



**Si TABANLI SOLAR HÜCRELERDE
PASİVASYON, 2D HARİTALAMA İLE
KARAKTERİZASYON**

Zeynep Elif GÜLDÜREN

Yüksek Lisans Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**Si TABANLI SOLAR HÜCRELERDE PASİVASYON, 2D HARİTALAMA İLE
KARAKTERİZASYON**

(Passivation of Si-Based Solar Cells, 2d Mapping Characterization)

Zeynep Elif GÜLDÜREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

ERZURUM
Ağustos, 2020

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Si Tabanlı Solar Hücrelerde Pasivasyon, 2D Haritalama İle Karakterizasyon

Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU danışmanlığında, Zeynep Elif GÜLDÜREN tarafından hazırlanan bu çalışma, 06/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanofabrikasyon Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Emre GÜR
Atatürk Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Güven TURGUT
Erzurum Teknik Üniversitesi

Enstitü Yönetim
Kurulunun / ... / tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Unvan Ad SOYAD
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 1 14F085



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU* danışmanlığında sunulan “Si Tabanlı Solar Hücrelerde Pasivasyon, 2DHaritalama İle Karakterizasyon” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Yöntem	1	35
Bulgular	6	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Zeynep Elif GÜLDÜREN	Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU
21.8.2020	21.8.2020
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez süreci boyunca bilgisini, desteğini ve emeğini esirgemeyen, sergilediği çalışkanlık ve iş disipliniyle etrafındakilere ve özellikle de bana ışık tutmuş, fikirlerimi yönlendirmiş olan Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na, görüntülerin işlenmesinde katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümü doktora öğrencisi Melik GÜL'ün ve yazılımda katkılarından dolayı Prof. Dr. Ahmet Mavi'ye, ODTÜ GÜNAM laboratuvarlarında solar hücrelerimizin yüzey yapılandırmasını yapan Prof. Dr. Raşit TURAN ve Dr. Fırat ES'e teşekkür etmek istiyorum.

Süreç boyunca manevi desteğini esirgemeyen, hayatımda olmalarından büyük mutluluk duyduğum annem Birgül ÖZERBAŞ, babam A.Nafiz ÖZERBAŞ, kardeşim Fatih ÖZERBAŞ, teyzem Sevgi SULUOĞLU'na ve eşim M.Emin GÜLDÜREN'e teşekkür etmek istiyorum.

Bu tez çalışması, Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU' nun yürütücülüğünü yaptığı 114F082 numaralı “TÜBİTAK Amorf PIN-Si İnce Film Güneş Hücrelerinde Enerji Dönüşüm Veriminin İki Boyutta Yaşam Süresi ve Rekombinasyon Merkezlerinin Dağılımı ile Karakterizasyonu” projesi kapsamında yapılmıştır.

Zeynep Elif GÜLDÜREN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Si TABANLI SOLAR HÜCRELERDE PASİVASYON, 2D HARİTALAMA İLE KARAKTERİZASYON

Zeynep Elif GÜLDÜREN

Danışman Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

Amaç: Yüzey pasivasyonu, rekombinasyonu azaltmak ve solar hücre performansını iyileştirmek için en önemli faktörlerden biridir. Bu tez çalışmasında, ODTÜ GÜNAM tarafından üretilen yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış n^{++} -Si/ p-Si/ p^{++} -Si solar hücrelerin solar hücrelerde etkin yaşam sürelerinin artırılması hedeflenmiştir. Etkin yaşam süresine bağlı olarak solar hücre performansını artırmak amacıyla hızlı termal tavlama işleminde optimum süre ve sıcaklık değerinin tespiti hedeflenmiştir.

Yöntem: Yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış n^{++} -Si/ p-Si/ p^{++} -Si solar hücrelerin yayıcı eklem yüzeyi üzerine, yüzey pasivasyonunu gerçekleştirmek amacıyla reaktif saçtırma tekniği ile 15nm kalınlığında TiO_2 ince film kaplanmıştır. Yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış solar hücrelere pasivasyon sonrası farklı sıcaklık ve farklı sürelerde hızlı termal tavlama işlemi uygulanmıştır. Laboratuvarımızda bulunan ölçüm sistemi ile elektriksel ve optik özellikler iki boyutlu haritalama ile karakterize edilmiştir.

Bulgular: Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümleri yapılmış ve solar hücre verimi üzerindeki etkileri tartışılmıştır. TiO_2 pasivasyonunun ve yüzey yapılandırmasının yaşam süresi üzerindeki olumlu etkileri ve noktasal olarak yapılan iki boyutlu haritalamanın bu olumlu etkileri tespit etmekteki önemi görülmüştür.

Sonuç: Haritalama ölçümlerinden elde edilen yaşam süresi, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı dağılımlarının ölçüm haritaları içinde uniform olduğunun yapılan iki boyutlu ölçümler ile teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: pasivasyon, rekombinasyon, yaşam süresi, TiO_2 , ince film, solar hücre verimi, açık devre gerilimi, kısa devre akımı

Ağustos 2020, 104 sayfa

ABSTRACT

MS Thesis

PASSIVATION OF Si-BASED SOLAR CELLS, 2D MAPPING CHARACTERIZATION

Zeynep Elif GÜLDÜREN

Supervisor : Prof.Dr. Hasan EFEOĞLU

Purpose: Surface passivation is one of the most important factors to reduce recombination and improve solar cell performance. In this thesis, it is aimed to increase the effective lifetime on surface of n^{++} -Si / p-Si / p^{++} -Si solar cells produced by METU GUNAM with and without structured surface. It is aimed to determine the optimum time and temperature values in the rapid thermal annealing process in order to increase solar cell performance depending on the effective lifetime.

