



**GÜNEŞ HÜCRESİ ve LAZER
UYGULAMALARI İÇİN BÜYÜTÜLEN Sb
TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN
YAPILARIN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Sabahattin Erinç ERENOĞLU

Eskişehir 2024

**GÜNEŞ HÜCRESİ ve LAZER UYGULAMALARI İÇİN BÜYÜTÜLEN Sb
TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN YAPILARIN İNCELENMESİ**

SABAHATTİN ERİNÇ ERENOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burcu ARPAPAY

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2024

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 21GAP060 no.lu proje ve
TÜBİTAK tarafından kabul edilen 121F168 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Sabahattin Erinç ERENOĞLU'nun "GÜNEŞ HÜCRESİ VE LAZER UYGULAMALARI İÇİN BÜYÜTÜLEN SB TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN YAPILARIN İNCELENMESİ" başlıklı çalışması 16/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İleri Teknolojiler Anabilim dalı Enerji Kaynakları ve Yönetimi Bilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üy. Burcu ARPAPAY

Üye

: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Üye

: Dr. Öğr. Üy. İsmail KABAÇELİK

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

16/08/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm yüksek lisans ğrencisi Sabahattin Erinç ERENOğLU, GüNEş HÜCRESİ VE LAZER UYGULAMALARI İÇİN BÜYÜTÜLEN SB TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN YAPILARIN İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. y. Burcu ARPAPAY

ÖZET

GÜNEŞ HÜCRESİ ve LAZER UYGULAMALARI İÇİN BÜYÜTÜLEN Sb TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN YAPILARIN İNCELENMESİ

Sabahattin Erinç ERENOĞLU

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2024

Danışman: Dr. Öğr. Üy. Burcu ARPAPAY

Uydu-uzay ve havacılık uygulamalarının baş aktörü olan III-V grubu fotovoltaiik teknolojilerinde termalizasyon ve geçirgenlik kaybını en aza indirerek güneş enerjisini etkin bir şekilde dönüştürebilen yüksek verimli çok eklem güneş hücreleri geliştirme çalışmaları dikkat çekici bir şekilde ilerlemektedir. Son yıllarda kızılötesi bölgeyi en iyi şekilde kullanabilmek için alt-hücre olarak GaSb'nin kullanımı ve entegrasyonu üzerine yoğun araştırma faaliyetleri başlatılmıştır. Diğer yandan, yüksek hızlı ve çok amaçlı sistemler için elektronik ve fotonik bileşenlerin aynı çip üzerinde hibrit entegrasyonu ihtiyacı her geçen gün hızla artmaktadır. Bu aşamada, III-V grubu yarıiletkenlerin üstün elektronik ve optoelektronik uygulamalarını fonksiyonel ve maliyet etkin hale getirerek yaygınlaşmalarını sağlayabilmek için Si teknolojisiyle verimli bir şekilde entegrasyonu geleceğin teknolojisinde en önemli yaklaşımlardan biri olarak öngörülmektedir.

Sb tabanlı üçlü ve dörtlü alaşımlar, bazı özel yarıiletken aygıt teknolojilerinin geliştirilmesinde ilgi çeken III-V grubu malzemelerden biridir. Enerji bant aralığının alaşım konsantrasyonu ile istenilen şekilde ayarlanabilmesi kuantum heteroyapılı aygıt tasarımı ve üretiminde neredeyse sınırsız esneklikler sunabilmektedir. Bu nedenle, GaSb tabanlı üçlü ve dörtlü alaşımların büyütme mekanizmalarının anlaşılması ve karakterizasyon çalışmaları ile özelliklerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

Tez çalışmasının ilk kısmında, GaSb ve Si alttaş üzerine GaSb tek eklem güneş hücresi fabrikasyonları gerçekleştirilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinden %1,20 enerji dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise GaSb tabanlı üçlü (AlAsSb) ve dörtlü (InGaAsSb/AlGaAsSb) malzemelerin moleküler demet epitaksi tekniğiyle epitaksiyel büyütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı büyütme parametrelerinin epitaksiyel filmler üzerindeki yapısal özellikleri incelenmiştir. DeneySEL bulgulardan elde edilen geri besleme ile hem filmlerin ve hem de büyütme koşullarının en-iyileştirme süreçleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GaSb, Güneş hücresi, Üçlü ve dörtlü yarıiletken bileşikler

ABSTRACT

INVESTIGATION OF GROWN Sb-BASED III-V GROUP SEMICONDUCTOR STRUCTURES FOR SOLAR CELL AND LASER APPLICATIONS

Sabahattin Erinç ERENOĞLU

Department of Advance Technologies

Programme in Energy Resources and Management

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2024

Supervisor: Assist. Prof. Burcu ARPAPAY

Highly efficient multi-junction solar cells that minimise thermalisation and transparency loss in III-V group photovoltaic technologies are making remarkable progress in space and aerospace applications. Recent research has been focused on the use and integration of GaSb as a subcell to make the use of the infrared region in these technologies. On the other hand, the need for the hybrid integration of electronic and photonic components on the same chip for high-speed and multipurpose systems is rapidly increasing. To make the superior electronic and optoelectronic applications of III-V group semiconductors more functional and cost effective, their integration with Si technology is one of the most important approaches in the future projection of the technology.

Sb-based ternary and quaternary alloys are one of the III-V group materials of interest in the development of specialized device technologies. The ability to tune the energy band gap with alloy concentration offers flexibility in the design and fabrication of quantum heterostructure devices. It is therefore important to understand the growth mechanisms of GaSb-based alloys and investigate their properties through characterization studies.

In the first section of this study, GaSb single-junction solar cells were fabricated and characterized on GaSb and Si substrates. An energy conversion efficiency of 1.20% was obtained from the GaSb solar cell grown on GaSb substrate. In the second section, the epitaxial growth of AlAsSb and InGaAsSb/AlGaAsSb materials grown using molecular beam epitaxy is discussed. The structural properties of alloys with different growth parameters were experimentally investigated, and optimization processes were carried out based on the experimental results.

Keywords: GaSb, Solar cell, Ternary and quaternary semiconductor alloys

TEŞEKKÜRLER

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda geçirdiğim bu güzel üç yılın ardından, bana kazandırmış olduğu akademik ve teknik deneyimler için tüm Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı ekibine sonsuz teşekkürler etmek isterim. Başta danışmanım Dr. Öğr. Üy. Burcu Arpaway'a tüm kalbimle teşekkür ediyorum. Bu süreç boyunca bana yapmış olduğu yol göstericiliğin yanında harika bir insan tanımış olmanın mutluluğunu yaşıyorum.

Yüksek lisans sürecimin başında Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı bünyesine katılmak için yapmış olduğumuz görüşmede tüm korkularımın geçmesine yardımcı olan ve engin bilgi birikimlerini her daim paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Uğur Serincan ve Doç. Dr. Mustafa Kulakcı'ya çok teşekkür ediyorum.

Laboratuvara geldiğim ilk günden bugüne kadar hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, herhangi bir konuda yardıma ya da tavsiyeye ihtiyaç duyduğumda yanımda olan Ayşe Aygöl Ergürhan'a; bilgi ve tecrübelerini çekinmeden paylaşan, beraber çok eğlenceli zamanlar geçirdiğim Onur Şenel'e; gerek laboratuvarda gerek dışarıda birlikte çok keyifli vakit geçirdiğim iyi insan Hazal Zaimler'e; kendisiyle ne kadar uğraşırsam uğraşayım beni hep anlayışla karşılayan Dr. Elif Yılmaz'a ve keşke daha önce tanıma fırsatım olsaydı dediğim güzel insan Arş. Gör. Orkun Ergürhan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecine başladığım günden son güne kadar her zaman yanımda olan can yoldaşlarım Ezgi Yalçıklı, Vet. Hek. İlker Sert ve Uzm. Öğrt. Gamze Aslantürk'e tüm kalbimle teşekkür ederim. İyi ki varsınız!

Artık aynı şehirde olmasak da her zaman varlıklarını yanımda hissettiğim kıymetli dostlarım, hatta kardeşlerim Dr. Haydar Sarper Salman, Alpgiray Keskin, İbrahim Altinel, Ali Taş ve Aytolun Çatalkaya'ya çok teşekkür ederim.

Of course, as it can happen to anyone, I also experienced some difficult times during this process, both in the course of my studies and in the effects of daily life. I would be remiss if I did not express my gratitude to my dear friend Jessica "Kohme" Lindström from the land of thousand lakes and the white lilies in the North, for cheering me up and putting a smile on my face everytime we talked during this process. Kiitos paljon kaikesta.

Son olarak, tez sürecimin son zamanlarında yaşadığımız sorunlarla beraber savaştığımız ve beraber yeneceğimiz babam Mustafa Tahir Erenoğlu'ya; can dostum Misha'ya ve çekirdek ailemin bir parçası olan halam Ayşe Güler Erdem'e; teyzelerim Selma Ökten ve Fatma Katlav'a; adeta öz ablalarım ve abilerim gibi olan kuzenlerim Düşize Ökten Yılmaz, İpek Erdem, Kara Orkun Erdem, Sanem Yıldırım, Oğuz Erdem'e çok teşekkür ederim.

S. Erinç ERENOĞLU



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.

Sabahattin Erinç ERENOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜRLER.....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VIII
İÇİNDEKİLER	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. Sb TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN TEKNOLOJİLERİ	4
2.1. Sb Tabanlı III-V Grubu Güneş Hücreleri	5
2.1.1. Güneş hücresinin çalışma prensibi	9
2.1.2. Güneş hücresi karakterizasyonu	10
2.2. Sb Tabanlı III-V Grubu Lazer Uygulamaları.....	12
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	14
3.1. Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi (MBE)	14
3.2. X-Işını Kırınımı (XRD).....	16
3.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	17
3.4. GaSb Güneş Hücresi Fabrikasyonu	18
4. GaSb GÜNEŞ HÜCRELERİNİN KARAKTERİZASYONU	21
5. GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE AlAsSb EPI-KATMAN BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU	32

6. GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE AlGaAsSb/InGaAsSb BÜYÜTÜLMESİ ve	
KARAKTERİZASYONU	37
7. SONUÇ	40
KAYNAKÇA.....	41
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinden elde edilen aygıt parametreleri.	24
Tablo 4.2. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinden elde edilen aygıt parametreleri.	24
Tablo 4.3. GaSb/Si güneş hücresi yapısına ait simetrik ve asimetrik düzlem eksenleri etrafında alınan sallantı eğrisi ölçümleri sonucu elde edilen FWHM değerleri.	29
Tablo 4.4. GaSb /(2°) Si güneş hücresi yapısına ait simetrik ve asimetrik düzlem eksenleri etrafında alınan sallantı eğrisi ölçümleri sonucu elde edilen FWHM değerleri.	30
Tablo 5.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen AlAsSb epi-katman örneklerin büyütme parametreleri ve HRXRD ölçümünden elde edilen sonuçları.	32
Tablo 6.1. AlGaAsSb/InGaAsSb kuantum kuyu yapılarının büyütme parametreleri.	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. III-V grubu yarıiletkenlerin 300K'deki örgü sabiti ve bant enerji aralıkları-dalgaboyu grafiği [17].	2
Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu [40].	5
Şekil 2.2. Çok eklem bir güneş hücresinin, her bir alt hücresinin güneş spektrumunda soğurduğu bölgeyi gösteren şematik diyagramı [43]. (Her bir renkli alt hücre farklı bant aralığına sahip yarıiletken malzemeyi temsil etmektedir.)	6
Şekil 2.3. GaSb güneş hücreleriyle ilgili yayınların yıllar içerisindeki dağılımı, anahtar kelimeler: GaSb, güneş hücresi [53].	7
Şekil 2.4. (a) p-n eklemi, (b) elektron-boşluk çifti oluşumu ve yeniden birleşme, (c) tüketim bölgesinde oluşan elektron-boşluk çiftleri (d) p-n eklemi ile enerji üretiminin devre gösterimi.	10
Şekil 2.5. Bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiği ve güç-gerilim karakteristiği [61].	11
Şekil 3.1. MBE sisteminin şematik gösterimi [75].	15
Şekil 3.2. X-ışını kırınımı şematiği [75].	17
Şekil 3.3. $C_6H_8O_7 : H_2O : H_3PO_4 : H_2O_2$ çözeltisi ile yapılan aşındırma yaparken; (a) Manyetik karıştırıcı ile çözelti karıştırılırken örnek beher yüzeyinde konuldu. (b) Manyetik karıştırıcı ile çözelti karıştırılırken örnek karıştırıcı üzerinde sepet yardımıyla yatay pozisyonda tutuldu.	19
Şekil 3.4. Si alttaş üzerine büyütülen GaSb tabanlı güneş hücresinin aygıt yapısının optik mikroskop görüntüleri.	20
Şekil 4.1. (a) Si alttaş üzerine büyütülen GaSb tampon katman yapısının şematik gösterimi, (b) Aktif güneş hücresi yapısının şematik gösterimi, (c) Büyütülen güneş hücresi örneğinin yüzey SEM görüntüsü.	22
Şekil 4.2. (a) Si alttaş ve (b) GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb tampon katman ve aktif güneş hücresi yapısının şematik gösterimi.	23
Şekil 4.3. GaSb güneş hücresinin dalgaboyuna bağlı kuantum verimlilik grafiği. ..	23
Şekil 4.4. GaSb güneş hücresinin (a) aygıt fotoğrafı ve (b) AM1.5G güneş spektrumunda ölçülmüş voltaja bağlı akım yoğunluğu grafiği.	24

Şekil 4.5. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinin (a) akım yoğunluğu-voltaj ve (b) dış kuantum verimlilik ölçüm grafikleri.	25
Şekil 4.6. DLARC Simulation Programı.	26
Şekil 4.7. GaSb alttaş üzerine büyütülen güneş hücresi örneğinden alınan yansıma ölçümü ile DLARC Simulation programından elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	26
Şekil 4.8. GaSb alttaş üzerine yapılan (a) 190 nm Si ₃ N ₄ [52] ve (b) 175 nm SiO ₂ [51] ARC kaplama simülasyonlarının kaplama yapılmamış GaSb simülasyonu ile karşılaştırılması	27
Şekil 4.9. (a) 125 nm ZnS üzerine 210 nm MgF ₂ ARC kaplama ile kaplama yapılmamış GaSb karşılaştırması, (b) ARC simülasyonu ile hesaplanan dış kuantum verimliliği ile kaplamasız dış kuantum verimliliği karşılaştırılması.	28
Şekil 4.10. GaSb/Si güneş hücresi yapısı için $\tan^2\theta\text{-}\beta^2_{\text{adj}}$ grafiği.	29
Şekil 4.11. GaSb/(2°) Si güneş hücresi yapısı için $\tan^2\theta\text{-}\beta^2_{\text{adj}}$ grafiği.	30
Şekil 4.12. GaSb/ Si güneş hücresi örneğine ıslak aşındırma işlemi uygulandıktan sonra alınan yüzeyinin SEM görüntüsü.	31
Şekil 5.1. (a) NB-1 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği, (b) NB-1 örneğinin optik mikroskop yüzey görüntüsü.	33
Şekil 5.2. NB-1 örneğinin XRD simülasyon sonucunu gösteren grafik.....	33
Şekil 5.3. (a) NB-2 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği, (b) NB-2 örneğinin optik mikroskop yüzey görüntüsü.	34
Şekil 5.4. NB-3 örneğinin yüzeyine ait (a) optik mikroskop görüntüsü ve (b) SEM görüntüsü.....	35
Şekil 5.5. NB-3 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği.	36
Şekil 6.1. NB-6 örneğinin yan-kesit SEM görüntüsü.....	38
Şekil 6.2. (a) NB-4, (b) NB-5, (c) NB-6 ve (d) NB-7 örneklerinin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	38
Şekil 6.3. NB-4 örneğinin yüzeyine ait SEM görüntüsü	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AlAsSb	: Alüminyum Arsenik Antimon
AlGaAsSb	: Alüminyum Galyum Arsenik Antimon
AlSb	: Alüminyum Antimon
As	: Arsenik
C ₆ H ₈ O ₇	: Sitrik Asit
DBR	: Bragg Yansıtıcı
EQE	: Dış Kuantum Verimliliği
FF	: Dolum Faktörü
FWHM	: Full Width Half Maximum
GaAs	: Galyum Arsenik
GaSb	: Galyum Antimon
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
H ₃ PO ₄	: Fosforik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
HRXRD	: Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
In	: İndiyum
InAs	: İndiyum Arsenik
InGaAsSb	: İndiyum Galyum Arsenik Antimoni
IQE	: İç Kuantum Verimliliği
IR	: Kızılötesi
I _{sc}	: Kısa Devre Akımı
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi

MIR	: Orta Kızılötesi
mpp	: Maksimum Güç Noktası
η	: Enerji Dönüşüm Verimliliği
P_{mpp}	: Maksimum Güç Noktası Değeri
PR	: Fotorezist
QW	: Kuantum Kuyu
RG	: Atık Gaz Analizörü
RHEED	: Yansıma Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı
Sb	: Antimon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SESAM	: Yarıiletken Doyurulabilir Soğurucu Ayna
Si	: Silisyum
SL	: Süperörgü
Te	: Tellür
UHV	: Ultra Yüksek Vakum
UV	: Morötesi
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
XRD	: X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

III-V grubu yarıiletkenler, doğrudan bant aralığı ve yüksek mobilite değerlerine sahip olma özellikleri sayesinde, optoelektronik aygıt teknolojisinde önemli bir yere sahiptir [1-3]. Bu bileşikler arasında, 0,72 eV (300 K'de) bant aralığına sahip galyum antimon (GaSb) yarıiletkeninin yeri önemlidir [4]. Özellikle kızılötesi (infrared, IR) bölgeyi kapsayan fotodetektör [5], lazer diyot [6], termofotovoltaik hücre [7] vb. aygıt uygulamalarında yüksek kullanım potansiyeline sahip olduğundan optoelektronik teknolojisinde önemli bir rolü vardır [8]. Ayrıca, üçlü ve dörtlü bileşikler halinde kullanıldığında, konsantrasyon oranları değiştirilerek çalışılmak istenen dalgaboyuna özel heteroyapılar elde edilebilmekte ve optoelektronik aygıtların üretilmesinde işlevsel bir malzeme özelliği sunmaktadır [9].

1947 yılında Bell Laboratuvarlarında germanyum (Ge) tabanlı transistörün keşfi, birçok yarıiletken tabanlı aygıtın geliştirilmesinde çıkış noktası olmuş ve yarıiletken teknolojisinin büyümesine öncülük etmiştir [10]. Doğada en çok bulunan elementler arasında ikinci sırada olan silisyum (Si), işlenmesinin hem kolay hem de daha düşük maliyetli olması ile öne çıkmaktadır. Yüksek termal iletkenliği, kararlı oksit formu, daha az termal elektron-boşluk çifti üretimi, düşük kaçak akım özellikleriyle Si, gelişmiş elektronik yarıiletken teknolojisinde üstünlük sağlamaktadır. Zaman içerisinde bu özellikleri sebebiyle Si, Ge'nin yerini almıştır. Dolayısıyla bulunduğumuz çağ "Silisyum Çağı" olarak adlandırılmaktadır [11,12].

