayıcı GaInP	n+ Yayıcı GaInP
n+ AlInP BSF Katmanı	n+ AlInP BSF Katmanı
n++ GaAs Şapka Katmanı	n++ GaAs Şapka Katmanı
AlAs Ayırma Katmanı	AlAs Ayırma Katmanı
GaAs Alttaş	GaAs Tampon Katmanı
	Desenlenmiş veya 4° miscut Si Alttaş

Şekil 4.23. GaAs ve Si alttaşlar üzerine büyütülmüş GaInP tek eklem güneş hücresine ait katmanlar

GaInP bileşiğine ait katkı kalibrasyon ve alaşım konsantrasyonu için i-GaAs üzerine 1 µm kalınlığında GaInP n ve p katkılı ($>1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) iki ayrı örnek büyütülmüştür (NB891 ve NB892). $10 \times 10 \text{ mm}^2$ örnekler 1 mm² metal kontak Van der

Pauw geometrisi fotolitografi yöntemi ile aktarılmıştır (Görsel 4.15). Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 4.6’da görülmektedir.

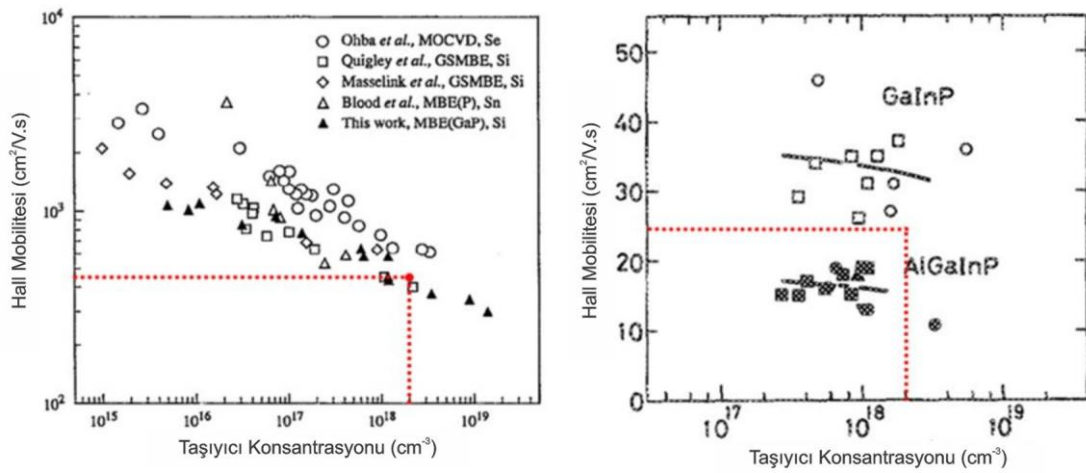
Katkı yoğunluğu-mobilite ölçüm sonuçları literatürde yapılmış diğer çalışmaların üzerinden kırmızı kesikli çizgiler ile belirtilmiştir. Şekil 4.24’te katkı kalibrasyon örneklerinden elde edilen mobilite değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Görsel 4.15. *i-GaAs alttaş üzerine ayrı ayrı iki farklı n v p tipi GaInP büyütülmüş ve Van der Pauw geometrisi kalibrasyon örnekleri*

Tablo 4.6. *Van der Pauw geometrisi örneklerinin ölçüm sonuçları*

Örnek Kodu	Katkı Yoğunluğu (cm^{-3})	Mobilite ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
NB891	$2,6 \times 10^{18}$ (n-tipi)	360
NB892	$2,8 \times 10^{18}$ (p-tipi)	23



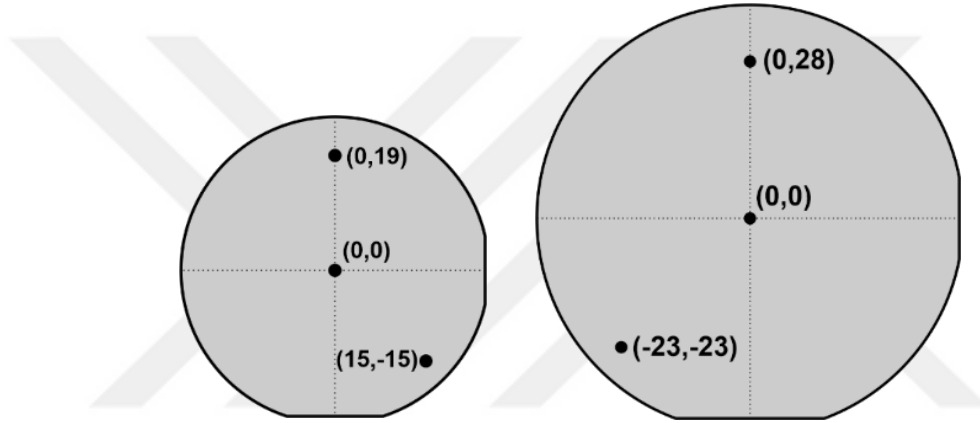
Şekil 4.24. *GaInP için farklı katkı yoğunluğu seviyelerine göre mobilite ölçüm sonuçları [57, 58].*

4.3. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Bu bölümde büyütülmüş örneklerin HRXRD, PL ve SEM ölçüm sonuçları bulunmaktadır.

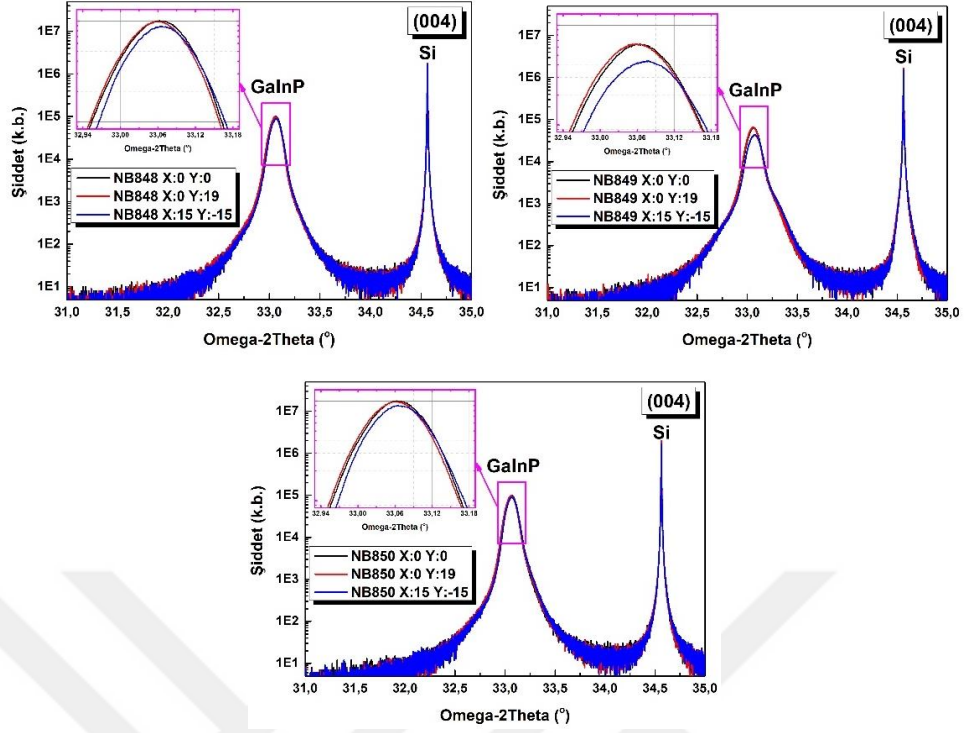
4.3.1. HRXRD

MBE büyütmesi sonrasında tam alttaş üzerinden uygun olması durumunda haritalama ve homojenlik kontrolleri için farklı noktalardan (004) sallantı eğrisi ölçümleri alınmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. HRXRD için 2 inç (solda) ve 3 inç (sağda) alttaşlarda ölçüm noktaları

Düzensiz, düzenli ve işlemsiz Si alttaş üzerine GaAs tampon katmanı ve üzerlerine GaInP tek eklem aygıt yapısı büyütülmüş ilk grup örneklerle ait sallantı eğrisi ölçümleri Şekil 4.26’da görülmektedir. Şekil 4.26’da görüldüğü gibi ilk grup örneklerde GaInP yapısı Si üzerine alttaş boyunca homojen olarak büyütülebilmektedir. Ölçümlerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7’de görülmektedir.

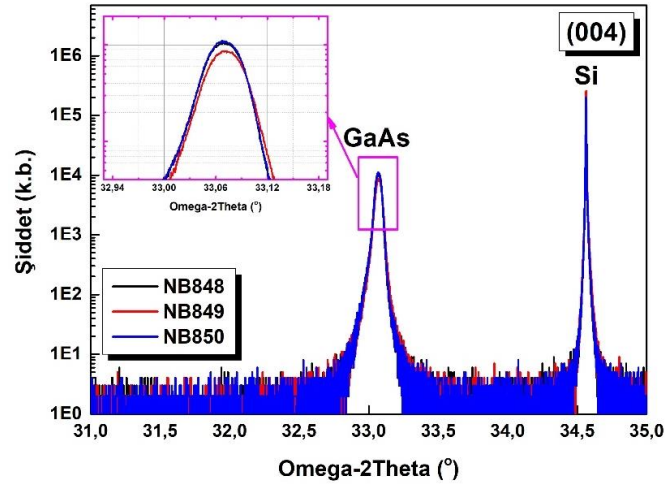


Şekil 4.26. İlk grup örneklerle ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları

Tablo 4.7. İlk grup örneklerle ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar

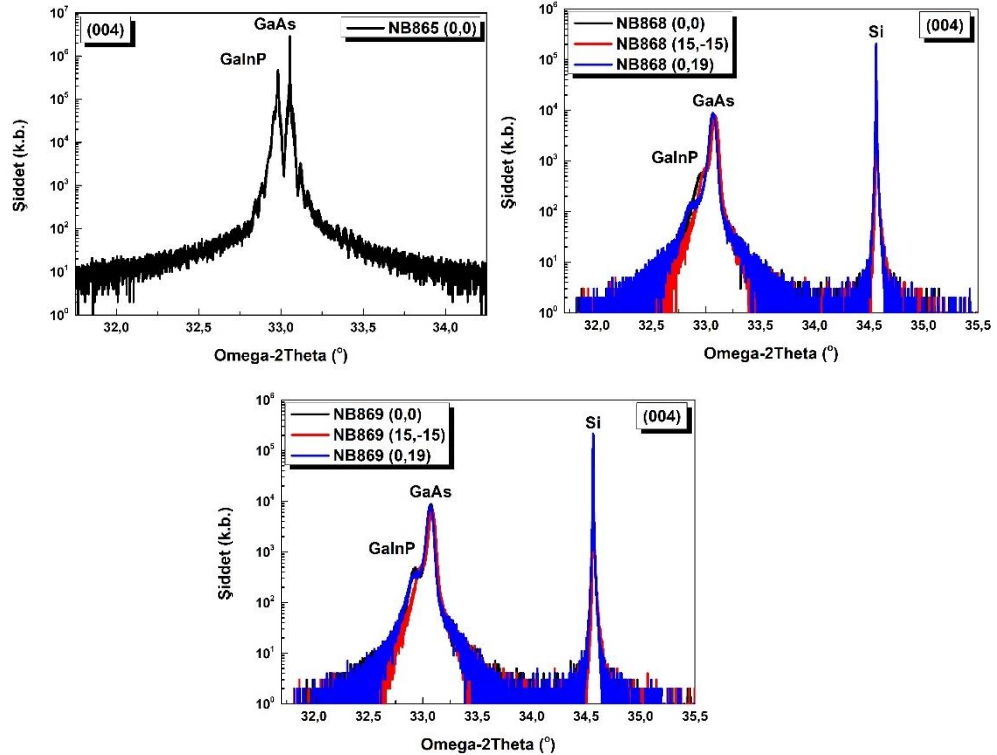
Örnek Kodu	FWHM (arcsec)			Ga (%)	In (%)
	(0,0)	(0,19)	(15,-15)		
NB848	389	389	392	54	46
NB849	422	430	443	53	47
NB850	387	389	390	54	46

Büyütülmüş GaAs tampon katmanının kalitesinin anlaşılması için $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 'lik örnekler kesilmiştir. GaInP katmanı ıslak aşındırma yöntemi ile GaAs tampon katmanına kadar aşındırılmıştır. Örneklerle ait (004) sallantı eğrisi Şekil 4.27'de görülmektedir.



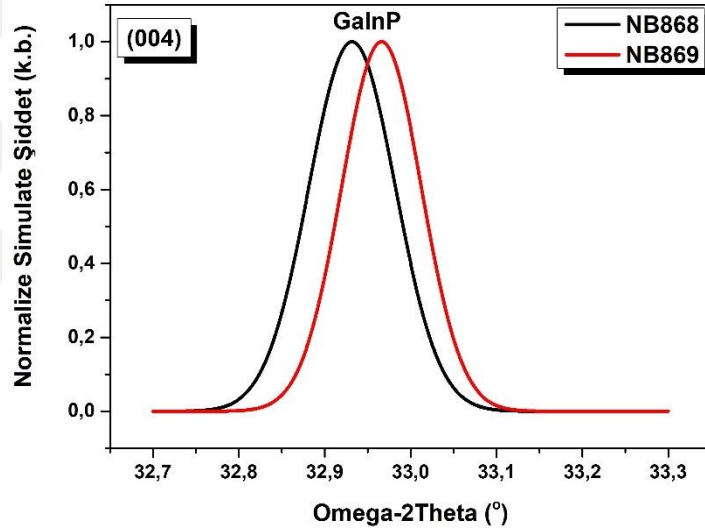
Şekil 4.27. Si üzerine büyütülmüş GaAs (004) sallantı eğrisi

Büyütülmüş GaAs tampon katmanlarının FWHM değeri yaklaşık 180 arcsec olarak ölçülmüştür. Kırınım şiddetlerinin ve tepe noktalarının da birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Çalışmada, işlemsiz Si alttaş üzerine büyütülmüş GaInP (NB850 örneği) aygıt yapılarından foto tepki alınamamıştır. İkinci grup örneklerde, GaAs alttaş üzerine yapılan referans yapının aynısı düzenli ve düzensiz desenlenmiş Si alttaşların üzerine de büyütülmüştür. Elde edilen sallantı eğrisi ölçüm sonuçları Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. İkinci grup örneklere ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları

İlk grup örneklerde Ga konsantrasyonunun %54 ölçülmesinden sonra MBE sisteminde Ga konsantrasyonu %50 olacak şekilde akı ayarlamaları yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ile GaInP katmanındaki Ga konsantrasyonu %50 olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.29'da NB868 ve NB869 örneklerine ait GaInP kırınım şiddetinin Gauss Fit yapılmış ve simüle edilmiş (004) sallantı eğrisi görülmektedir. Şekil 4.29 incelendiğinde GaAs alttaş üzerine büyütülen GaInP katmanının ppm mertebesinde GaAs ile örgü uyumsuz olduğu görülmektedir. Aynı GaInP yapısının düzenli ve düzensiz Si alttaşlar üzerine büyütülmesi sonucunda gerilme stresi altında GaInP kırınım tepesinin GaAs ile ayrıştığı görülmektedir. İkinci grup örneklerle elde edilmiş sonuçlar Tablo 4.8'de görülmektedir



Şekil 4.29. NB868 ve NB869 örneklerine ait Gauss Fit işlemi uygulanmış ve normalize edilmiş Gauss Fit verilerinin (004) sallantı eğrileri

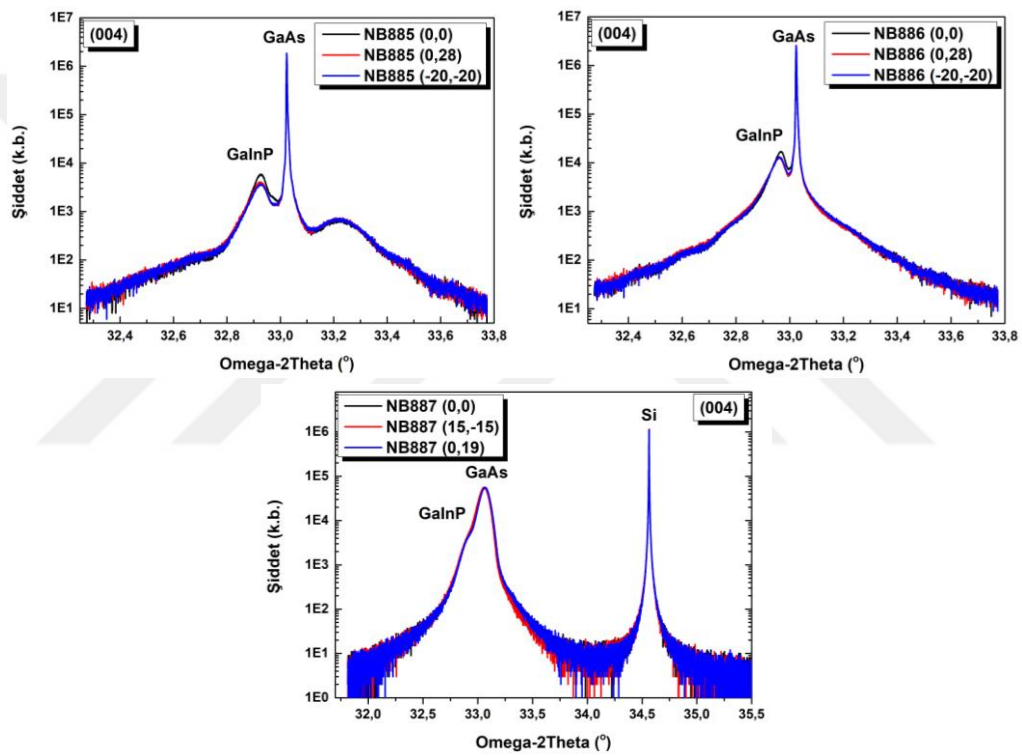
Tablo 4.8. İkinci grup örneklerle ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar

Örnek Kodu	GaAs FWHM (arcsec)	GaInP tepe (°)	GaInP FWHM (arcsec)	Ga (%)	In (%)
NB865	10	32,98	25	50	50
NB868	178	32,96	362	53	47
NB869	181	32,99	334	53	47

Ölçüm sonuçlarından, GaAs ve Si alttaşlar için büyütme parametrelerinin ayrı ayrı ayarlanması gerektiği anlaşılmıştır. GaAs katmanı ile örgü uyumsuzluğu oldukça düşük görülmektedir ancak önceki gruptaki gibi homojenlik söz konusu değildir. İlk grup örnekten sonra büyütme ara verildiği için fosfor hücresinin akı miktarında değişiklik

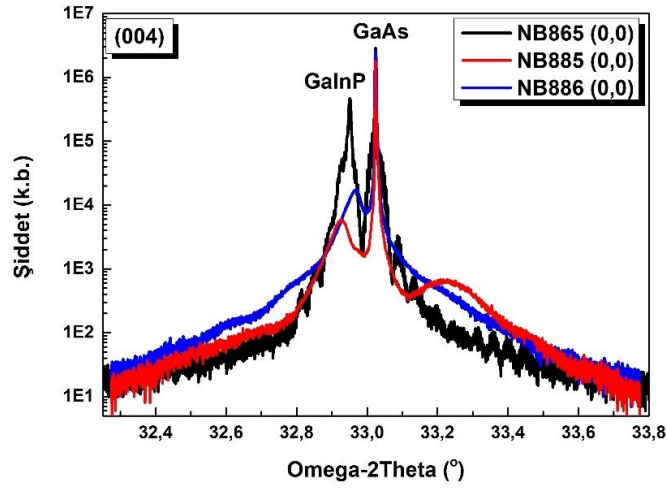
olabileceği düşünülmektedir. Akı farklılığından dolayı V/III akı oranı ve dolayısıyla elemental konsantrasyonundaki değişiklikler örneklerde farklılıklara yol açmaktadır.

Üçüncü grup örnekler, alttaş tabanlı tasarlanmıştır. NB885 ve NB886 p-GaAs üzerine, NB887 ise desenlenmiş Si alttaş üzerine büyütülmüştür (Şekil 4.30). p-GaAs üzerine büyütülmüş NB885 ve NB886 örneklerinde elektriksel alt kontak alttaştan alınmıştır. Si üzerine büyütülmüş tampon p-GaAs katmanı, NB887 örneğinde elektriksel alt kontak katmanı olarak kullanılmıştır.