Method: 15 nm thick TiO_2 thin film was coated on the emitter surface of n^{++} -Si / p-Si / p^{++} -Si solar cells with and without surface structured by reactive sputtering technique in order to perform surface passivation. Rapid thermal annealing process was applied at different temperatures and different times after passivation to TiO_2 coated, surface structured and unstructured solar cells. Two dimensional mapping in our laboratory used for electrical and optical characterization.

Findings: Measurements of open circuit voltage and short circuit current were made and their effects on solar cell efficiency were discussed. The positive effects of TiO_2 passivation and surface structuring on the lifetime and the importance of point-to-point two-dimensional mapping in detecting these positive effects were seen.

Results: The lifetime, the open circuit voltage and short circuit current distributions obtained from the mapping measurements was confirmed by two-dimensional measurements that were uniform within the measurement maps.

Keywords: passivation, recombination, lifetime, TiO_2 , thin film, solar cell efficiency, open circuit voltage, short circuit current

August 2020, 104 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xv
GİRİŞ.....	1
Solar Enerji ve Fotovoltaik Olay.....	1
Silisyumdan Solar Hücre Üretim Aşamaları.....	2
Yarıiletken Temelleri	2
Yasak enerji bant aralığı.....	2
Yarıiletkende yük taşınımı (mobilité)	3
Sürüklenme akımı	4
Difüzyon akımı.....	5
Yarıiletkende optiksel soğurma ve rekombinasyon	6
Katkılama	8
Yarıiletkenlerde kusurlar.....	9
Solar Hücre Temelleri	10
P-n eklem	10
Solar hücre çeşitlerine ve yıllara göre verimin değişimi.....	11
Kısa devre akımı (ISC).....	12
Açık devre gerilimi (V_{OC})	13
Dolum faktörü (FF)	13
Solar hücre verimi	14
Sıcaklık.....	14
Optik Kayıplar.....	15
KAYNAK ÖZETLERİ.....	16
MATERYAL ve YÖNTEM	22
Solar Hücrede Optiksel Kayıpları Önleme Metodları.....	24
Yansıma önleyici kaplama	24

Yüzey yapılandırması.....	24
Metalizasyon	26
Hızlı Termal Tavlama (RTA)	29
Işık Yakalama.....	30
Yaşam Süresi.....	31
Difüzyon Uzunluğu.....	32
Yüzey Pasivasyonu	33
Doymamış bağlar	33
Yüzey pasivasyonu ve rekombinasyon ilişkisi	34
Pasivasyon çeşitleri	36
Rekombinasyona ilişkin teoriler	37
İnce Film Kaplama Teknikleri	38
Fiziksel biriktirme teknikleri.....	38
Ölçümlerde Kullanılan Deney Düzeneği	42
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	44
Yüzeyi Yapılandırılmamış Numunelerin Değerlendirilmesi	44
Tavlama sıcaklığına bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmamış numuneler	44
Tavlama süresine bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmamış numuneler.....	51
Yüzeyi Yapılandırılmış Numunelerin Değerlendirilmesi	57
Tavlama sıcaklığına bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmış numuneler	58
Tavlama süresine bağlı olarak yapılan ölçümler.....	64
Açık Devre Gerilimi-Kısa Devre Akımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	69
Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi	70
Yüzeyi yapılandırılmış 500°C 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait açık devre ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi.....	71
Yüzeyi yapılandırılmış 550°C 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi	73
Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi	74
Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi	75
SONUÇLAR.....	78
Isıl İşlem Sıcaklığına Bağlı Olarak Yapılan Ölçümler	78
Yaşam süresi sonuçları.....	78

Isıl işlem Süresine Bağlı Olarak Yapılan Ölçümler	79
Yaşam süresi sonuçları.....	79
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	86



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı pasivasyon malzemelerinin pasivasyon etkileri ve endüstriyel uyumlulukları	20
Tablo 2. c-Si solar hücre yüzey pasivasyon yöntemleri	20
Tablo 3. İnce film kaplama teknikleri sınıflandırması.....	38
Tablo 4. TiO ₂ depozite edilen ve 120sn ısıtıl işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış Si numunelere ait solar hücre performansı ölçümlerinden elde edilen yaşam süresi değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklığına bağı sonuçları	79
Tablo 5. TiO ₂ depozite edilen ve 400°C’de ısıtıl işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış Si numunelere ait solar hücre performansı ölçümlerinden elde edilen yaşam süresi değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklığına bağı sonuçları	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 5760 K'de siyah cisim ışıması ve optimum bant aralıklı hücresinin mevcut güç spektrumu	3
Şekil 2. Elektron akım yoğunluğunu göz önüne alan yarıiletken örneği.	4
Şekil 3. Bir yarıiletkende boşluklar ve elektronların sürüklenmesi	5
Şekil 4. Difüzyonda, elektron ve boşluk popülasyonlarının istatistiksel potansiyel enerjilerini azaltmak için bir yoğunluk gradyenti altında dağılımı	5
Şekil 5. Yarıiletkende bantdan banda geçişle optik soğurma.....	6
Şekil 6. Işımalı rekombinasyon	7
Şekil 7. SRH rekombinasyonu	7
Şekil 8. Auger rekombinasyonu	8
Şekil 9. a) n-tipi katkılama. b) p tipi katkılama.....	8
Şekil 10. n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemelerin p-n eklem yapısı	10
Şekil 11. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının en iyi hücre verimliliği sonuçları grafiği	11
Şekil 12. Solar Hücreye ait I-V eğrisinde I_{sc} ve V_{oc} gösterimi.....	12
Şekil 13. I-V eğrisi üzerinden dolum faktörü hesaplanması	13
Şekil 14. I-V karakteristiği üzerinde sıcaklığın etkisi	14
Şekil 15. Solar hücredeki optik kayıpların kaynakları	15
Şekil 16. Kristal ve çok kristalli silisyum solar hücrelerin veriminin yıllara göre gelişimi.....	18
Şekil 17. (a) Patern aktarmada kullanılan negatif maskenin LayOut çizimi. Hücreler $1000 \times 1000 \mu m^2$ olup aralık $50 \mu m$ olarak tasarlanmıştır. (b) Solar hücre yüzeyinde oluşturulmuş TiO_2 kaplamanın optik görüntüsü.....	23
Şekil 18. $400^\circ C$ 'de 2D haritalama süresince eş zamanlı ölçülen numune sıcaklığındaki değişim. Değişimin 1mK altında sistemin ölçüm sınırlarında da olması numune sıcaklığının kararlı olduğunu göstermektedir.	23
Şekil 19. AR-kaplamanın temel prensibi	24
Şekil 20. Yüzeyi yapılandırılmış kristal silisyum yüzeyi karesel tabanlı piramit yapılar temsili.....	26
Şekil 21. New South Wales University- The School of Photovoltaic & Renewable Energy Engineering görüntülerinden alınan yapılandırılmış yüzeye ait SEM görüntüsü	26