Si, bu cazip özelliklerine rağmen dolaylı bant aralığı özelliği nedeniyle III-V grubu yarıiletkenlere kıyasla optoelektronik aygıtlarda kullanılmak için avantajlı değildir [13]. III-V grubu yarıiletkenler ise doğrudan bant aralığına sahip olmasına rağmen Si'ye kıyasla yüksek maliyetli malzemelerdir ve özellikle ileriye dönük sürdürülebilir verimli aygıt üretimi açısından değerlendirildiğinde, dezavantajlıdır. Bu doğrultuda, son 20 yıldır, özellikle III-V grubu yarıiletkenlerin Si alttaşlar üzerine entegre edilerek optoelektronik aygıt üretimi ve karakterizasyon araştırmaları hız kazanmıştır [14,15].

Dar bant aralığına sahip olan GaSb tabanlı yarıiletkenler, orta kızılötesi bölgede optoelektronik aygıtlar için ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1.1). Bu durumda, yüksek maliyetli GaSb alttaş yerine Si alttaş kullanarak GaSb tabanlı aygıt yapılarının büyütülmesi ve geliştirilmesi, ileri optoelektronik teknolojisine katkı sağlamayı amaçlayan önemli bir araştırma alanıdır. Ancak, GaSb ve Si arasındaki örgü

kullanılan III-V grubu üçlü ve dörtlü bileşiklerin öneminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise yapıların büyütülmesi ve karakterizasyonu için kullanılan teknikler olmak üzere MBE sistemi, X-ışını kırınımı (X-ray diffraction, XRD), taramalı elektron mikroskopu (scanning electron microscopy, SEM) ve güneş hücresi fabrikasyonu açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, fabrikasyonu yapılan güneş hücrelerinin dış kuantum verimliliği, iç kuantum verimliliği, enerji dönüşüm verimliliği sonuçları ve büyütülen güneş hücresi yapılarının kusur yoğunluk hesaplamaları sunulmuştur.

Beşinci bölümde, GaSb alttaş üzerine AlAsSb epi-katman büyütmelelerinden ve altıncı bölümde GaSb alttaş üzerine büyütülen AlGaAsSb/InGaAsSb yapılarından elde edilen yapısal karakterizasyon sonuçları sunulmuştur ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Son olarak yedinci bölümde, sonuçlar özetlenmiştir.

2. Sb TABANLI III-V GRUBU YARIİLETKEN TEKNOLOJİLERİ

Sb tabanlı III-V grubu yarıiletkenler IR bölgede çalışan yüksek performanslı optoelektronik aygıtlar için önemli bir malzeme grubu olarak yer almaktadır. III-V grubu yarıiletkenler arasında GaSb, ikili bileşiklerle (AlSb, InAs) bant hizalaması, üçlü ve dörtlü bileşikler ile kullanıldığında ise geniş bir spektral aralığı sunması ile ilgi çekici bir konuma gelmiştir [8,18]. Ayrıca, GaSb alttaş olarak kullanıldığında AlAsSb ve InGaAsSb gibi üçlü ve dörtlü bileşiklerle örgü uyumlu olması da avantaj sağlamaktadır [19]. Bu özellikleri sayesinde, kızılötesi algılayıcı, lazer diyot, termofotovoltaik, çok eklem güneş hücresi ve yüksek frekans aygıt uygulamalarını kapsayan çok geniş bir araştırma ve geliştirme sahasına hitap etmektedir [6, 20-24].

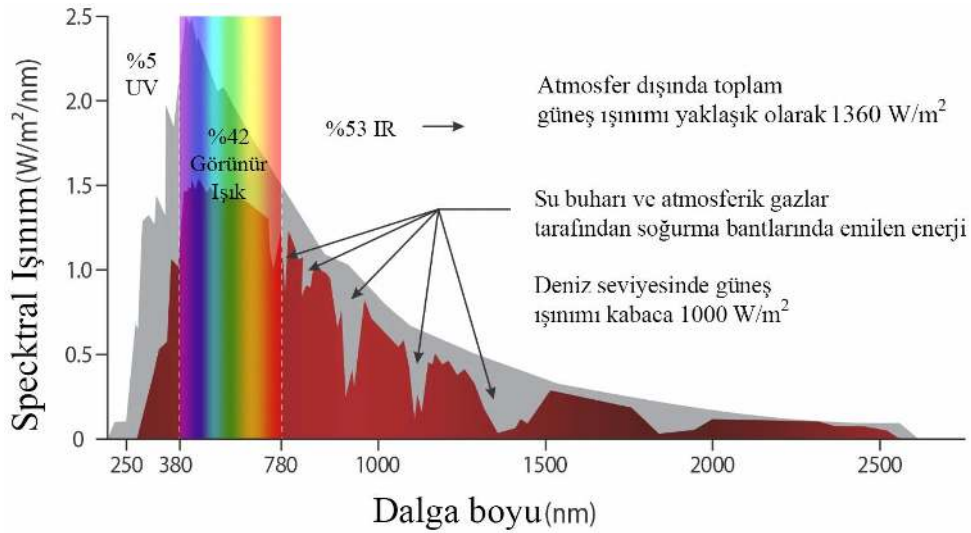
Sb tabanlı aygıtlar, 2-5 ve 8-14 μm aralıklarında çalışan IR füze ve gözetleme sistemleri için görüntüleme sensörleri, yangın algılama ve çevre kirliliğinin izlenmesi vb. gibi çeşitli askeri ve sivil uygulamalar için kritik konumdadır [20]. Yüksek verimli fotodedektörler [5, 24-27], fiberoptik haberleşme sistemleri, lazer mesafe ölçüm sistemleri [6,28] gibi teknolojilerin yanı sıra GaSb tabanlı güneş hücrelerinin, özellikle çok eklem güneş hücreleri alanında araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [29].

Genel olarak, yarıiletken aygıt üretiminde kullanılan III-V grubu alttaşların global pazarda maliyeti önemlidir ve aygıt üretim maliyetini de etkilemektedir [30-32]. Bunların arasında GaSb, bahsedildiği üzere işlevsel rolüne rağmen Si, hatta GaAs gibi yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında alttaş maliyeti hayli yüksektir. Bu anlamda, maliyeti düşürmek amacıyla, III-V grubu alttaşlara kıyasla daha cazip bir tercih olan Si alttaşlar üzerine III-V grubu yarıiletkenlerin büyütme çalışmaları önem kazanmıştır. Ancak, Si ile III-V grubu yarıiletken malzemeler arasında örgü uyumsuzluğu, termal genleşme katsayı farkı ve polar/nonpolar yüzey uyumsuzluğu mevcuttur [33]. Bu nedenle, büyütme esnasında yapı içerisinde anti-faz alanları, dislokasyonlar, mikro ikizler gibi kusurlar oluşmaktadır [34,35]. Bu kusurlar, aygıt performansını olumsuz yönde etkilediğinden özellikle istenmemektedir. Bu nedenle, Si alttaş üzerine kristal kalitesi yüksek tampon katman yapısının geliştirilmesi, üzerine aygıt yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyon çalışmalarının yapılması, optoelektronik aygıt performanslarının iyileştirilmesi açısından önemlidir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda, Si üzerine büyütülen GaSb yapılar için kusur yoğunluğu aygıt üretilimi için gerekli seviyeye kadar indirgenmesine rağmen

[36-39], alttaş ile örgü uyumlu yapılarla karşılaştırıldığında hala geliştirilmeye açık bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

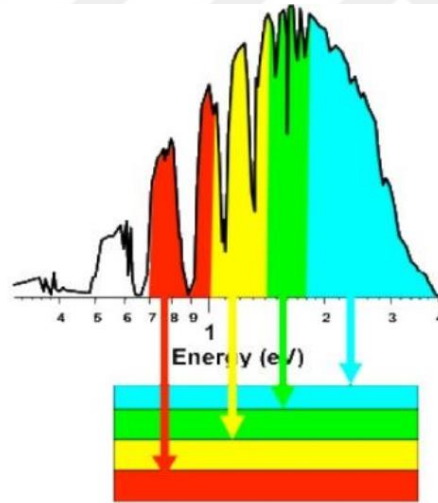
2.1. Sb Tabanlı III-V Grubu Güneş Hücreleri

III-V grubu yarıiletken tabanlı güneş hücreleri, yüksek kristal kalitesi, güçlü soğurma, yüksek fotovoltajik dönüştürme verimliliği özellikleriyle tüm güneş hücresi malzemeleri arasında çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere güneş ışıınımı spektrumu, 300-2500 nm aralığını kapsayan spektral bant içinde yer almakta ve %3-5’i UV ışığından, %42-43’ü görünür ışıktan ve %52-55’i kızılötesi (NIR) ışıktan oluşmaktadır (Şekil 2.1) [29]. Güneş ışıığının spektral ışıınım şiddeti 500-800 nm aralığında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Genel olarak tek eklemli güneş hücresinin çalışması, bant aralığına eşit veya daha büyük enerjili fotonları soğurup elektron-boşluk çiftine dönüştürme mekanizmasına dayanmaktadır. Güneş ışıınım spektrumu dikkate alındığında enerji dönüşüm verimliliğini arttırmak amacıyla tek eklem yerine farklı dalgaboylarındaki ışığı soğurabilen katmanların üst üste bindirilerek elde edilen çok eklem güneş hücreleri sayesinde güneş spektrumundan en iyi şekilde yararlanılmaktadır. Bu hücreler, 3. nesil güneş hücreleri olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Güneş ışıınım spektrumu [40].

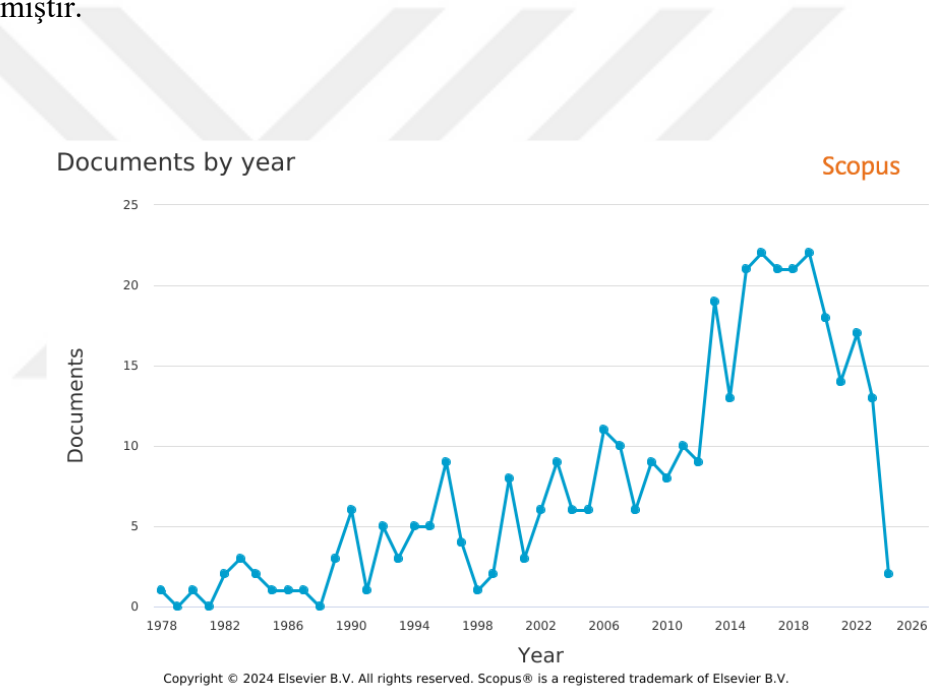
Çok eklem güneş hücreleri, iki veya daha fazla olmak üzere farklı bant aralığını soğurabilen hücre yapılarının üst üste bindirilerek oluşturulan güneş hücreleridir. Farklı bant aralığına sahip ve alt-hücre olarak adlandırabileceğimiz bu yapıların her biri, bant aralığı enerjisinden daha yüksek enerjideki ışığı soğurur ve güneş hücresinin verimine katkı sağlar. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi üst taraftaki alt-hücreler spektrumun yüksek enerjili fotonlarını soğururken, alt taraftaki alt-hücreler spektrumun düşük enerjili fotonlarını soğurmaktadır. Böylece, hücrenin çalışma dalgaboyu aralığı ve performansı artırılabilir. Güneş spektrumunun tamamına karşılık gelen çok sayıda yakın bant aralıklı alt-hücre yapılarını içeren ideal bir çok eklem güneş hücresi için enerji dönüşüm verimliliğinin teorik üst limiti yaklaşık %86 olarak hesaplanmıştır [41]. Deneysel olarak ise enerji dönüşüm verimliliği, yoğunlaştırma altında, rekor değeri yaklaşık %47 değerine ulaşmıştır [42].



Şekil 2.2. Çok eklem bir güneş hücresinin, her bir alt-hücresinin güneş spektrumunda soğurduğu bölgeyi gösteren şematik diyagramı [43]. (Her bir renkli alt-hücre farklı bant aralığına sahip yarıiletken malzemeyi temsil etmektedir.)

GaSb’nin bant aralığı 0,72 eV’dir [2]. Bu bant aralığı, tek eklemlı güneş hücresi üretimi için uygun olmamaktadır [44]. Bu sebeple, 1991 yılında Fraas vd. [45,46] GaSb’yi destekleyici hücre olarak kullanarak hücre verimliliğini arttırma araştırmalarına başlayana kadar GaSb güneş hücresi çalışmaları araştırmacıların ilgisini çekmemiştir. Fraas vd. GaAs güneş hücresinin altına mekanik olarak yerleştirilen GaSb destekleyici hücre ile çok eklem hücre verimliliğini arttırarak, uzayda yüksek konsantrasyonlu ışık

altında kullanılabilecek tandem hücrelerin geliştirilmesini hedeflemiştir. Üretilen aygıt ile %30'un üzerinde bir verimlilik elde edilmiş olup GaSb güneş hücresinin bu uygulamaya yönelik uygun bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir [45]. Fraas vd., n-katkılı bir GaSb alttaşa difüzyon yöntemiyle çinko katkılayarak p-katkılı bölge oluşturmuş ve p-n eklemine elde etmişlerdir. Bu hücrede, kontak tabakası için alttaşın arka yüzeyinin tamamına metal kaplama işlemi uygulanmıştır. Ön kontak için ise standart fotolitografi ve metal kaplama işlemi uygulanmıştır. Son işlem olarak elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile yansıma önleyici tabaka kaplaması ile güneş hücresi fabrikasyonu tamamlanmıştır [47,48]. Böylece, GaSb için güneş hücresi çalışmalarının kapıları açılmıştır [29, 49-52] ve Şekil 2.3'de gösterildiği üzere araştırma çalışmaları hız kazanmıştır.



Şekil 2.3. GaSb güneş hücreleriyle ilgili yayınların yıllar içerisindeki dağılımı, anahtar kelimeler: GaSb, güneş hücresi [53].

Başka bir çalışmada, Lumb vd., GaSb alttaş üzerine iki eklemli GaSb/InGaAsSb güneş hücresi geliştirmiştir. Transfer baskı yöntemi ile GaAs tabanlı üç eklemli bağlantı hücresi GaSb tabanlı yapıyla mekanik olarak birleştirilmiş ve dört terminalli, beş eklemli bir hücre elde edilmiştir. Geliştirdikleri bu güneş hücresiyle %41,2'lik birleşik modül verimliliği elde edilmiştir [29].

Parola vd. ise GaSb ile örgü uyumlu $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ alaşımı için simülasyon yaparak, elde edilen parametreler ışığında güneş hücresi uygulamaları için optik ve elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirmiştir. $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ dörtlü bileşiği için $x=0,31$ ve $x=0,50$ değerlerinde güneş hücresi veriminin %18-20 mertebelerine yükseldiği gözlemlenmiştir [51].

Kret vd., AlInAsSb/GaSb tandem güneş hücreleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, AlInAsSb kristal kalitesinin iyileştirilmesiyle birlikte hücre verimliliğinin %5,2 seviyesine ulaşabileceğini raporlamıştır [54].

GaSb alttaşların maliyetinin yüksekliği göz önüne alındığında, daha ucuz olan Si alttaş kullanarak GaSb güneş hücresi geliştirilmesi yönünde çalışmalar da önem kazanmıştır [55,56]. Tournet vd., Si alttaş üzerine GaSb güneş hücresi çalışmasında, öncelikle %5,90 verimliliğe sahip bir GaSb referans güneş hücresi üretmiştir. GaSb referans hücre için uygulanan hazırlık, büyütme ve üretim süreçleri Si üzeri GaSb güneş hücresi için uyarlanmıştır. Si ile GaSb arasındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı oluşabilecek kristal kusurları ve anti-faz alanlarının etkisinin azaltılması için alttaş üzerine GaSb tampon katman büyütmesi yapıp, aktif hücre yapısı bu tampon katman üzerine büyütülmüştür. Üretilen Si üzerine GaSb güneş hücresinden %0,6 verimlilik elde edilmiştir [55]. Ayrıca, Si üzerine GaSb güneş hücresinin performansının, GaSb ve Si malzemeleri arasındaki %12 mertebesindeki örgü uyumsuzluğuna rağmen, GaAs üzerine GaSb güneş hücresi çalışmalarında elde edilen kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve dolum faktörü (FF) sonuçlarına yakın olduğu vurgulanmıştır [57,58].

Maji vd. ise yapmış oldukları teorik çalışma sonucunda, Si/GaSb iki eklemlili güneş hücresinin verimliliğinin %29,5 değerlerine kadar ulaşma potansiyelinin olduğunu göstermiştir [56].

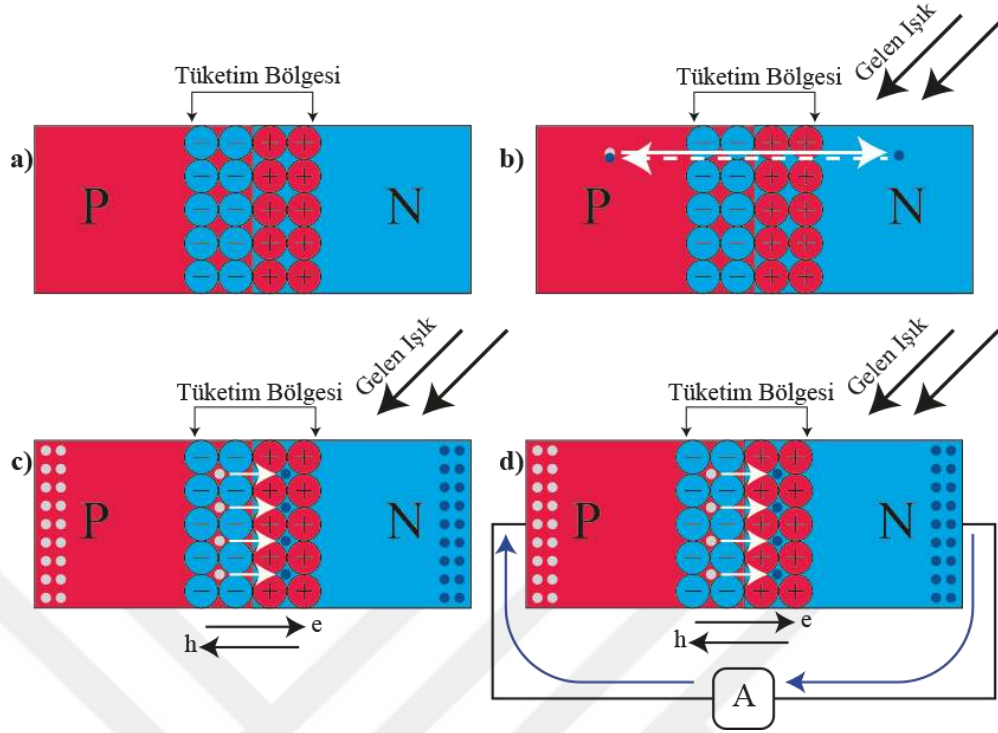
GaSb malzemesinin maliyeti göz önüne alındığında, Si üzerine GaSb güneş hücresi yapısının geliştirilmesinin üretim maliyetini azaltacağı aşikârdır. Ayrıca, üretim maliyetinin azaltılmasının yanı sıra, Si üzerine geliştirilecek GaSb güneş hücreleri ile tandem güneş hücresi yapılarının verimliliğinin iyileştirilmesi için yeni kapılar açılacağı öngörülmektedir.