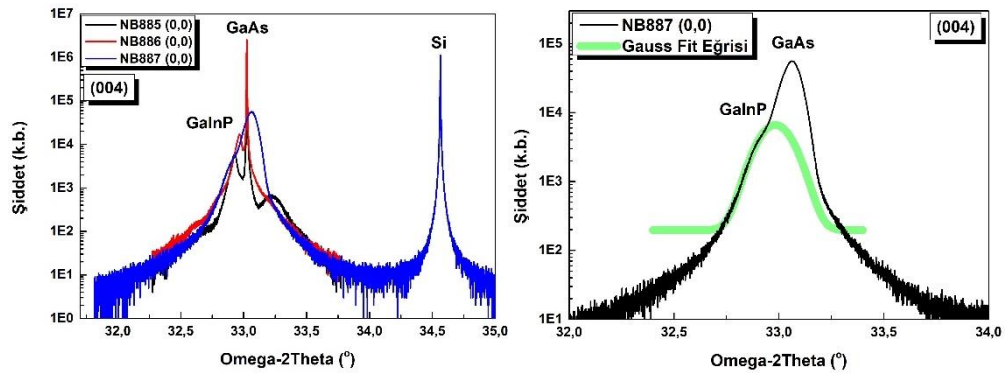
Şekil 4.30. Üçüncü grup örneklere ait (004) sallantı eğrisi ölçüm sonuçları

Üçüncü grup olarak büyütülen NB885 ve NB886 örnekleri, NB865 örneği ile aynı büyütme reçetesi kullanılarak ancak alttaş tabanlı olacak şekilde güncellenerek büyütülmüştür. NB885 kodlu örnekte, örgü uyumsuzluğu artmış ve GaInP katman kırınımın şiddeti oldukça azalmıştır. NB886 kodlu örnekte elemental konsantrasyon GaAs ile örgü uyumuna daha çok yaklaşmasına rağmen yine de NB865'in kırınım şiddetinin 100 kat altındadır (Şekil 4.31). Ayrıca, NB885'de amorf veya çok ince başka bir katman olduğu (Ga konsantrasyonu yüksek GaInP) (004) GaAs tepesinin sağ tarafında bulunan geniş tepe eğriden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.31. NB865 örneğine göre GaAs alttaş üzerine alttaş tabanlı büyütülen örneklerin (004) sallantı eğrisi karşılaştırılması

Üçüncü grup olarak büyütülen örneklerin genel olarak alttaş boyunca homojen olduğu farklı noktalardan alınan HRXRD ölçümleri ile görülmüştür. Si üzerine büyütülen GaAs tampon katmanının FWHM değeri ve kırınım şiddeti NB868 örneği ile benzerlik göstermektedir. Üçüncü grup örneklerin üst üste HRXRD eğrileri ve NB887'nin GaInP katmanının Gauss Fit işlemine göre simüle edilmiş eğrileri Şekil 4.32'de görülmektedir. Elde edilen veriler ise Tablo 4.9'da listelenmiştir.

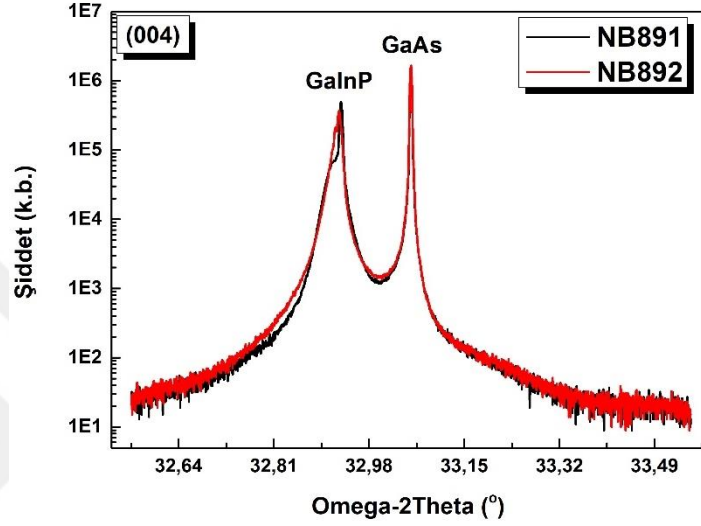


Şekil 4.32. Üçüncü gruba ait örneklerin (004) sallantı eğrileri

Tablo 4.9. Üçüncü grup örneklerine ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar

Örnek Kodu	GaAs FWHM (arcsec)	GaInP tepe (°)	GaInP FWHM (arcsec)	Ga (%)	In (%)
NB885	--	32,95	172	49	51
NB886	--	32,99	114	50	50
NB887	341	33,02	564	52	48

Ga konsantrasyonunun ayarlanması ve kırınım şiddetlerinin iyileştirilmesi için farklı büyütme parametreleri kullanılarak yeni örnekler büyütülmüştür. Şekil 4.33'te, katkı kalibrasyonu için büyütülmüş örneklerde, GaInP katmanının In konsantrasyonunun arttığı görülmektedir ve NB865 kadar yüksek bir kırınım şiddeti iki örnekte de mevcuttur. Elde edilen veriler Tablo 4.10'da görülmektedir.

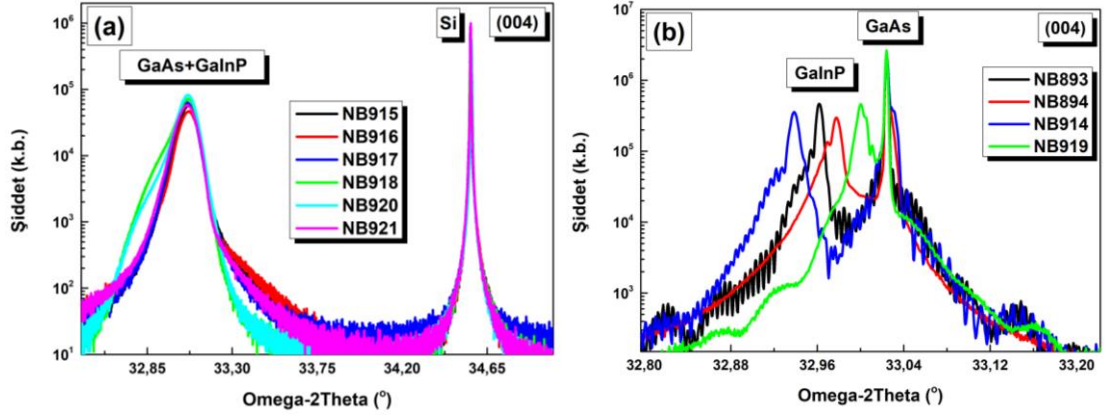


Şekil 4.33. i-GaAs üzerine büyütülen p ve n katkı kalibrasyon örneklerine ait (004) sallantı eğrileri

Tablo 4.10. i-GaAs üzerine büyütülen katkı kalibrasyon örneklerine ait HRXRD'den elde edilen sonuçlar

Örnek Kodu	GaInP Tepe (°)	GaInP FWHM (arcsec)	Ga (%)	In (%)
NB891	32,93	22	49	51
NB892	32,93	32	49	51

Düzenli veya düzensiz desenlenmiş Si alttaşlara ilave olarak 4° miscutlı Si alttaşların da kullanılmasına bu aşamada karar verilmiştir. Si ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülen örneklerin alttaşlarına göre ayrı ayrı (004) HRXRD eğrileri Şekil 4.34a ve Şekil 4.34b'de görülmektedir.



Şekil 4.34. (a) Si alttaşlar üzerine büyütülen örneklerin ve (b) GaAs alttaş üzerine büyütülen örneklerin HRXRD eğrileri

HRXRD eğrilerinde Si alttaş üzerine yapılmış örneklerin hepsinin (004) kırınım eğrilerinin üst üste olduğu görülmektedir. Buna karşın, GaAs alttaş üzerine büyütülmüş örneklerde, GaInP üçlü bileşiğinin farklı konsantrasyonlarda büyüdüğü görülmektedir. Ancak, Tablo 4.11’de kırınım eğrilerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, büyütülen katmanların GaAs ile aralarında ppm mertebesinde bir örgü uyumsuzluğu olduğu görülmektedir. GaAs üzerine büyütülmüş son örnek olan NB919 örneği, yüksek çözünürlükten ve yüksek kristal kalitesinden (GaAs alttaş ve büyütülen film için) kaynaklı olarak iki farklı kırınım şiddeti vermiş gibi görülmektedir. Si üzerine büyütülmüş GaInP katmanlarda ayrı iki kırınım şiddeti görülmemesi GaAs ile örgü uyumlu olduğunu göstermektedir. FWHM değerinin GaAs üzerine büyütülmüş örneklerden daha geniş olması da Si üzerine büyütülmüş GaAs tampon yapısı ile GaInP kırınım şiddetlerinin birbiri içerisinde kaybolmasına sebep olmaktadır. Kırınımına ait elde edilen değerler Tablo 4.11’de görülmektedir.

Tablo 4.11. GaAs ve Si alttaşlar üzerine büyütülen GaInP örneklerine ait HRXRD ölçüm sonuçları

Örnek Kodu	Alttaş Tipi	GaInP Kırınımı		Ga (%)	In (%)
		Tepe açısı (°)	FWHM (arcsec)		
NB893	GaAs	32,96	22	50	50
NB894	GaAs	32,98	24	50	50
NB914	GaAs	32,94	31	50	50
NB915	Si-DZD	33,07	350	53	47
NB916	Si-DLD	33,07	365	53	47
NB917	Si-İşlemsiz	33,06	343	53	47
NB918	Si-Miscut	33,07	374	50	50
NB919	GaAs	33,00	37	51	49

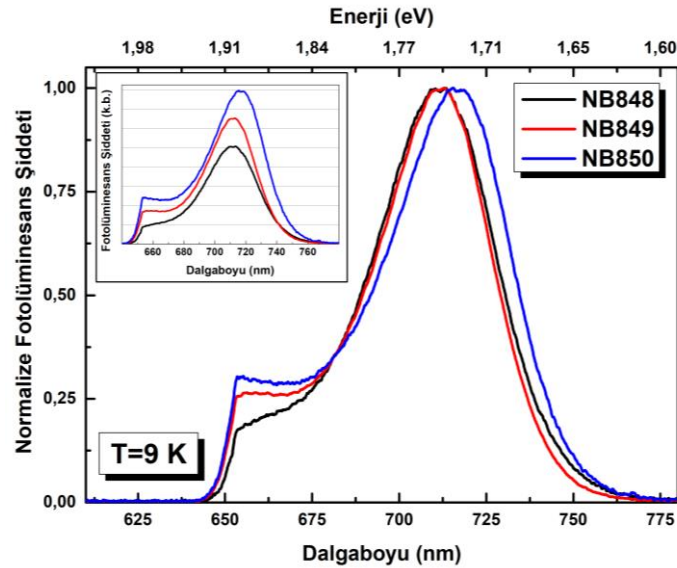
Tablo 4.11 devamı.

NB920	Si-Miscut	33,07	345	50	50
NB921	Si-DZD	33,06	380	53	47
NB923	GaAs	32,86	25	48	52
NB924	GaAs	32,99	29	51	49
NB925	Si-DZD	33,06	401	53	47
NB926	Si-Miscut	33,06	363	53	47
NB927	GaAs	32,98	26	51	49
NB941	GaAs	32,97	24	52	48
NB942	Si-DLD	33,06	372	53	47
NB943	Si-DLD	33,06	361	53	47
NB944	Si-Miscut	33,09	312	49-54	51-46
NB945	Si-Miscut	33,09	301	49-54	51-46
NB946	GaAs	32,85	38	48	52

4.3.2. PL

İlk grup örneklerin hiçbiri oda sıcaklığında ışıma yapmamıştır. Bundan dolayı kreostat içerisinde 9 K sıcaklığında PL ölçümü yapılmıştır.

Şekil 4.35'te ilk grup örneklerle ait normalize PL spektrumu görülmektedir. Inset grafikte ise birbirlerine göre sinyal şiddetleri kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen bilgiler Tablo 4.12'de görülmektedir.



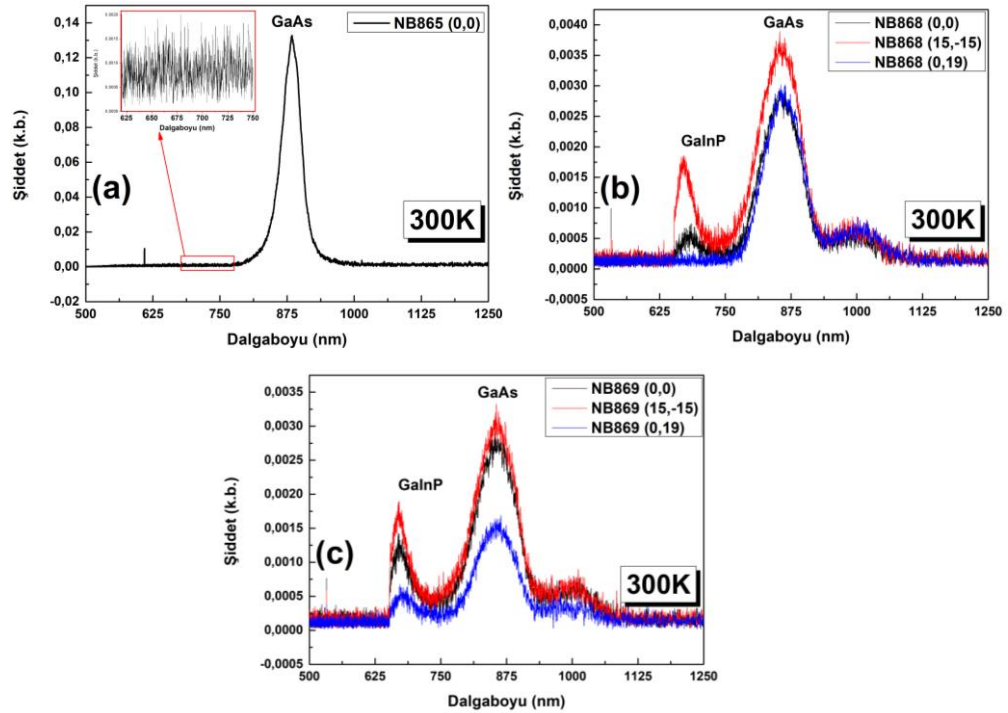
Şekil 4.35. 9 K sıcaklıktaki ilk grup örneklerin PL eğrileri

Tablo 4.12. İlk grup örneklerde PL ölçüm verileri

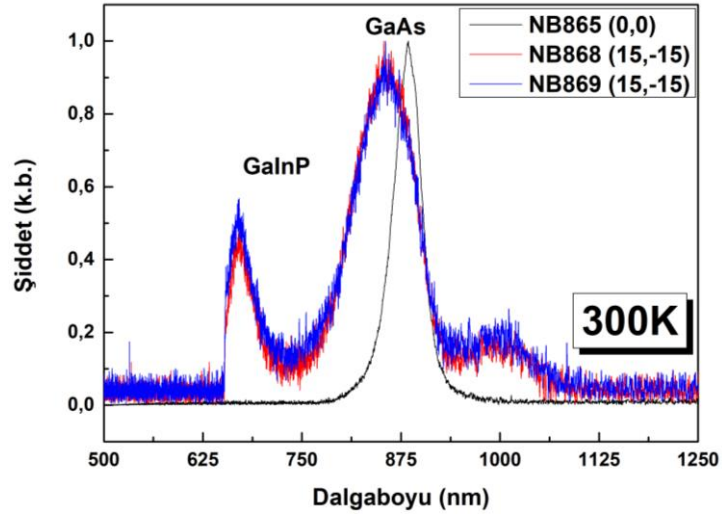
Örnek Kodu	PL Tepe Noktası (nm)	PL Tepe Noktası (eV)
NB848	712	1,74
NB849	712	1,74
NB850	715	1,73

İkinci grup örneklerde oda sıcaklığında ışıma görülmüştür. Ancak, NB865 örneğinde GaAs şapka katmanı bulunduğu için GaInP katmanından PL şiddeti alınamamıştır (Şekil 4.36a). NB868 ve NB869'a ait PL eğrileri Şekil 4.36b-c'de görülmektedir.

NB868 ve NB869 örneklerinde (15,-15) mm noktalarından elde edilen ışımların hem şiddet hem ışıma tepe dalgaboyunda çok uyumlu oldukları anlaşılmaktadır (Şekil 4.37). Ancak, GaAs katmanı incelendiğinde gerilmeden kaynaklı olarak ışıma tepe dalgaboyunun maviye kaydığı görülmektedir. Bu durum, desenlenmiş Si alttaşların yeterli miktarda kristalde rahatlama oluşturamadığını ve Si alttaş desenleme çalışmalarında derinlik ve yüzeyde oluşturulan nanoyapıların büyüklükleri ile ilgili başka parametrelerin denenmesi gerektirdiğini göstermektedir. Desenlenecek Si alttaşlarda daha sığ aşındırma için seyreltilmiş aşındırma çözeltileri kullanılmıştır.

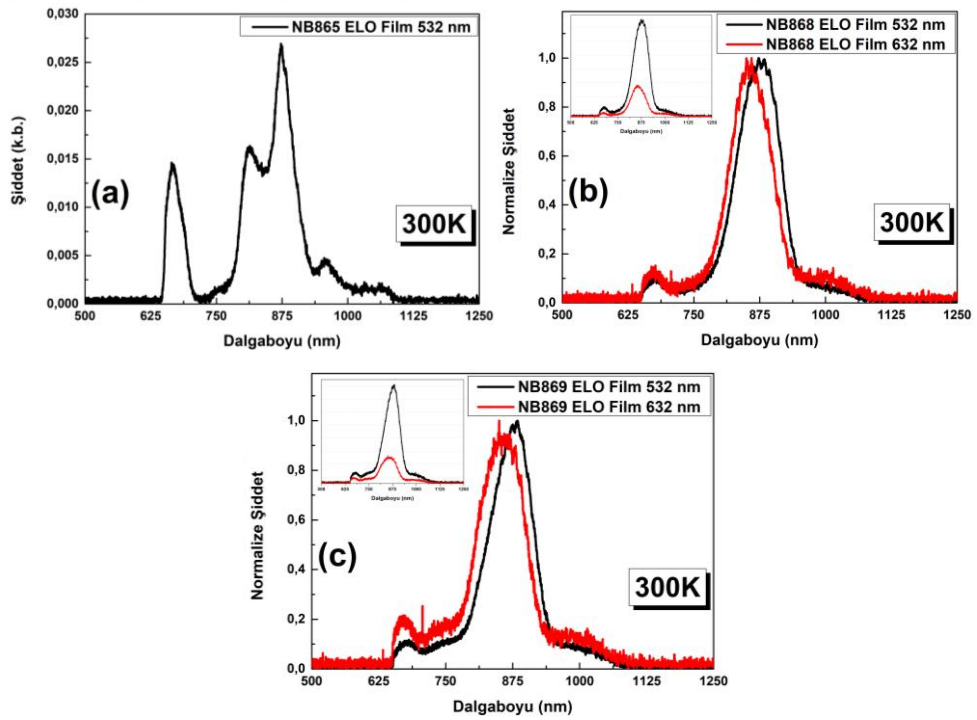


Şekil 4.36. (a) Şapka katmanı aşındırılmamış NB865, (b) NB868 ve (c) NB869 300 K'de PL ışıma eğrileri



Şekil 4.37. NB865, NB868 ve NB869 örneklerinin normalize PL şiddet eğrileri

İkinci grup örneklerde, ilk grup örneklerden farklı olarak, kontak şapka katmanını sitrik asit çözeltisi ile kaldırıldıktan sonra ışımaya görülmüştür. PL ışınları iki farklı dalgaboylu ve güçteki lazerler kullanılarak yapılmıştır. 532 nm (yeşil) 100 mW ve 632 nm (kırmızı) 30 mW güçteki lazerler ile yapılan ölçümler Şekil 4.38’de görülmektedir.



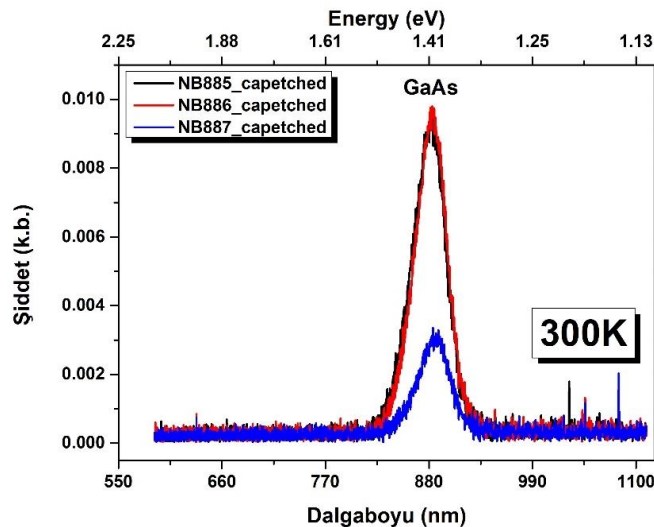
Şekil 4.38. (a) Şapka katmanını aşındırılmış NB865, (b) NB868 ve (c) NB869 300 K’de esnek ince filmlere ait PL eğrileri

Şekil 4.38a’da NB865 numaralı örnek 632 nm lazer ile uyarılamamıştır. Şekil 4.38’da 650 nm civarında görülen ışımlar GaInP katmanına, 875 nm’de görülen ışımlar GaAs katmanına aittir. ELO işlemi yapılmadan önce 855 nm’de ışıma yapan GaAs katmanları ELO işleminde sonra rahatlamış ve olması gereken 875 nm’de ışıma yapmaya başlamıştır. ELO işlemi sonucunda ince filmlerdeki stresin rahatladığı bu kaymadan anlaşılmaktadır. NB865 numaralı örnekte 812 nm’de bulunan şiddet ise fabrikasyon bölümünde de bahsedileceği üzere ELO sürecinde alttaştan kırılarak ayrılan ince filmten kaynaklıdır. Gerilmeden dolayı buradaki farklı dalga boyundaki PL sinyali, ağır boşluk ve hafif boşluk bandındaki yarılmalardan kaynaklı olmaktadır. PL ölçümlerinden elde edilen değerler Tablo 4.13’te görülmektedir.