Şekil 22. a) $\Phi_m > \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi p-tipi olduğunda Schottky kontak oluşumu, b) $\Phi_m < \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi n-tipi olduğunda Schottky kontak oluşumu, c) Schottky kontağın I-V karakteristiği Metal $\Phi_m > \Phi_s$ Yarıiletken.....	28
Şekil 23. a) $\Phi_m > \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi p-tipi olduğunda omik kontak oluşumu , b) $\Phi_m < \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi n-tipi olduğunda omik kontak oluşumu, c) Omik kontağın I-V karakteristiği.....	29
Şekil 24. Laboratuvarımızda yer alan RTA ünitesi	30
Şekil 25. Yüzeyi Yapılandırılmış bir silisyum solar hücrenin yüzeyindeki yansıma ve iletimi	31
Şekil 26. Kristal formda bir yarıiletkenin yüzeyde oluşan doymamış bağ oluşumu.....	34
Şekil 27. P tipi malzemede arka p kontaktları.	35
Şekil 28. Arka yüzeyi nokta kontaktlı solar hücre kesiti.....	35
Şekil 29. Termal buharlaştırma sisteminin şematik olarak gösterimi	39
Şekil 30. Elektron demeti buharlaşmasının şematik diyagramı	40
Şekil 31. Saçtırma sistemi şeması	41
Şekil 32. Solar hücrelerde yaşam süresi ölçüm sistemi ve bileşenleri.	42
Şekil 33. (a) TiO_2 kaplanmış ve herhangi bir ısıtma işlemi tabi tutulmamış referans numuneye ait üç boyutta, (b) iki boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı $4 \times 4 \text{ mm}^2$ dir.	44
Şekil 34. Referans numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	45
Şekil 35. (a) 200°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresinin üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası	46
Şekil 36. 200°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	46
Şekil 37. (a) 300°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası	47
Şekil 38. 300°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.	48
Şekil 39. (a) 400°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu , (b) iki boyutlu yüzey haritası	48
Şekil 40. 400°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	49
Şekil 41. (a) 500°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası	49
Şekil 42. 500°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	50
Şekil 43. (a) 550°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası.	50
Şekil 44. 550°C 'de 120sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.	51

Şekil 45. (a) 400°C’de 10sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	52
Şekil 46. 400°C’de 10sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	53
Şekil 47. (a) 400°C’de 30sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	53
Şekil 48. 400°C’de 30sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	54
Şekil 49. (a) 400°C’de 60sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	54
Şekil 50. 400°C’de 60sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	55
Şekil 51. (a) 400°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	55
Şekil 52. 400°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	56
Şekil 53. (a) 400°C’de 180sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	56
Şekil 54. 400°C’de 180sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	57
Şekil 55. (a) TiO ₂ kaplanmış ve herhangi bir ısı işleme tabi tutulmamış referans numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir.	58
Şekil 56. Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	58
Şekil 57. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 200°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir	59
Şekil 58. 200°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	59
Şekil 59. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 300°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir	60
Şekil 60. 300°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.	60
Şekil 61. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir ...	61
Şekil 62. 400°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	61
Şekil 63. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir ...	62
Şekil 64. 500°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	62
Şekil 65. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısı işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örneklem alanı 4x4mm ² ’dir ...	63

Şekil 66. 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	63
Şekil 67. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 10sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm ² ’dir ...	64
Şekil 68. 400°C’de 10sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	64
Şekil 69. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 30sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm ² ’dir. ..	65
Şekil 70. 400°C’de 30sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	66
Şekil 71. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm ² ’dir ...	66
Şekil 72. 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	67
Şekil 73. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm ² ’dir ...	67
Şekil 74. 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	68
Şekil 75. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 180sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm ² ’dir ...	68
Şekil 76. 400°C’de 180sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği	69
Şekil 77. (a) Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası	70
Şekil 78. (a) Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası	71
Şekil 79. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	72
Şekil 80. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası	72
Şekil 81. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	73
Şekil 82. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası	74
Şekil 83. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	74
Şekil 84. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	75
Şekil 85. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası	76

Şekil 86. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası.....	76
Şekil 87. 120sn ısıt işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olan Si numunelere ait yaşam süresi değerlerinin ısıt işlem sıcaklığına bağlılığının grafiksel gösterimi	79
Şekil 88. 400°C’de ısıt işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olan Si numunelere ait yaşam süresi değerlerinin ısıt işlem süresine bağlılığının grafiksel gösterimi	80