2.1.1. Güneş hücresinin çalışma prensibi

Güneş hücresi, güneş ışığı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Temel olarak p-n ekleminden oluşmaktadır. P-n eklemi; akseptör atomlarıyla katkılanmış (p-tipi) kristal yapı ile donör atomlarıyla katkılanmış (n-tipi) kristallerin bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkan bir yapıdır. Bu durumda, p-tipi yarıiletkeninde çoğunluk taşıyıcıları boşluklar iken n-tipi yarıiletkeninde çoğunluk taşıyıcılar elektronlar olur. Bu iki bölgenin kesişim bölgesinde, bir diğer deyişle eklem bölgesinde, elektronlar n-tipinden ve boşluklar p-tipinden difüzyon yoluyla hareket ederek sırasıyla pozitif yüklü donör ve negatif yüklü akseptör iyonları bırakarak bir arındırılmış bölge oluştururlar (Şekil 2.4(a)). Sonuç olarak, tüketim bölgesinde, yönü n-tipinden p-tipine doğru olan bir elektrik alan oluşur. Böylece, elektrik alan, yük taşıyıcılarının difüzyon akımına zıt yönde bir sürüklenme meydana getirir. Denge durumunda, yani bir dış etki olmadığı durumda, eklem boyunca net akım sıfır olmaktadır [59,60].

Güneş hücresi ışık ile uyarıldığında, gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin bant aralığından düşükse soğurulmadan geçer. Foton enerjisi, bant aralığından yüksek ise soğurulma olayı gerçekleşir. Bu durumda, eklem bölgesine ışık düşürüldüğünde ilk olarak elektron-boşluk çifti oluşmaktadır. Elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasıyla tüketim bölgesindeki elektrik alan etkisinden kaynaklı yeniden birleşme şansı bulamadan elektronlar çoğunluk taşıyıcı oldukları n-tipi bölgeye sürüklenirken, boşluklar da benzer şekilde çoğunluk taşıyıcı oldukları p-tipi bölgeye sürüklenirler. Yük taşıyıcılarının bu hareketinden kaynaklı bir akım oluşmaktadır. Tüketim bölgesi ve taşıyıcıların difüzyon mesafesi dışında üretilen yük taşıyıcılar tüketim bölgesine ulaşmadan elektron-boşluk birleşmesi meydana gelir ve akıma katkı sağlamaz. Dolayısıyla, elektron soğurduğu enerjiyi kaybederek enerji dönüşümü sağlayamaz [59,60].

Aygıt fabrikasyonu sonucu alt ve üst kontakların oluşturulması ve devreye bağlanması ile ışığa maruz kalan güneş hücresi elektrik üretimini gerçekleştirmektedir (Şekil 2(d)). Işık ile uyarılıp soğurulan enerji sayesinde tüketim bölgesi içerisinde oluşan yük taşıyıcılar ayrışır ve dış devrede n-tipini taraftan p-tipi tarafa doğru elektron akışı başlar. Sonrasında, elektronlar p-tipi bölgeye ulaşır, boşluklar ile yeniden birleşme tamamlanır ve foton enerjisi elektrik enerjine dönüştürülmüş olur [59,60].



Şekil 2.4. (a) p-n eklemi, (b) elektron-boşluk çifti oluşumu ve yeniden birleşme, (c) tüketim bölgesinde oluşan elektron-boşluk çiftleri (d) p-n eklemi ile enerji üretiminin devre gösterimi.

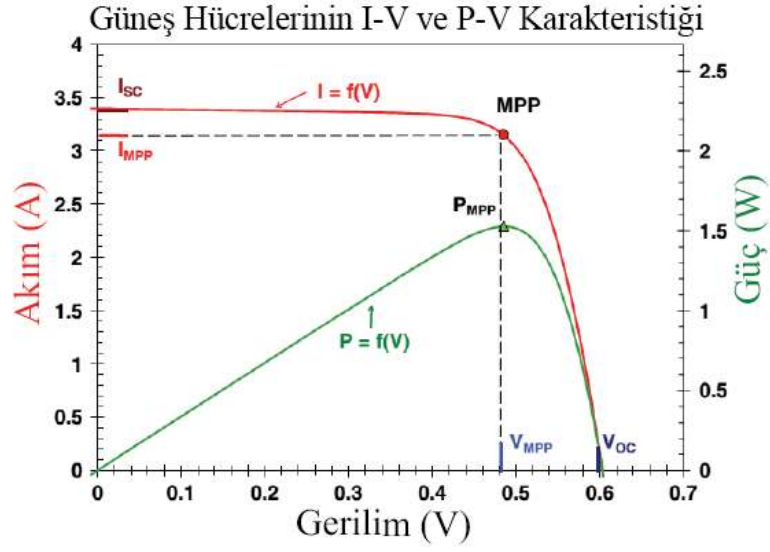
2.1.2. Güneş hücresi karakterizasyonu

Bir güneş hücresinin performansını belirlemek için kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dolun faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimliliği (η) parametreleri elde edilmelidir. Güneş hücrelerinin akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri, güneş hücresi için önemli olan ve aşağıda verilen parametreleri hesaplamak için kullanılmaktadır (Şekil 2.5) [61].

Kısa devre akımı (I_{sc}): Voltajın sıfır olduğu durumda hücreden geçen akımın ulaşabildiği maksimum değerdir.

Açık devre voltajı (V_{oc}): Akımın sıfır olduğu durumda hücreden elde edilen maksimum voltaj değeridir.

Maksimum güç noktası (mpp): Bu noktada, güneş hücresi, gelen ışık şiddetine ve sıcaklığa bağlı olarak en yüksek güç çıkışını üretmektedir.



Şekil 2.5. Bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiği ve güç-gerilim karakteristiği [62].

Dolum faktörü (FF): Güneş hücresinin genel davranışında belirleyicidir ve kalitesinin bir ölçüsüdür. P_{mmp} 'nin (Denklem 2.1) $V_{oc} \cdot I_{sc}$ değerine oranı ile hesaplanmaktadır (Denklem 2.2).

$$P_{mmp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2.1)$$

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.2)$$

Enerji dönüşüm verimliliği (η): Güneş hücresinin performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bir hücrenin, güneş enerjisini ne kadar etkin bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürebildiğini ifade eder. Bir güneş hücresinin enerji dönüşüm verimliliği, maksimum çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.3).

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{giris}} \quad (2.3)$$

2.2. Sb Tabanlı III-V Grubu Lazer Uygulamaları

Telekomünikasyon ve moleküler spektroskopi gibi birçok uygulamalarda, orta kızılötesi (MIR) bölgesinde (2-5 μ m) çalışan aygıtlar tercih edilmektedir [63]. HF, PH₃, H₂S vb. tehlikeli gazın soğurma bölgesi MIR bölgesinde olması sebebiyle, bu bölgede gaz tespiti için kullanılan sistemler için bir önem teşkil etmektedir [64]. MIR yarıiletken lazerler, oda sıcaklığında atmosfer kirliliği tespiti için uygun bir kullanım aracı haline gelmiştir. Bunun yanı sıra; kaçak tespitleri, endüstriyel işlem, tıbbi teşhisler ve lazer operasyonlar vb. birçok uygulama için oldukça geniş bir yelpazede kullanım olanağı sunmaktadır [6].

GaSb; InAsSb, AlAsSb gibi üçlü bileşiklerle ve AlGaAsSb, InGaAsSb gibi dörtlü bileşiklerle birlikte kullanılmaktadır. Üçlü ve dörtlü bileşikler, kompozisyon oranlarının değiştirilmesi ile bant aralığı ayarlaması yapılabilmesi nedeniyle belirli dalgaboylarında çalışan optoelektronik aygıtların üretimi için fonksiyonel malzemelerdir [65,66].

AlGaAsSb, orta kızılötesi lazerler için doğal bariyer ve kaplama malzemesidir. InGaAsSb, 2 μ m dalgaboyu mertebesindeki diyot lazerlerin önemli bir aktif bölge bileşenidir [67]. Garbuzov vd., GaSb üzerine AlGaAsSb/InGaAsSb yapısı ile 2 μ m dalgaboyu bölgesi için 4 W çıkış gücüne sahip bir lazer geliştirmişlerdir [68]. Donetsky vd., 2,2-2,5 μ m bölgesinde GaSb üzerine AlGaAsSb/InGaAsSb kuantum kuyu yapısı ile geliştirdikleri diyot lazer ile oldukça düz bir optik kazanç spektrumu gözlemiştir [69].

Yarıiletken doyurulabilir soğurucu aynalar (SESAM), ultra hızlı katı-hal ve yarıiletken lazerler için önemli bir pasif mod-kilitleme aracıdır [70]. Alaydın vd. 2,35 μ m bölgesi için tasarladıkları SESAM yapısında, GaSb alttaş üzerine 24 çift GaSb/AlAs_{0,08}Sb_{0,92} Bragg yansıtıcı (DBR) katman çiftini takiben In_{0,34}Ga_{0,66}Sb kuantum kuyu (QW) doyurucu soğurucu katman modelini kullanmıştır. Yapılan bu çalışma ile MIR bölge için ultra hızlı lazerlerde kullanılmak üzere bir SESAM yapısı incelenmiştir [71].

Üçlü ve dörtlü bileşikler, konsantrasyon oranlarının değiştirilmesi ile bant aralığı enerjisini ayarlama esnekliği sunmaktadır. Bir diğer deyişle, üretilen lazerin aktif bölgesini oluşturması sebebiyle üçlü ve dörtlü bileşiklerin oransal ayarlanabilirliği, hedeflenen dalga boyunda çalışan aygıtlar geliştirmek için kritiktir [72]. Bunun yanı sıra, AlAsSb ve AlGaAsSb DBR katmanlarının örgü uyumluluğunun yanı sıra, yüksek kırılma

indisi sayesinde çok yüksek yansıtıcılık elde edilebilmektedir. Bu sayede, lazer kavitesinde etkili optik geri besleme sağlanmakta ve lazerin genel çıkış gücü artırılabilir [73,74].

Kullanım alanları göz önüne alındığında, MIR bölgede çalışan lazerler için üçlü ve dörtlü bileşikler ve DBR katman büyütme dinamiklerinin anlaşılması/geliştirilmesi, örgü uyumluluğunun sağlanması, doğru bileşik kompozisyonunun belirlenmesi günümüzde büyük önem taşıyan konulardan biri haline gelmiştir.



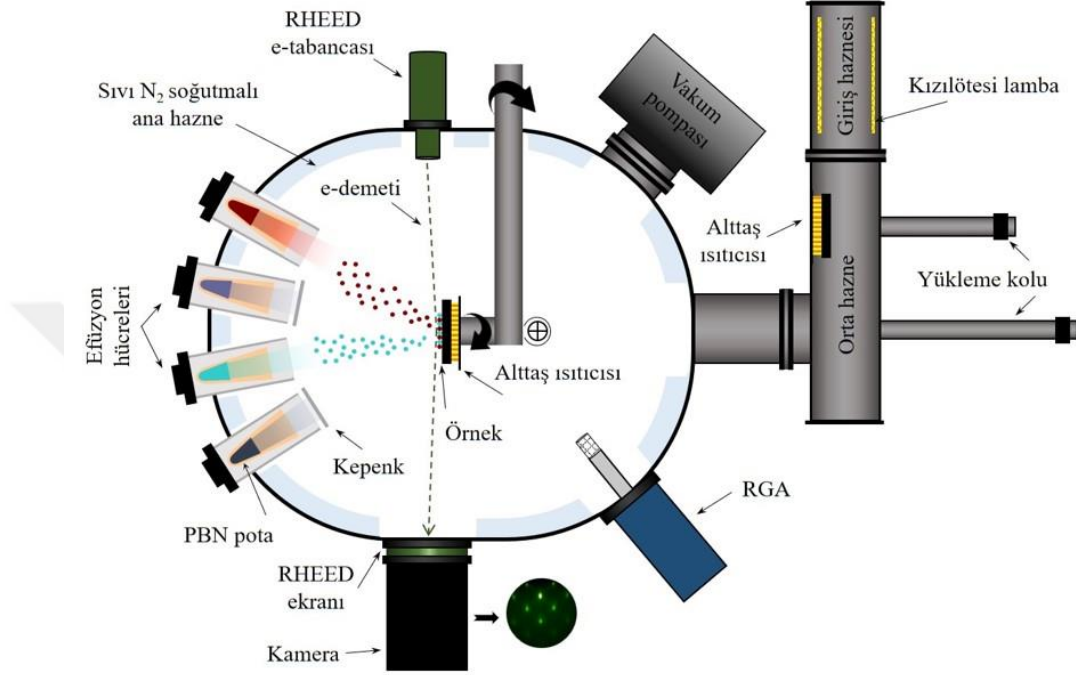
3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi (MBE)

MBE, ultra yüksek vakum (ultra high vacuum, UHV) altında, atomik katman hassasiyetinde, homoepitaksiyel ya da heteroepitaksiyel yapıların büyütülmesi için kullanılan bir kristal büyütme tekniğidir. Yarıiletkenler, oksitler vb. olmak üzere, çeşitli epitaksiyel katmanlar, MBE tekniği ile homojen, tekrarlanabilir ve yüksek kristal kaliteli olarak elde edilebilmektedir. Özellikle, hassas bir şekilde katkı oranları ile konsantrasyon oranları ayarlanarak atomik katman mertebesinde yapıların büyütülmesini mümkün kıldığından günümüzde en gelişmiş büyütme teknikleri arasında önemli bir yere sahiptir.

Efüzyon hücreleri, vakum pompaları, yüzey analiz araçları, kütle spektroskopisi ve sıcaklık sensörleri ile donatılmış paslanmaz çelik hazne, bir MBE sisteminin temel bileşenlerini oluşturmaktadır (Şekil 3.1). MBE sisteminin temel kullanım amacı yüksek kristal kaliteli malzemeler büyütme olduğundan UHV ($\leq 10^{-10}$ Torr) ortamı gereklidir. Hazne ortamını temiz tutmak ve büyütme işlemi sırasında oluşabilecek kirliliği en aza indirmek için iyon pompaları ve/veya kriyojenik pompalar ile UHV koşulu sağlanır. Ayrıca, sıvı azot ile büyütme haznesinin iç çeperinin soğutulması sağlanarak vakumun iyileştirilmesine katkıda bulunulur. Büyütme sürecinde ya da bakım aşamasında hazne ortamında atık ya da istenmeyen gazların tespit ve takip edilmesi için atık gaz analizörü (residual gas analyzer, RGA) kullanılır. Çok yüksek saflıkta olan elementel kaynaklar, kepenklerle donatılmış efüzyon hücrelerinin içindeki potalara yüklenir ve potaların ısıtılmasıyla akı sağlanır. Kepenklerin açma ve kapama süresinin yaklaşık 0,1 s olması, atomik mertebede büyütme kontrolünün sağlanması açısından önemlidir. Akı oranları ve büyütme hızları, iyon ölçer, bir diğer deyişle vakum ölçer ile belirlenebilmektedir. Büyütme sürecinde, alttaş ısıtıcısına yüklenen alttaş ve efüzyon hücreleri istenilen uygun büyütme sıcaklıklarına ayarlanır. Büyütülecek malzeme gubuna ait kepenklerin açılmasıyla buharlaşan atomlar veya moleküller alttaş yüzeyine tutunarak kristalleşme süreci başlar. Büyütme işlemi sırasında alttaş sıcaklığı, alttaş ısıtıcısının termoçiftleri ve temassız sıcaklık ölçerler kullanılarak izlenebilmektedir. Büyüme sürecini gerçek zamanlı olarak izlemek için kullanışlı tekniklerden biri de yansıma yüksek enerjili elektron kırınımıdır (reflection high energy electron diffraction, RHEED). RHEED, elektron tabancısından çıkan ve çok küçük geliş açısı ($1-3^\circ$) ile yüzeye gelen elektron demetinin örneğin yüzey atomları ile etkileşimi sonucunda kırınım deseni oluşmasını ve

büyüme hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Böylece, anlık olarak yüzey kristal bilgisi ve büyüme modları hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, RHEED desenindeki osilasyonlar incelenerek büyüme hızı ölçülebilmektedir [75].



Şekil 3.1. MBE sisteminin şematik gösterimi [75].

GaSb güneş hücreleri için büyütme işlemleri, Veeco GEN20MC MBE sisteminde (100) yönelimli 2 inç çapında katkısız eğimli Si alttaşlar (Sil'tronix) üzerine yapılmıştır. Alttaşlara, ana hazneye yüklenmeden önce ayrı haznelerde sırasıyla 150 ve 400 °C sıcaklıklarında standart temizleme prosedürü olan kusturma işlemleri uygulanmıştır. Büyütme haznesine alınan alttaşlar, ~850 °C sıcaklığına ısıtılarak yüzeyinden doğal oksit katmanı kaldırılmıştır. Ardından 2×1 Si kırınım deseninin gözlenmesiyle büyütme sıcaklığına indirilerek 5 dk boyunca Sb akısı altında bekletilip büyütme işlemine başlanmıştır. AlSb QDs, V/III akı oranı ~50, büyüme hızı 0,1 ML/sn olmak üzere 485 °C'de büyütülmüştür. AlSb ve GaSb epi-katmanları ise, V/III akı oranı 10, büyüme hızı 0,5 ML/sn olmak üzere sırasıyla 485 ve 520 °C'de sıcaklıklarında büyütülmüştür. Büyütme boyunca sıcaklıklar pirometre ile kontrol edilmiş ve kırınım desenleri RHEED ile takip edilmiştir.