Tablo 4.13. İkinci grup örneklerde PL ölçüm verileri

Örnek Kodu	Tepe Dalgaboyu (nm)		Tepe Enerjisi (eV)	
	GaAs	GaInP	GaAs	GaInP
NB865	884	--	1,40	--
NB865 ELO	872	666	1,42	1,86
NB868	854	670	1,45	1,85
NB868 ELO	875	680	1,41	1,82
NB869	855	670	1,45	1,85
NB869 ELO	871	674	1,42	1,83

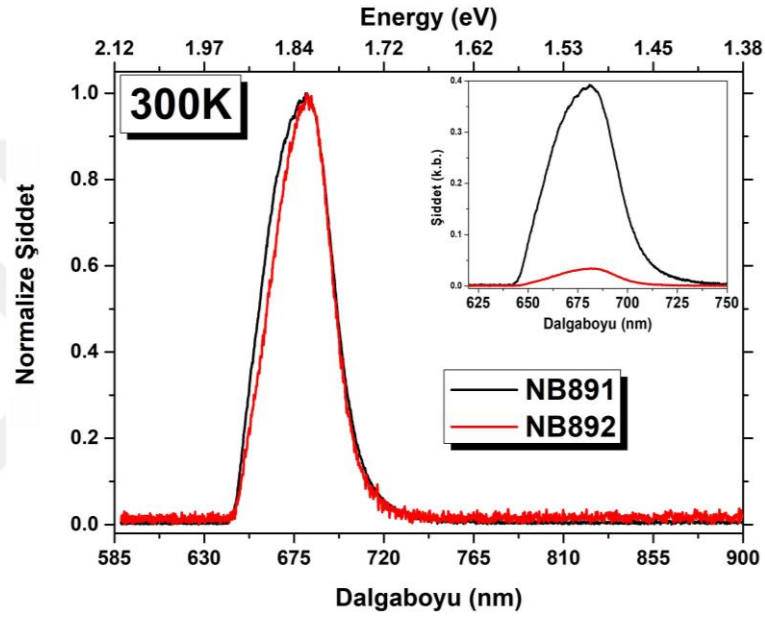
Üçüncü grup örneklerin PL ölçümleri için öncelikle en üstte bulunan GaAs kontak şapka katmanının kaldırılması gerekmiştir. Sitrik asit çözeltisi ile GaAs kontak katmanı aşındırıldıktan sonra örneklerle ait PL eğrileri Şekil 4.39’da görülmektedir.



Şekil 4.39. Şapka katmanı aşındırılmış üçüncü grup örneklerin PL eğrileri

Şekil 4.39’da PL ışıması sadece GaAs katmanında görülmektedir. GaInP katmanından ışıma görülmemiştir. p-GaAs alttaş üzerine büyütülen NB885 ve NB886 örneklerinin GaAs PL şiddetinin benzer şiddette ışıma yaptığı ancak Si alttaş üzerine büyütülen NB887’in 5 kat daha az ışıma şiddeti olduğu görülmektedir.

Katkı kalibrasyon örneklerinde şapka kontak katmanı olmadığı için doğrudan PL ölçümleri yapılmıştır. PL eğrileri Şekil 4.40’te verilmiştir.



Şekil 4.40. Katkı kalibrasyon örneklerinin normalize PL şiddeti eğrileri

NB891 ve NB892 örneklerinin PL ölçümlerinde n katkılı NB891 örneği oldukça yüksek PL ışıma şiddetine sahiptir. NB892 örneği de önceki örneklere göre yüksek PL şiddetine sahiptir ve aralarında 11 kat PL ışıma şiddeti bulunmaktadır. Önceki örneklere göre GaInP katmanının toplam kalınlığı aynı olsa da soğurma katsayısının yükseldiği GaAs alttaştan gelen PL şiddeti olmamasından anlaşılmaktadır. PL ölçümlerinden elde edilen değerler Tablo 4.14’te görülmektedir.

Tablo 4.14. GaAs alttaş üzerine büyütülen n ve p katkı kalibrasyon örneklerinde PL ölçüm verileri

Örnek Kodu	PL Tepe Işıması (nm)	PL Tepe Işıması (eV)
NB891	680	1,82
NB892	681	1,82

Üst şapka GaAs katmanı aşındırılarak ve örnekler soğutulularak PL ölçümleri yapılmıştır. Oda sıcaklığında kızılötesi bölgesinin başlangıcında bulunan yasak enerji aralığı örneklerin soğutulması ile görünür bölgeye kaymış ve PL ölçümü sırasında göz ile görülebilir kırmızı ışık yaymaya başlamıştır. Görsel 4.16’da 10 K sıcaklıktaki örnek üzerine odaklanmış 532 nm dalgaboylu yeşil lazer ile uyarılan NB914 örneğinin kırmızı ışıması görülmektedir.



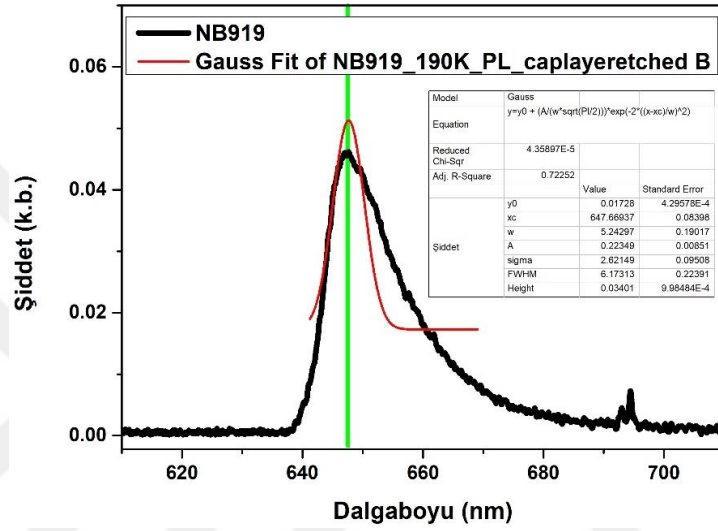
Görsel 4.16. NB914 numaralı örneğin 10 K sıcaklıktaki ışıması

Farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde, örneklerin ışımalarının tepe dalgaboylarına ait enerji değerleri Tablo 4.15’te görülmektedir. Tablodaki boş değerler, ilgili sıcaklıklarda, o örneklerden ışıma alınamadığını göstermektedir.

Tablo 4.15. PL ölçümünden elde edilen değerler

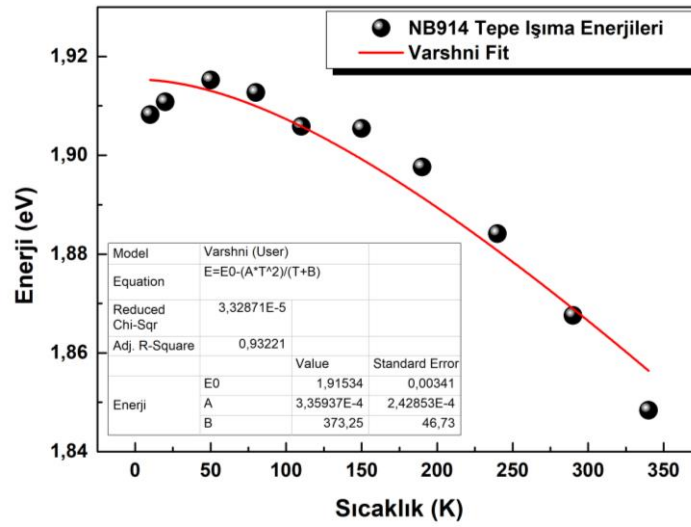
Sıcaklık (K)	Işıma Tepe Dalgaboyu Enerjisi (eV)							
	NB914	NB915	NB916	NB917	NB918	NB919	NB920	NB921
10	1,908	1,812	1,740	1,845	1,853	1,902	1,850	1,825
20	1,911	1,810	1,767	1,839	1,861	1,901	1,862	1,815
50	1,915	1,738	1,748	1,840	1,861	1,899	1,850	1,782
80	1,913	1,714	1,737	1,838	1,861	1,899	1,818	1,737
110	1,906	1,702	1,716	--	1,867	1,899	1,883	1,711
150	1,905	1,699	1,692	--	1,887	1,903	1,886	1,697
190	1,898	--	--	--	1,893	1,915	1,881	--
240	1,884	--	--	--	1,891	1,901	1,887	--
290	1,868	--	--	--	1,878	1,886	1,874	--
340	1,848	--	--	--	1,861	1,865	1,859	--

Işımanın dalgaboyunun tepe noktası yasak enerji aralığı ile ilgili bilgi vermektedir. Ancak, büyütülen GaInP katmanlarının ışıma eğrilerinde tüm sıcaklıklarda asimetri görülmüştür. Şekil 4.41’de NB919 örneğine ait 190 K sıcaklıktaki ışıma eğrisi görülmektedir. Işımanın asimetrik olmasından dolayı Gaussian Fit işlemi uygulanmıştır. Düşük enerjili bölgede (ışıma tepesinin sağında) görülen asimetrisinin, bant kenarlarındaki kuyruklardan (band tail) meydana gelmektedir.



Şekil 4.41. NB919 örneğine ait 190 K sıcaklıktaki PL eğrisi

Şekil 4.42’de farklı sıcaklıklarda alınan PL ölçümlerinde tepe dalgaboyuna denk gelen ışıma enerjisi fit işlemleri ile elde edilmiştir. Varshni empirik formülünü uygulamak için yasak enerji aralığının sıcaklığa göre grafikleri her bir örnek için çizdirilmiştir. Elde edilen grafikten Varshni empirik formülü için fit işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.42’de NB914’ün enerji sıcaklık grafiği görülmektedir.



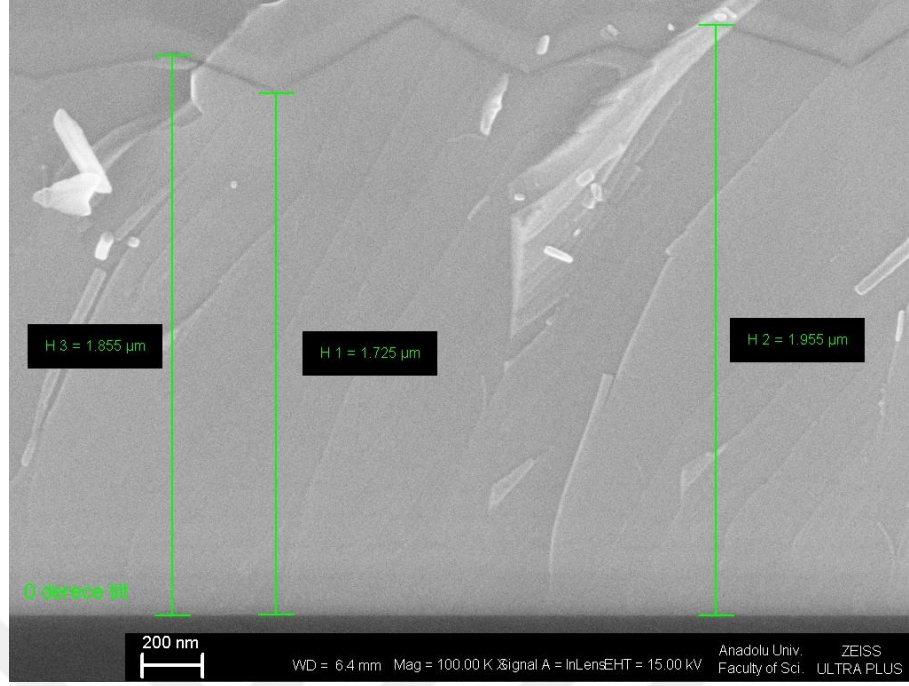
Şekil 4.42. NB914 örneğinin tepe ışıma enerjisi sıcaklık grafikleri

4.3.3. SEM

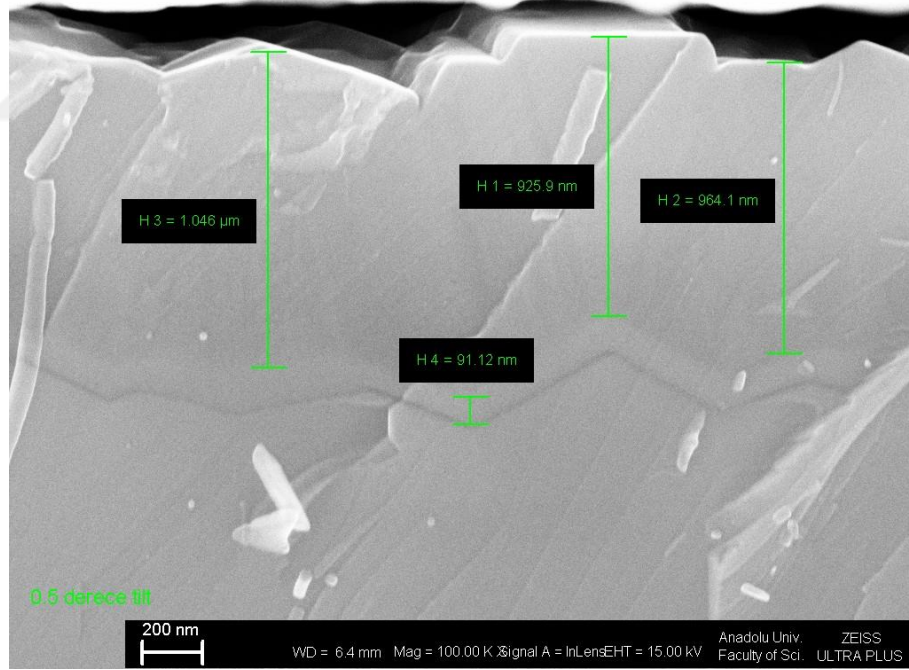
Bu bölümde MBE büyütme sonrası işlemsiz yan-kesit ve yüzey görüntüleri SEM görüntüleri verilmiştir.

Örneklerin SEM yan-kesit görüntüleri ile büyütme kalınlıklarının teyidi yapılmıştır. Yüzeyden alınan SEM görüntülerinden, örnek yüzeyinde termal veya APD sonucu oluşması muhtemel çatlak ve kristal kusurları incelenmiştir.

Şekil 4.43'te görülen işlemsiz Si alttaş üzerine doğrudan büyütülen GaAs tampon katmanının yan-kesit görüntüsü görülmektedir. Katman kalınlıklarının tasarlanan kalınlıklar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. İlk grup örneklerden olan NB850 örneği desenleme işleminin sonuçlarına göre referans oluşturmaktadır. Şekil 4.44'te NB850 örneğinin GaInP aktif hücre yapısının yan-kesit SEM görüntüsü görülmektedir.

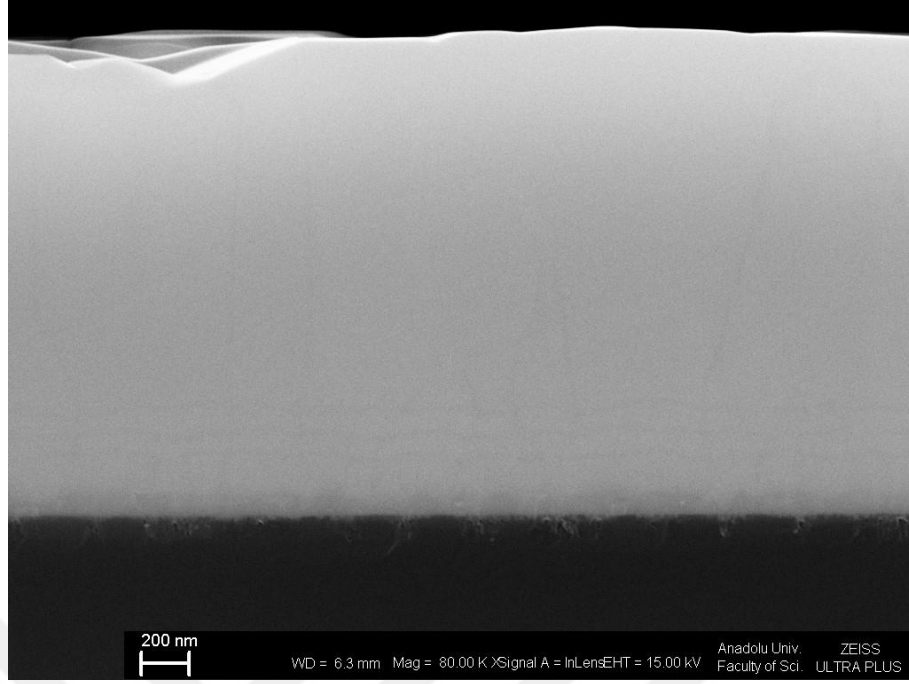


Şekil 4.43. NB850 örneğinde GaAs tampon katmanı yan-kesit SEM görüntüsü



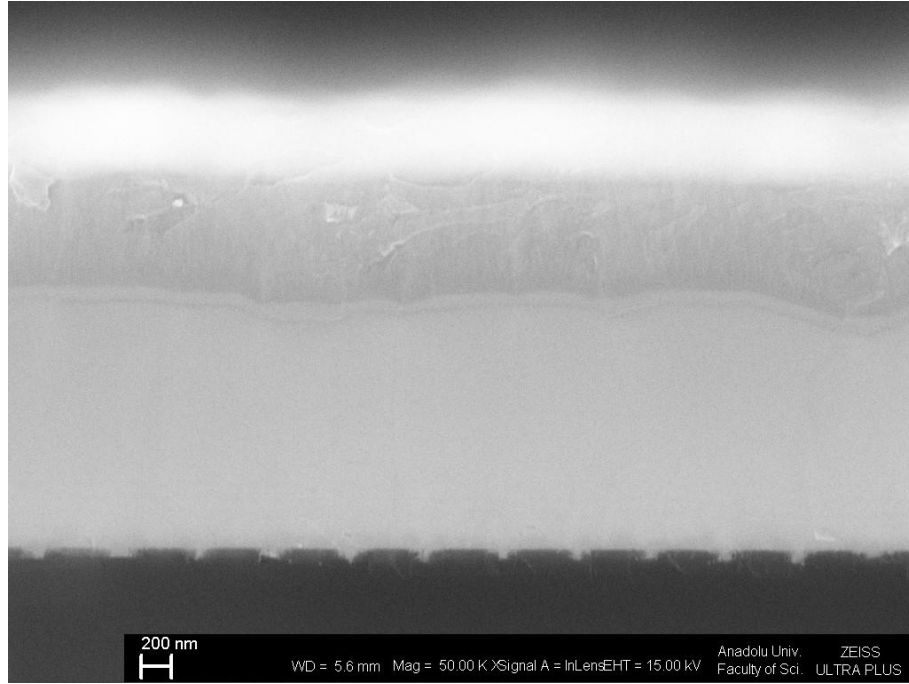
Şekil 4.44. NB850 örneğinde GaInP aktif hücre yapısı yan-kesit SEM görüntüsü

Şekil 4.45'te NB895 örneği görülmektedir. NB895 örneği düzensiz desenlenmiş Si alttaş üzerine sadece GaAs tampon katmanı büyütülmüştür.