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

η	Verim
ν	Işığın frekansı
AM1.5	Air mass 1.5 spektrum- solar hücre kalibrasyon standardı
a-Si	Amorf silisyum
C	Vakumdaki ışığın hızı
c-Si	Kristal Silisyum
D	Yayınım
E_g	Bant aralığı enerjisi
eV	Elektron Volt
G	Birim hacim başına üretim oranı
H	Planck sabiti
I_{SC}	Kısa Devre Akımı
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin
$L_n ; L_p$	Elektron difüzyon uzunluğu; boşluk difüzyon uzunluğu
m_n	Elektronun kütlesi
mV	Milivolt
n	Birim hacim başına elektron yoğunluğu
nm	Nanometre
p	Birim hacim başına boşluk yoğunluğu
q	Parçacık yükü
Si	Silisyum
$S_n ; S_p$	Elektron yüzey rekombinasyon hızı ; boşluk yüzey rekombinasyon hızı
T	Sıcaklık
U	Birim hacim başına rekombinasyon oranı
V_m	Açığa çıkangerilim değeri
V_n	Sürüklenme hızı
V_{oc}	Açık devre gerilimi
V_{OC}	Açık devre voltajı
$\Delta\mu$	Quasi- Fermi seviyesi ayırımı ya da ışığın kimyasal potansiyeli

τ	Yaşam süresi
Φ	İş fonksiyonu
λ	Dalga boyu
μA	Mikro amper
μm	Mikro metre
μ_n	Elektron mobilitesi
μ_p	Boşluğun mobilitesi
μs	Mikro saniye

Kısaltmalar

ALD	Atomik Katman Biriktirme
AR	Yansıma Önleyici
CPD	Temas Potansiyel Farkı
ERDA	Elastik Geri Tepme Algılama Analizi
FF	Dolum faktörü
LED	Işık Yayan Diyot
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar birikimi
PV	Fotovoltaik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SRH	Schockley Read Hall
XPS	X Işını Fotoelektron Spektroskopisi

GİRİŞ

Yeryüzünde artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla fosil kaynakların yanında yenilenebilir enerji kaynakları da kullanılmaya başlanmıştır. Güneş enerjisi en yüksek potansiyele sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi, elektrik enerjisinin büyük bir kaynağıdır.

Solar Enerji ve Fotovoltaik Olay

Solar enerji, Güneş'ten yeryüzüne gün içinde doğrudan ulaştığı için yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Solar enerjinin varlığı, coğrafi konuma bağlı olmamakla beraber farklı yoğunluklar ile gezegende her yerde bulunur. Tamamen temiz ve doğal bir kaynaktır. Fosil yakıtlar gibi ekosistemin dengesini bozmaz, su, çevre ve hava kirliliğine yol açmaz ve diğer kaynakların varlığı için tehdit oluşturmaz. Son on yılda solar enerji teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, solar enerji üretim maliyetleri ekonomik açıdan makul seviyeye gelmiştir. Solar enerjinin kullanıldığı çeşitli uygulamalar vardır.

PV sistemi güneş ışığı enerjisini elektriğe dönüştürmek için fotovoltaik etki olarak adlandırılan enerji dönüşüm olayıdır. İlk olarak Edmond Becquerel 1839'da elektriğin güneş ışığından nasıl elde edilebileceğini açıklayan fotovoltaik etkiyi keşfetti. Becquerel, iletken bir çözeltiye batırılmış bir elektrot üzerine düşen bir ışığın elektrik akımı oluşturacağına inanıyordu. Bununla birlikte yaptığı kapsamlı çalışmalar neticesinde fotovoltaik güç hala az verimliydi ve solar hücreler ışığı ölçmek için kullanıldı. 1914'te fotovoltaik gözelerin verimliliği %1, değerine ulaşmıştır ancak ilk kez güneş enerjisini %6 verimlilik ile güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik yapılar 1954'te kristal silisyum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tarih fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilmiş ve ileriki zamanlarda yapılan araştırmalar ve elde edilen ilk tasarımlar, uzay alanında kullanılan araçlarda güç sistemlerine yönelik olarak yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri halen en güvenli enerji kaynağı olmayı sürdürmektedir.

Elektrik enerjisi üreten PV sistem, sürekli artış eğiliminde olan konut ve endüstriyel kullanım için çevreci enerji kaynağıdır. Bir PV sisteminde, solar hücreler fotovoltaik etki uygular ve tüm sistemin dönüşüm verimini belirler. Geleneksel solar hücredeki yarıiletken malzemeler, bir iç elektrik alanı oluşturmak üzere p-n yapısındadır (Chen 2015).

Güneş ışığı solar hücreye geldiğinde silisyumun yasak enerji aralığından büyük enerjili fotonların soğrulması ile elektron-boşluk çifti oluşur. P-n eklemine oluşan iç elektrik alan, bu çiftlerin ayrılmasına neden olur. Sonuç olarak, güneş ışınları ile gelen fotonlar sayesinde n tipi yarıiletkenlerden kopan elektronlar p tipi yarıiletkene doğru hareket eder. Her iki tarafın yük dengesi eşitleninceye kadar bu olay devam eder. Karşıt kutuplar arasında oluşan potansiyel fark, bu kutuplara bağlanan yük üzerinden akım sürer. Solar hücre, bir PV sisteminin tüm bileşenler arasında güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren en önemli aygıt olarak kabul edilir. Solar hücre dönüşüm verimliliğini artırmak ve silisyum tabanlı solar hücre maliyetini düşürmek son yıllarda iki temel çalışma alanıdır.