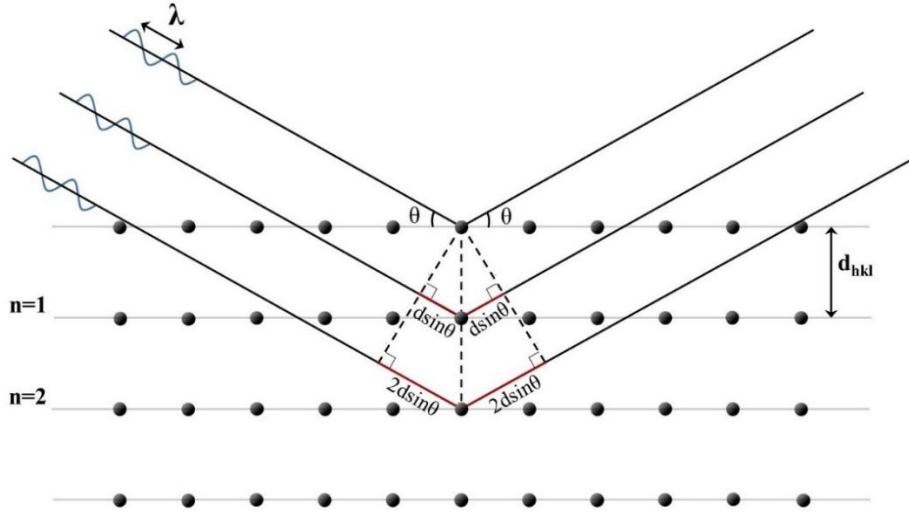
Üçlü ve dörtlü bileşiklerin büyütülmesi, (100) yönelimli 2 inç çapında Te katkılı n-tipi GaSb alttaş üzerine yapılmıştır. Her büyütme öncesinde, giriş ve orta haznede, alttaşlara sırasıyla 150 ve 350 °C sıcaklıklarında standart temizleme prosedürü olan kusturma işlemleri uygulanmıştır. Büyütme haznesine alınan alttaşlar, yüksek Sb akısı altında (10^{-6} Torr mertebesinde) doğal oksit kaldırma sıcaklığı olan 560 °C'ye ısıtılmıştır. RHEED ekranı ile yüzeyden oksit kaldırma süreci takip edilmiştir. Kırınım desenlerinin gözlenmesiyle örnekler büyütme sıcaklığına indirilmiştir.

3.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

Atomların düzenli periyodik bir şekilde dizildiği yapılar kristal olarak adlandırılmaktadır. Kristal yapının tüm özelliklerini gösteren en küçük yapıtaşına ise birim hücre denir. Kristal yapılarını incelerken, atomik düzlemler ve düzlem yönleri kullanmak kolaylık sağlamaktadır. Düzlemler, hayali değerlendirilmek üzere miller indisleri ile temsil edilmektedir. Böylece, kristal yapısına özgü yüzey özellikleri hakkında bilgi elde edilebilmektedir.

Bir kristalin düzlemlerine bir geliş açıyla gönderilen X-ışını, düzlemi oluşturan atomlar ile etkileşime girerek aynı fazda ve yapıcı girişim yapması durumunda gerekli koşul gerçekleşmektedir (Şekil 3.2). XRD olayını açıklayan bağlantı ise Bragg yasası olarak bilinir (Denklem (3.1)) [76]. Burada, λ X-ışının dalgaboyunu, n kırınım mertebesini ($n=1,2,3,\dots$), d Miller indisleri (h,k,l) ile ifade edilen düzlemler arasındaki mesafeyi, θ gelen ile yansıyan X ışınının yüzey ile yaptığı açıyı göstermektedir.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.1)$$



Şekil 3.2. X-ışını kırınımı şematiği [75].

X-ışınlarının dalga boyu uzunluğunun atomlar arası mesafe mertebesinde olması ve kırınım sayesinde kristal yapılar hakkında birçok bilgi elde edilmesine olanak sağlar. Yüksek çözünürlüklü XRD (high resolution XRD, HRXRD), kristal malzemelerin yapısal karakterizasyonu için kullanılan ve geniş kullanım alanına sahip çok kullanışlı bir tekniktir. Tek katman ya da çok katmanlı epitaksiyel yapıların kristal kalitesi, katman kalınlığı, yüzey/ara-yüzey pürüzlülüğü, kusur yoğunluğu ve yapıdaki gerilme-gerinim (stress-strain) seviyesinin belirlenmesi ve bileşiklerin konsantrasyon oranının tespit edilmesi HRXRD sistemleri ile yapılan analizlerle mümkündür [76].

Bu çalışmada, Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı deneyleri, Panalytical X'Pert Pro MRD HRXRD sistemi kullanılarak yapılmıştır. Si ve GaSb kristaline ait simetrik düzlem eksenleri etrafında sallantı eğrisi ölçümleri, $0,0005^\circ$ hassasiyetinde ve Cu $K_{\alpha 1}$ ışınması ($\lambda = 0,15406$ nm) kullanılarak alınmıştır. Örneklerin ω - 2θ ölçümleri, simetrik (004) düzlem eksenleri ($\Phi=0$ ve $\Phi=180$) ve asimetrik (224) düzlem eksenleri etrafında alınmıştır. Ayrıca, V grubu konsantrasyonu PANalytical Epitaxy programı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

SEM, vakum ortamında örnek yüzeyinin elektron demetine maruz bırakılması ve etkileşimi sonucunda yüksek çözünürlükte görüntü alınmasını sağlayan işlevsel bir

görüntüleme tekniğidir. Elektron tabancısından elde edilen elektronların malzeme atomları ile etkileşimleri sonucunda ortaya çıkan çeşitli sinyaller, uygun algılayıcılar aracılığıyla toplanıp ve işlenmesi sayesinde görüntüye çevirebilmektedir. Optik mikroskopta kaynak olarak kullanılan ışık yerine, SEM sistemlerinde kaynak olarak daha kısa dalga boylu elektronlar kullanılmaktadır. Böylece, yüksek çözünürlükte, yüzey topografisi ve morfolojisi hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, elemental analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, yüzey morfolojisi, Olympus optik mikroskop ve ZEISS Ultraplus field emission scanning electron microscope (FESEM) ile incelenmiştir.

3.4. GaSb Güneş Hücresi Fabrikasyonu

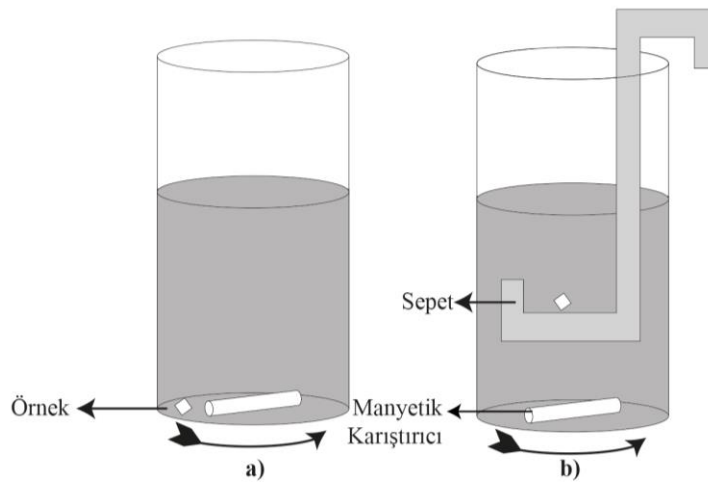
Güneş hücresi fabrikasyonu standart fotolitografi basamakları kullanılarak yapılmıştır. Örnekler, fabrikasyon işlemleri öncesinde yüzey kirliliklerinden arındırılmak için 5 dk boyunca asetonda bekletilmiştir. Asetonun kendisi de örnek yüzeyinde kalıntı bırakacağından bu işlem sonrasında aseton kalıntılarını temizlemek için 5 dk boyunca Isopropanol içerisinde bekletilip, ardından ultra saf su ile yıkanıp saf azot ile kurutularak temizlik tamamlanmıştır.

Temizlenen örnekler döner kaplama (spin coating) sistemi ile AZ9260 fotorezist (PR) ile kaplanmıştır. Bu işlemde, 5000 rpm ile 1 dk boyunca kaplanan fotorezist kalınlıklarının ortalama 1,7 μm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, 1 dk boyunca 110 °C sıcaklığında hafif ısıtma işlemi uygulanarak, örnekler maskeleme basamağına hazırlanmıştır.

PR kaplanan örnekler, morötesi (UV) maskeleyici kullanılarak 150 sn pozlamaya maruz bırakılmıştır. PR kaplı örnek yüzeyinde ışık gören alanlar, AZ400K: H₂O (1:4) çözeltisi ile ortalama 3 dk 30 sn sürede çözünmüştür. Ardından, 3 dk boyunca 120 °C sıcaklığında sert ısıtma işlemi uygulanmış ve ıslak aşındırma işlemine hazır hale getirilmiştir.

GaSb tabanlı güneş hücre fabrikasyonu için alt kontak derinliğine inip metal kaplama işlemine hazırlamak için ~3,5 μm aşındırılması gerektiğinden GaSb malzemesine uygun aşındırma çözeltileri üzerine bir çalışma yapılmıştır. Sitrik asit tabanlı ıslak aşındırma çözeltisi, GaSb malzemesi için genel olarak kullanılan bir çözeltilerdir. Sitrik asit ile yapılan aşındırma çalışmasında, hazırlanan çözeltinin aşındırma

hızının çok yavaş olması sebebiyle bu yöntem kullanılmamıştır. Bunun yerine, HCl tabanlı aşındırıcılar da bu işlem için kullanılabilir. Ancak, yüksek aşındırma hızı nedeniyle kontrollü bir aşındırma gerçekleştirmek için tercih edilmeyebilir [77]. Bu nedenlerden dolayı, genellikle Tip-II süperörgü yapılarında kullanılan $C_6H_8O_7:H_2O:H_3PO_4:H_2O_2$ içerikli ıslak aşındırma çözeltisi kullanılmıştır. Öncelikle, ıslak aşındırma işlemi için $C_6H_8O_7:H_2O:H_3PO_4:H_2O_2$ çözeltisi 5 gr:200 mL:10 mL:20 mL oranlarında kullanılmıştır. Ancak, bu oran için profilometre ölçümünde mesa kenarlarında derin (~650 nm) hendeklenmeler (trenching) olduğu gözlenmiştir. Alt kontak katman kalınlığının 500 nm olduğu dikkate alındığında bu oranın uygun olmadığı anlaşılmıştır. İkinci olarak, sitrik asit oranının daha yüksek olduğu, $C_6H_8O_7:H_2O:H_3PO_4:H_2O_2$ çözeltisi, 6,67 gr:40 mL:5 mL:5 mL oranlarında kullanılmıştır [78]. Aşındırma çözeltisi önce referans GaSb örneği üzerinde denenmiştir. Yapılan aşındırma sonrasında mesa kenarlarında hendeklenme etkisi gözlenmiştir. Oluşan hendeklenmeleri azaltmak amacıyla örnek, manyetik karıştırıcı ile 200 rpm devirde karıştırılırken çözelti içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.3(a)). Bu durumda ~163 nm derinliğinde hendeklenmeler (trenching) gözlemlenmiştir. Bu hendeklenmelerin azaltılması için aynı çözelti oranı ve karıştırma devri kullanılarak örneği karıştırıcı üzerinde sepet ile yatay pozisyonda tutma (Şekil 3.3(b)) yöntemi uygulanmıştır. Mesa kenarlarında oluşan hendeklenmelerin ~80 nm seviyesine indiği görülmüştür. Bu yöntemin hendeklenme oluşumunu azaltması sebebiyle güneş hücresi fabrikasyonunda bu yöntem tercih edilmiştir.

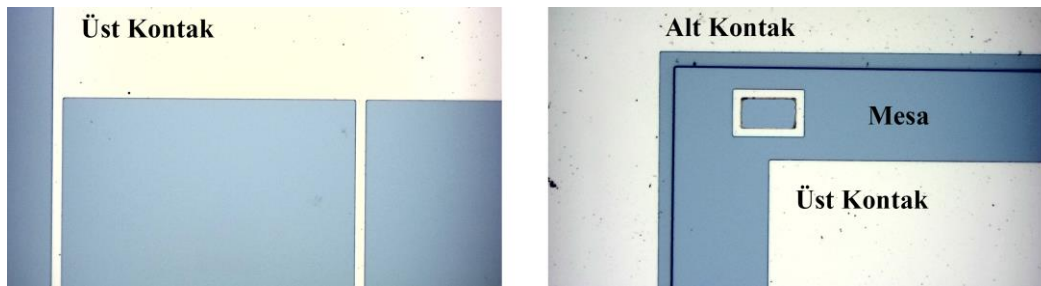


Şekil 3.3. $C_6H_8O_7 : H_2O : H_3PO_4 : H_2O_2$ çözeltisi ile yapılan aşındırma yaparken; (a) Manyetik karıştırıcı ile çözelti karıştırılırken örnek beher yüzeyinde konuldu. (b) Manyetik karıştırıcı ile çözelti karıştırılırken örnek karıştırıcı üzerinde sepet yardımıyla yatay pozisyonda tutuldu.

Aşındırma işlemi sonrasında, standart litografi süreci tekrarlanarak alt ve üst kontak kaplama işlemi yapılmıştır. Kontaklar, e-demet buharlaştırma tekniği ile Ti/Au katmanları ile oluşturulmuştur. Akabinde, lift-off işlemi ile metal kaplı PR kısımları örnek yüzeyinden kaldırılmıştır. Böylece, güneş hücresi fabrikasyonu tamamlanmış ve ölçümlere hazır hale getirilmiştir.

Fabrikasyon basamaklarının parametreleri aşağıda sıralanmıştır ve aygıtın optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.4’de verilmiştir.

- Örnek yüzey temizliği: Aseton (5 dk) + Isopropanol (5 dk) + De-iyonize su
- Fotorezist kaplama: AZ9260, 5000 rpm, 60 sn
- Hafif ısıtma: 110 °C, 1 dk
- Işınlama: 60 sn
- Tab etme: AZ400K:de-iyonize su (10 ml:40 ml)
- Sert Isıtma: 120 °C, 3 dk
- Mesa Aşındırma: $C_6H_8O_7:H_2O:H_3PO_4:H_2O_2$ (40 g:240 ml:30 ml:30 ml)
- Doğal oksit katmanı aşındırma: $HCl:H_2O$ (1:1), 30 sn
- Metal Buharlaştırma: 10 nm Ti / 220 nm Au
- Lift-off



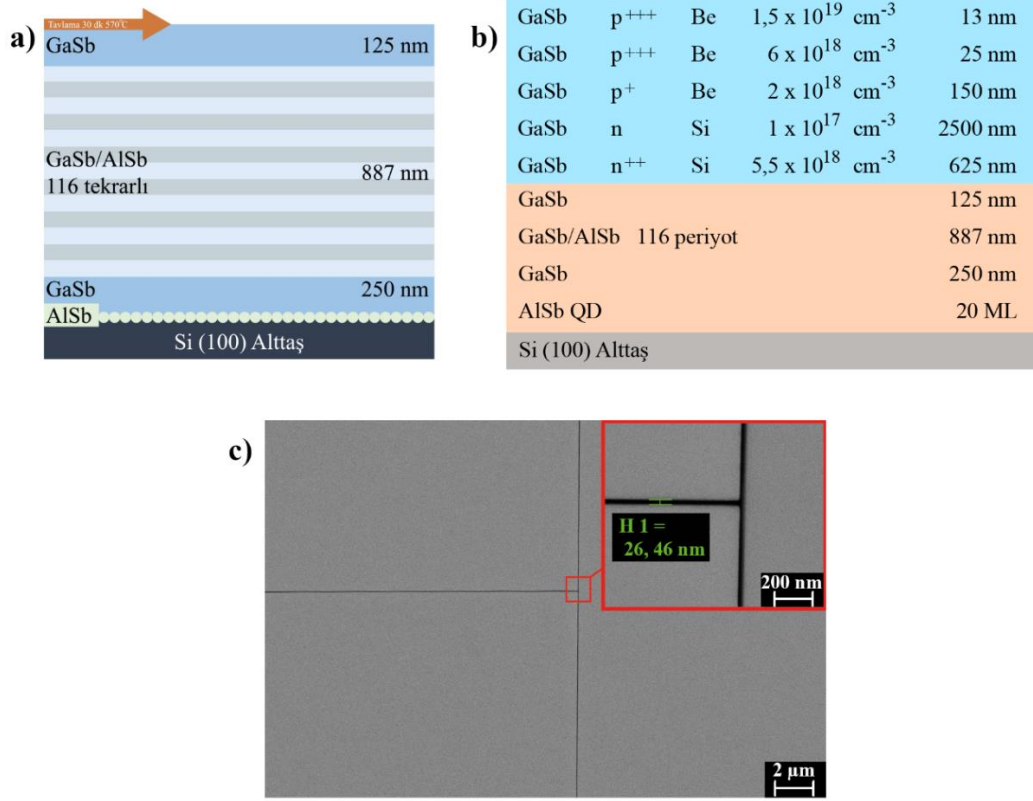
Şekil 3.4. Si alttaş üzerine büyütülen GaSb tabanlı güneş hücresinin aygıt yapısının optik mikroskop görüntüleri.

Aygıt haline getirilen tek eklem GaSb güneş hücrelerinin kuantum verimliliği Newport Quantax-300 cihazı ve enerji dönüşüm verimliliği AM1.5G koşulları altında ABET-2000 marka güneş simülatörü kullanarak ölçülmüştür.

4. GaSb GÜNEŞ HÜCRELERİNİN KARAKTERİZASYONU

Si ile GaSb yarıiletken malzemeleri arasındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı büyütme sırasında istenmeyen kusurlar oluşmaktadır. Bu nedenle, yapıda oluşabilecek kusurları en aza indirmek amacıyla Si alttaş üzerine GaSb aktif güneş hücre yapısı büyütmeden önce GaSb tampon katman büyütülmesinde daha önce yapılan çalışmalarda önerilen [38,39] metotlar uygulanmıştır. Şekil 4.1(a)'da gösterildiği gibi GaSb tampon katmanı çok tekrarlı GaSb/AlSb süperörgü katmanları içermektedir ve büyütme sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta (570 °C) MBE sistemi içerisinde tavlama işlemi uygulanmıştır. Ardından, örnek büyütme sıcaklığına düşürülerek, Şekil 4.1(b)'de gösterilen aktif güneş hücresi yapısı büyütülmüştür.

Aygıt fabrikasyonu sırasında, örnek üzerinde çizik şeklinde oluşumlar gözlenmiştir. Yüzeyi SEM ile incelenen örneğin yüzeyinde mikro çatlaklar olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.1(c)). Si ve GaSb'nin termal genleşme katsayıları sırasıyla $2,60 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ve $7,75 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 'dir [79]. Tampon katman büyütülmesi sırasında sistem içerisinde tavlamanın kusur yoğunluğunda azalmaya etkisi olduğu bilinmektedir [38]. Si ile GaSb arasındaki termal genleşme katsayı farkından dolayı, ara basamakta termal tavlama uygulamak ve üzerine aktif GaSb hücresi büyütme, toplam tampon katman kalınlığı da göz önüne alındığında, yapıda çatlakların oluşumu tetiklemiş olabilir.



Şekil 4.1. (a) Si alttaş üzerine büyütülen GaSb tampon katman yapısının şematik gösterimi, (b) Aktif güneş hücresi yapısının şematik gösterimi, (c) Büyütülen güneş hücresi örneğinin yüzey SEM görüntüsü.