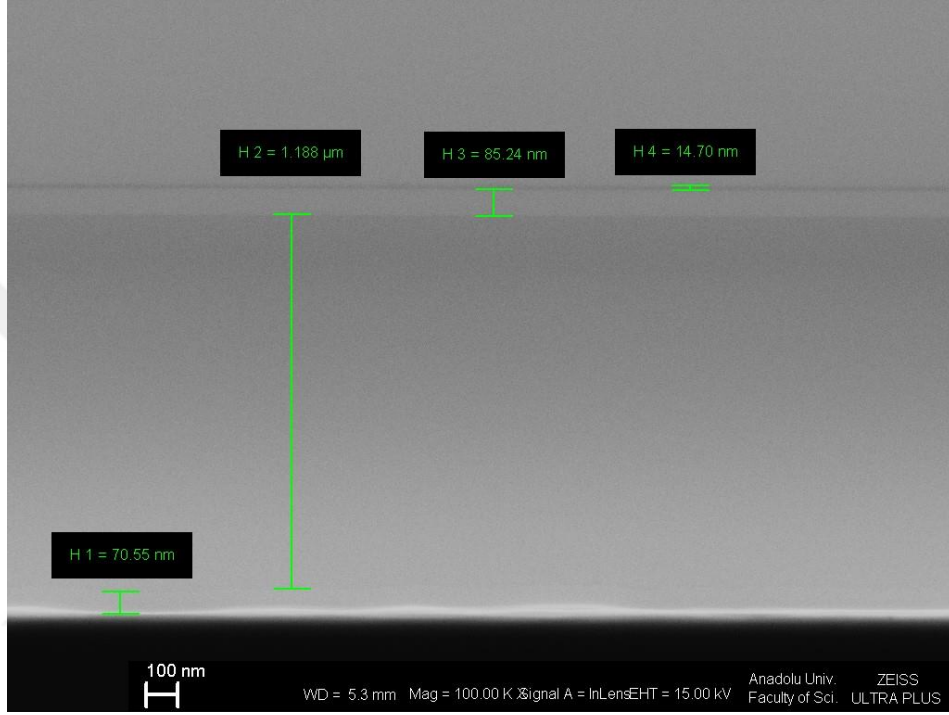
Şekil 4.45. NB895 örneğinin yan-kesit SEM görüntüsü

Şekil 4.46’da düzenli desenlenmiş Si üzerine büyütülmüş GaAs tampon katmanının yan-kesit SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.46. NB916 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü

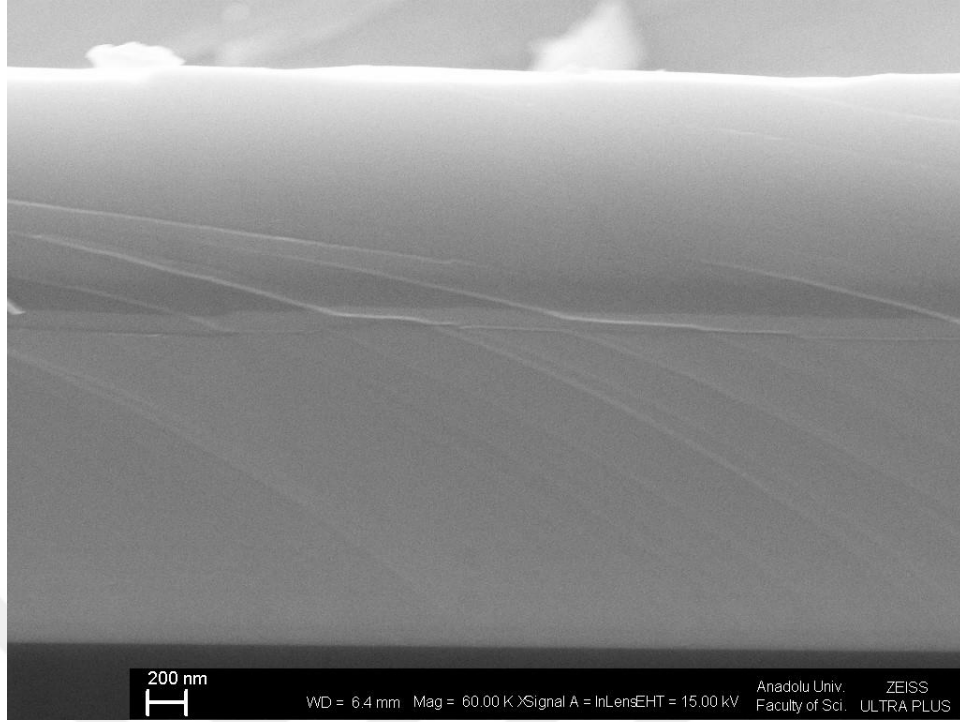
Şekil 4.47’de GaAs alttaş üzerine büyütülmüş NB919 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü bulunmaktadır. Görüntüde verilen H1 ve H3 yükseklikleri güneş hücresi yapısında GaAs üst ve alt kontak katmanlarını, H2 yüksekliği GaInP aktif hücreyi ve H4 yüksekliği ise AlAs katman kalınlıklarını temsil etmektedir.



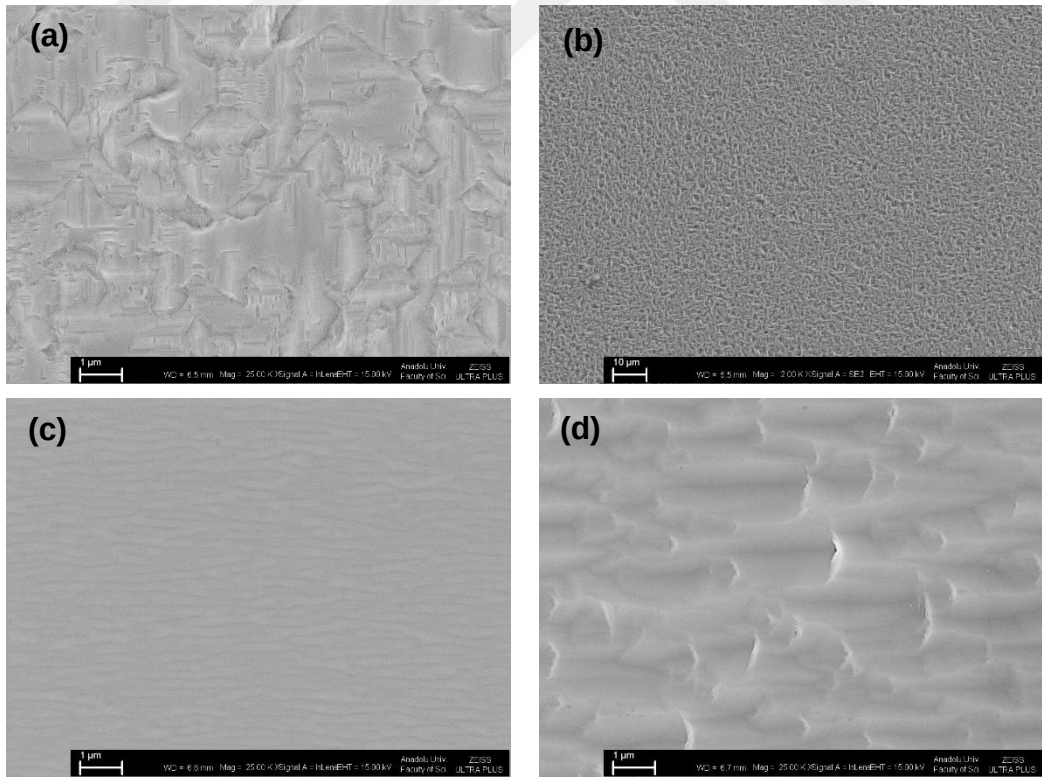
Şekil 4.47. NB919 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü

Çalışma kapsamında 4° miscut Si alttaşlar üzerine de yapılan büyütme çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.48’de NB918 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 4.49’da düzensiz ve düzensiz desenlenmiş Si alttaş, GaAs alttaş ve 4° miscut Si alttaş üzerine büyütülmüş örneklerle ait yüzey SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.48. NB918 örneğine ait yan-kesit SEM görüntüsü



Şekil 4.49. (a) düzensiz desenlenmiş NB925, (b) düzenli desenlenmiş NB869, (c) GaAs üzerine NB919 ve (d) 4° miscut NB926 örneklerinin yüzey SEM görüntüleri

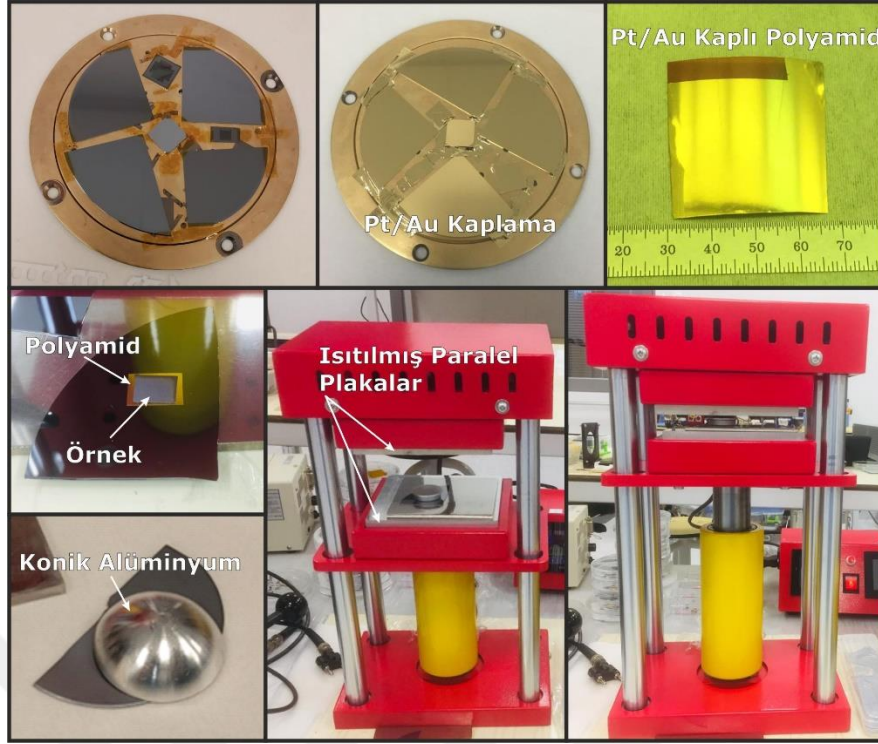
Şekil 4.49’da, farklı alttaşlar üzerine büyütülmüş üst GaAs kontak katmanları görülmektedir. Si alttaş üzerine büyütülen örneklerin üst GaAs kontak katmanlarında yüzeyinin pürüzlü olduğu anlaşılmıştır.

4.4. Aygıt Fabrikasyonu

Yapısal karakterizasyon işlemleri sonucunda büyütülmüş GaInP tek eklem güneş hücresi yapıları, sırasıyla epitaksiyel film kaldırma ve fotolitografi basamakları ile elektro-optik ölçümler için aygıt haline getirilmiştir.

4.4.1. Epitaksiyel film kaldırma sonuçları

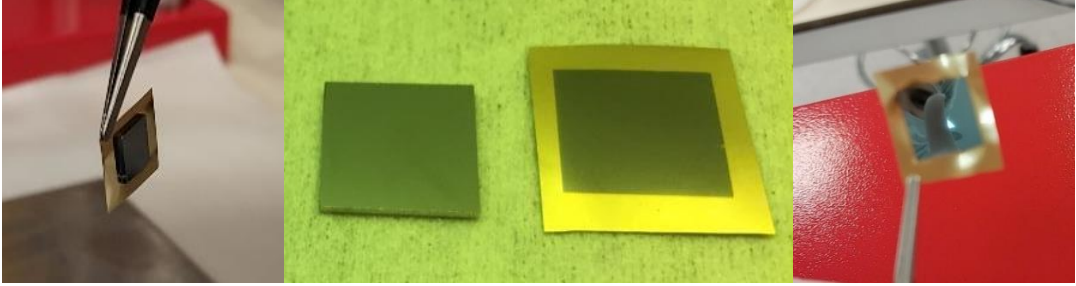
Epitaksiyel olarak ters yapıda büyütülmüş örneklerdeki GaAs tampon katmanı ile GaInP aktif hücre arasına büyütülen AlAs tabakası HF içerisinde çözünmektedir. HF seçici aşındırıcı olduğu için GaInP ve GaAs katmanlarını aşındırmamaktadır. AlAs katmanının aşınması sonucunda büyütülen film alttaştan ayrılıp serbest kalmaktadır. Ayrılan filmin zarar görmeden başka bir tabana aktarılması için yapılması gereken işlemler vardır. Öncelikle, HF içerisinde aşınmayacak bir metal ile örnek yüzeyi ve aktarılacak taban kaplanmalıdır. Aktarılacak taban olarak esnek ince polyamid kullanılmıştır. Bu çalışmada, hem poliyamid yüzeyine hem örnek yüzeyine 15 nm Pt/220 nm Au kaplanmıştır. Örnek yüzeyine kaplanan Pt/Au ile esnek ince polyamide kaplanan Pt/Au birbirlerine 165 °C ve yaklaşık 1 bar basınç altında 10 dk süresince preslenerek yapıştırılmıştır (Görsel 4.17).



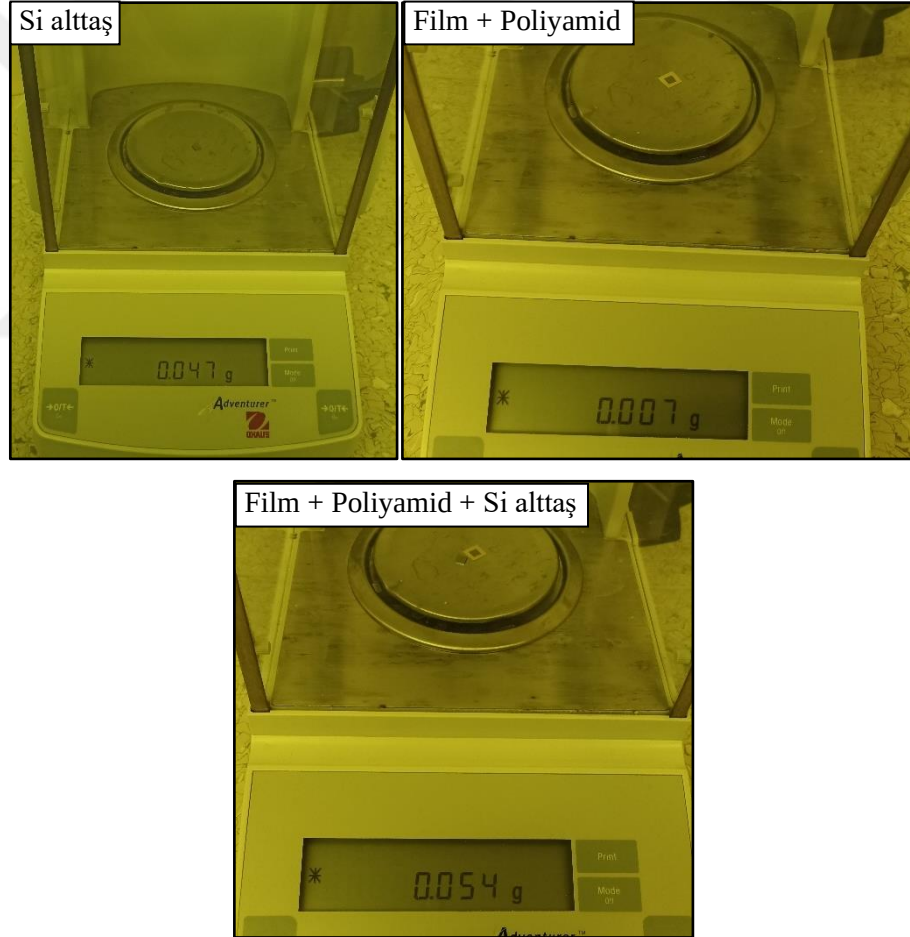
Görsel 4.17. Altın-altın yapıştırma işlemi için kullanılan pres düzeneği

Görsel 4.17’de ELO işlemindeki süreçler görülmektedir. Isıtılmış paralel plakalar arasındaki olası düşük dereceli paralellikten uzaklaşma durumunda büyütülmüş alttaşların kırılması gerçekleşebilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için konik alüminyumlar film üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede plakalardan aktarılabilecek kuvvetin alttaş üzerine dik olarak gelmesi sağlanmıştır. Sıcaklık ve basınç altında poliyamidin ve büyütülmüş örneğin yüzeyindeki altın-altın yapışma işlemi sonrasında HF içerisinde AlAs katmanı aşındırılmıştır. HF’in AlAs katmanını aşındırma süresi, örneğin büyüklüğüne, ortam sıcaklığına ve HF derişimine bağlı olarak değişmektedir. HF içerisine katılacak aseton gibi yardımcı solventler ile aşındırma hızı artırılabilir. Ancak, hızlı aşındırma işleminin, kalkan filmlerde boydan boya büyük çatlaklara yol açtığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, aşındırma sırasında HF sıcaklığının artırılmasının da filmler üzerinde çatlak oluşma miktarını artırdığı görülmüştür. HF içerisinde ağzı kapalı plastik kaplarda aşındırma işlemi $10 \times 10 \text{ mm}^2$ örnekler için yaklaşık 4 saat sürmektedir. Kaldırılmış filmler de-iyonize su dolu kap içerisinde önce asitten arındırılıp daha sonra yavaş akan de-iyonize su ile yıkanıp kurutulmuştur. Poliyamide yapıştırılmış ve aktarılmış esnek ince film ve kaldırılmış alttaş Görsel 4.18’de

görülmektedir. Epitaksiyel lift off yöntemi ile $\sim 6 \times 6 \text{ mm}^2$ kaldırılmış filme ve kaldırılan Si alttaşa ait hassas tartı ölçümleri ise Görsel 4.19’da görülmektedir.



Görsel 4.18. Altın-altın yapıştırma işlemi ve ELO sonrasında elde edilen esnek ince film görüntüsü

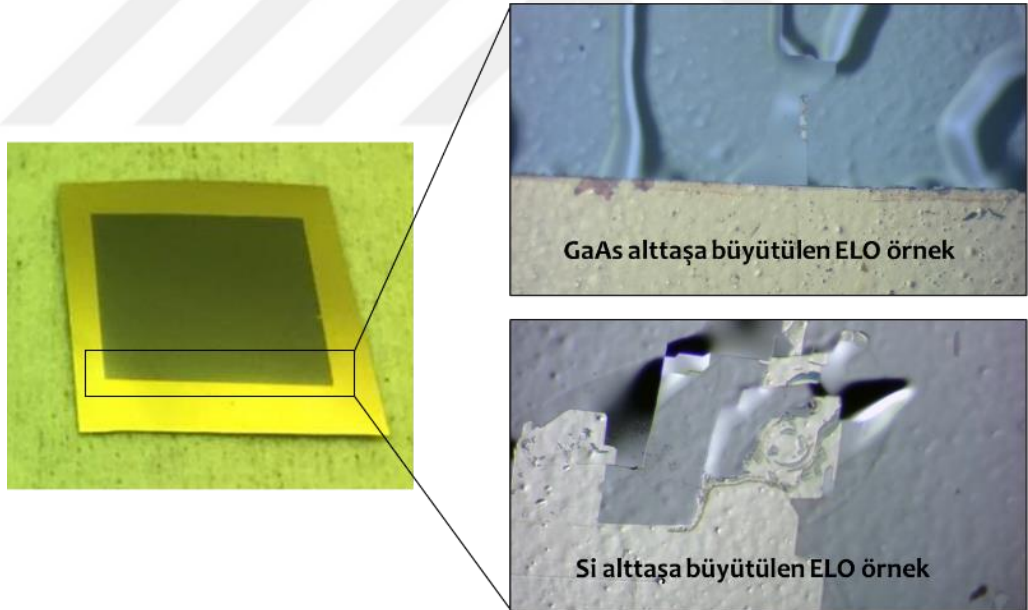


Görsel 4.19. Kaldırılmış esnek ince film ve alttaşın hassas tartı sonuçları

Görselden de görülebileceği gibi $\sim 6 \times 6 \text{ mm}^2$ Si alttaş (525 μm kalınlık) 47 mg ve kaldırılmış film+poliyamid 7 mg olarak ölçülmüştür. Si alttaş tabanlı güneş hücrelerine göre düşünüldüğünde ELO güneş hücreleri ~ 7 kat daha hafiftir.

4.4.2. Fotolitografi

Fotolitografi ile esnek tabana aktarılmış örnekler üzerine üst ızgara kontak metali kaplanması ve üst kontak aşındırma işlemleri yapılmıştır. Esnek ince filmler lamel üzerine fotolitografi işlemleri sırasında zarar görmemesi için yapıştırılmıştır. Üst kontak metali aktarılmış örneklerde elektriksel ölçümler sırasında çoğu aygıtın kısa devre olduğu görülmüştür. Görsel 4.18’de kaldırılmış örneklerin ayna görüntüsüne sahip olmasına karşın mikroskop altında incelendiğinde, hem GaAs hem Si üzerine büyütülmüş ve kaldırılmış filmin kenarlarında mikro çatlakların kaldırma işleminin hemen ardından oluştuğu gözlemlenmiştir (Görsel 4.20).