Silisyumdan Solar Hücre Üretim Aşamaları

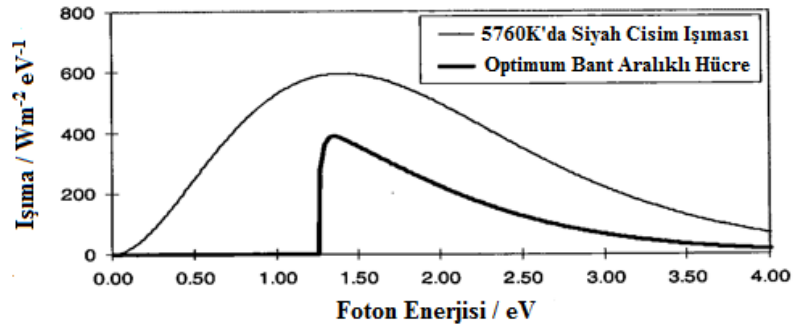
Silisyum ve diğer yarıiletken malzemeler PV sistemlerinin temel materyalidir. Günümüzde solar hücrelerin %90'ı silisyum tabanlıdır. Yeryüzünde en çok bulunan elementler ilk olarak oksijen ve ikinci olarak da silisyumdur. Bu nedenle silisyum kaynağı, ucuz ve neredeyse sonsuz bir doğal kaynaktır. Ancak bu maddeyi fotovoltaiik sistemlerde kullanabilmek için bir dizi komplike işlemler yapılması gerekir.

Doğal silika, saf kristal silisyum hâline getirilir. Yüksek saflıktaki silisyum üretildikten sonra, solar hücrede kullanılabilmesi için kristalografik kalitede ince tabaka hâline dönüştürülmesi gerekmektedir. Kristal levha üretimi, ya şerit büyütülmesi ya da külçe dökümü (kristalleştirme) ile başlayan ve ardından levha üretimi ile gerçekleştirilen iki aşamalı bir işlemdir.

Yarıiletken Temelleri

Yasak enerji bant aralığı

Bir solar hücreye ışık geldiğinde, fotonlar silisyum atomunun bir değerlik elektronunu koparır. Bir elektronu yerinden çıkaracak kadar enerjiye sahip olan fotonlar elektron-boşluk çifti meydana getirilir. Silisyum atomundan (Si) bir elektronu koparmak için gereken enerji miktarı 1.1eV'dir. Buna "bant aralığı" denir. Sadece bant aralığı enerjisinden (E_g) daha yüksek bir enerjiye sahip fotonlar elektrik üretebilir. Sabit spektrumlu gelen ışığın verimi (η) sadece bant aralığına bağlıdır. Çok küçük ve çok büyük bant aralıkları zayıf foto dönüşüme yol açar. Çünkü çok küçük bant aralığında; V 'nin açığa çıkan değeri çok küçüktür (V_m , V_{oc} gibi, E_g 'den her zaman daha düşüktür) ve çok büyük bant aralığında da; fotoakım çok düşüktür. Herhangi bir spektrum için, verimin maksimum olduğu optimum bir bant aralığı vardır. Şekil 1'de standart bir AM1.5 solar spektrum için hesaplanan E_g ile verimin değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 1. 5760 K'de siyah cisim ışıması ve optimum bant aralıklı hücresinin mevcut güç spektrumu (Nelson 2003)

Şekil 1’de, maksimum güç noktasında optimum bant aralıklı bir hücre için mevcut güç spektrumu, bir siyah cisim ışımasından gelen güç ile karşılaştırılmıştır. Yaklaşık 1.4 eV’lik bir bant aralığı enerjisinde maksimum yaklaşık% 33’e sahiptir. Silisyum 1.1 eV bant aralığına sahip olduğu için optimum aralıkta yer almakta ve bu nedenle güneş uygulamalarında kullanımı uygun olmaktadır. E_g ’den daha az enerjiye sahip olan fotonların hiçbiri mevcut güce katkıda bulunmaz. $E > E_g$ olan fotonlar emilir ama elektriksel enerjinin $\Delta\mu(=qV_m)$ değeri yüke aktarılır. Böylece sadece foton güçlerinin $\Delta\mu/E$ oranı mevcuttur. Şekil 1.1, E arttıkça bu oranın nasıl düşüş gösterdiğini ifade etmektedir. $E=E_g$ olsa bile $qV_m < E_g$ ’den dolayı, gelen gücün bir $\Delta\mu/E$ oranı mevcuttur (Nelson 2003).

Yarıiletkenlerde yük taşınımı (mobilité)

Yarıiletkenlerde termal enerjiye sahip serbest yükler rastgele doğrultuda hareket ederler. Serbest yükler örgü atomlarıyla, yabancı atomla veya kusur merkezleriyle etkileşerek saçılır. Bu saçılmalar neticesinde serbest yükler, elektrik alandan kazandığı enerjiyi kısmen kaybeder. Kayıp enerji örgüye ısı halinde transfer olur. Mobilité ne kadar büyükse serbest yük taşınımı o kadar iyi olur. İki ardışık çarpışma sırasında geçen süre “ortalama serbest zaman” olarak adlandırılır ve “ τ_c ” ile gösterilir. Katedilen yola ortalama serbest yol denir. Serbest yüklerin rastgele hareketinden dolayı yeterince uzun bir zaman periyodunda net yer değiştirme sıfırdır. Ancak yarıiletkene elektrik alan uygulanırsa elektron $-qE$ kuvvetine maruz kalır. Elektrik alana zıt yönde elektron hızlanmaya başlar. Bu elektrik alan tarafından oluşan hız bileşenlerine sürüklenme hızı (v_n) da denir. Ortalama serbest zamanda bir elektron momentumundaki değişim;

$$m_n v_n = -qE\tau_c \quad (1.1)$$

Yani;

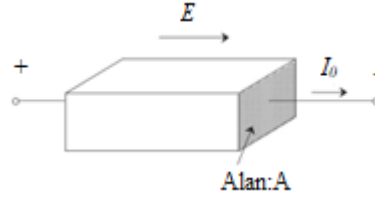
$$v_n = -\frac{q\tau_c}{m_n} E = -\mu_n E \quad (1.2)$$

2 numaralı denklemde μ_n elektron mobilitesidir. Benzer şekilde boşluk sürüklenme hızı;

$$v_p = -\frac{q\tau_c}{m_p}E = \mu_p E \quad (1.3)$$

ile verilir ve burada da μ_p boşluk mobilitesidir (Gray 2005, Nelson 2003).