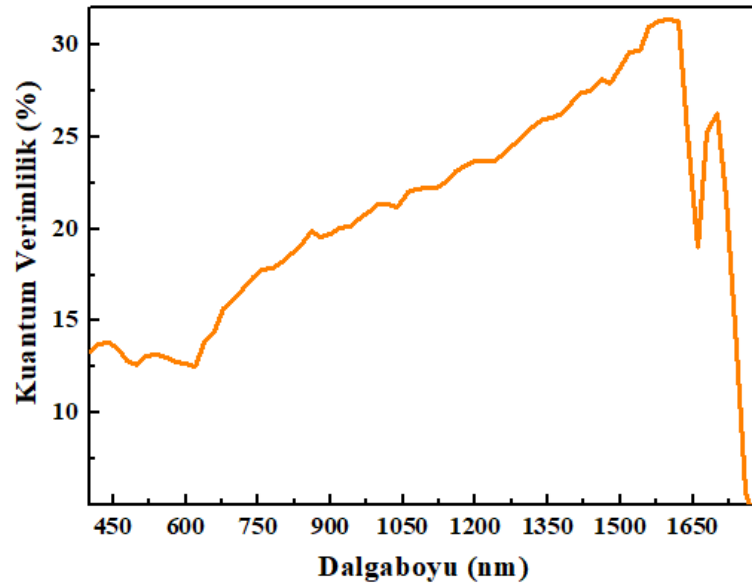
Si ile GaSb arasındaki termal genleşme katsayı farkından dolayı oluşabilen mikro çatlak kusurların yeniden oluşmaması için tampon katman büyütmesi sırasında tavlama işlemi uygulanmamış ve tampon katman kalınlığı düşürülmüştür. Ayrıca, benzer GaSb güneş hücresi yapısı, (100) yönelimli Si alttaş (Şekil 4.2(a)), anti-faz kusur yoğunluğunun azaltılması için (100) yöneliminde 2°'lik eğimli Si alttaş ve GaSb alttaş üzerine büyütülmüştür (Şekil 4.2(b)).

a)	GaSb	p ⁺⁺⁺	Be	$1,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	10 nm
	GaSb	p ⁺⁺⁺	Be	$6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	20 nm
	GaSb	p ⁺	Be	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	120 nm
	GaSb	n	Si	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	2000 nm
	GaSb	n ⁺⁺	Si	$5,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	500 nm
	GaSb				1000 nm
	AlSb QD				20 ML
	Si (100) Alttaş				

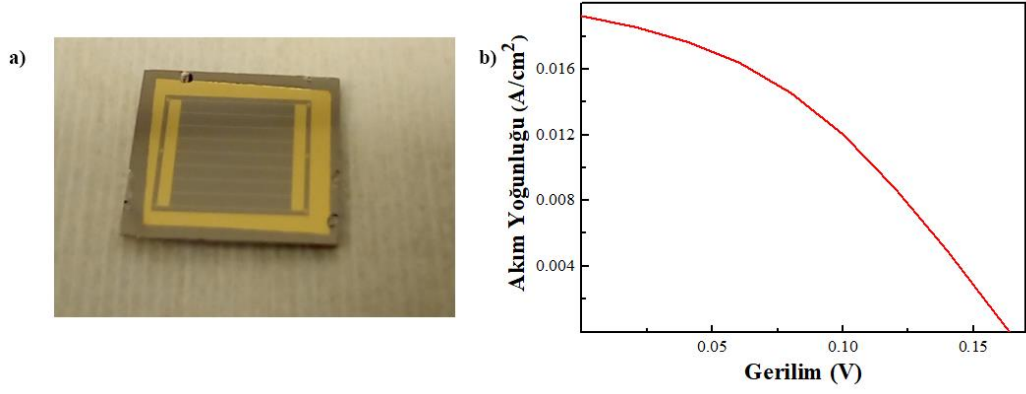
b)	GaSb	p ⁺⁺⁺	Be	$1,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	15 nm
	GaSb	p ⁺⁺⁺	Be	$6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10 nm
	GaSb	p ⁺	Be	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	120 nm
	GaSb	n	Si	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	2000 nm
	GaSb	n ⁺⁺	Si	$5,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	600 nm
	GaSb				
	GaSb Alttaş				

Şekil 4.2. (a) Si alttaş ve (b) GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb tampon katman ve aktif güneş hücresi yapısının şematik gösterimi.

GaSb alttaş üzerine büyütülen hücrenin aygıt performansını belirlemek için kuantum verimlilik ölçümü yapılmıştır. Yaklaşık %30 değerinde kuantum verimlilik değeri elde edilmiştir (Şekil 4.3). Bununla birlikte, 0,5 cm² boyutundaki güneş hücresinin (Şekil 4.4(a)) AM1.5G güneş spektrumu altında alınan akım/voltaj ölçümleri (Şekil 4.4(b)) sonucunda hesaplanan aygıt parametreleri Tablo 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.3. GaSb güneş hücresinin dalgaboyuna bağlı kuantum verimlilik grafiği.



Şekil 4.4. GaSb güneş hücresinin (a) aygıt fotoğrafı ve (b) AM1.5G güneş spektrumunda ölçülmüş voltaja bağlı akım yoğunluğu grafiği.

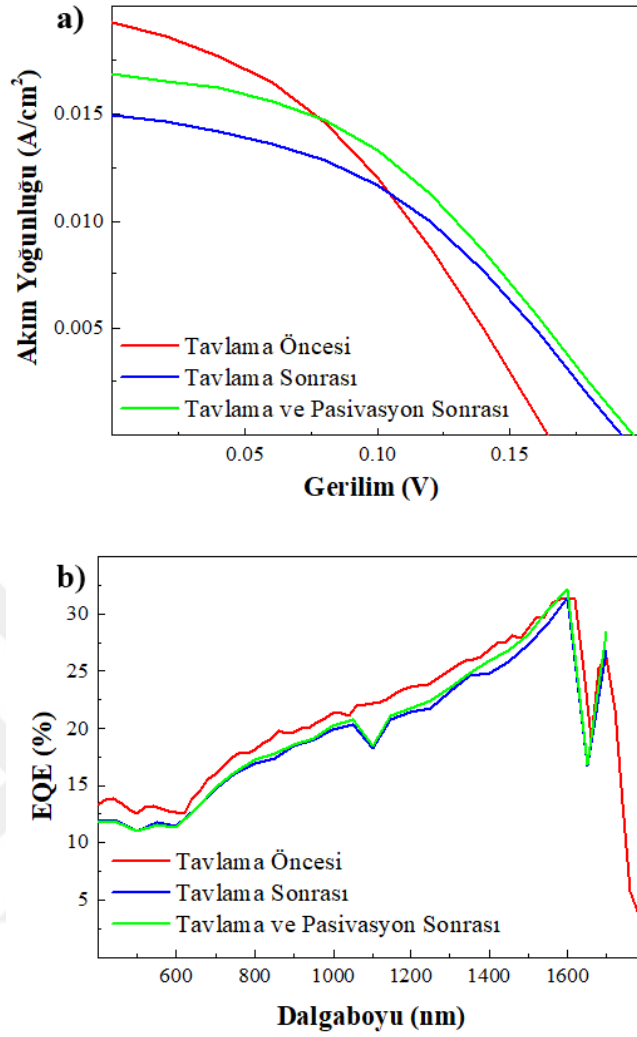
Tablo 4.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen hücreden elde edilen aygıt parametreleri.

Dönüşüm Verimliliği (η)	%1,20
Kısa Devre Akım Yoğunluğu (J_{sc})	0,02 A/cm ²
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	0,005 A
Açık Devre Voltajı (V_{oc})	0,16 V
Kuantum Verimlilik	%30,37

GaSb güneş hücresinin performansını iyileştirmek için tavlama ve pasivasyon işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen aygıt parametreleri Tablo 4.2’de sunulmuştur. Bu işlemler sonucu, enerji dönüşüm verimliliği %12’lik bir artışla, %1,35 seviyesine ulaşırken dış kuantum verimliliğinin neredeyse değişmediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.5).

Tablo 4.2. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinden elde edile aygıt parametreleri.

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_{max} (W)	J_{sc}(A.cm⁻²)	EQE (%)	FF	n(%)
Tavlama Öncesi	0,0046	0,16	2,91E-04	0,019	31,39	39,06	1,203
Tavlama Sonrası (200°C 1dk)	0,0036	0,18	2,89E-04	0,015	31,49	44,61	1,199
Tavlama ve Pasivasyon Sonrası	0,0041	0,18	3,26E-04	0,017	32,18	45,30	1,351

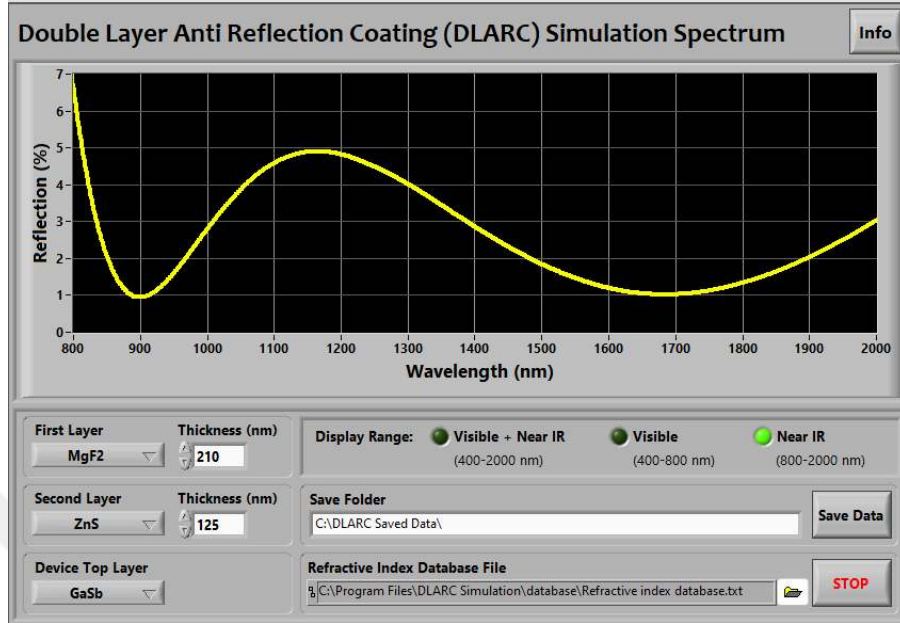


Şekil 4.5. GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresinin (a) akım yoğunluğu-voltaj ve (b) dış kuantum verimlilik ölçüm grafikleri.

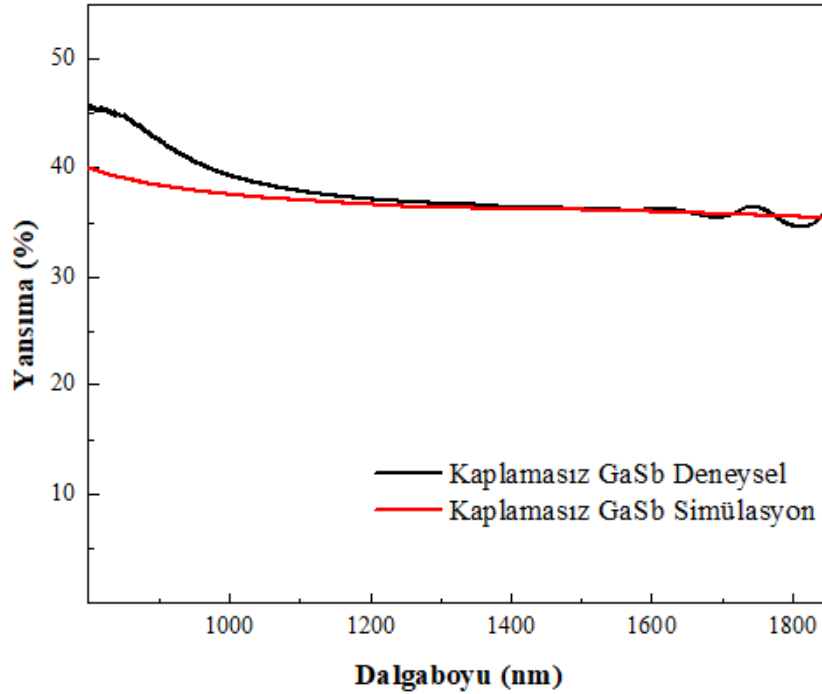
Aygıt performansını iyileştirmek için laboratuvar bünyesinde yazılmış olan DLARC Simulation programı (Şekil 4.6) ile ARC kaplama simülasyonları yapılmıştır. Yansıma önleyici kaplama (ARC) olarak 125 nm kalınlığında ZnS üzerine 210 nm kalınlığında MgF₂ kaplama yapılması planlanmıştır. Şekil 4.7’de kaplama yapılmamış GaSb güneş hücresi örneğinden alınan yansıma ölçümleri ile DLARC Simulation programından elde edilen simülasyon sonuçları kıyaslanmış olup, simülasyon sonuçlarının deneysel ölçümlere yakın olduğu gözlenmiştir. Ancak, yaşanan teknik sorunlar sebebiyle ARC kaplama işlemi gerçekleştirilememiştir.

Bununla birlikte, DLARC Simülasyon programıyla literatürde kullanılmış olan tek katman ARC kaplama simülasyonları da yapılmıştır (Şekil 4.8) [51,52]. Şekil 4.6 ile 4.8

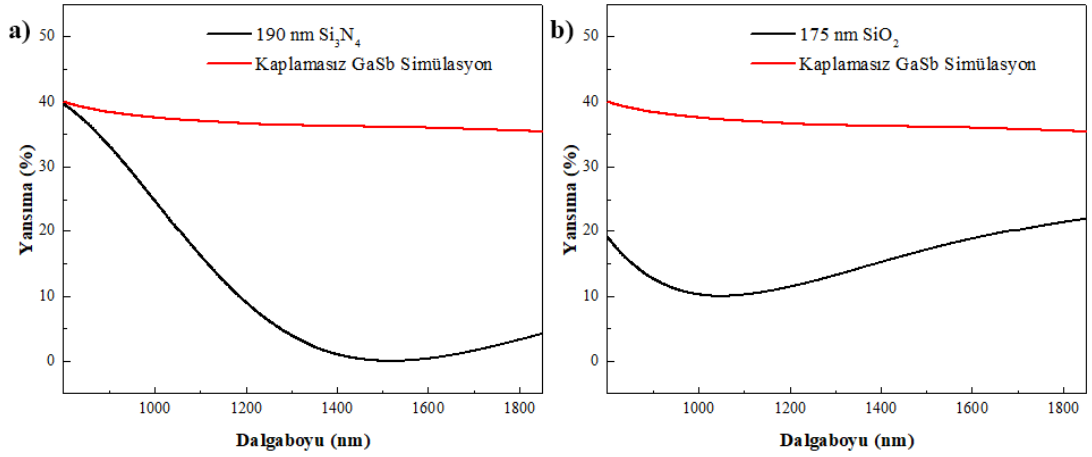
karşılaştırıldığında çift katmanlı ZnS/MgF₂ malzemesinin kullanılmasının daha verimli olacağı anlaşılmıştır.



Şekil 4.6. ZnS/MgF₂ katmanın DLARC Simulation Programı ile yapılan yansımaya simülasyonu.

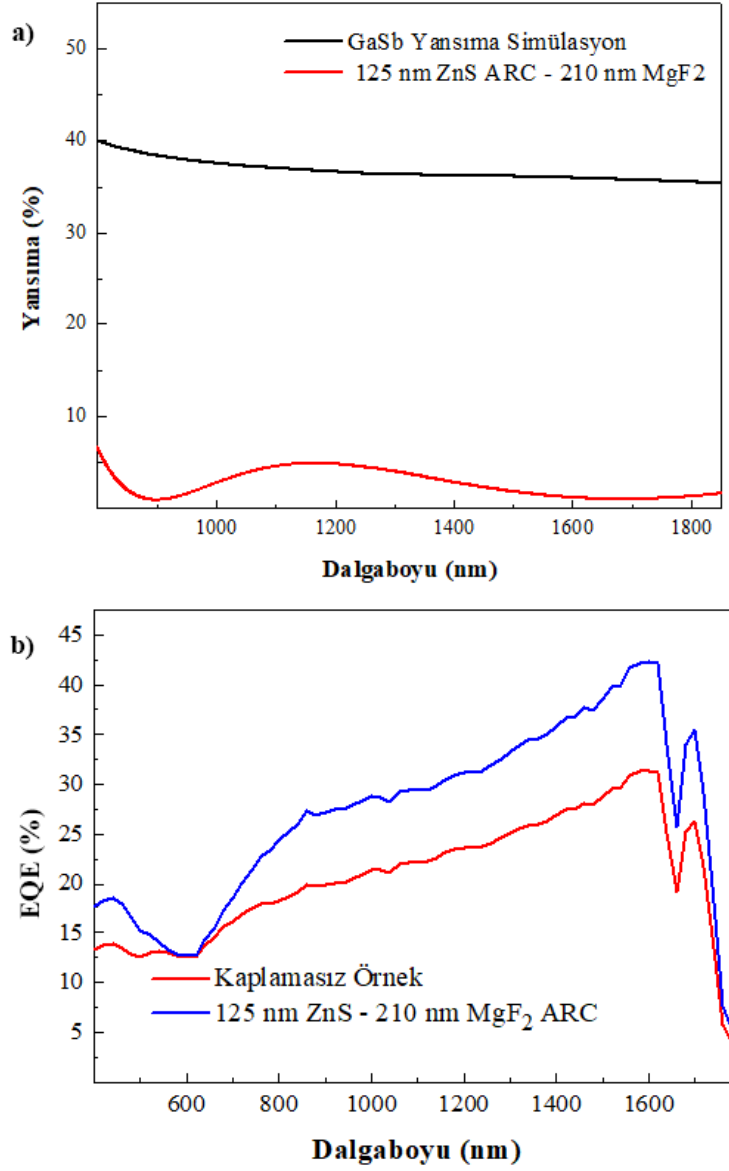


Şekil 4.7. GaSb alttaş üzerine büyütülen güneş hücresi örneğinden alınan yansımaya ölçümü ile DLARC Simulation programından elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.8. GaSb alttaş üzerine yapılan (a) 190 nm Si_3N_4 [52] ve (b) 175 nm SiO_2 [51] ARC kaplama simülasyonlarının kaplama yapılmamış GaSb simülasyonu ile karşılaştırılması.

Yansımaları daha da azaltabilmek adına çift katman ARC kaplama simülasyonu 125 nm ZnS üzerine 210 nm MgF_2 olacak şekilde yapılmıştır. ARC kaplama yapılması durumunda örnekten gelen yansımanın ~%36 mertebelerinden ~%5 mertebelerine düşmesiyle birlikte (Şekil 4.9(a)) güneş hücresinin dış kuantum verimliliğinin %42 seviyelerine yükseleceği öngörülmektedir (Şekil 4.9(b)).



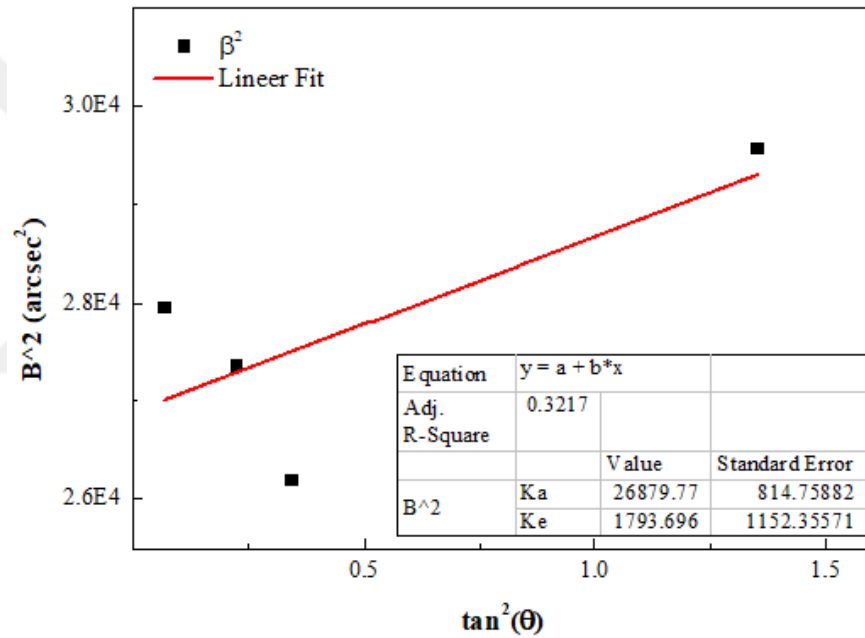
Şekil 4.9. (a) 125 nm ZnS üzerine 210 nm MgF₂ ARC kaplama ile kaplama yapılmamış GaSb karşılaştırması, (b) ARC simülasyonu ile hesaplanan dış kuantum verimliliği ile kaplamasız dış kuantum verimliliği karşılaştırılması.