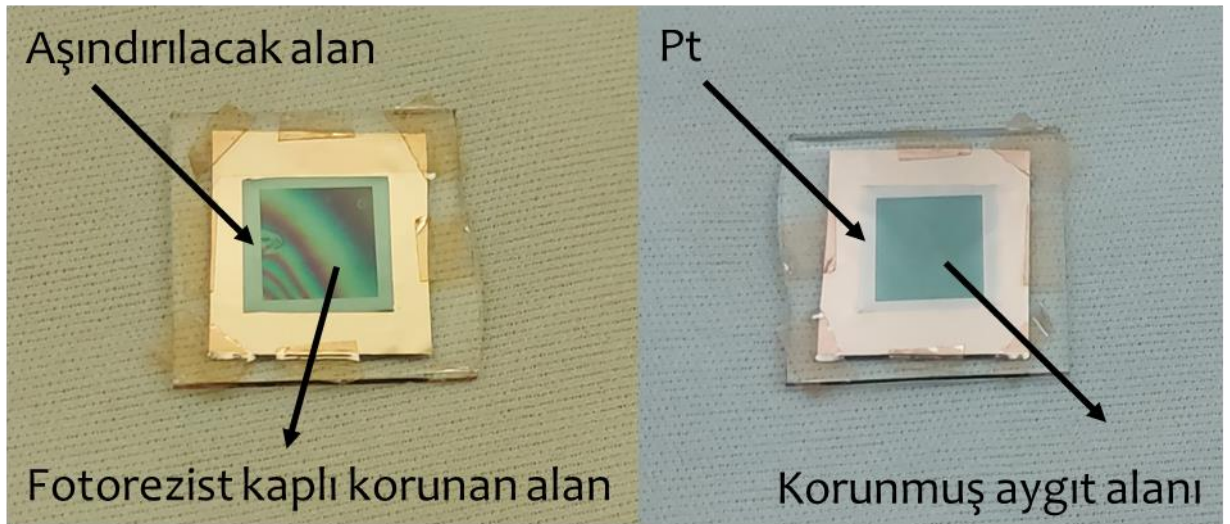


Görsel 4.20. *GaAs veya Si alttaş üzerine büyütülmüş ELO yapıdaki filmlerin polyamide aktarıldıktan sonra kenarlarına ait kırık ve çatlaklarına ait mikroskop görüntüleri*

Esnek filmin kenarlarında bulunan bu çatlaklar pres işleminde farklı yaklaşımlar ile giderilmeye çalışılmıştır. Ancak kesin çözüm olması adına kaldırılmış filmin kenarlarında bulunan bu çatlakların kimyasal olarak aşındırılmasına karar verilmiştir. Islak aşındırma ile uygulanacak bu basamağa kenar aşındırma işlemi adı verilmiştir.

-Kenar aşındırma işlemi

Kaldırılmış filmlerin boyutu $10 \times 10 \text{ mm}^2$ olduğu için her bir kenardan 1 mm aşındırılmasına karar verilmiştir. Lamel üzerine sabitlenmiş esnek filmlerin üzerine AZ5214E fotorezist kaplanmıştır. Esnek ince filmin ortasında $8 \times 8 \text{ mm}^2$ aktif alan korunarak ışınlama yapılmıştır. Develop ve fotorezist sertleştirme işleminin ardından esnek ince filmin kenarlarındaki 1 mm'lik kısım aşındırma için hazır hale gelmiştir. GaAs kontak katmanları için 25 g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ / 25 ml H_2O / 5 ml H_2O_2 , GaInP katmanları için 50 ml HCl / 10 ml H_2O / 10 ml H_3PO_4 çözeltileri oda sıcaklığında aşındırma çözeltisi olarak kullanılmıştır. HCl ve sitrik asit çözeltileri kendi aralarında GaAs ve GaInP için seçici aşındırıcılardır. Bu sayede, kalınlık ölçümüne gerek kalmadan aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Esnek ince film aşındırılırken yüzey renk değişimi ile aşındırmanın tamamlandığı anlaşılmıştır. Önce, GaAs üst kontak katmanı sitrik asit içerisinde aşındırılmıştır. Ardından, HCl çözeltisi içerisinde GaInP katmanı aşındırılmıştır. Yıkayıp kurutulmuş esnek ince film GaAs alt kontak katmanının aşındırılması ve ELO işlemi öncesinde örnek yüzeyine kaplanmış Pt görüldüğünde kenar aşındırma işlemi tamamlanmıştır (Görsel 4.21).

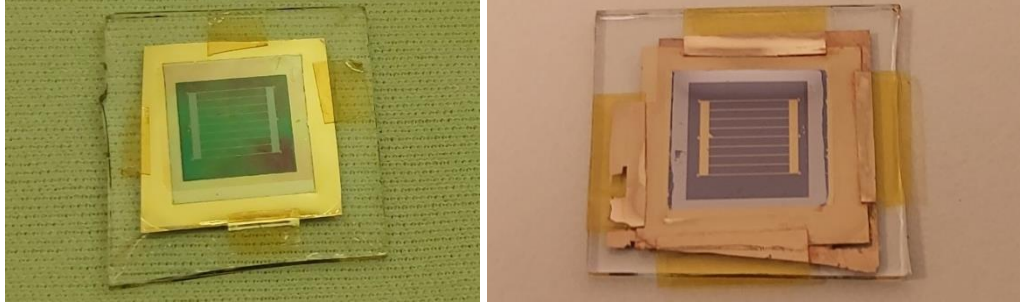


Görsel 4.21. Kenar aşındırma işleminde fotorezist ile korunan $8 \times 8 \text{ mm}^2$ alan (solda) ve aşındırma sonrası korunmuş aygıt alanı (sağda)

-Üst ızgara kontak metali işlemi

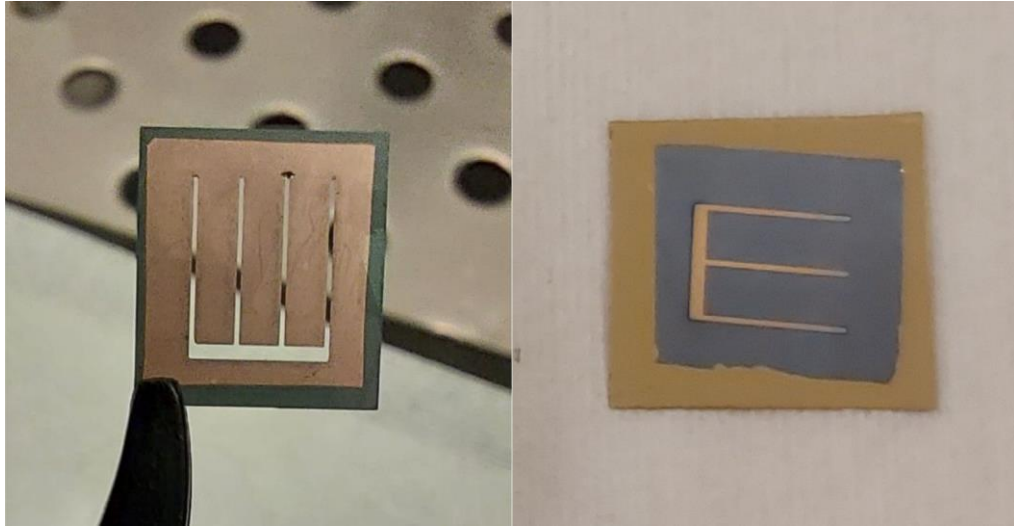
Kenar aşındırma işlemi sonucunda üst kontak metali kaplama işlemi için lamel üzerindeki esnek ince film üzerine tekrar fotorezist kaplanmıştır. Lift-off işleminde

kolaylık sağlaması için örnekler daha kalın AZ9260 fotorezisti ile kaplanmıştır. Izgara üst kontak deseni aktarılmış ve lift-off sonrası esnek ince film, Görsel 4.22’de görülmektedir.



Görsel 4.22. Fotolitografi ile metal deseni aktarılmış esnek ince film (solda) ve lift-off işlemi sonrası oluşturulmuş üst ızgara metal kontak katmanı

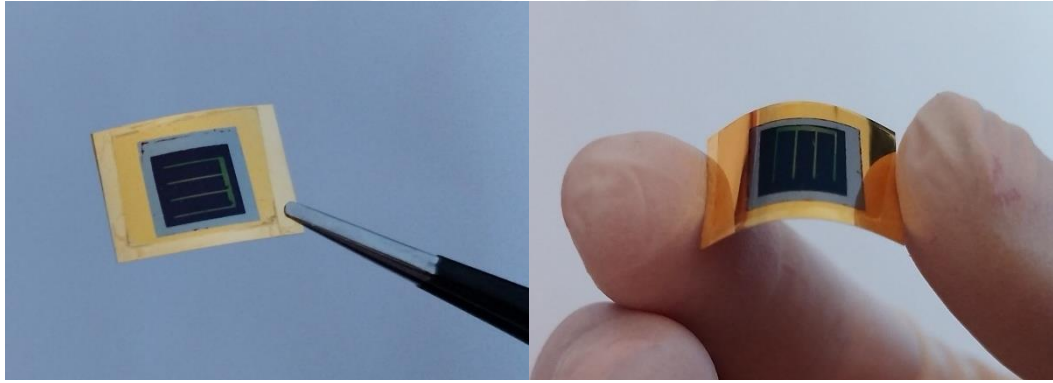
Fotolitografi ile yüzeye aktarılan üst kontak deseninin uygulanabilmesi için fotorezist kaplama, ışınlama, develop ve lift-off gibi süreçler içermesinden dolayı 10×10 mm² ve üzeri boyuttaki örneklerde gölge maske ile metal kaplama yöntemi de kullanılmıştır (Görsel 4.23).



Görsel 4.23. Gölge maske ile esnek ince film üzerine ızgara metal kontak oluşturulması

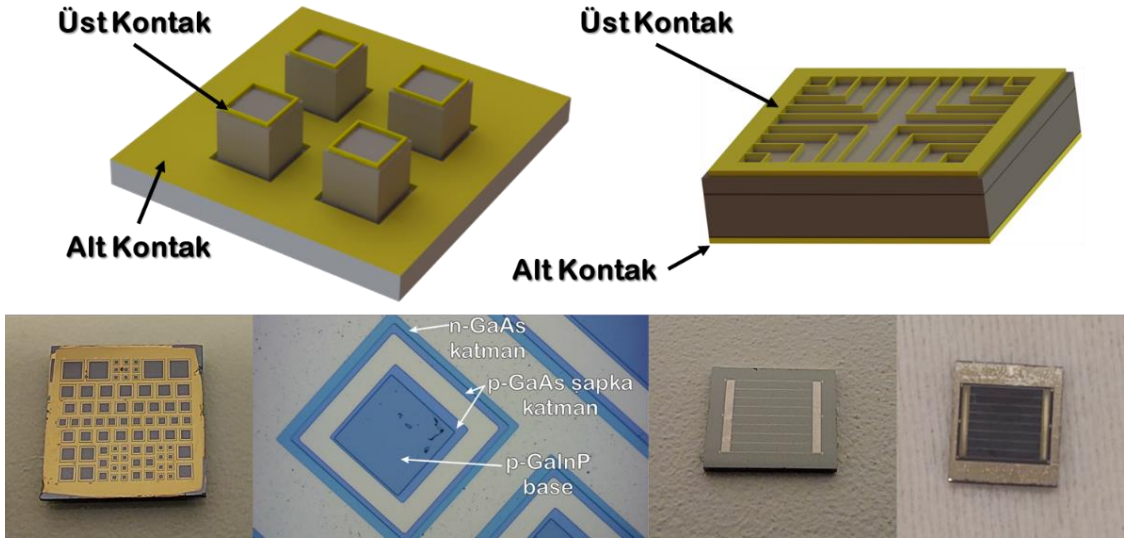
Altaş tabanlı örneklerde, kontakların omik davranışının artırılması için 420 °C’de 30 s tavlama yapılmaktadır. Yapılan denemeler sonucunda poliyamidin en fazla 300 °C’ye dayanabildiği görülmüştür. Üst metal kontak (30 nm Ni/80 nm Ge/220 nm Au)

kaplama işleminden sonra esnek ince filmler 5 dk 300 °C sıcaklıkta metal kontaktların omik davranışının artırılması için tavlansmıştır. Tavlama işlemi sonrasında üst kontak GaAs katmanı ışığın aktif bölgede soğurulmasını engelleyeceği için sitrik asit çözeltisi ile aşındırılmıştır. Üst metal kontak, sitrik asit içerisinde zarar görmeyeceği için tıpkı bir fotorezist gibi davranarak ızgara deseni haricinde kalan yerlerin aşındırılmasına yardımcı olmaktadır. Güneş hücresinin fabrikasyon sürecinin son basamağı olan yansıtmasız kaplama işleminde örnek yüzeyine önce 50 nm ZnS ve üzerine 100 nm MgF₂ kaplanmıştır. Kplama işlemi sırasında üst kontak metalinin küçük bir alanı ölçüm probu için maskelenmiş ve bütün kaldırılmış esnek ince film yüzeyi yansıtmasız kaplama ile kaplanmıştır. Bu sayede örnek elektriksel olarak da yalıtılmıştır. Fabrikasyonu tamamlanmış esnek ince film güneş hücresi Görsel 4.24'te görölmektedir.



Görsel 4.24. Fabrikasyon işlemi tamamlanmış esnek ince film güneş hücresi

Fotolitografi işlemleri esnek güneş hücresinin yanı sıra alttaş tabanlı büyütölmüş Si ve GaAs alttaş üzerine büyütölmüş örneklere de uygulanmıştır. Hem güneş hücresi üst kontak ızgara deseni ($\sim 5 \times 5 \text{ mm}^2$) hem de tek piksel aygıt yapımında kullanılan farklı büyüklükteki mesa ($0,4 \times 0,4 - 1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$) desenleri ile örnekler aygıt haline getirilmiştir. p-GaAs alttaş üzerine büyütölen örneklere alttaş alt kontak katmanını oluşturmaktadır. p-GaAs alttaşın altına Pt/Au metal kontak kaplanmıştır. Si üzerine büyütölen alttaş tabanlı güneş hücreleri ise alt kontak bölgesine kadar aşındırılarak aygıt haline getirilmiştir. Hem mesa hem ızgara kontak desenli hücreler Görsel 4.25'te görölmektedir.



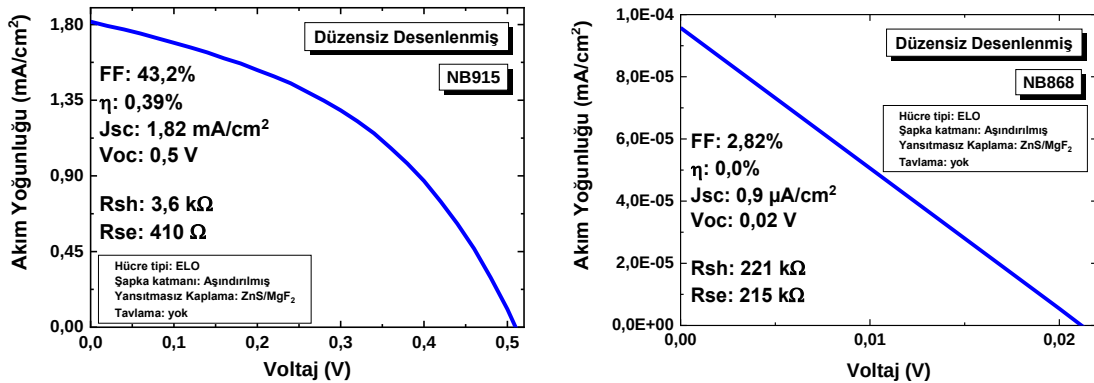
Görsel 4.25. Şematik alttaş tabanlı aygıt yapıları (üstte), Alttaş tabanlı güneş hücresi aygıtlarına ait görseller (altta)

4.5. Güneş Hücresi Karakterizasyon Sonuçları

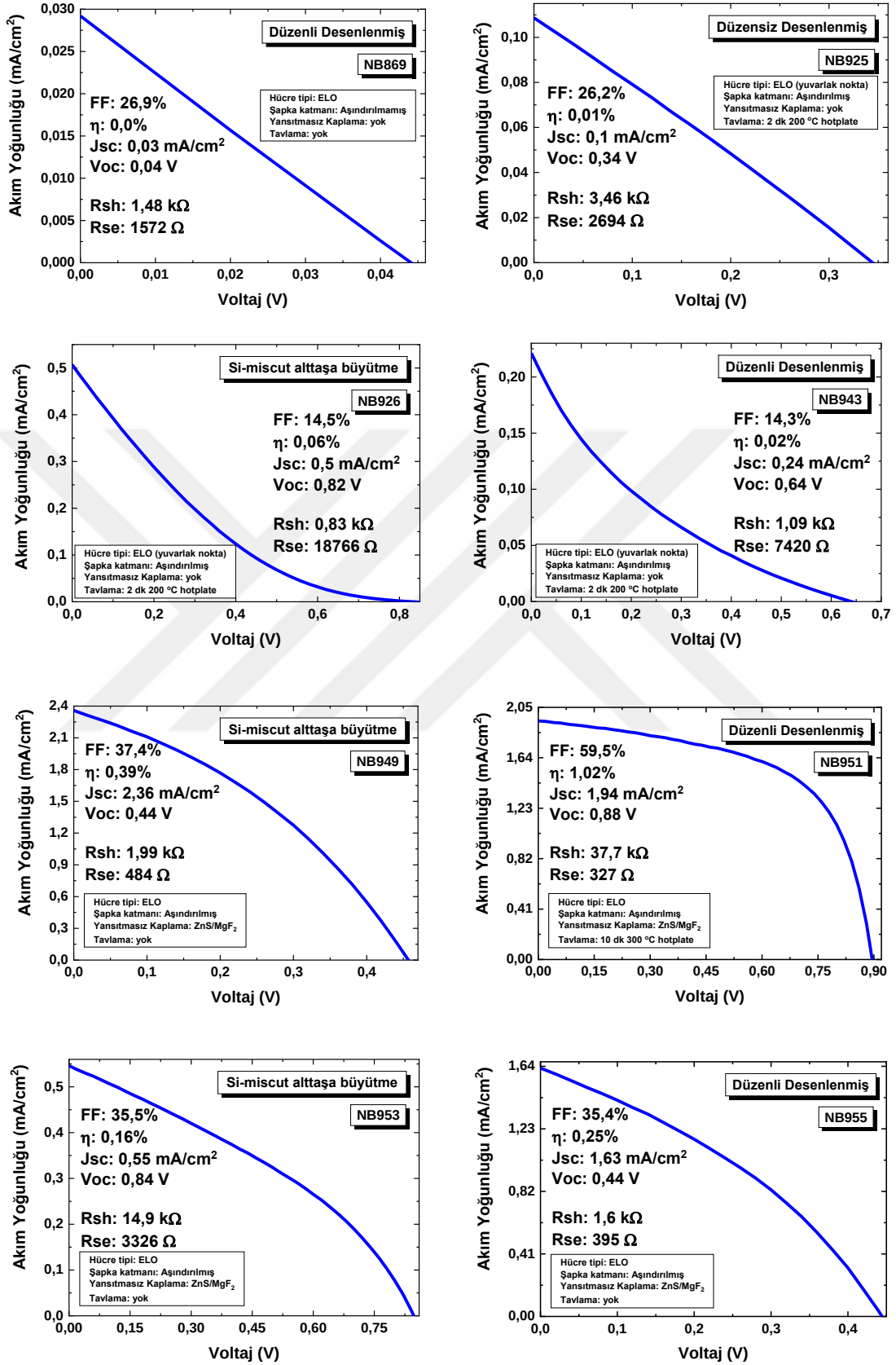
Alttaş tabanlı veya esnek ince film halindeki güneş hücrelerinin fabrikasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından elektro-optik ölçümleri yapılmıştır.

4.5.1. Dönüşüm verimi sonuçları

Si alttaş üzerine büyütülmüş ve ölçümü yapılan örnekler için akım voltaj eğrileri ile türetilmiş parametreler Şekil 4.50’de görülmektedir.