Sürüklenme akımı



Şekil 2. Elektron akım yoğunluğunu göz önüne alan yarıiletken örneği.

Şekil 2'deki gibi A yüzey alanına sahip n tipi bir yarıiletken göz önüne alalım. Yarıiletkene bir elektrik alan uygulandığında elektron akım yoğunluğu ;

$$J_n = \frac{I_n}{A} = -nqv_n = nq\mu_n E \quad (1.4)$$

İle verilir. Benzer şekilde boşluk akım yoğunluğu ise ;

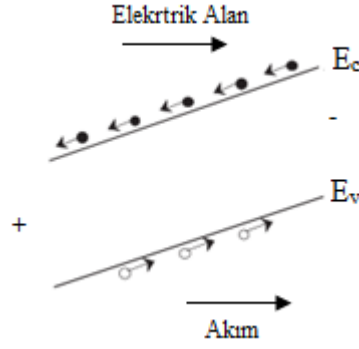
$$J_p = \frac{I_p}{A} = -pqv_p = pq\mu_p E \quad (1.5)$$

Sürüklenme akımı olarak bilinen elektrik alandan dolayı toplam akım yoğunluğu ;

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p) E = \sigma E \quad (1.6)$$

ile verilir. Burada σ iletkenlik sabitidir.

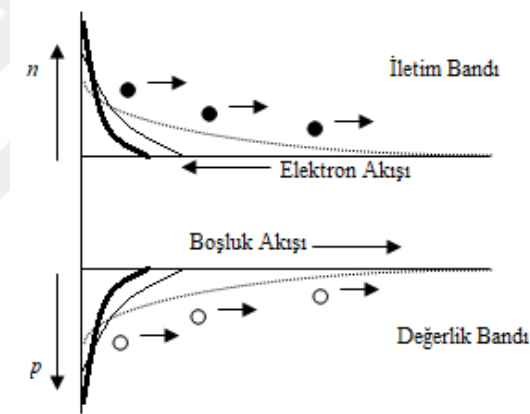
Sürüklenme akımı enerji bant diyagramı kullanarak ele alındığında Şekil 3'teki gibi yarıiletkene elektrik alan uygulandığında iletim bandının ve değerlik bandının gradyanı meydana gelir. Düşük potansiyel enerji seviyesine hareket eden serbest elektronlar ve boşluklar akımı oluşturur. Elektronlar ve boşluklar karşıt yönlerde doğru hareket eder, ancak akım yönü aynıdır.



Şekil 3. Bir yarıiletkende boşluklar ve elektronların sürüklenmesi

Difüzyon akımı

Yarıiletken içerisinde elektronların yoğunluğu bir uzaysal değişim sergilediğinde elektronların çok yoğun olduğu yerden az yoğun olduğu yere doğru hareket etmesiyle oluşan akıma difüzyon akımı denir. Bu elektronlar her iki tarafta da eşit oluncaya kadar akış devam eder.



Şekil 4. Difüzyonda, elektron ve boşluk popülasyonlarının istatistiksel potansiyel enerjilerini azaltmak için bir yoğunluk gradyenti altında dağılımı

Şekil 4'te difüzyonda, elektron ve boşluk yoğunluğunun, istatistiksel potansiyel enerjilerini azaltmak için bir yoğunluk gradyenti altında dağılımı gösterilmektedir. Gri ve noktalı çizgiler elektron ve boşluk yoğunluğunun oluşumundan sonra nasıl geliştiğini göstermektedir. Elektron ve boşluk dağılımına bağlı olarak oluşan difüzyon akımları tarafından üretilen akımlar zıt yönlüdür. Elektron ve boşluk hareketlilikleri farklı olmadığı sürece, net akım sıfır olabilir.

Yarıiletkende optiksel soğurma ve rekombinasyon

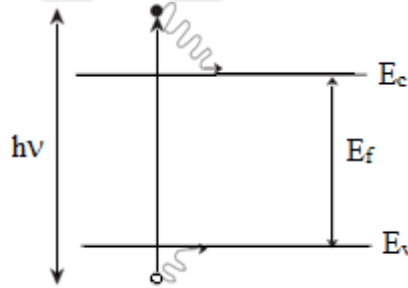
Optik soğurma

Foton enerjisi ve dalgaboyu arasındaki ilişki,

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1.2398}{h\nu (\text{eV})} \quad (1.7)$$

ile verilmektedir. Burada c , vakumdaki ışığın hızını; h , Planck sabitini ν , ışığın frekansını tanımlamaktadır. Solar ışığın enerji spektrumu UV bölgeden ($0.3\mu\text{m}$) IR bölgeye ($3\mu\text{m}$) kadar yayılmıştır.

Yarıiletken solar aydınlatmaya maruz kaldığında fotonun enerjisi yarıiletken bant aralığından küçükse fotonlar, malzeme içerisinden soğurulmadan doğrudan geçer. Yani, yarıiletken bu fotonlar için şeffaftır. Eğer foton enerjisi bant aralığından büyükse değerlik bandındaki elektronlar uyarılarak iletim bandına geçer. Foton soğurulması sonucunda elektron-boşluk çifti meydana gelir. Bu sürece banttan banda geçiş denir. Kesim dalgaboyu (λ_0), solar hücre malzemesi seçiminde çok önemlidir. Çünkü gelen ışığın λ_0 'dan daha uzun dalgaboyuna sahip bileşenleri solar enerji dönüşümü için kullanılamaz. Optik soğurma ile elektronun banttan banda geçişi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yarıiletkende banttan banda geçişle optik soğurma

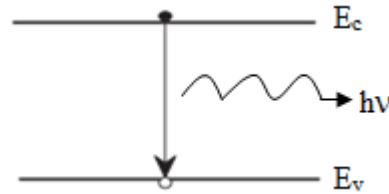
Bant aralığını aşan enerjinin fazlası $h\nu - E_g$ olarak tanımlanır. Bu artık kinetik enerji yarıiletkene ısı olarak transfer edilir.