Yapılan güneş hücresi fabrikasyonları sonucu Si alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücrelerinden tepki alınamamıştır. Kusurların güneş hücresi performansına etkisini araştırmak amacıyla XRD yöntemi kullanılarak kusur yoğunlukları hesaplanmıştır [80]. Tüm örnekler için (002), (004), (006) ve (115) düzlemlerinde sallantı eğrisi ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümler sonrasında örneklerden elde edilen FWHM değerleri Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilmiştir. Ayrıca, Denklem (4.1) ve Denklem (4.2) kullanılarak yapılan hesaplamalar aşağıda sunulmuştur (Şekil 4.10, Şekil 4.11). Bunun sonucunda

GaSb/Si ve GaSb/Si(2°) örnekleri için kusur yoğunlukları sırasıyla $7,84 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ (D_1) ve $7,95 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ (D_2) olarak bulunmuştur.

Tablo 4.3. GaSb/Si güneş hücresi yapısına ait simetrik ve asimetrik düzlem eksenleri etrafında alınan sallantı eğrisi ölçümleri sonucu elde edilen FWHM değerleri.

Düzlem	Θ (°)	FWHM (°)	$\tan^2(\theta)$	FWHM (arcsec)	β^2 (arcsec ²)
0 0 2	14,6377	0,04646	0,06821	167,22	27962,52
0 0 4	30,3612	0,04496	0,34314	161,85	26195,42
0 0 6	49,3007	0,04777	1,35172	171,97	29574,36
1 1 5	25,3152	0,04594	0,22375	165,38	27350,54



Şekil 4.10. GaSb/Si güneş hücresi yapısı için $\tan^2\theta$ - β^2_{adj} grafiği.

$$\beta^2_{adj} = K_{\alpha} + K_{\epsilon} \tan^2 \theta \quad (4.1)$$

$$\beta^2_{adj} = 26879,7781 \text{ (arcsec)}^2 + 1793,6963 \text{ (arcsec)}^2 \tan^2 \theta$$

$$K_{\alpha} = 26879,7781 \text{ (arcsec)}^2 = 6,3247 \times 10^{-7} \text{ rad}^2$$

$$D = K_{\alpha} / 4,36 \quad (4.2)$$

$$b^2 = 1,85 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$$

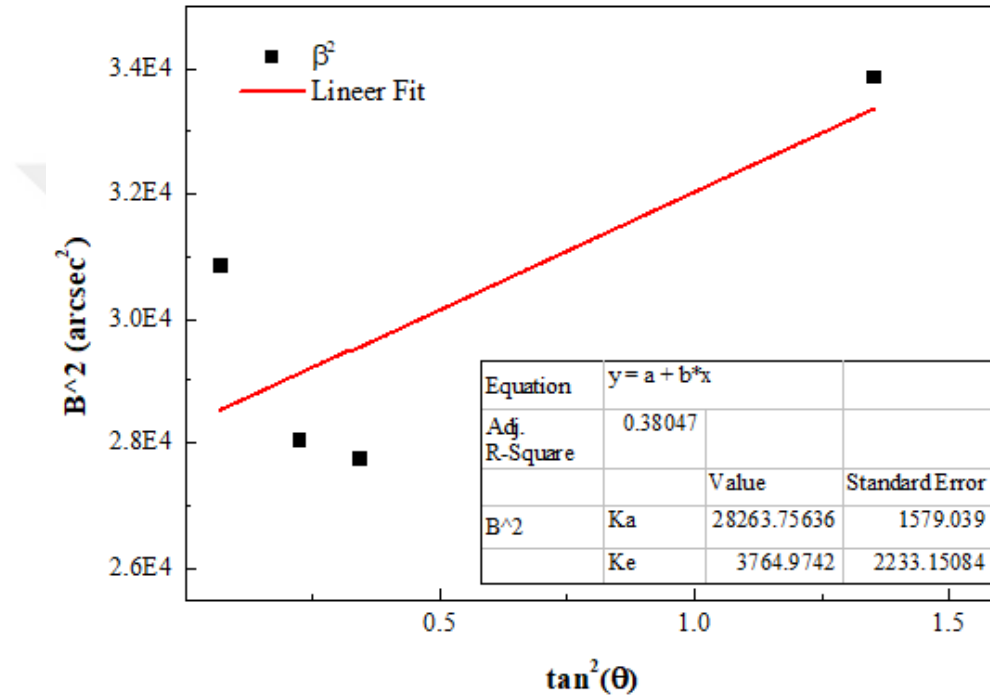
$$D = 6.3247 \times 10^{-7} / 4,36 \times (1,85 \times 10^{-15} \text{ cm}^2)$$

Kusur yoğunluğu:

$$D_1 = 7,84 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$$

Tablo 4.4. GaSb /(2°) Si güneş hücresi yapısına ait simetrik ve asimetrik düzlem eksenleri etrafında alınan sallantı eğrisi ölçümleri sonucu elde edilen FWHM değerleri.

Düzlem	Θ (°)	FWHM (°)	$\tan^2(\theta)$	FWHM (arcsec)	β^2 (arcsec ²)
0 0 2	14,6392	0,04880	0,068	175,68	30863,46
0 0 4	30,3614	0,04628	0,343	166,60	27755,56
0 0 6	49,3036	0,05112	1,352	184,03	33867,04
1 1 5	25,3029	0,04652	0,223	167,47	28046,20



Şekil 4.11. GaSb/(2°) Si güneş hücresi yapısı için $\tan^2\theta$ - β^2_{adj} grafiği.

$$\beta^2_{adj} = K_{\alpha} + K_{\epsilon} \tan^2 \theta \quad (4.1)$$

$$\beta^2_{adj} = 28263,75636 \text{ (arcsec)}^2 + 3764,9742 \text{ (arcsec)}^2 \tan^2 \theta$$

$$K_{\alpha} = 28263,75636 \text{ (arcsec)}^2 = 6,42 \times 10^{-7} \text{ rad}^2$$

$$D = K_{\alpha} / 4,36 \quad (4.2)$$

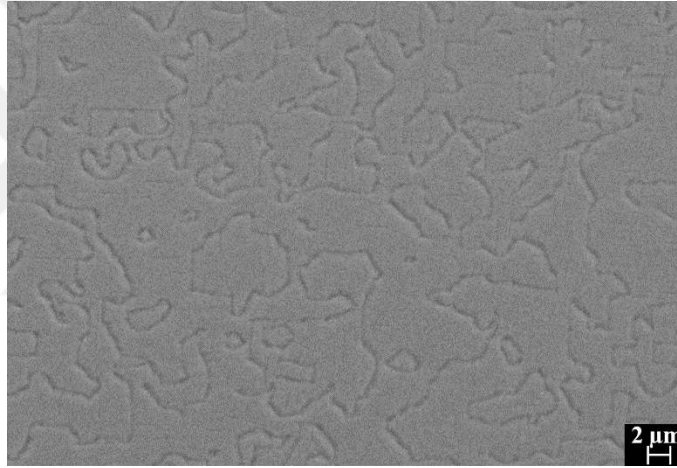
$$b^2 = 1,85 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$$

$$D = 6,42 \times 10^{-7} / 4,36 \times (1,85 \times 10^{-15} \text{ cm}^2)$$

Kusur yoğunluğu:

$$D_2 = 7,95 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda Si alttaş üzerine büyütülen GaSb güneş hücresi yapılarında, 10^7 cm^{-2} mertebesinde kusur yoğunluğu olduğu görülmüştür. Kusur yoğunluğunun bu seviyede olmasının aygıt performansını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Anti-faz alan kusurları ortaya çıkarmak amacıyla GaSb malzemeler için uygun 70°C 'de $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (4:2:1) oranlarında hidroklorik tabanlı bir çözelti kullanılmıştır [34]. şekil 4.10'da gösterildiği gibi yapı içerisinde ayrıca anti faz alan kusurlarının olduğu gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, aygıt performansını etkileyen bu kusurların varlığı nedeniyle Si alttaş üzerine GaSb güneş hücresi aygıtının çalışmadığı anlaşılmıştır. Si alttaş üzerine büyütülen GaSb tampon katmanları için, kusur yoğunluğunun azaltılması için büyütme çalışmalarının geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



şekil 4.12. GaSb/Si güneş hücresi örneğine ıslak aşındırma işlemi uygulandıktan sonra alınan yüzeyinin SEM görüntüsü.

5. GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE AlAsSb EPI-KATMAN BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, GaSb alttaşla örgü uyumlu $\text{AlAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92}$ katman elde etmek amacıyla MBE sistemi ile büyütülen örneklerin karakterizasyon sonuçları sunulmuştur. Tüm örneklerin yapısı, 200 nm kalınlığında GaSb epi-katman, 1 μm kalınlığında AlAsSb epi-katman ve yüzeyin oksitlenmemesi amacıyla 20 nm kalınlığında çok ince GaSb şapka katmanından oluşmaktadır. V grubu konsantrasyon oranlarının belirlenmesi için Sb akısının belirlenmesinin ardından,

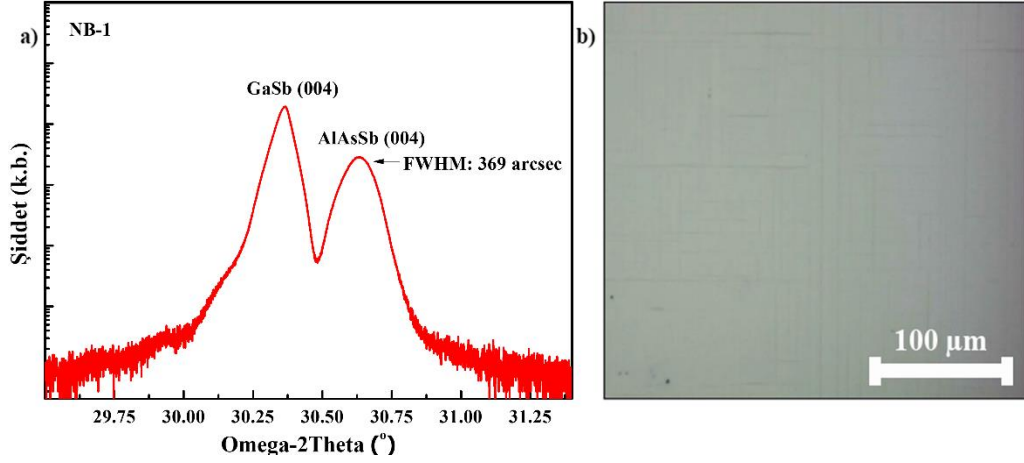
$$y = BEP [As/(As + Sb)] \quad (5.1)$$

formülü kullanılarak As akı oranı kararlaştırılmıştır [81]. Örneklerin büyüme parametreleri ve XRD analizi sonucunda elde edilen FWHM ve As konsantrasyon değerleri Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

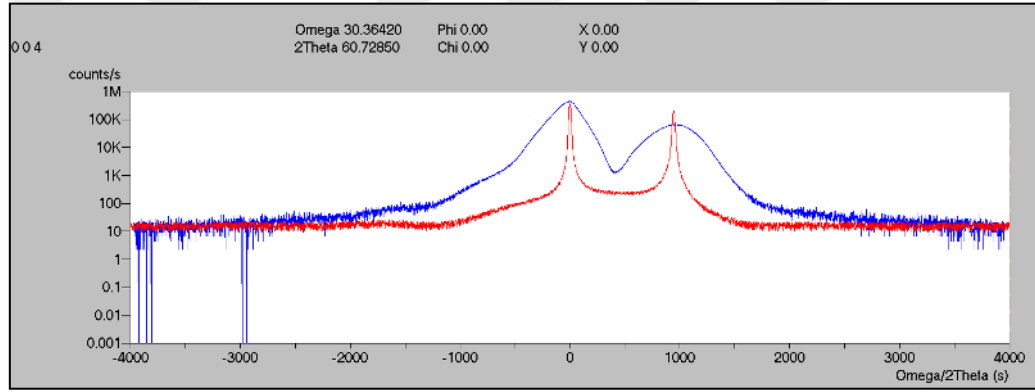
Tablo 5.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen AlAsSb epi-katman örneklerin büyüme parametreleri ve HRXRD ölçümünden elde edilen sonuçları.

Örnek No	Al Büyüme Oranı (ML/sn)	Büyütme Sıcaklığı (°C)	V/III oranı	XRD Ölçümünden Elde Edilen	
				FWHM Değeri (arcsec)	As konsantrasyon Değeri
NB-1	0,9	500	24	369	%16
NB-2	0,9	530	24	249	%14
NB-3	0,7	530	12	33	%8

NB-1 örneğinden (004) eksenini etrafında alınan XRD sallantı eğrisi grafiğinden AlAsSb sinyaline ait FWHM değeri 369 arcsec olarak bulunmuştur (Şekil 5.1(b)). Yüzey morfolojisi incelediğinde Şekil 5.2(b)’de optik mikroskop görüntüsünden anlaşılabileceği üzere çizgi şeklinde yüzey kusurlarına rastlanmıştır. Kristal kalitesi ile ilgili ölçütlerden biri olan FWHM değerinin yapı içerisindeki kusurlar nedeniyle beklenenden daha geniş çıkmıştır. Ayrıca, NB-1 örneğinin As konsantrasyonu %16 olarak bulunmuş ve AlAsSb katman ile GaSb arasında örgü uyumsuzluğu olduğu anlaşılmıştır. Hesaplanan değerler kullanılarak simülasyon ile de sonuçlar teyit edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. (a) NB-1 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği, (b) NB-1 örneğinin optik mikroskop yüzey görüntüsü.



Şekil 5.2. NB-1 örneğinin XRD simülasyon sonucunu gösteren grafik.

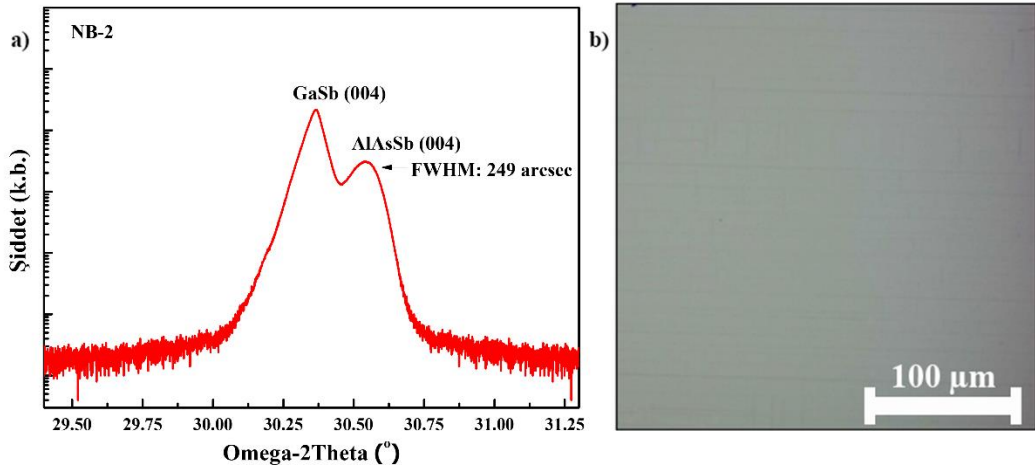
Bu sonuçlar doğrultusunda, büyütülen AlAsSb katmanındaki As konsantrasyonunun hedeflenen As konsantrasyon değerinden oldukça fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun, yüksek Sb akısı ($\sim 10^{-6}$) ve büyüme hızı (0,9 ML/sn) dikkate alındığında, As'in Sb'ye kıyasla Al ile daha güçlü kovalent bağ yapma eğilimi nedeniyle, yüksek büyüme hızında, As'in katı faza daha yüksek oranda dahil olmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir [73]. Öte yandan, MBE sisteminde kullanılan vakum ölçer gibi bileşenlerin veya As akı kararlılığı gibi etkenlerin etkili olma ihtimali de göze alınmalıdır. Neticede, $\text{AlAs}_{0,16}\text{Sb}_{0,84}$ katmanı ile GaSb alttaş arasındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklı yapıda gerinim-rahatlama mekanizması meydana gelmektedir. Bu nedenle, yapıda kusurlar oluşmuştur [82].

Hedeflenen $\text{AlAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92}$ katmanını büyütme amacıyla, Sb ve Al akısı değiştirilmeden 530 °C sıcaklığında NB-2 örneği büyütülmüştür. Denklem (5.1)

kullanılarak hesaplanan As konsantrasyonu ve elde edilen sonuç arasındaki farklılık dikkate alınarak, NB-2 örneğinde As akısı yaklaşık %30 oranında azaltılmıştır. Şekil 5.3(a)'da görüldüğü üzere alınan XRD ölçümü sonucunda AlAsSb katmanına ait kırınım pikinin FWHM değeri 249 arcsec olarak bulunmuştur. Ancak, Şekil 5.5(b)'de optik mikroskop görüntüsünden anlaşılacağı üzere, NB-1 örneğine benzer tipte kusurların yüzeyde mevcut olduğu görülmektedir. As konsantrasyonu ise, XRD analizi sonucunda %14 olarak elde edilmiş ve hedeflenen değere yaklaşmıştır.

Büyüme sıcaklığındaki değişim nedeniyle, büyütülen AlAsSb katmanının büyüme hızına etkisi olup olmadığı ayrıca kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, NB-1 ve NB-2 örneklerinin kalınlıkları yan kesit SEM analizi yapılarak ölçülmüştür. NB-1 ve NB-2 örneklerinin kalınlıklarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Böylece, AlAsSb büyüme hızının kritik ölçüde değişmediği doğrulanmıştır. Bununla birlikte, Sb desorpsiyon hızının, 530 °C'de büyütülen örnekte, daha yüksek olması beklenmektedir [83]. NB-2 örneğinin büyüme sürecinde yüksek büyüme hızı altında katı faza As'ın Sb'ye kıyasla dahil olma mekanizmasının da baskın olduğu anlaşılmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, büyüme sıcaklığının doğrudan kusur oluşumuna etkisi olmadığı söylenebilir. Azalan As akısı sayesinde NB-1 ile karşılaştırıldığında daha düşük konsantrasyonda As içeren $\text{AlAs}_{0,12}\text{Sb}_{0,88}$ katmanı elde edilmesine rağmen hedeflenen değere ulaşamamıştır.