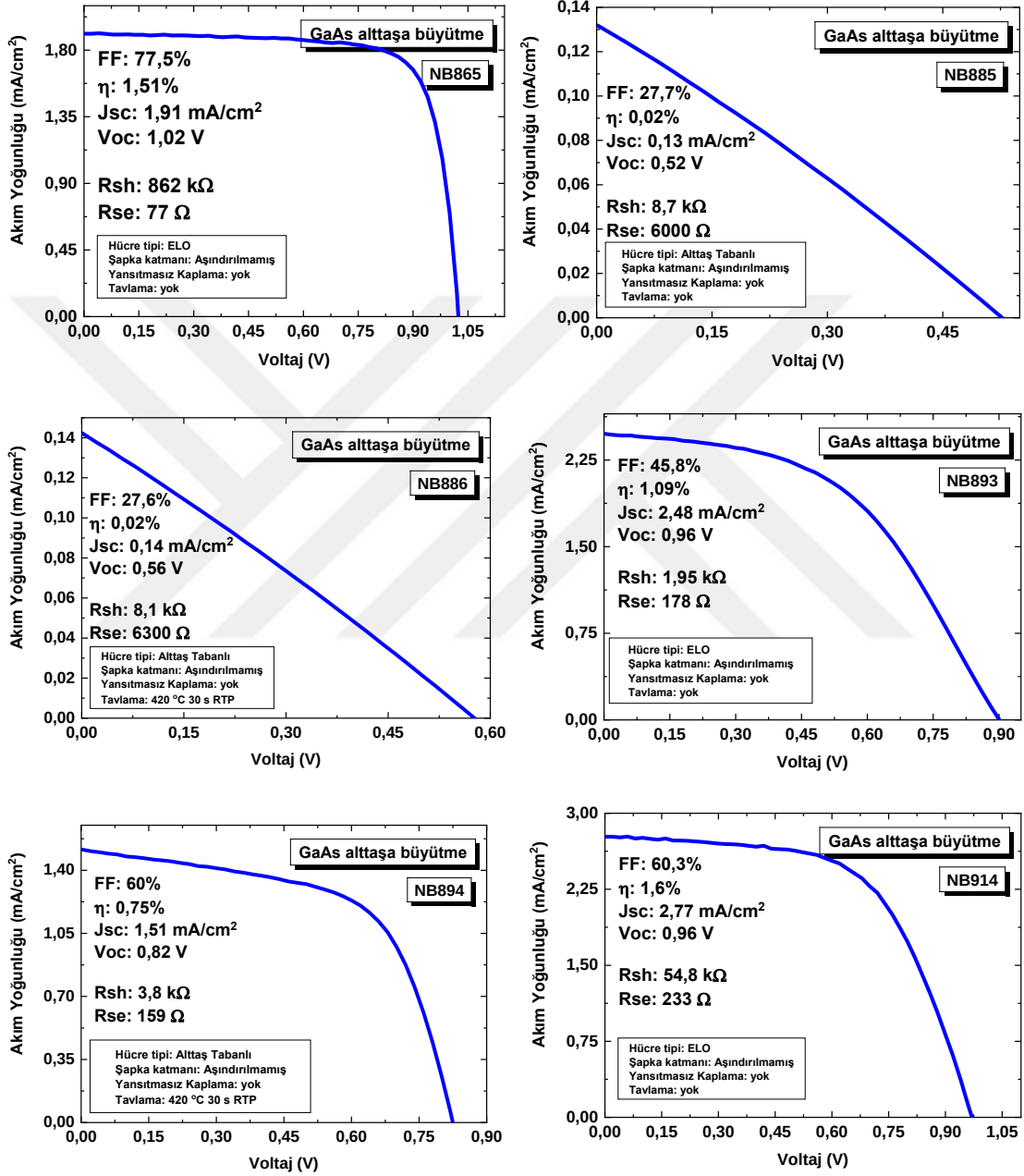


Şekil 4.50 devamı.

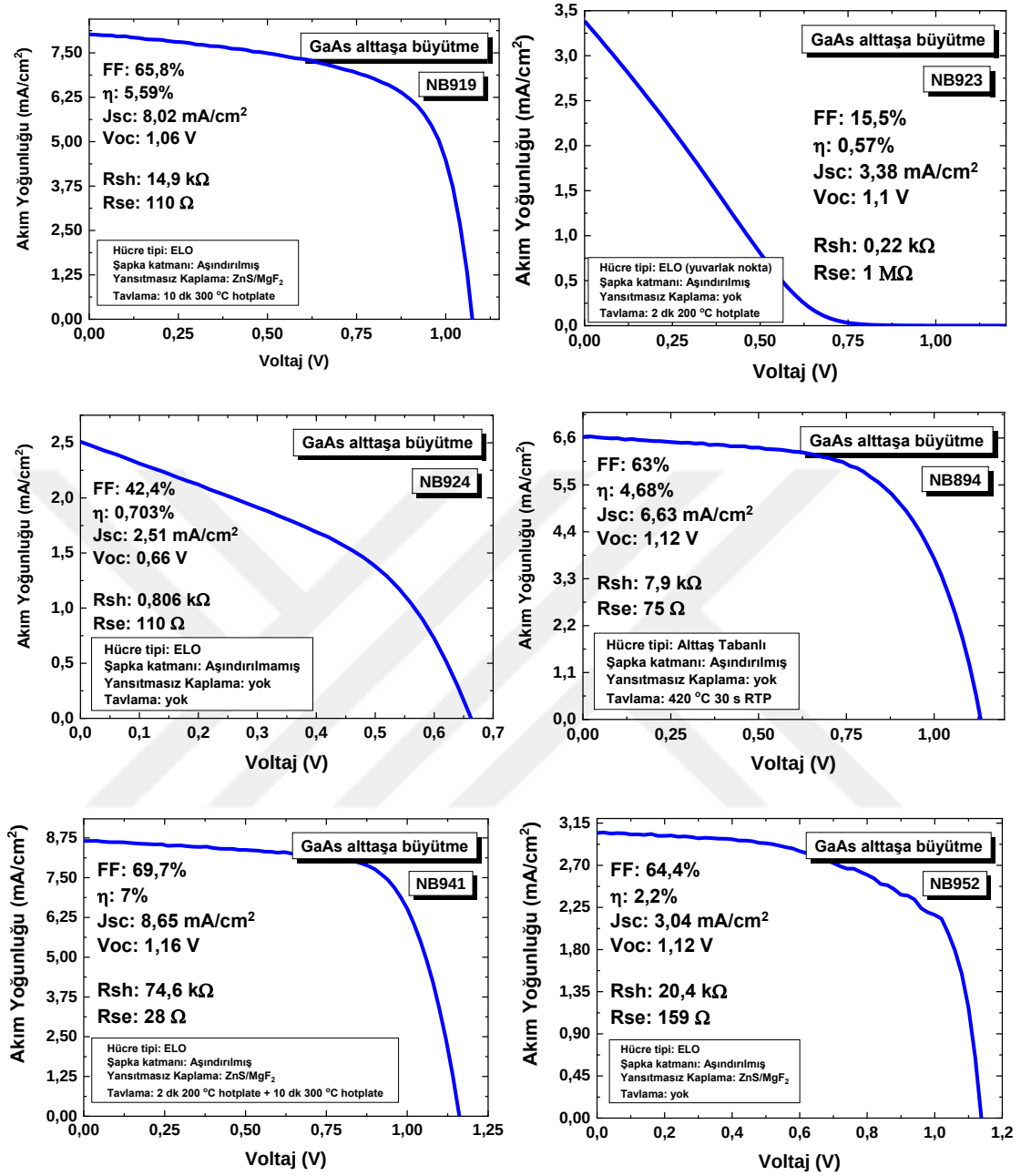


Şekil 4.50. Si üzerine büyütülmüş ve fabrikasyonu tamamlanmış esnek ince film güneş hücrelerinin AM1.5G altında I-V ölçüm sonuçları

GaAs alttaş üzerine büyütülmüş ve ölçümü yapılan örneklere ait akım voltaj eğrileri ile türetilmiş parametreler Şekil 4.51’de görülmektedir. Örneklere ait elektriksel veriler Tablo 4.16 ve 4.17’de özet halinde sunulmuştur.



Şekil 4.51 devamı.



Şekil 4.51. GaAs üzerine büyütülmüş ve fabrikasyonu tamamlanmış esnek ince film güneş hücrelerinin AM1.5G altında I-V ölçüm sonuçları

Tablo 4.16. *I-V ölçümü yapılmış örneklere ait işlemsiz ve tavlama işlemi sonrası ölçüm sonuçları*

Örnek Kodu	Alttaş Tipi	İşlemsiz Ölçüm Sonuçları						Tavlama İşlemi Sonrası					
		FF (%)	η (%)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	R _{SH} (k Ω)	R _{SE} (Ω)	FF (%)	η (%)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	R _{SH} (k Ω)	R _{SE} (Ω)
NB865	GaAs	77,5	1,51	1,91	1,02	862	77	71,4	1,35	1,86	1,02	31,9	95
NB869	Si-DLD	26,9	0	0,04	0,03	1,48	1572	-	-	-	-	-	-
NB885	GaAs	27,7	0,02	0,13	0,52	8,7	6000	-	-	-	-	-	-
NB886	GaAs	-	-	-	-	-	-	27,6	0,02	0,14	0,56	8,1	6300
NB893	GaAs	45,8	1,09	2,48	0,96	1,95	178	-	-	-	-	-	-
NB894	GaAs	-	-	-	-	-	-	60	0,75	1,51	0,82	3,8	159
NB914	GaAs	60,3	1,6	2,77	0,96	54,8	233	61,7	1,3	2,15	0,98	75,4	200
NB915	Si-DZD	41,8	0,13	0,72	0,44	4,47	687	42,5	0,17	0,82	0,5	5,58	590
NB919	GaAs	65,6	2,07	3,09	1,02	4,8	45	55,3	2,23	3,96	1,02	2	42
NB923	GaAs	20,2	0,54	2,52	1,06	1,5	425071	23,7	0,56	2,22	1,08	2,48	193892
NB924	GaAs	42,4	0,703	2,51	0,66	0,806	110	-	-	-	-	-	-
NB925	Si-DZD	28,8	0,13	1,07	0,42	0,819	398	30,2	0,01	0,09	0,32	4,26	1441
NB926	Si-Miscut	23,1	0,45	2,17	0,8	0,39	1488	10,3	0,02	0,24	0,82	1,18	22753
NB927	GaAs	60,2	1,16	1,76	1,1	2,2	49	72,3	1,02	1,91	0,74	162	106
NB941	GaAs	73	3,06	3,74	1,12	10,6	30	74,1	3,06	3,76	1,1	13,9	34
NB943	Si-DLD	48,8	0,52	1,3	0,82	4	367	25,4	0	0,14	0,1	0,75	928

Tablo 4.17. *I-V ölçümü yapılmış örneklere ait şapka katmanı aşındırma ve yansıtmasız kaplama işlemi sonrası ölçüm sonuçları*

Örnek Kodu	Alttaş Tipi	Şapka Katmanı Aşındırma Sonrası						Yansıtmasız Kiplama Sonrası					
		FF (%)	η (%)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	R _{SH} (k Ω)	R _{SE} (Ω)	FF (%)	η (%)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	R _{SH} (k Ω)	R _{SE} (Ω)
NB865	GaAs	69,3	2,29	3,18	1,04	10,2	79	69,3	2,29	3,18	1,04	10,2	79
NB915	Si-DZD	-	-	-	-	-	-	43,2	0,39	1,82	0,5	3,6	410
NB919	GaAs	61,1	4,45	7	1,04	9,34	30	56,2	7,04	16,05	0,78	24,7	342
NB923	GaAs	15,5	0,57	3,38	1,1	0,22	1013230	-	-	-	-	-	-
NB925	Si-DZD	26,2	0,01	0,1	0,34	3,46	2694	-	-	-	-	-	-
NB926	Si-Miscut	14,5	0,06	0,5	0,82	0,83	18766	-	-	-	-	-	-
NB927	GaAs	63	4,68	6,63	1,12	7,9	75	-	-	-	-	-	-
NB941	GaAs	64,5	5,81	7,9	1,14	1,72	29	69,7	7	8,65	1,16	74,6	28
NB943	Si-DLD	14,3	0,02	0,24	0,64	1,09	7420	-	-	-	-	-	-
NB949	Si-Miscut	-	-	-	-	-	-	37,4	0,39	2,36	0,44	1,99	484
NB951	Si-Miscut	-	-	-	-	-	-	56,5	1,03	2,22	0,82	27,6	248
NB952	GaAs	-	-	-	-	-	-	64,4	2,2	3,04	1,12	20,4	159
NB953	Si-Miscut	-	-	-	-	-	-	35,5	0,16	0,55	0,84	14,9	3326
NB955	Si-DLD	-	-	-	-	-	-	38,9	0,25	1,48	0,44	1,5	395

Tablo 4.16 ve 4.17 incelendiğinde, Si ve GaAs üzerine büyütülmüş örneklerde yüksek seri direnç ve beklenenden düşük FF değerleri göze çarpmaktadır. Metal katmanların omik davranışının iyileştirilmesi ve katmanların birbiri içerisinde çözünmesi ile kontak direncinin iyileştirilmesi tavlama işlemi ile sağlanmaktadır. Diğer taraftan, metaller için uygulanan tavlama sıcaklıklarında poliyamidin yapısal bütünlüğü bozulmaya başlamaktadır. Yeterli sıcaklıktan aşağıda tavlama işlemi sonucunda n-GaAs için kaplanan üst metal kontakın omik davranışının iyileşmemesi ve Şekil 4.49’da görülen yüzey pürüzlülüğü nedeniyle yüksek seri direnç değerleri ölçülmüştür. Tablolarda boş görünen değerler işlemler öncesi veya sonrasında örnek ile ilgili çalışma yapılamamasından kaynaklanmaktadır.

Dönüşüm verimi incelendiğinde ise örneklerin tümünde beklenenden az değerler elde edildiği görülmektedir. Dönüşüm verimi ile FF değerinin lineer ilişkide olduğu Denklem 3.6’da belirtilmişti. Bu durumda, ölçümü yapılan uygun örneklerde FF değerinin örneğin %85 gibi makul bir değerde olduğu kabul edilirse, elde edilecek dönüşüm verimi Tablo 4.18’de verilmiştir.

Tablo 4.18. %85 FF ile dönüşüm verimi değişimi

Örnek Kodu	Altaş Tipi	η (%)	η (%) @FF=%85
NB915	Si-DZD	0,39 (FF=%43,2)	0,77
NB919	GaAs	7,04 (FF=%56,2)	10,65
NB941	GaAs	7 (FF=%69,7)	8,54
NB949	Si-Miscut	0,39 (FF=%37,4)	0,89
NB951	Si-Miscut	1,03 (FF=%56,5)	1,55
NB952	GaAs	2,2 (FF=%64,4)	2,90
NB953	Si-Miscut	0,16 (FF=%35,5)	0,38
NB955	Si-DLD	0,25 (FF=%35,4)	0,60

Tablo 4.18’den de görülebileceği gibi FF değeri %85 olduğu durumda üretilmiş esnek GaInP tek eklem güneş hücreleri için dönüşüm verim değerlerinde büyük ölçüde değişiklik olmamaktadır.

Ölçümü yapılan örneklerde, üretilen foto akım ve açık devre voltajındaki düşük değerler dönüşüm veriminin az olmasının ana sebebi olarak görülmektedir. Açık devre voltajı, Quasi-Fermi seviyelerinin ayrılması ve katman katkılanması ile ilişkilendirilebilir. Foto akım ise soğurma, yansıma, difüzyon uzunluğu ve yeniden birleşme gibi etmenler ile ilişkilendirilebilir.

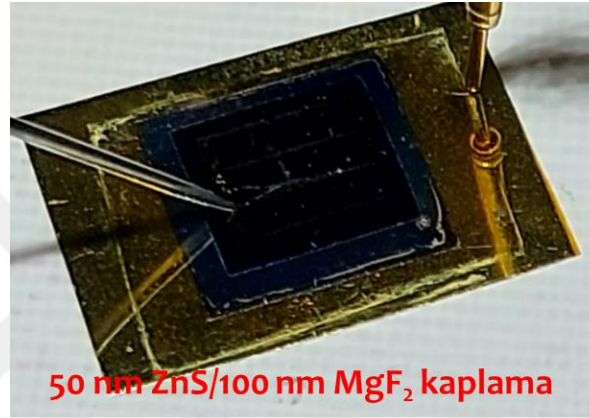
Foto akımın düşük olmasının sebepleri incelenirken soğurma, yansıma ve yeniden birleşme etkileri üzerinde durulmuştur.

-Soğurma unsuru

GaInP PL eğrilerinde bahsedilen GaAs tampon katmanından sinyal alınmaması, uyarıcı yüksek şiddetteki lazer ışığının (532 nm) tamamının GaInP katmanında soğurulmasından kaynaklanmaktadır. Eğer lazer ışığı yeteri kadar soğurulamazsa GaAs katmanına ulaştığında, tampon GaAs'i uyaracak ve 873 nm'de ışık yaymasına sebep olacaktır. Tampon GaAs katmanından yayılacak 873 nm'lik ışık ise GaInP katmanı tarafından soğurulmayacak ve tampon GaAs'e ait PL sinyali görülecektir. İlk ve ikinci grup örneklerde bu durum gözlemlenmiş ve hem kristal kalitesinin hem de katman kalınlığının artırılması ile yeni büyütülen örneklerde soğurma sorununun önüne geçilmiştir.

-Yansıma unsuru

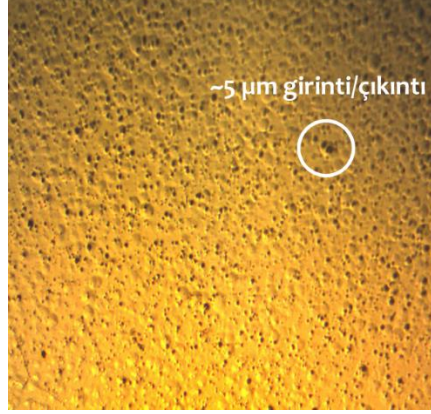
İlk, ikinci ve üçüncü grup örneklerde yansıtmasız kaplama yapılmamıştır. Ancak, son büyütülen örneklerin hepsine yansıtmasız kaplama çalışması uygulanmıştır. Yansıtmasız kaplamanın başarılı olduğu, ışık altında ölçüm alınan örneklerin Görsel 4.26'da yüzeylerinin karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır.



Görsel 4.26. Yansıtmasız kaplama yapılmamış esnek ince film güneş hücresi (üstte) ve 50 nm ZnS/100 nm MgF₂ yansıtmasız kaplama yapılmış esnek ince film güneş hücresi (altta)

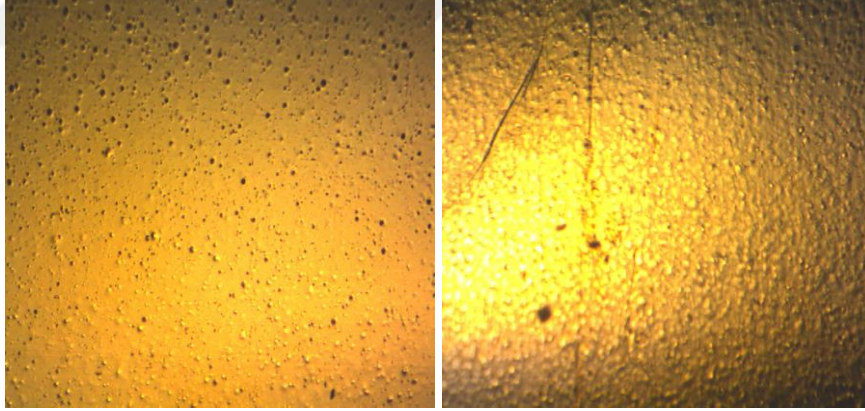
-Yeniden birleşme etkisi

Kristal içerisinde bulunan kusurlar ve yüzeyde bulunan açık bağlarda ışık ile oluşmuş taşıyıcıların birleşmesidir. Taşıyıcıların yok olması ile foto akımda düşüşler meydana gelmektedir. HRXRD ve PL eğrilerinden, örneklerin kristal kalitelerinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Fabrikasyon basamağı incelendiğinde, kullanılan poliyamidin esnek tabanın mikroskop altında incelenmesiyle yüzeyinde girinti ve çıkıntıların özellikle altın kaplama sonrasında oldukça belirginleştiği görülmektedir (Görsel 4.27). Profilometre ile yüzey taraması yapıldığında bu girinti ve çıkıntıların ± 5 μm olduğu tespit edilmiştir. Kaldırılan filmin kalınlığı (~ 1 μm) dikkate alınarak, büyütülmüş ince film yapısında mikro kırıkların ortaya çıktığı değerlendirilmiştir. Bu kırıklar üzerine denk gelen üst metal kontak kaplaması sonrası örneklerin çoğu kısa devre olmuştur. Kısa devre olmayan örneklerde ise bu kırıklar yeniden birleşme bölgelerini oluşturarak foto taşıyıcıların kaybedilmesine sebep olmaktadır.