Rekombinasyon

Yarıiletken ışığı soğurduğunda elektron-boşluk çifti oluşur. Işık kesildiğinde, iletkenlik bandındaki elektronları valans bandına geri dönerek tekrar boşluklarla birleşmesi belli bir ihtimaliyet dahilinde gerçekleşir. Bu işleme rekombinasyon (yeniden birleşme) denir. Rekombinasyon serbest yüklerin yaşam süresini etkileyen bir kavramdır. Işımalı (band-band geçişi) rekombinasyon, Shockley Read Hall (SRH, dolaylı geçiş) rekombinasyon, Auger rekombinasyon olmak üzere 3 tip rekombinasyon mekanizması bulunmaktadır. Auger ve SRH

rekombinasyon silisyum temelli solar hücrelerde esas rekombinasyon mekanizmalarıdır. Işımalı (banttan banda- doğrudan) rekombinasyon;

Işımalı rekombinasyonun başlıca özellikleri şunlardır; ışımalı rekombinasyonda Şekil 6'daki gibi bir elektron iletim bandından direkt olarak değerlik bandındaki bir boşluk ile birleşir ve bir foton yayımlar. Salınan foton bant aralığına yakın bir enerjiye sahiptir ve yarıiletkenin çıkabilmek için yalnızca bir kısmı soğurulur.

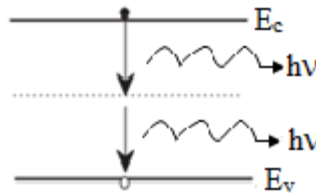


Şekil 6. Işımalı rekombinasyon

Shockley Read Hall (SRH, dolaylı) rekombinasyonu;

SRH rekombinasyonu malzeme içerisinde bulunan kusurlardan kaynaklandığı için kusursuz malzemelerde oluşmaz. SRH rekombinasyonu iki aşamalı bir işlemdir. Aşamalar;

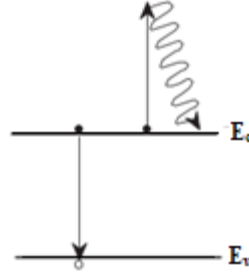
- 1) Şekil 7'de gösterildiği gibi bir elektron (veya boşluk) kristal kafesteki kusurlardan dolayı bant içinde oluşan kusur seviyeleri tarafından tuzaklanır. Bu esnada bir foton veya birden fazla fonon açığa çıkar.
- 2) İkinci aşamada ise bu elektron valans bandındaki boşluk ile birleşir ve bu esnada yine enerji açığa çıkarır (Shockley and Read 1952; Hall 1952).



Şekil 7. SRH rekombinasyonu

Auger rekombinasyonu;

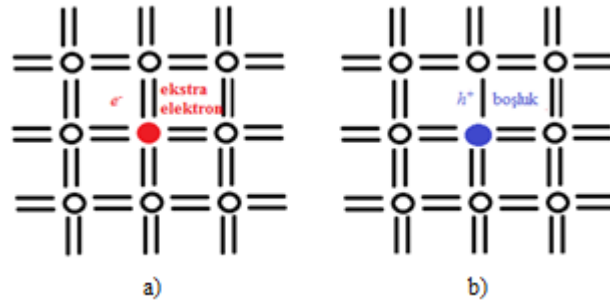
Auger rekombinasyonu Şekil 8'deki gibi üç taşıyıcı içerir. Bir elektron ve bir boşluk birleşir, ancak enerjiyi ısı veya foton olarak yaymak yerine, enerji iletim bandındaki bir elektron olan üçüncü bir taşıyıcıya transfer edilir. Bu elektron termalize olur ve iletim bandı kenarına geri döner. Auger rekombinasyonu, ağır katkılama veya yoğun güneş ışığı altında yüksek seviyeli enjeksiyonun neden olduğu aşırı taşıyıcı yoğunluğunda etkilidir. Malzeme ne kadar çok katkılı olursa, Auger rekombinasyon ömrü kısalır (Auger 1923; Kerr and Cuevas 2002).



Şekil 8. Auger rekombinasyonu

Katkılama

Katkılama yarıiletkeninde elektron ve boşluk sayısını değiştirmek için kullanılan bir tekniktir. IV. grubundaki yarıiletken, V. grup atomlarla katkıldığında n tipi; III grup atomlar ile katkıldığında p-tipi özellik kazandırılır. N tipi yarıiletken malzemeler yapısındaki elektron sayısını artırarak iletkenliğini artırmış olurlar. P-tipi yarıiletken malzemeler yapısındaki boşluk miktarını artırarak iletkenliğini artırmış olurlar. Elektriksel aktiviteye sahip yabancı atomla katkılanmış bir yarıiletkeninde daha yüksek konsantrasyona sahip taşıyıcı türü "çoğunluk taşıyıcı" olarak adlandırılırken, düşük konsantrasyona sahip taşıyıcı türüne "azınlık taşıyıcı" denir.