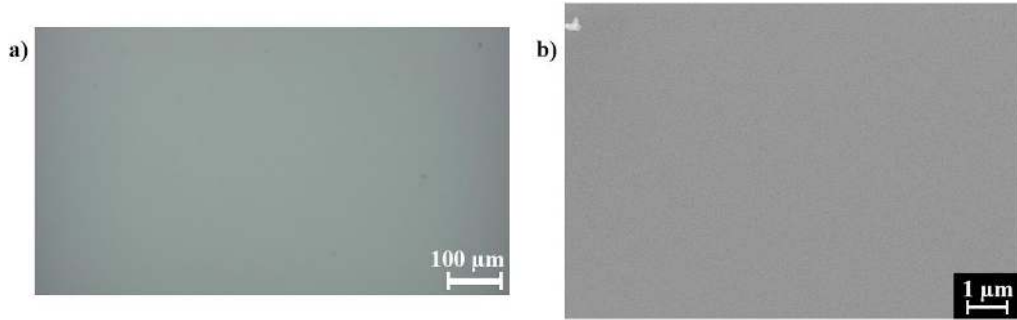


Şekil 5.3. (a) NB-2 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği, (b) NB-2 örneğinin optik mikroskop yüzey görüntüsü.

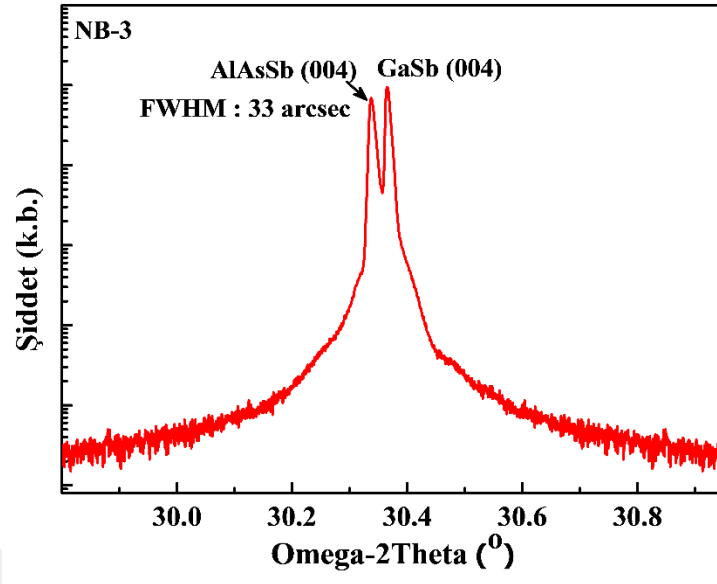
Yüksek V/III akı oranı ve büyüme hızı koşulları altında düşük As konsantrasyonuna sahip AlAsSb katmanının büyütülmesi, büyük bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu doğrultuda, Al büyüme hızının yanı sıra V/III oranının etkisini anlamak için Al büyüme hızı 0,7 ML/sn değerine ve Sb akısı da 10^{-6} Torr mertebesinde 10^{-7} Torr mertebesine düşürülerek V/III akı oranının 12 olduğu büyütme koşulunda NB-3 örneği büyütülmüştür. Bu numunede, karşılaştırma yapabilmek amacıyla, hesaplanan As akısı değerinden %30 oranında daha az As akısı değeri kullanılmıştır.

Büyütme sonrasında, NB-3 örneğinin optik mikroskop görüntüsünde, yüzeyde herhangi bir kusur oluşumuna rastlanmamıştır (Şekil 5.4(a)). Ayrıca, SEM görüntüleri alınmış ve NB-3 örneğinin yüzeyinin kusur barındırmadığı teyit edilmiştir (Şekil 5.4(b)). Yapısal karakterizasyon sonucunda ise NB-3 örneği için AlAsSb katmanına ait FWHM değeri 33 arcsec (Şekil 5.5) ve As konsantrasyon değeri de %8 olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere, V/III oranının azaltılmasıyla AlAsSb katmanının kristal kalitesinde kayda değer bir iyileşme olmuştur. Yüksek V/III akı oranı altında GaSb ile örgü uyumlu AlAsSb elde etmek zor olsa da [84], nispeten yüksek AlAsSb büyüme hızında ve V/III oranında düşük As konsantrasyonuna sahip bir AlAsSb katmanı elde etmek mümkün olmuştur. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, arzu edilen As konsantrasyonuna sahip AlAsSb katmanın büyütülmesinde As akı oranının ve V/III oranının kritik olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.4. NB-3 örneğinin yüzeyine ait (a) optik mikroskop görüntüsü ve (b) SEM görüntüsü.



Şekil 5.5. NB-3 örneğinin (004) düzlemi etrafında alınan HR-XRD sallantı eğrisi grafiği.

6. GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE AlGaAsSb/InGaAsSb BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, farklı konsantrasyon oranlarında büyütülen AlGaAsSb/InGaAsSb kuantum kuyu yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonu sonuçları sunulmuştur. AlGaAsSb katmanı için konsantrasyon oranı sabit olmak üzere InGaAsSb katmanı için In ve As konsantrasyon oranları değiştirilmiştir. Tüm örnekler, kuantum kuyu ve bariyer kalınlığı sırasıyla 12 ve 25 nm değerlerinde olacak şekilde GaSb alttaş üzerine 530 °C büyütme sıcaklığında ve 12'lik V/III akı oranında büyütülmüştür. Dörtlü bileşiklerin V ve III grubu konsantrasyon oranları, Denklem (5.1) [81], Denklem (6.1) ve Denklem (6.2) [85] kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (6.1) ve Denklem (6.2)'de GR değeri büyütme hızlarını ifade etmektedir.

$$y = BEP [As/(As + Sb)] \quad (5.1)$$

$$x = GR_{GaSb}/[GR_{GaSb} + GR_{InAs}] \quad (6.1)$$

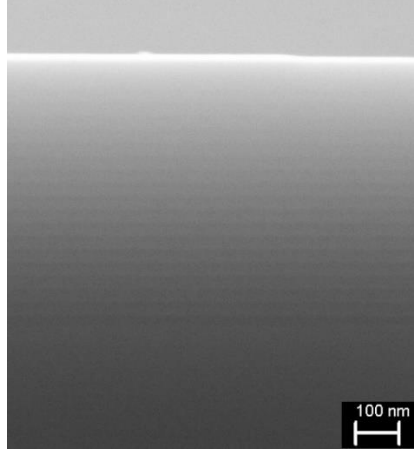
$$x = GR_{GaSb}/[GR_{GaSb} + GR_{AlAs}] \quad (6.2)$$

Büyütülen dörtlü kuantum kuyu yapılarının konsantrasyon değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. AlGaAsSb/InGaAsSb kuantum kuyu yapılarının büyütme parametreleri.

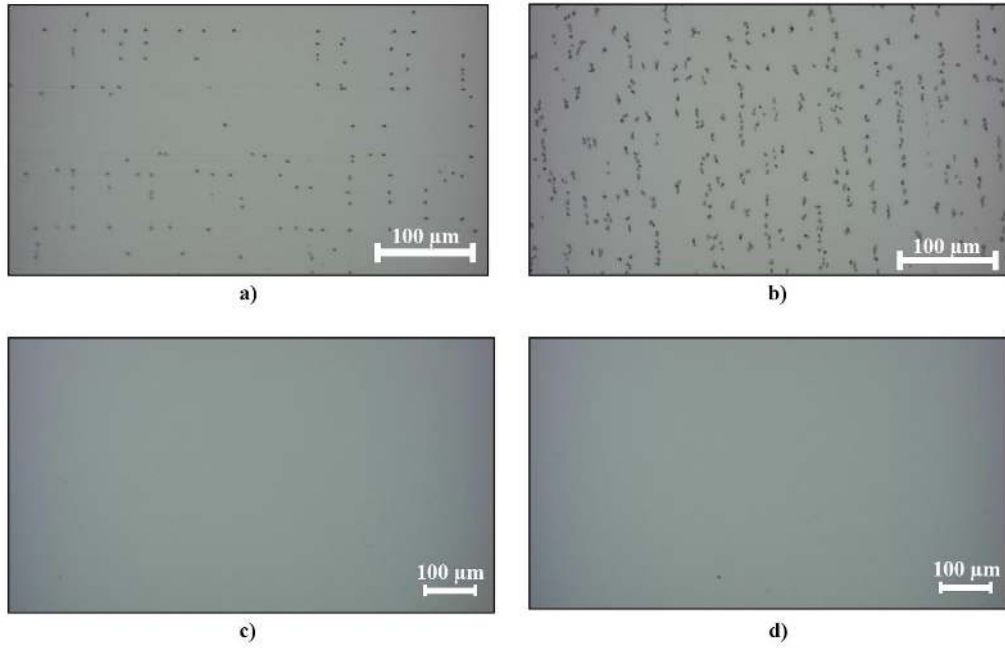
Örnek No	Dörtlü Bileşik Katmanların Konsantrasyon Değerleri	
	Kuantum Kuyu	Bariyer
NB-4	In _{0,30} Ga _{0,70} As _{0,04} Sb _{0,96}	Al _{0,49} Ga _{0,51} As _{0,04} Sb _{0,96}
NB-5	In _{0,35} Ga _{0,65} As _{0,03} Sb _{0,97}	Al _{0,49} Ga _{0,51} As _{0,03} Sb _{0,97}
NB-6	In _{0,44} Ga _{0,56} As _{0,14} Sb _{0,86}	Al _{0,49} Ga _{0,51} As _{0,03} Sb _{0,97}
NB-7	In _{0,44} Ga _{0,56} As _{0,20} Sb _{0,80}	Al _{0,49} Ga _{0,51} As _{0,03} Sb _{0,97}

Büyütülen örneklerden yan-kesit numuneler hazırlanmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerden, AlGaAsSb/InGaAsSb katmanların düzgün bir şekilde büyütüldüğü gözlenmiştir. Temsili olarak NB-6 örneğinin yan-kesit SEM görüntüsü sunulmuştur (Şekil 6.1).

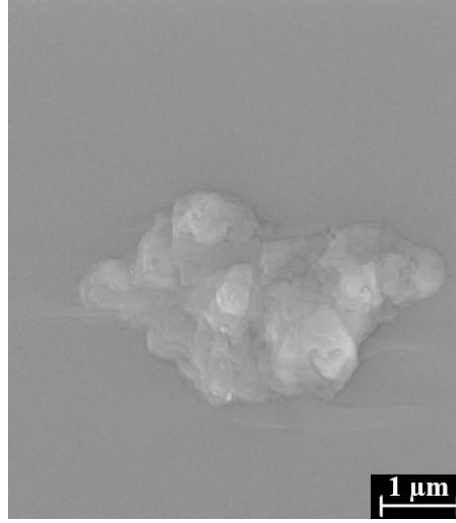


Şekil 6.1. NB-6 örneğinin yan-kesit SEM görüntüsü.

Büyütülen örneklerin optik mikroskop ile yüzey analizleri incelendiğinde NB-4 ve NB-5 örneklerinin yüzeylerinde noktasal kusurlara rastlanırken (Şekil 6.2(a) ve (b)), InGaAsSb katmanında As konsantrasyonunun %14-20 aralığında olan örneklerin yüzeylerinde (NB-6 ve NB-7) bu kusurların olmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.2(c) ve (d)). Kusurların daha yakından incelenmesi için ayrıca SEM görüntüleri alınmıştır. NB-4 ve NB-5 örneklerinin yüzeyinde kümelenme şeklinde kusurlar olduğu gözlenmiştir. Temsili olarak NB-4 örneğinin SEM görüntüsü Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.2. (a) NB-4, (b) NB-5, (c) NB-6 ve (d) NB-7 örneklerinin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 6.3. NB-4 örneğinin yüzeyine ait SEM görüntüsü.

Düşük As konsantrasyon oranına sahip örneklerin (NB-4 ve NB-5) yüzeyinde kümelenme şeklinde kusurlara rastlanmasının nedeni olarak, büyütme dinamiği açısından bakıldığında Sb_2 ve As_2 arasındaki değişim etkileşiminin etkisi olduğu düşünülmektedir [86]. Bu problemin önüne geçmek için kuantum kuyu ve bariyer geçişleri sırasında As ve Sb kepenk açma-kapama ile duraklama işlemlerinin yapılmasının etkili bir yöntem olacağı ön görülmektedir [87].

Sonuç olarak, hedeflenen dalga boyunda ışıma yapması amaçlanan dörtlü bileşik kuantum kuyu yapılarında büyütme mekanizmasının irdelenmesi ve büyütme parametrelerinin en-iyileştirilmesinin yapılmasının önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu noktada, yapıların ışıma ile yapıdaki gerilim değerlerinin teorik hesaplarının yapılması ve fotoluminesans ölçümleri alınarak karşılaştırılması, konsantrasyon değerlerinin teyit edilmesi amacıyla önemlidir ve sonraki çalışmalar için önerilmektedir.

7. SONUÇ

Bu tez kapsamında, GaSb alttaşa göre daha az maliyetli Si alttaş üzerine çok eklem güneş hücreleri uygulamalarında kullanılmak üzere tek eklem GaSb güneş hücreleri üretilmiştir. Ayrıca, GaSb alttaş üzerine AlAsSb katman ve AlGaAsSb/InGaAsSb yapılarının büyütülmesi ve yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Si üzerine GaSb tampon katman büyütmelerinde termal tavlamanın mikro çatlaklara neden olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda, Si ile GaSb termal genleşme katsayılarının arasındaki fark fazla olduğu için toplam katman kalınlığının dikkate alınması gereken etkenlerden biri olduğu anlaşılmıştır. Si ile GaSb arasında temel olarak örgü uyumsuzluğu farkından dolayı, ara yüzeyde AlSb kuantum nokta uygulanmasına rağmen, yapı içerisinde 10^7 cm^{-2} mertebesinde dislokasyon kusur yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun ise aygıt performansını ciddi derecede düşürdüğü sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, Si alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatman büyütmelerinde farklı büyütme yöntemlerinin araştırılması gerektiği ortaya çıkmıştır. GaSb alttaş üzerine büyütülen tek eklem GaSb güneş hücresi ise başarılı bir şekilde büyütülmüş ve aygıt haline getirilmiştir. Bu aygıtlardan, ARC olmadan, yaklaşık %30 kuantum verimlilik değeri ile %1,20 enerji dönüşüm verimliliği elde edilmiştir.

GaSb güneş hücresinin çok eklem güneş hücrelerinde alt-hücre olarak kullanma potansiyeli olduğuna ve geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Güneş hücresi yapılarında güneş spektrumunun soğurulmasında kayıplar istenmeyen durumlardır ve ilk kayıplar ışığın yüzeyden yansımaları sonucunda oluşmaktadır. Bu kayıpların en aza indirgenmesi ve enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması için yapıya uygun yansıma önleyici katman uygulanması bilinen yöntemlerden biridir. Dolayısıyla, ileriki çalışmalarda, yansıma önleyici katman kaplama çalışmaları ile fabrikasyon basamaklarının en-iyileştirilmesi önerilmektedir. Böylece, aygıtların enerji verimlilikleri artırılabilir ve ileriki araştırmalara katkı sağlanabilecektir.

Kızılötesi bölge aralığında çalışan üçlü ve dörtlü bileşik kristallerin büyütülmesi önem teşkil etmektedir. Bu çalışmanın sonucunda, yüksek kristal kaliteli alaşımların elde edilmesi için büyütme parametrelerinin özenli ve sistematik bir şekilde çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece, orta kızılötesi bölgede çalışan optoelektronik aygıtların geliştirilmesine önemli bir katkı sunulabilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Stillman, G. E., Robbins, V. M., Tabatabaie, N. (1984). III-V Compound Semiconductor Devices: Optical Detectors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31, 1643-1655.
- [2] Joyce, H. J., Gao, Q., Tan, H. H., Jagadish, C., Kim, Y., Zou, J., Smith, L. M., Jackson, H. E., Yarrison-Rice, J. M., Parkinson, P., Johnstone, M. B. (2011). III-V Semiconductor Nanowires for Optoelectronic Device Applications. *Progress in Quantum Electronics*, 35, 23-75.
- [3] Mikhailova, M. P., Moiseev, K. D., Yakovlev, Y. P. (2018). Discovery of III-V Semiconductors: Physical Properties and Application. *Semiconductors*, 53, 291-308.
- [4] Niu, S., Wei, Z., Fang, X., Wang, D., Wang, X., Gao, X., Chan, R. (2017). Brief Review of Epitaxy and Emmision Properties of GaSb and Related Semiconductors. *Crystals*, 7, 337 (1-21).
- [5] Guatam, N., Kim, H. S., Kutty, M. N., Plis, E., Dawson, L. R., Krisha, S. (2010). Performance Improvement of Longwave Infrared Photodetector Based on Type-II InAs/GaSb Superlattices Using Unipolar Current Blocking Layers. *Applied Physics Letters*, 96, 2311107 (1-3).
- [6] Joullié, A., Christol, P. (2003). GaSb-Based Mid-Infrared 2-5 μm Laser Diodes. *Comptes Rendus Physique*, 4, 621-637.
- [7] Mauk, M. G., Andreev, V. M. (2003). GaSb-Related Materials for TPV Cells. *Institute of Physics Publishing*, 18, 191-201.
- [8] Kroemer, H. (2004). The 6:1 A Family (InAs, GaSb, AlSb) and Its Heterostructures: A Selective Review. *Physica E*, 20, 196-203.
- [9] Law, H. D., Chin, R., Nakano, K., Milano, R. A. (1981). The GaAlAsSb Quaternary and GaAlSb Ternary Alloys and Their Application to Infrared Detectors. *Journal of Quantum Electronics*, 17, 275-283.
- [10] Riordan, M., Hoddeson, L., Herring, C. (1999). Invention of the Transistor. *Reviews of Modern Physics*. 71, 336-345.
- [11] https://education.jlab.org/glossary/abund_ele.html
- [12] Kamal, K. Y. (2022). The Silicon Age: Trends in Semiconductor Devices Industry. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 15, 110-115.

- [13] Wang, R., Vasiliev, A., Muneeb, M., Malik, A., Sprengel, S., Boehm, G., Amann, M.C., Simonyte, I., Vizbaras, A., Vizbaras, K., Baets, R., Roelkens, G. (2017). III-V on-Silicon Photonic Integrated Circuits for Spectroscopic Sensing in the 2-4 μm Wavelength Range. *Sensors*, 17, 1788 (1-21).
- [14] Nguyen, T., Varhue, W., Cross, M., Pino, R., Adams, E., Lavoie, M., Lee, J. (2007). Structural Evolution and Characterization of Heteroepitaxial GaSb Thin Films on Si (111) Substrates. *Journal of Applied Physics*, 101, 073707 (1-7).
- [15] Ghegin, E., Rodriguez, Ph., Nemouchi, F., Jany, Ch., Brihoum, M., Halimaoui, A., Sagnes, I., Szelag, B. (2016). Towards contact integration for III-V/Silicon heterogeneous photonics devices. *IEEE International Interconnect Technology Conference/Advanced Metallization Conference*, San Jose, CA, USA, 23-26 May., 2016, IITC-AMC. pp. 69-71. ISBN: 978-1-5090-0386-0.
- [16] Toyota, H., Yasuda, T., Endoh, T., Nakamura, S., Jinbo, Y., Uchitomi, N. (2009). Comparison of Structural and Optical Properties of GaSb/AlGaSb Quantum Well Structures Grown on Different Oriented Si Substrates. *Journal of Crystal Growth*, 311, 802-805.
- [17] Schubert, E. F. (2009). Physical Foundation of Narrow Gap Semiconductors. *Troy, New York*, Chapter 17.
- [18] Nakagawa, A., Kroemer, H., English, J. H. (1989). Electrical Properties and Band Offsets of InAs/AlSb n-N Isotype Heterojunctions Grown on GaAs. *Applied Physics Letters*, 54, 1893-1895.
- [19] Magri, R., Zunger, A., Kroemer, H. (2005). Evolution of the Band-gap and Band-edge Energies of the Lattice-matched GaInAsSb/GaSb and GaInAsSb/InAs Alloys as a Function of Composition. *Journal of Applied Physics*, 98, 043701 (1-9)
- [20] Dutta, P. S., Bhat, H. L. (1997). The Physics and Technology of Gallium Antimonide: An Emerging Optoelectronic Material. *Journal of Applied Physics*, 81, 5821-5870
- [21] Bett, A.W., Dimroth, F., Stollwerck, G., Sulima, O.V. (1999). III-V Compounds for Solar Cell Applications. *Applied Physics A*, 69, 119-129.
- [22] Razeghi, M., Haddadi, A., Hoang, A.M., Huang, E.K., Chen, G., Bogdanov, S., Darvish, S.R., Callewaert, F., McClintock, R. (2013). Advances In Antimonide-based Type-II Superlattices for Infrared Detection and Imaging at Center for Quantum Devices. *Infrared Physics&Technology*, 59, 41-52.