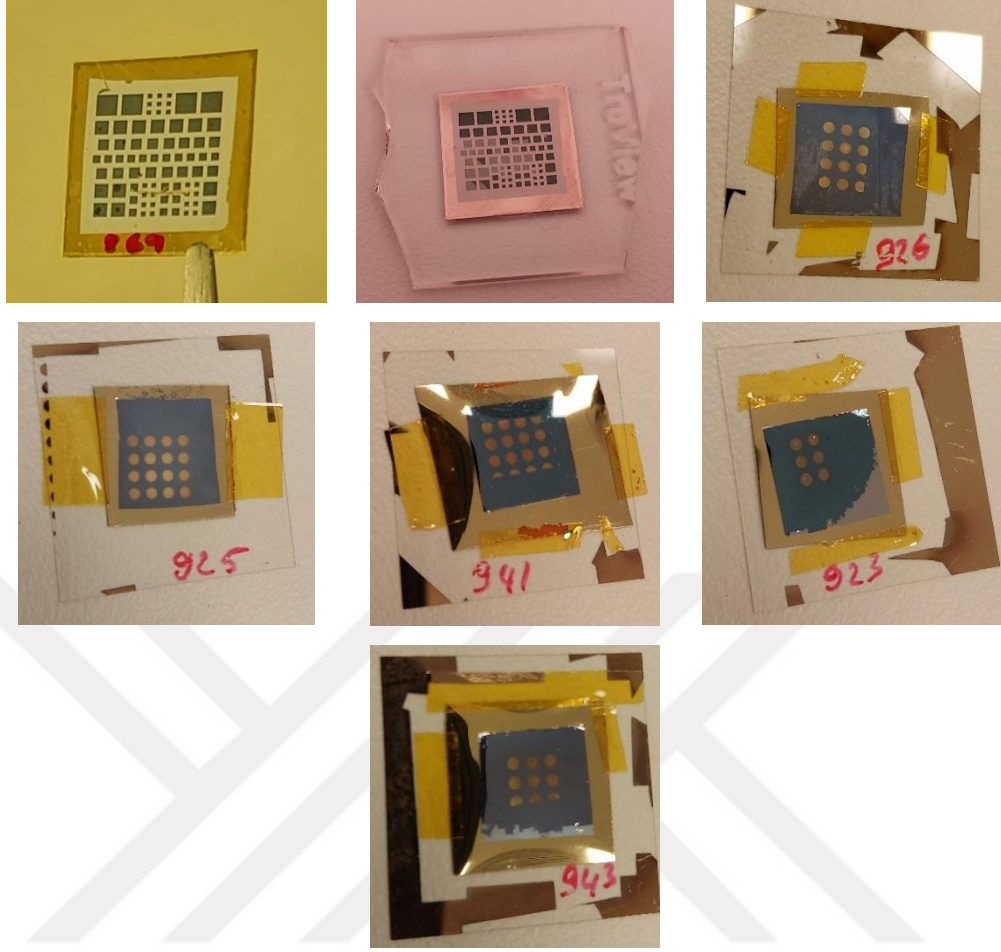
Görsel 4.27. Altın kaplama işlemi sonrası farkedilir olan poliyamid yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar

Poliyamid yüzeylerinin iyileştirilmesi için altın kaplama öncesinde ince zımpara ile sivri noktaların yumuşatılması ve yüzeyleri parlatılmış iki Si alttaş arasında pres makinesi ile sıkıştırılması denenmiştir. Yapılan denemelerde poliyamid yüzeyleri için denenmiş yöntemler etkili olmamıştır. Zımpara yapılan poliyamid yüzeyi ve zımpara sonrası altın kaplanmış poliyamidin mikroskop görüntüsü Görsel 4.28’de görülmektedir.



Görsel 4.28. Zımpara sonrası (solda) ve zımparalanmış poliyamid altın kaplama sonrası (sağda) yüzey mikroskop görüntüleri

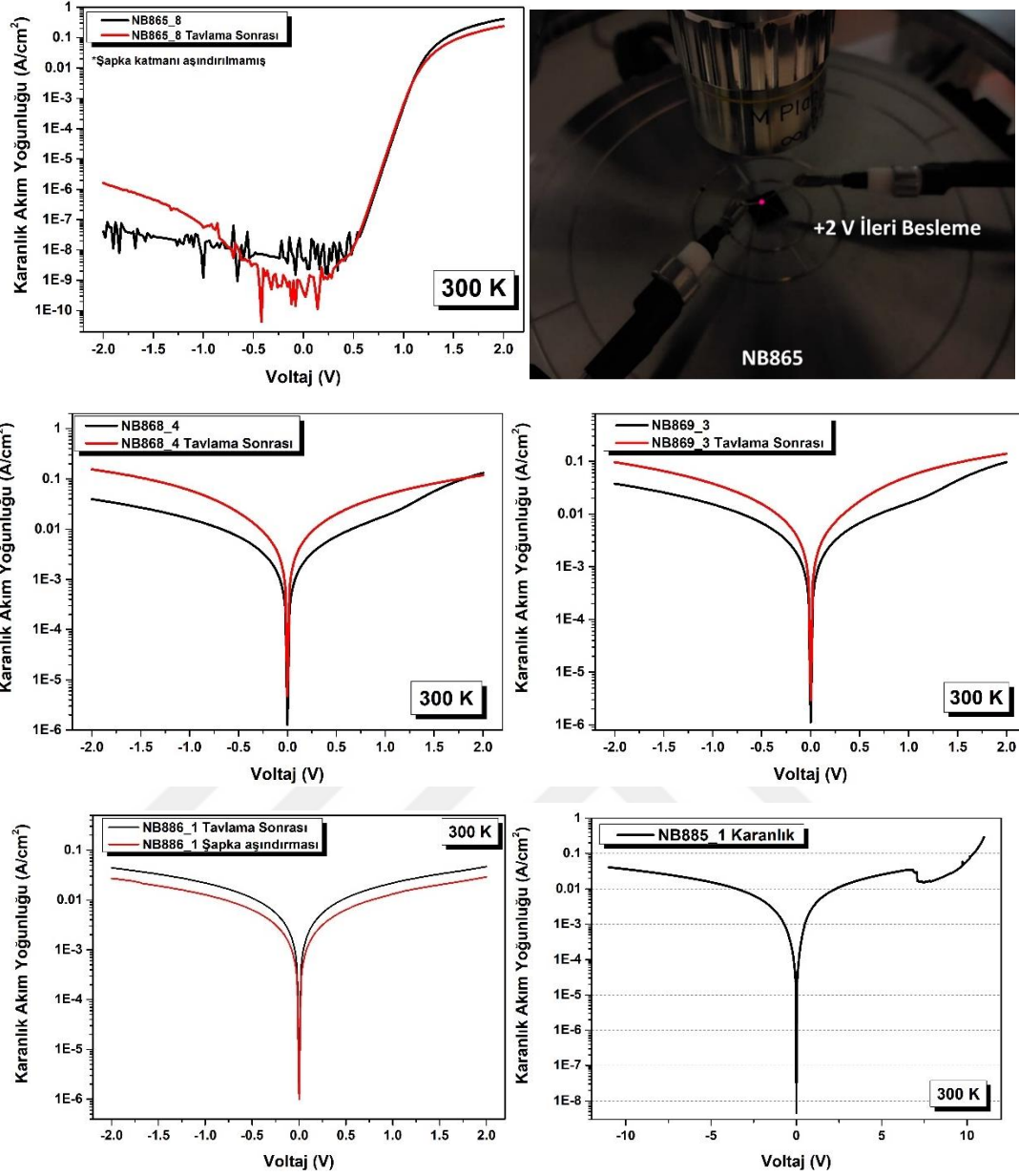
Gölge maske yöntemi ile lokal metal kontak desenleri ve mesa deseni de esnek ince filme uygulanmıştır (Görsel 4.29). Yüzeyde çokça kontak noktası oluşturarak, örneklerden ölçüm alabilme ihtimalinin artırılması sağlanmıştır.



Görsel 4.29. Lokal metal üst kontak aktarılmış esnek ince film güneş hücreleri

Yapılan çoğu denemenin sonucunda ölçüm alınabilen bölgelerde de benzer elektriksel sonuçlar elde edilmiştir.

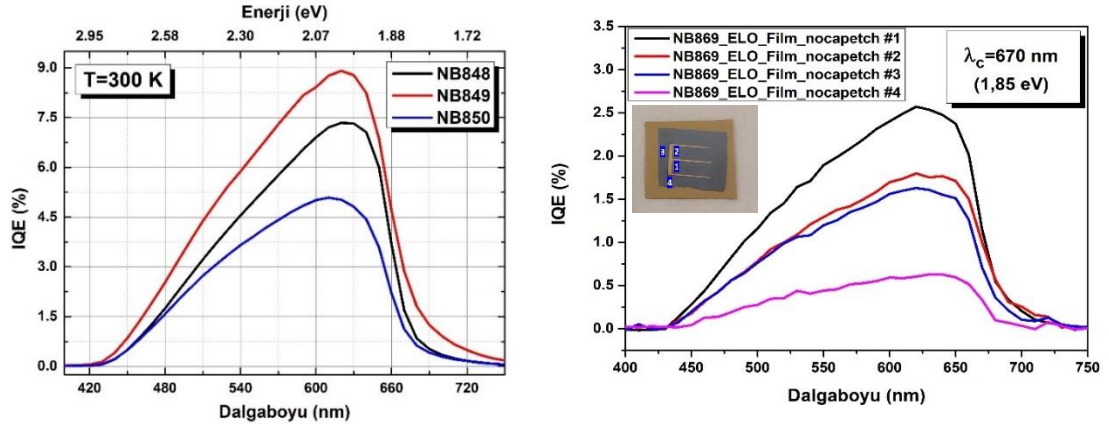
Dönüşüm verimi ölçümü haricinde karanlık akım ve ileri besleme altında yayılan ışıma Şekil 4.52’de görülmektedir.



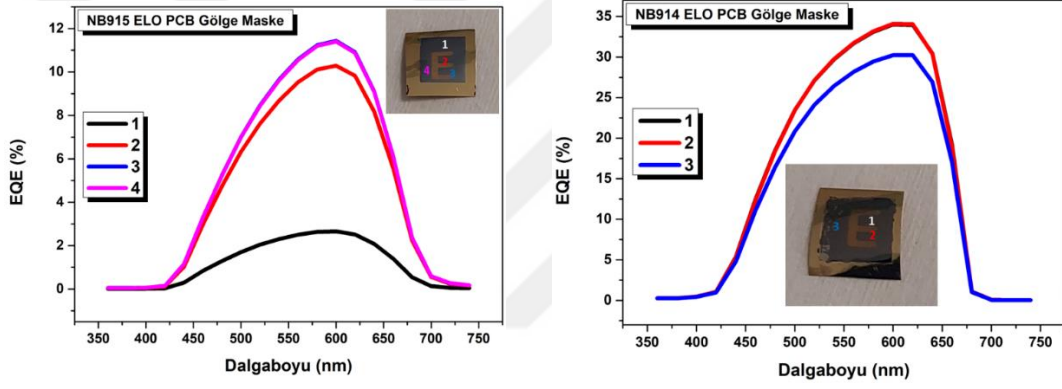
Şekil 4.52. İkinci grup örneklere ait karanlık akım voltaj eğrileri

4.5.2. Kuantum verimi ölçümü sonuçları

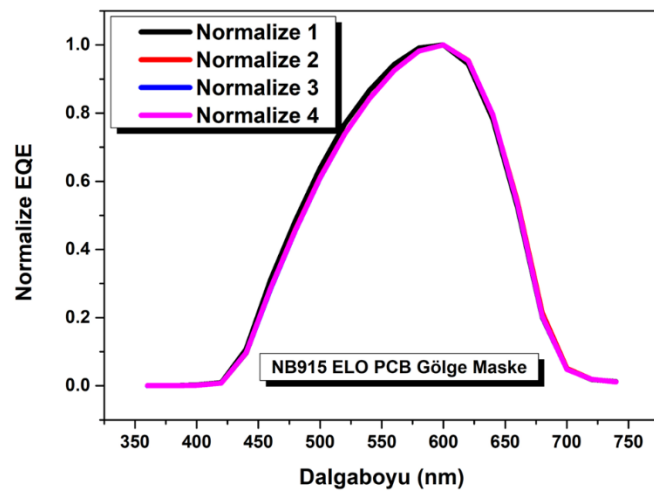
Esnek ince filmlerde, bölgesel olarak poliyamid kaynaklı problemlerden dönüşüm verimi ölçümü bölümünde bahsedilmektedir. Benzer problemler kuantum verimi ölçümünde de görülmektedir. Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te farklı noktalarından ölçüm yapılan örneklere ait kuantum verimi eğrileri görülmektedir. Lokal olarak problemlili bölgelere denk gelen ışığın foto akımda düşüşlere yol açması kuantum verimi grafiklerinden de anlaşılabilmektedir. NB915 örneğine ait farklı bölgelerden alınan ölçümlerin normalizasyon yapılmış grafiği Şekil 4.55'te görülmektedir.



Şekil 4.53. Esnek ince film güneş hücresine ait iç kuantum verimi eğrileri



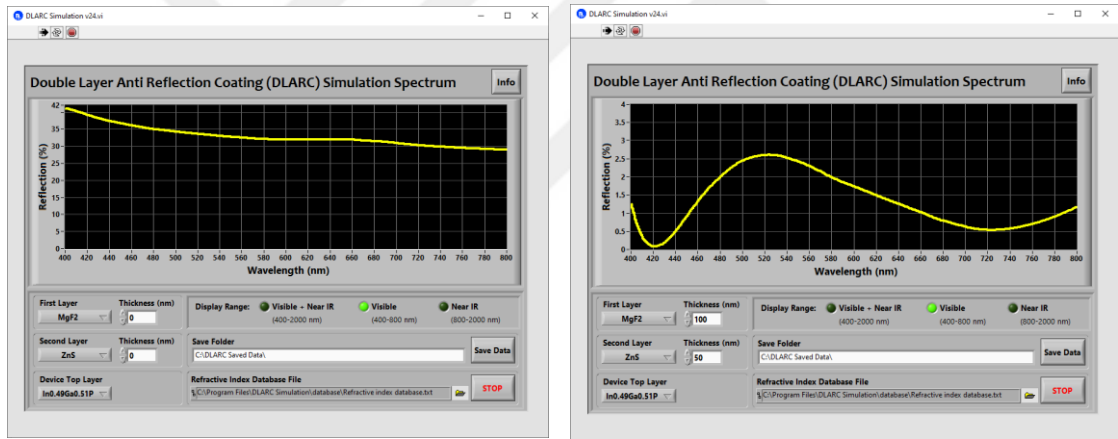
Şekil 4.54. Esnek ince film güneş hücresine ait dış kuantum verimi eğrileri



Şekil 4.55. NB915 örneğine ait farklı noktalardan alınan normalize edilmiş dış kuantum verimi eğrileri

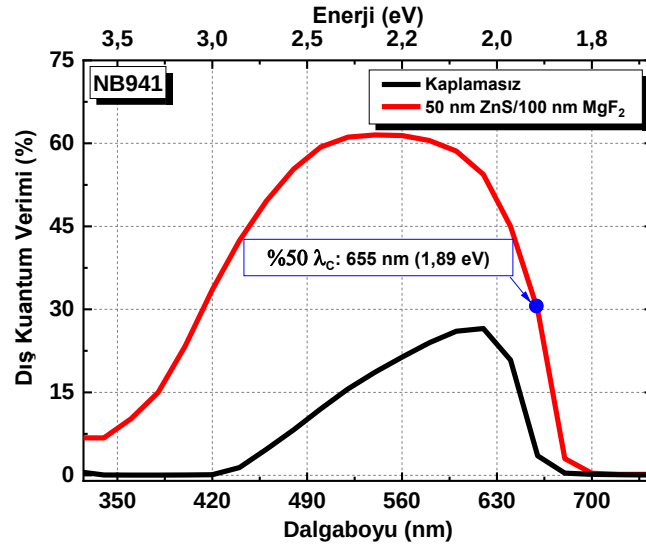
Şekil 4.55'te normalizasyon işlemi sonucunda farklı 4 bölgenin de eğrilerinin üst üste oturduğu görülmektedir. Örnek yüzeyinde farklı noktalardan alınan ölçümlerin hepsinin üst üste oturması örnek boyunca homojenliğin göstergesidir. Ancak poliyamid üzerinde rastgele dağılımlı girinti ve çıkıntılar esnek güneş hücresinin farklı bölgelerinde farklı foto akım üretilmesine sebep olmaktadır.

Şekil 4.56'da görülen 400-2000 nm arasında çift katman yansıtmasız kaplama simülasyon programı (double layer anti-reflection coating, DLARC) geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program ile farklı güneş hücreleri taban malzemesi olarak seçilebilmektedir. Görünür bölgede (400-800 nm) ve yakın kızılötesi bölgesinde (800-2000 nm) yansıtma miktarları dalgaboyuna bağlı olarak simüle edilmektedir. DLARC ile görünür bölgede kaplamasız GaInP'a ait ve 50 nm ZnS / 100 nm MgF₂ kaplama sonrası elde edilen simülasyon yansıma eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.56. GaInP kaplamasız (solda) ve 50 nm ZnS/100 nm MgF₂ (sağda) dalgaboyuna bağlı simülasyon eğrileri

Görünür bölgede ortalama %33 yansıma miktarı bulunan GaInP üzerine 50 nm ZnS/100 nm MgF₂ kaplama sonrasında görünür bölgede yansımanın %3'ün altına düştüğü Şekil 4.56'da görülmektedir. Esnek ince filmlerin yüzeyindeki n-GaAs kontak tabakasının aşındırılmasından sonra AlInP optik pencere katmanının üzerine kaplanan 50 nm ZnS/100 nm MgF₂ ile yansıma miktarı daha da düşürülmüştür. Yansıtmasız kaplama sonrası NB941 örneğine ait kuantum verimi grafiği ise Şekil 4.57'de görülmektedir.



Şekil 4.57. NB941 örneğine ait kaplamasız ve yansıtmasız kaplama işlemi sonrası dalgaboyuna bağlı kuantum verimi eğrileri

Yansıtmasız kaplama sonrasında örneklerdeki kuantum veriminde kısa dalgaboylarında tepki alınmaya başlanmıştır. Şekil 4.57 incelendiğinde kuantum veriminin 2-3 kat arttığı görülmektedir. Uzun dalgaboylarında kuantum verimindeki düşüş, azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunluğunun kısa olması hakkında bilgi vermektedir. Tablo 4.19’da kuantum verimi ölçümünden elde edilen veriler görülmektedir.

Tablo 4.19. Aygıt fabrikasyonunda farklı aşamalardaki kuantum verimi ölçüm sonuçları

Örnek Kodu	Alttaş Tipi	İşlemsiz Ölçüm Sonuçları		Şapka Katmanı Aşındırma Sonrası		Yansıtmasız Kaplama Sonrası		%50 Kesim Dalgaboyu (nm)
		Tepe EQE		Tepe EQE		Tepe EQE		
		Verim (%)	Dalgaboyu (nm)	Verim (%)	Dalgaboyu (nm)	Verim (%)	Dalgaboyu (nm)	
NB848	Si-DZD	6,12	620	-	-	-	-	660
NB849	Si-DLD	8,72	620	-	-	-	-	660
NB850	Si-İşlemsiz	4,43	610	-	-	-	-	650
NB865	GaAs	28,74	620	-	-	-	-	660
NB868	Si-DZD	5,65E-04	620	-	-	-	-	670
NB869	Si-DLD	2,25	620	-	-	-	-	660
NB893	GaAs	32,44	600	-	-	-	-	670
NB894	GaAs	17,51	620	17,9	620	17,9	620	670
NB914	GaAs	34,02	600	-	-	-	-	660
NB915	Si-DZD	11,44	600	-	-	-	-	660
NB919	GaAs	-	-	51,15	620	51,15	620	650

Tablo 4.19 devamı.

NB923	GaAs	29,26	620	51,5	540	51,5	540	670
NB925	Si-DZD	7,23	540	7,31	520	7,31	520	650
NB926	Si-Miscut	14,6	540	33,26	520	33,26	520	650
NB927	GaAs	14,65	620	44,85	560	44,85	560	660
NB941	GaAs	27,97	600	46,25	540	61,51	540	660
NB943	Si-DLD	19,96	600	1,58	560	1,58	560	660
NB951	Si-Miscut	-	-	-	-	26,54	620	650

Bu çalışmada, düzenli, düzensiz desenlenmiş ve 4° miscut Si ve GaAs alttaşlar üzerine en iyi performans gösteren örnekler ve ölçüm sonuçları Tablo 4.20’de görülmektedir.

Tablo 4.20. Çalışmada en iyi performans gösteren farklı alttaşlar üzerine büyütülmüş örnekler

Alttaş Tipi	(004) GaInP FWHM (arcsec)	Dönüşüm Verimi (%)	Tepe Dış Kuantum Verimi (%)
Si-DZD	NB915 (350)	NB915 (%0,39)	NB915 (%11)
Si-DLD	NB943 (361)	NB955 (%0,25)	NB943 (%19)
Si-Miscut	NB945 (301)	NB951 (%1,03)	NB926 (% 33)
GaAs	NB941 (24)	NB919 (%7,04)	NB941 (% 61)

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında düzenli ve düzensiz olarak iki farklı yaklaşım ile Si alttaşlar üzerinde nanoyapılar oluşturulmuştur. Ticari olarak temin edilen farklı çaplardaki nanoküreler kullanılarak nanoküre litografisinde çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. MBE yöntemi ile ilk defa desenlenmiş Si alttaş üzerine GaInP tek eklem güneş hücresi ELO yapıda büyütülmüş ve esnek tabana aktarılarak aygıt fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş esnek ince film tek eklem güneş hücrelerinde dönüşüm verimi ve kuantum verimi ölçümleri yapılmıştır.

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı, GaAs tek eklem ELO ve alttaş tabanlı güneş hücreleri, kızılötesi külçe, süperörgü ve kuantum kuyulu fotodedektörler, kuantum tel ve kuantum nokta büyütülmesi üzerine uzmanlaşmıştır. GaAs tabanlı güneş hücreleri, Si alttaşlar üzerine geliştirilmiş ve bu konuda Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı bünyesinde patent alınmıştır [59]. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu bulunan MBE sistemi ile bu çalışma kapsamında ilk defa fosfor bileşikler içeren ince filmler büyütülmüştür. Sistematik olarak değiştirilen büyütme parametreleri sayesinde GaInP ve AlInP katmanlarında alaşım konsantrasyonu, alttaş boyunca homojenlik, katman kalınlığı gibi önemli parametreler en iyileştirilmiştir.

Güneş hücresi aygıt fabrikasyonunda ELO işlemi için satın alınan poliyamidin yüzeyinin beklenilenden pürüzlü olması aygıt performanslarında belirleyici rol oynamıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlarda, Si alttaş üzerinden geliştirilebilecek ELO yapıları esnek ince filmlerin GaAs gibi pahalı alttaşlara alternatif olabileceği görülmüştür. GaAs alttaşların ELO yöntemi ile tekrar tekrar kullanılabilmesi büyütme maliyetlerini oldukça düşürse de her ELO işlemi sonrasında GaAs alttaşın kimyasal ve mekanik temizliğinin yapılması gerekmektedir. Bu zahmetli uğraşlar sonucunda hem kimyasal hem de zehirli atıklar ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, desenlenmiş bir Si alttaşın ELO işlemi sonrasında ihtiyacı olan tek temizlik, üzerinde III-V grubu bileşiği olan GaAs tampon katmanının Piranha çözeltisi ile temizlenmesi ve tekrar MBE sistemine yüklenmeden önce HF ile yüzey oksitinin temizlenmesidir. Piranha ve HF işlemleri önceden Si alttaş üzerine oluşturulmuş nanoyapılara zarar vermediği için tekrar tekrar desenleme işlemine gerek kalmamaktadır. Yine benzer şekilde, büyütme işleminde optimizasyon çalışmalarının yapılması ve yaşanabilecek büyütme problemleri sonrası desenlenmiş Si alttaş, Piranha

ve HF ile temizlenebilmektedir. Böylece, tekrar tekrar, aynı desenlenmiş alttaş ile büyütme işlemleri farklı parametreler ile büyütme işlemi için kullanılabilir.

ELO yapıda büyütülmüş GaInP tek eklem güneş hücresi üzerine MBE sisteminde GaAs ve InGaAs gibi daha düşük bant aralığına sahip yarıiletken ince filmler büyütülebilmektedir. Böylece çoklu eklem güneş hücre yapıları da Si alttaşlar üzerinden geliştirilebilmektedir.

Çalışma kapsamında, anti faz sınırlarını azaltmak amaçlı kullanılan 4° miscut Si alttaşlar doğrudan kullanılmıştır. İşlemsiz Si alttaşta büyütülen filmlerin aksine 4° miscutlu Si alttaşlar üzerine büyütülmüş esnek ince film GaInP güneş hücrelerinden fototepki alınmıştır. Böylece desenleme işleminin miscutlu Si alttaşlara da uygulanarak denenmesi ile daha da iyi kalitede GaAs tampon katmanları elde edilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] NREL, “Solar Market Research & Analysis,” 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/90042.pdf>. [Accessed Ekim 2024].
- [2] Fraunhofer ISE, “Photovoltaics Report,” 2024. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html>. [Accessed Ekim 2024].
- [3] M. A. Green, E. D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefeld and X. Hao, “Solar cell efficiency tables (Version 64),” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 32, no. 1, pp. 425-441, 2024.
- [4] NREL, “Best Research-Cell Efficiency Chart,” 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>. [Accessed Ekim 2024].
- [5] K. Sasaki, T. Aqai, K. Nakaido, N. Takahashi, R. Onitsuka and T. Takamoto, “Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1556, pp. 22-25, 2013.
- [6] J. F. Geisz, M. A. Steiner, N. Jain, K. L. Shulte, M. Young, R. M. France and D. J. Friedman, “Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell,” in *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018.
- [7] N. Wada, S. Yoshimi, S. Shiro, C. L. Shao and M. Fukui, “Stable operation of AlGaAs/GaAs Light-Emitting Diodes fabricated on Si substrate,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 31, no. 2A, pp. 78-81, 1992.
- [8] J. Yang, P. Bhattacharya and Z. Mi, “High-performance In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs quantum-dot lasers on silicon with multiple-layer quantum-dot dislocation filters,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 11, pp. 2849-2855, 2007.
- [9] D. K. Sengupta, W. Fang, J. I. Malin, J. Li, T. Horton, A. P. Curtis, K. C. Hsieh, S. L. Chuang, H. Chen, M. Feng, G. E. Stillman, L. Li, H. C. Liu, K. M. Bandara, S. D. Gunapala and W. I. Wang, “GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors on GaAs-on-Si substrates,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 1, pp. 78-80, 1997.
- [10] K. Eisenberger, R. Emrick, R. Droopad, J. Finder, S. Rockwell, J. Holmes, C. Overgaar and W. Ooms, “GaAs MESFETs fabricated on Si substrates using a SrTiO₃ buffer layer,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 23, no. 6, pp. 300-302, 2002.
- [11] L. C. Andre, J. A. Carlin, J. J. Boeckl, D. M. Wilt, M. A. Smith, A. J. Pitera, M. L. Lee, E. A. Fitzgerald and S. A. Ringel, “Investigations of high-performance GaAs solar cells grown on Ge-Si/sub 1-x/Ge/sub x/-Si substrates,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 6, pp. 1055-1060, 2005.

- [12] B. Arpapay and U. Serincan, "The role of antiphase domain boundary density on the surface roughness of GaSb epilayers grown on Si (001) substrates," *Superlattices and Microstructures*, no. 140, 2020.
- [13] S. Saravanan, Y. Hayashi, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno, N. Sato and T. Yonehara, "Growth and characterization of GaAs epitaxial layers on Si/porous Si/Si substrate by chemical beam epitaxy.," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, no. 9, pp. 5215-5218, 2001.
- [14] M. Vaisman, N. Jain, Q. Li, K. M. Lau, E. Makoutz, T. Saenz, W. E. McMahon, A. C. Tamboli and E. L. Warren, "GaAs Solar Cells on Nanopatterned Si Substrates," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1635-1640, 2018.
- [15] I. Sandall, J. Shien Ng, P. R. David, C. H. Tan, T. Wang and H. Liu, "1300 nm wavelength InAs quantum dot photodetector grown on silicon," *Optics Express*, vol. 20, no. 10, pp. 10446-10452, 2012.
- [16] M. Yamaguchi, M. Sugo and Y. Itoh, "Misfit stress dependence of dislocation density reduction in GaAs films on Si substrates grown by strained-layer superlattices," *Applied Physics Letters*, vol. 54, no. 25, p. 2568, 1989.
- [17] Y. Alaskar, S. Arafin, D. Wickramaratne, M. A. Zurbuchen, L. He, J. McKay, Q. Lin, M. S. Goorsky, R. K. Lake and K. L. Wang, "Towards van der Waals Epitaxial Growth of GaAs on Si using a Graphene Buffer Layer," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 42, pp. 6629-6638, 2014.
- [18] R. Cipro, T. Baron, M. Martin, J. Moeyaert, S. David, V. Gorbenko, F. Bassani, Y. Bogumilowicz, J. P. Barnes and N. Rochat, "Low defect InGaAs quantum well selectively grown by metal organic chemical vapor deposition on Si(100) 300 mm wafers for next generation non planar devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 26, 2014.
- [19] K. Bhatnagar, J. S. Rojas-Ramirez, R. Contreras-Guerrero, M. Caro and R. Droopad, "Heterointegration of III-V on silicon using a crystalline oxide buffer layer," *Journal of Crystal Growth*, vol. 425, pp. 262-267, 2015.
- [20] M. Richter, C. Rossel, D. J. Webb, T. Topuria, C. Gerl, M. Sousa, C. Marchiori, D. Caimi, H. Siegart, P. M. Rice and J. Fomperine, "GaAs on 200 mm Si wafers via thin temperature graded Ge buffers by molecular beam epitaxy," *Journal of Crystal Growth*, vol. 323, no. 1, pp. 387-392, 2011.
- [21] Z. Mi, J. Yang, P. Bhattacharya and D. Huffaker, "Self-organised quantum dots as dislocation filters: the case of GaAs-based lasers on silicon," *Electronic Letters*, vol. 42, no. 2, pp. 121-123, 2006.
- [22] A. Lee, H. Liu and A. J. Seeds, "Semiconductor III-V lasers monolithically grown on Si substrates," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 28, 2013.

- [23] J. Wang, H. Y. Hu, C. Deng, Y. R. He, Q. Wang, X. F. Duan, Y. Q. Huang and X. M. Ren, "Defect reduction in GaAs/Si film with InAs quantum-dot dislocation filter grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Chinese Physics B*, vol. 24, no. 2, 2015.
- [24] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 510, pp. 510-519, 1961.
- [25] H. I. Ikeri and A. Onyia, "Investigation Of Optical Characteristics Of Semiconductor Quantum Dots For Multi Junction Solar Cells Applications," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 8, no. 10, 2019.
- [26] J. J. Schermer, G. J. Bauhuis, P. Mulder, E. Haverkamp, J. V. Deelen, A. J. Van Niftrik and P. K. Larsen, "Photon confinement in high-efficiency, thin-film III–V solar cells obtained by epitaxial lift-off," *Thin Solid Films*, Vols. 511-512, pp. 645-653, 2006.
- [27] D. Cardwell, A. Kirk, C. Stender, A. Wibowo, F. Tuminello, M. Drees, R. Chan, M. Osowski and N. Pan, "Very high specific power ELO solar cells (>3 kW/kg) for UAV, space, and portable power applications," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2017.
- [28] J. Li, A. Aierken, Y. Liu, Y. Zhuang, X. Yang, J. H. Mo, R. K. Fan, Q. Y. Chen, S. Y. Zhang, Y. M. Huang and Q. Zhang, "A brief review of high efficiency III-V solar cells for space application," *Frontiers in Physics*, vol. 8, 2021.
- [29] Y. F. Yang, C. C. Hsu and E. S. Yang, "Integration of GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors and High Electron Mobility Transistors," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 363-365.
- [30] J. M. Olson, S. R. Kurtz, A. E. Kibbler, K. A. Bertness and D. J. Friedman, "GaInP₂/GaAs tandem cells or space applications," in *Space Photovoltaic Research and Technology Conference*, 1991.
- [31] Z. Deng, J. Ning, Z. Su, S. Xu, X. Zheng, R. Wang, S. Lu, J. Dong, B. Zhang and H. Yang, "Structural dependences of localization and recombination of photogenerated carriers in the top GaInP Subcells of GaInP/GaAs double-junction tandem solar cells," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 1, pp. 690-695, 2015.
- [32] E. E. Perl, D. Kuciauskas, J. Simon, D. J. Friedman and M. A. Steiner, "Identification of the limiting factors for high-temperature GaAs, GaInP, and AlGaInP solar cells from device and carrier lifetime analysis," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, no. 23, 2017.
- [33] D. Alcer, M. Tirrito, L. Hrachowina and M. T. Borgstrom, "Vertically Processed GaInP/InP Tandem-Junction Nanowire Solar Cells," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 7, no. 2, pp. 2352-2358, 2024.

- [34] B. Shi, Q. Li and K. M. Lau, "Self-organized InAs/InAlGaAs quantum dots as dislocation filters for InP films on (001) Si.," *Journal of Crystal Growth*, vol. 464, pp. 28-32, 2017.
- [35] B. Shi, Q. Li and K. M. Lau, "Epitaxial growth of high quality InP on Si substrates: The role of InAs/InP quantum dots as effective dislocation filters.," *Journal of Applied Physics*, vol. 123, 2018.
- [36] O. Abouzaid, H. Mehdi, M. Martin, J. Moeyaert, B. Salem, S. David, A. Souifi, N. Chauvin, J.-M. Hartmann and B. Ilahi, "O-Band Emitting InAs Quantum Dots Grown by MOCVD on a 300 mm Ge-Buffered Si (001) Substrate," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 12, p. 2450, 2020.
- [37] Y. Du, B. Xu, G. Wang, Y. Miao, B. Li, Z. Kong, Y. Dong, W. Wang and H. H. Radamson, "Review of Highly Mismatched III-V Heteroepitaxy Growth on (001) Silicon," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 5, 2022.
- [38] Y. Alaskar, S. Arafin, D. Wickramaratne, M. A. Zurbuchen, L. He, J. McKay, L. Qiyin, M. S. Goorsky, R. K. Lake and K. L. Wang, "Towards van der Waals epitaxial growth of GaAs on Si using a graphene buffer layer," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 42, pp. 6629-6638, 2014.
- [39] "Metal-assisted chemical Etching (MacEtch)," [Online]. Available: <https://mocvd.ece.illinois.edu/research/MacEtch.html>. [Accessed Ekim 2024].
- [40] X. Li, "Metal assisted chemical etching for high aspect ratio nanostructures: A review," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 16, pp. 71-81, 2012.
- [41] A. Stafiniak, J. Prazmowska and W. Macherzynski, "Nanostructuring of Si substrates by a metal-assisted chemical etching and dewetting process," *Royal Society of Chemistry*, vol. 8, pp. 31224-31230, 2018.
- [42] S. Nichkalo, A. Druzhinin, A. Evtukh, O. Bratus and O. Steblova, "Silicon nanostructures produced by modified macetch method for antireflective Si surface," *Nanoscale Research Letters*, vol. 12:106, 2017.
- [43] M. E. Celestien, S. Krishnan, S. Bhansali, E. Stefanakos and D. Y. Goswami, "A review of self-assembled monolayers as potential terahertz frequency tunnel diodes," *Nano Research*, vol. 7, no. 5, pp. 589-625, 2014.
- [44] R. D. Oliveira, A. Mouquinho, P. Centeno, M. Alexandre, S. Haque, R. Martins, E. Fortunato, H. Aguas and M. J. Mendes, "Colloidal Lithography for Photovoltaics: An Attractive Route," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 1665, 2021.
- [45] P. Gao, J. He, S. Zhou, X. Yang, S. Li, J. Shen, D. Wang, T. Yu, J. Ye and Y. Chui, "Large-area nanosphere self-assembly by a micro-propulsive injection method for high throughput periodic surface nanotexturing," *Nano Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 4591-4598, 2015.

- [46] C. J. K. Richardson and M. L. Lee, "Metamorphic epitaxial materials," *Materials Research Society*, vol. 41, pp. 193-198, 2016.
- [47] L. Yang, M. T. Bulsara, K. E. Lee and E. A. Fitzgerald, "Compositionally-graded InGaAs–InGaP alloys and GaAsSb alloys for metamorphic InP on GaAs," *Journal of Crystal Growth*, vol. 324, pp. 103-109, 2011.
- [48] M. Holland, M. V. Dal, B. Duriez, R. Oxland, G. Vellianitis, G. Doornbos, A. Afzalian, T.-K. Chen and vd, "Atomically flat and uniform relaxed III–V epitaxial films on silicon substrate for heterogeneous and hybrid integration," *Science Report*, vol. 7:14632, 2017.
- [49] T. Ward, A. M. Sanchez, M. Tang, J. Wu, H. Liu, D. J. Dunstan and R. Beanland, "Design rules for dislocation filters," *Journal of Applied Physics*, vol. 116, no. 6.
- [50] P. Demeester, I. Pollinter, P. D. Dobbelaare, C. Brys and P. Van Daele, "Epitaxial lift-off and its applications," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 1124-1135, 1993.
- [51] B. Corbett, L. Considine, S. Walsh and W. M. Kelly, "Resonant cavity light emitting diode and detector using epitaxial liftoff," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 9, pp. 1041-1043, 1993.
- [52] P. G. Young, S. A. Alterovitz, R. Mena and E. D. Smith, "RF properties of epitaxial lift-off HEMT Devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 40, no. 11, pp. 1905-1909, 1993.
- [53] P. Ramu, A. Aho, V. Polojarvi, T. Aho, A. Tukiainen, T. Hakkarainen and J. Reuna, "Epitaxial lift-off process for GaAs solar cells controlled by InGaAs internal sacrificial stressor layers and a PMMA surface stressor," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 248, 2022.
- [54] R. Venkatesen, M. K. Arivalagan, V. Venkatachalapathy, J. M. Pearce and J. Mayandi, "Effects of silver catalyst concentration in metal assisted chemical etching," *Materials Letters*, vol. 221, pp. 206-210, 2018.
- [55] A. A. Ergürhan, O. Şenel, E. Yılmaz, B. Arpapay, M. Kulakcı and U. Serincan, "Effect of tilt angle and drying temperature on the surface coverage rate of polystyrene nanospheres in evaporation-driven self-assembly process," *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials and Metrology*, vol. 23, no. 1, 2024.
- [56] E. Yılmaz, A. A. Ergürhan, O. Şenel, B. Arpapay, M. Kulakcı and U. Serincan, "Highly ordered polystyrene nanospheres by self-assembly method," *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials and Metrology*, 2025.
- [57] M. Ikeda and K. Kaneko, "Selenium and zinc doping in Ga_{0.5}In_{0.5}P and (Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Journal of Applied Physics*, vol. 66, no. 11, pp. 5285-5289, 1989.

- [58] T. Shitara and K. Eberl, "Electronic properties of InGaP grown by solidsource molecularbeam epitaxy with a GaP decomposition source," *Applied Physics Letters*, vol. 65, pp. 356-358, 1994.
- [59] M. Kulakcı and U. Serincan, "Fabrication of Flexible Thin Film GaAs-Based Group III-V Solar Cell on Si Substrate". Türkiye Patent WO2022139729, 30 Haziran 2022.



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-5045-8392

Ad Soyad : Onur ŞENEL

Yabancı Dil : İNGİLİZCE

Doğum Yeri ve Yılı :

E-Posta :

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2024-Halen, Temizoda Uzmanı, Koç Üniversitesi, Araştırma ve İnovasyondan Sorumlu Rektör Yardımcılığı
- 2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Katıhal Fiziği Bölümü, Fizik Anabilim Dalı
- 2018, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Katıhal Fiziği Bölümü, Fizik Anabilim Dalı
- 2014, Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Yılmaz E., Ergürhan A., Şenel O., Arpapay B., Kulakcı M., Serincan U., Highly ordered polystyrene nanospheres by self-assembly method, J. Micro/Nanopattern. Mats. Metro. 24(1) 013001 (28 January 2025).
- Ergürhan A., Şenel O., Yılmaz E., Arpapay B., Kulakcı M., Serincan U., Effect of tilt angle and drying temperature on the surface coverage rate of polystyrene nanospheres in evaporation-driven self-assembly process, J. Micro/Nanopattern. Mater. Metrol., Vol. 23, Issue 1, 013001(February 2024).
- Serincan U., Arıkan B., Şenel O., Direct growth of type II InAs/GaSb superlattice MWIR photodetector on GaAs substrate, Superlattices and Microstructures, 120:15-21, 2018.
- Serincan U., Erkuş M., Şenel Onur, Unpassivated High Operating Temperature GaInAsSb Infrared Photodetector Grown On GaAs Substrate, Anadolu University

Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 18-3: 624-631, 2017.

- Erkuş M., Şenel O., Serincan U., Structural, optical and electrical characterization of InAs_{0.83}Sb_{0.17} p- π -n photodetector grown on GaAs substrate, Thin Solid Films, 616:141-144, 2016.

Ödülleri:

- Yüksek Lisans Tezi Başarı Ödülü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, 2021.
- Eskişehir Sanayi Odası, ESO 2020 Ar-Ge ve İnovasyon Proje Pazarı, birincilik ödülü, 2020.
- Italian Crystal Growth, Young researcher best poster award, 2017.
- Eskişehir Sanayi Odası, ESO teknoloji ödülleri, jüri özel ödülü, 2016.
- TÜBİTAK 2241 Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Yarışması, Nanoteknoloji alt kategorisi birincilik ödülü, 2014.