- [23] Nainani, A., Irisawa, T., Yuan, Z., Bennett, R.B., Boos, J.B., Nishi, Y., Saraswat, K.C. (2011). Optimization of the Al₂O₃/GaSb interface and a high-mobility GaSb pMOSFET. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58, 3407-3415.
- [24] Alshahrani, D. O., Kesaria, M., Anyebe, E. A., Srivastava, V., Huffaker, D. L. (2022). Emerging Type-II Superlattices of InAs/InAsSb and InAs/GaSb for Mid-Wavelength Infrared Photodetectors. *Advanced Photonics Research*, 3, 2100094 (1-23).
- [25] Serincan, U., Arıkan, B., Şenel O. (2018). Direct Growth of Type II InAs/GaSb Superlattice MWIR Photodetector on GaAs Substrate. *Superlattices and Microstructures*, 120, 15-21.
- [26] Korkmaz, M., Kaldırım, M., Arıkan, B., Serincan, U., Aslan, B. (2015). Comparative Evaluation of InAs/GaSb Superlattices for Mid Infrared Detection: p-i-n versus Residual Doping. *Semiconductor Science and Technology*. 30, 085006.
- [27] Xie, H., Piao, J., Katz, J., Wang, W. I. (1991). Intersubband Absorption in Ga_{1-x}Al_xSb/AlSb Superlattices for Infrared Detection. *Journal of Applied Physics*, 70, 3152-3156.
- [28] Dvinelis, E., Trinkūnas, A., Greibus, M., Kaušylas, M., Žukauskas, T., Šimonytė, I., Songaila, R., Vizbaras, A., Vizbaras, K. (2015). High-Performance GaSb Laser Diodes and Diode Arrays in the 2.1- 3.3 Micron Wavelength Range for Sensing and Defense Applications. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9370, 93702E.
- [29] Lumb, M. P., Mack, S., Schmieder, K. J., González, M., Bennet, M. F., Scheiman, D., Meitl, M., Fisher, B., Vurroughs, S., Lee, K. T., Rogers, J. A., Walters, R. J. (2017). GaSb-Based Solar Cells for Full Solar Spectrum Energy Harvesting. *Advanced Energy Materials*, 7, 1700345 (1-9).
- [30] <https://www.msесupplies.com/products/gasb-crystal-substrates?variant=31869984571450>
- [31] https://www.universitywafer.com/Wafers_Services/Silicon/GaSb.html
- [32] Smith, B. L., Woodhouse, M., Horowitz, K. A. W., Silverman, T. J., Zuboy, J., Margolis, R. M. (2021). Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results. *Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-7A40-78173.
- [33] Rodriguez, J.B., Madiomanana, K., Cerutti, L., Castellano, A., Tournié, E. (2016). X-ray Diffraction Study of Gasb Grown by Molecular Beam Epitaxy on Silicon Substrates. *Journal of Crystal Growth*, 439, 33-39.
- [34] Ko, K. M., Seo, J. H., Kim, D. E., Lee, S. T., Noh., Y. K., Kim, M. D., Oh, J. E. (2009) The Growth of a Low Defect InAs HEMT Structure on Si Using an

AlGaSb Buffer Layer Containing InSb Quantum Dots for Dislocation Termination. *IOP Science*, 20, 225202.

- [35] Arpapay, B., Serincan, U. (2020). The Role of Anthiphase Domain Boundary Density on the Surface Roughness of GaSb Epilayers Grown on Si (001) Substrates. *Superlattices and Microstructures*, 140, 106450.
- [36] Akahane, K., Yamamoto, N., Gozu, S., Ohtani, N. (2004). Heteroepitaxial growth of GaSb on Si(001) substrates. *Journal of Crystal Growth*, 264, 21-25.
- [37] Kim, Y.H., Lee, J.Y., Noh, Y.G., Kim, M.D., Cho, S.M. (2006). Growth Mode and Structural Characterization of GaSb on Si (001) Substrate: A Transmission Electron Microscopy study. *Applied Physics Letters*, 88, 241907 (1-3).
- [38] Serincan, U., Arpapay, B., (2019). Structural and Optical Characterization of GaSb on Si (001) Grown by Molecular Beam Epitaxy. *Semiconductor Science of Technology*, 34, 035013.
- [39] Arpapay, B., Suyolcu, Y. E., Çorapçıoğlu, G., Aken. P, A., Gülgün, M. A., Serincan. U. (2020). A Comparative Study on GaSb Epilayers Grown on Nominal and Vicinal Si (100) Substrates by Molecular Beam Epitaxy. *Semiconductor Science and Technology*. 36, 025011.
- [40] <https://sunwindsolar.com/blog/solar-radiation-spectrum/>
- [41] De Vos, A. (1980). Detailed Balance Limit of the Efficiency of Tandem Solar Cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 13, 839-846.
- [42] Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Hao, X., (2023). Solar Efficiency Tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32, 3-13.
- [43] Kurtz, S., Geisz, J. (2010). Multijunction Solar Cells for Conversion of Concentrated Sunlight to Electricity. *Optics Express*, 18, A73-A78.
- [44] Green, M. A. (1982). Solar Cells Operating Principles Technology and System Applications. *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 0762*, Chapter 9.
- [45] Fraas, L. M., Girard, G. R., Avery, J. E., Arau, B. A., Sundaram, V. S., Thompson, A. G. (1989). GaSb Booster Cells for Over 30% Efficient Solar Cell Stacks. *Journal of Applied Physics*, 66, 3866-3870.
- [46] Fraas, L. M., Avery, J. E., Gruenbaum, P. E., Sundaram, V. S., Emery, K., Matson, R. (1991). Fundamental Characterization Studies of GaSb Solar Cells. *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 0-87942-636-5

- [47] Fraas, L. M., Avery, J. E., Girard, G. R. (1992). Tandem Photovoltaic Solar Cell with III-V Diffused Junction Booster Cell. *Boeing Co., Seattle, WA (United States)*, Patent Number: US 5091018, Application Number: PPN: US 7-523710.
- [48] Fraas, L. M., Avery, J. E. (1993). Low Bandgap Photovoltaic Cell with Inherent Bypass Diode. *Boeing Co., Seattle, WA (United States)*, Patent Number: US 5389158, Application Number: PPN: US 7-97353.
- [49] Bett, A. W., Sulima, O. V. (2003). GaSb Photovoltaic Cells for Applications in TPV Generators. *Semiconductor Science and Technology*, 18, 184-190.
- [50] Marshall, J. M., Dimova-Malinovska, D. (2001). Photovoltaic and Photoactive Materials – Properties, Technologies and Applications. *NATO Science Series*, Chapter 5.
- [51] Parola, S., Vauthelin, A., Martinez, F., Tournet, J., Hussein, J. E., Kret, J., Qbesnel, E., Rouillard, Y., Tournié, E., Cuminal, Y. (2018). Investigation of Antimonide-Based Semiconductors for High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, 0937-0942.
- [52] Tang, L., Fraas, L. M., Liu, Z., Xu, C., Chen, X. (2015). Performance Improvement of the GaSb Thermophotovoltaic Cells with n-Type Emitters. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62, 2809-2815.
- [53] <https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sort=plf-f&st1=gasb+solar+cell&sid=9fb796d8ac5400cb3ab7acf04d154182&sot=b&sdt=b&sl=30&s=TITLE-ABS-KEY%28gasb+solar+cell%29&cl=t&offset=1&ss=plf-f&ws=r-f&ps=r-f&cs=r-f&origin=resultslist&zone=queryBar>
- [54] Kret, J., Tournet, J., Parola, S., Martinez, F., Chemisana, D., Morin, R., de la Mata, M., Fernandez-Delgado, N., Khan, A. A., Molina, S. I., Rouillard, Y., Tournié, E., Cuminal, Y. (2021). Investigation of AlInAsSb/GaSb Tandem Cells – A First Step Towards GaSb-Based Multi-Junction Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2109, 110795.
- [55] Tournet, J., Parola, S., Vauthelin, A., Montesdeoca Cardenas, D., Soresi, S., Martinez, F., Lu, Q., Cuminal, Y., Carrington, P. J., Décobert, J., Krier, A., Rouillard, Y., Tournié, E. (2019). GaSb-Based Solar cells for Multi-Junction Integration on Si Substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 444-450.

- [56] Maji, B., Chattopadhyay, R. (2021). Design and Optimization of High Efficient GaSb Homo-Junction Solar Cell Using GaSb Intrinsic Layer. *Microsystem Technologies*, 27, 3589-3598.
- [57] Mansoori, A., Addamane, S. J., Renteria, E. J., Shima, D. M., Behzadirad, M., Vadie, E., Honsberg, C., Balakrishnan, G. (2018). Reducing Threading Dislocation Density in GaSb Photovoltaic Devices on GaAs by Using AlSb dislocation Filtering Layers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 185, 21-27.
- [58] Nelson, G. T., Juang, B. C., Slocum, M. A., Bittner, Z. S., Laghumavarapu, R. B., Hufftaker, D. L., Hubbard, S. M. (2017). GaSb Solar Cells grown on GaAs via Interfacial Misfit Arrays for Use in the III-Sb Multi-Junction Cell. *Applied Physics Letters*, 111, 231104 (1-5).
- [59] Kittel, C. (2005). Introduction to Solid State Physics 8th Edition. *John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-41526-X*, Chapter 8.
- [60] Markvart, T., Castañer, L. (2005). Solar Cells – Materials, Manufacture and Operation. *Elsevier Ltd. ISBN-13:978-1-85617-457-1, ISBN-10: 1-85617-457-3*. Chapter 1.
- [61] Dittrich, T. (2014). Materials Concepts For Solar Cells. *Imperial College Press, ISBN 978-1-78326-444-5*, Chapter 1.
- [62] Al-Khazzar, A. A. A., Hashim, E. T. (2016). Temperature Effect on Power Drop of Different Photovoltaic Modules. *Journal of Engineering*, 22, 129-143.
- [63] Gebbie, H. A., Harding, W. R., Hilsum, C., Pryce, A. W., Roberts, V., Stratton, F. J. M. (1997). Atmospheric transmission in the 1 to 14 μ region. *Royal Society*, 206, 87-107.
- [64] Rothman, L. S., Gamache, R. R., Goldman, A., Brown, L., Toth, R., Pickett, H., Poynter, R., Flaud, J., Camy-Peyret, C., Barbe, A., Husson, N., Rinsland, C., Smith, M. (1987). The HITRAN Database: 1986 Edition. *Optica Publishing Group*, 26, 4058-4097.
- [65] Zhang, Y. H. (1995). Continuous Wave Operation of InAs/InAs_xSb_{1-x} Midinfrared Lasers. *Applied Physics Letters*, 66, 118-120.
- [66] Rogalski, A., Martyniuk, P., Malgorzata, K., Madejczyk, P., Krishna, S. (2020). InAsSb-Based Infrared Photodetectors: Thirty Years Later On. *Sensors*, 20, 7047 (1-72)
- [67] Vurgaftman, I., Meyer, J. R., Ram-Mohan, L. R. (2001). Band Parameters for III-V Compound Semiconductors and Their Alloys. *Journal of Applied Physics*, 89, 5815-5875.

- [68] Garbuzov, D. Z., Martinelli, R. U., Lee, H., Menna, R. J., York, P. K., DiMarco, L. A., Harvey, M. G., Matarese, R. J., Narayan, S. Y., Connolly, J. C. (1997). 4 W Quasi-Continuous-Wave Output Power from 2 μm AlGaAsSb/InGaAsSb Single-Quantum-Well Broadened Waveguide Laser Diodes. *Applied Physics Letters*, 70, 2931-2933.
- [69] Donetsky, D. V., Westerfeld, D., Belenky, G. L., Martinelli, R. U., Garbuzov, D. Z., Connolly, J. C. (2001). Extraordinarily Wide Optical Gain Spectrum in 2.2-2.5 μm In(Al)GaAsSb/GaSb Quantum-Well Ridge-Waveguide Lasers. *Journal of Applied Physics*, 90, 4281-4283.
- [70] Diebold, A., Emaury, F., Schriber, C., Golling, M., Saraceno, C. J., Südmeyer, T., Keller, U. (2013). SESAM Mode-Locked Yb:CaGdAlO₄ Thin Disk Laser with 62 fs Pulse Generation. *Optics Letters*, 38, 3842-3845.
- [71] Alaydin, B. O., Heidrich, J., Gaulke, M., Golling, M., Barh, A., Keller, U. (2021). 2.35- μm InGaSb/GaSb SESAM. in *Conference on Lasers and Electro-Optics, Optica Publishing Group*, paper STh1E.6.
- [72] Garnache, A., Ouvrard, A., Cerutti, L., Barat, D., Vicet, A., Genty, F., Rouillard, Y., Romanini, D., Cerda-Méndez, E. A. (2016). 2-2.7 μm single frequency tunable Sb-based lasers operating in CW at RT: microcavity and external cavity VCSELs, DFB. *Proc. SPIE 6184, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II*, 61840N.
- [73] Harmand, J. C., Kohl, A., Juhel, M., Le Roux, G. (1997). Molecular beam epitaxy of AlGaAsSb system for 1.55 μm Bragg mirrors. *Journal of Crystal Growth*, 175/176, 372-376.
- [74] Perona, A., Garnache, A., Cerutti, L., Ducanhez, A., Mihindou, S., Grech, P., Boisseier, G., Genty, F. (2007). AlAsSb/GaSb doped distributed Bragg reflectors for electrically pumped VCSELs emitting around 2.3 μm . *Semiconductor Science and Technology*, 22, 1140-1144.
- [75] Arpaway, B. (2019). Growth and Characterization of Group III-V Nanostructures on Si Substrates by MBE. *PhD Dissertation, Eskişehir Technical University*.
- [76] Birkholz, M. (2006). Thin Film Analysis by X-Ray Scattering. *Darmstadt: Wiley-VCH*.
- [77] Dier, O., Lin, C., Grau, M., Amann, M. C. (2004). Selective and Non-Selective Wet-Chemical Etchants for GaSb-Based Materials. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 1250-1253.
- [78] <https://cloud.wikis.utexas.edu/wiki/spaces/wasserman/pages/61770409/Wet+Etc+h+Recipes>

- [79] <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
- [80] Ayers, J. E. (1994). The Measurement of Threading Dislocation Densities in Semiconductor Crystals by X-Ray Diffraction. *Journal of Crystal Growth*, 135, 71-77.
- [81] Gao, H., Wang, W., Jiang, Z., Liu, L., Zhou, J., Chen, H. (2007). The Growth Parameter Influence on the Crystal Quality of InAsSb Grown on GaAs by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 308, 406-411.
- [82] Yastrubchak, O., Domagała, J. Z., Wosiński, T., Kudła, A., Regiński, K. (2005). Anisotropic Strain Relaxation in Lattice-Mismatched III-V Epitaxial Layers. *Physica Status Solidi*, 2, 1943-1947.
- [83] Gopaladasu, P., Cecchi, J. L., Malloy, K. J., Kaspi, R. (2001). Response Surface Modeling of the Composition AlAs_ySb_{1-y} Alloys Grown by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 225, 556-560.
- [84] Wilk, A., Genty, F., Fraisse, B., Boissier, G., Grech, P., El Gazouli, M., Christol, P., Oswald, J., Simecek, T., Hulicius, E., Joullié, A. (2001). MBE Growth of InAs/InAsSb/AlAsSb Structures for Mid-Infrared Lasers. *Journal of Crystal Growth*, 223, 341-348.
- [85] Prineas, J. P., Yager, J. R., Olesberg, J. T., Seydmohamadi, S., Cao, C., Reddy, M., Coretsopoulos, C., Hicks, J. L., Bogges, T. F., Santilli, M., Olafsen, L. J. (2006). PIN Versus PN Homojunctions in GaInAsSb 2.0-2.5 Micron Mesa Photodiodes. *Semiconductor Photodetectors III*, 6119, 611903.
- [86] Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Brown, A. S., Brown, T., May, G. (2006). Fundamental Reactions Controlling Anion Exchange During Mixed Anion Heterojunction Formation: Chemistry of As-for-Sb and Sb-for-As Exchange Reactions. *Journal of Applied Physics*, 100, 013531.
- [87] Lin, C. H., Lee, C. P. (2014). Enhanced Optical Property in Quaternary GaInAsSb/AlGaAsSb Quantum Wells. *Journal of Applied Physics*, 116, 153504.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-6265-4489

Ad Soyad : Sabahattin Erinç ERENOĞLU

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği
- 2021 - 2022, Radyasyondan Korunma Sorumlusu, Tam Grup Enerji Işınlama San. Tic. Ltd. Şti.

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Erenoğlu, S. E., Ergürhan, A. A. Y., Şenel, O., Arpapay, B., Kulakcı, M., Serincan, U. (2022). Si Alttaş Üzerine GaSb Güneş Hücresi Geliştirilmesi, Poster Bildirisi, Estekfest22, Eskişehir, Türkiye.
- Erenoğlu, S. E., Şenel, O., Arpapay, B., Serincan, U. (2022). Growth of GaSb Buffer Layers on GaAs Substrate by MBE Technique, Konferans Bildirisi, International Dumlupınar Science & Mathematics Congress, Kütahya, Türkiye.
- Erenoğlu, S. E., Ergürhan, A. A. Y., Arpapay, B., Alaydın, B. Ö., Altun, D., Kulakcı, M., Serincan, U. (2023). GaSb Alttaş Üzerine Büyütülen Dörtlü Yarıiletken Bileşiklerin Karakterizasyonu, Poster Bildirisi, Estekfest23, Eskişehir, Türkiye.
- Ergürhan, A. A. Y., Erenoğlu, S. E., Arpapay, B., Kulakcı, M., Alaydın, B. Ö., Altun, D., Serincan, U. (2023). Structural and Optical Properties of Quaternary Alloy Grown by Molecular Beam Epitaxy, Konferans Bildirisi, 19th International Conference on Thin Films, Burgos, Spain.

- Arpaway, B., Ergürhan, A. A. Y., Erenoglu, S. E., Alaydin, B. Ö., Altun, D., Kulakci, M., Serincan, U. (2023). Growth and Characterization of GaSb Based Semiconductor Saturable Absorber Mirror, Konferans Bildirisi, 19th International Conference on Thin Films, Burgos, Spain.