Şekil 9. a) n-tipi katkılama. b) p tipi katkılama

Şekil 9 (a) ve (b)'de n-tipi katkılama oratadaki mavi atom, fosfor atomunu; p-tipi katkılama ortadaki kırmızı atom bor atomunu temsil etmektedir. N tipi yarıiletken, Şekil 9a'da gösterildiği gibi, 4 değerlik elektrona sahip olan silisyum atomları ile 5 değerlik Fosfor atomu arasında kurulan kovalent bağda beşinci elektronun serbest kalması ile oluşur. Silisyum atomunun sadece 4 tane bağ yapma şansı vardır bu nedenle Fosfor'dan gelen 5. değerlik elektronu açıkta kalmaktadır. Bu elektronun bağlanma enerjisi ortamın dielektrik özelliğinden dolayı çok küçüktür ve oda sıcaklığında fosfor atomundan yeterli enerji alıp ayrılarak silisyumun iletkenlik bandına çıkar. Fosfor atomunda olduğu gibi, katıldığı kristal yapıya elektron veren safsızlık atomlarına donör denir. Bu nedenle iletim bandına daha fazla elektron eklenir ve dolayısıyla mevcut elektron sayısı artar. N tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır. Bu durumda azınlık taşıyıcılar boşluklardır.

P-tipi yarıiletken malzemeler, Şekil 9b'de gösterildiği gibi 4 değerlik elektrona sahip olan silisyum elementi ile 3 değerlik elektrona sahip olan Bor atomları arasında kurulan kovalent bağ sayesinde oluşur. Silisyumda 4 adet değerlik elektron bulunduğu için Bor atomunun 3 değerlik elektronu ile bağ yaptığında silisyuma ait değerlik elektronlardan biri açıkta kalmaktadır. Böylece bir eksik bağ oluşur. Valans bandından bir elektron yeterli termal enerjiyle dördüncü bağ yapımında kullanılır ve valans bandı içerisinde bir serbest boşluk oluşur. Bu şekilde katkılanmış yarıiletkenlerde değerlik bandındaki boşlukların sayısı iletkenlik bandındaki serbest elektron sayısından daha çok olduğundan, p-tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır. Azınlık taşıyıcılar ise elektronlardır.

Yarıiletkenlerde kusurlar

Gerçek bir kristalde, kafesin periyodik simetrisi kusurlarla kırılabilir. Örgü kusurları, yasak enerji aralığı içinde yeni enerji seviyelerinin oluşumuna sebep olabilmektedir. Nokta kusurları olarak bilinen kristal kusurları, boşluklar veya büyütme esnasında maksatlı yada istemeden yapıya dahil olan yabancı atomlar olabilir. Aygıt imalatı sırasında malzemelerin işlenmesi de nokta kusurlarına neden olabilir. Bazı kusurlar kaçınılmazdır ve bir yarıiletkenin özelliklerinin belirlemede anahtar rol oynamaktadır. Nokta kusurları oluşturan kimyasal kirlilikler kafes içinde veya ikame olarak kafeste mevcut olabilir. Hatalar, boş kafes bölgeleri tarafından da oluşturulabilir. Farklı nokta kusurlarının bir araya geldiği kusur kompleksleri de mevcuttur.

Kusurlar, termodinamik yasalarına uygun olarak meydana gelir. Bu nedenle, bir tür kusurun giderilmesi veya bastırılması, başka bir türün etkilerini artıracaktır. Örneğin, tanecik sınırları ve dislokasyonlar gibi kusurların giderilmesi nokta kusurlarının önemini artırır. Yarıiletkenlerde kusurların varlığı, kusurların doğasına ve malzemenin fiili uygulanmasına bağlı olarak cihazlarda yararlı ya da zararlı olabilir.

Bir kusur seviyesinin derin veya sığ olup olmadığını belirlemek zordur. Genellikle bant kenarına göre enerjisi 0.1 eV'dan büyük olan enerji seviyeleri derin kabul edilir. Bir kusur merkezi, oluşma şekillerine bağlı olarak bir rekombinasyon veya bir yakalama merkezi olabilir. Bir kusur merkezine bağlanmış bir taşıyıcı, izin verilen en yakın enerji bandına termal olarak salınmadan önce karşıt işaretli başka bir taşıyıcıyla birleşirse, bu durumda bu merkez rekombinasyon merkezidir. Bununla birlikte, eğer taşıyıcı, rekombinasyon oluşmadan önce en yakın banda termal uyarım yolu ile kaçabilirse o zaman bu merkez bir yakalama merkezidir. Dolayısıyla, merkezin enerji seviyesi ya valans ya da iletkenlik bantlarından birine yakınsa kusur merkezinden bir taşıyıcının kaçma ihtimali daha yüksektir. Bu, değerlik ya iletim

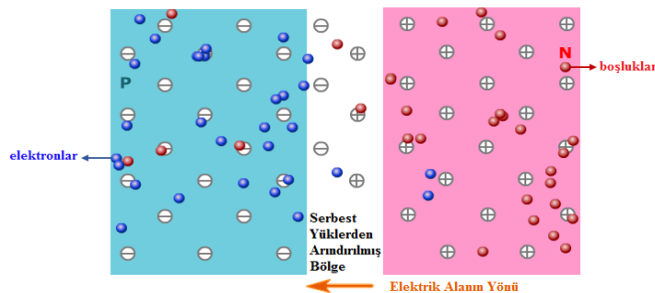
bantlarının yakınındaki bir donör ya da alıcı seviyesinin yakalama merkezi olma ihtimalinin daha yüksek olduğu anlamına gelir.

Solar Hücre Temelleri

Solar hücreler fotovoltaik enerji dönüşümünde ışık enerjisini elektriksel enerjiye dönüştüren aygıtlardır. Yarıiletkenler solar hücre yapımında kullanılır. Enerji dönüşümü foton soğrulmasıyla yarıiletken içinde elektron boşluk çiftlerinin üretilmesini ve yük taşıyıcıların ayrılmasını içerir. Yük taşıyıcıların birbirinden ayrılması için yarıiletkenlerin bant yapısından faydalanılarak oluşturulan p-n eklem gerekir.

P-n eklem

P-n eklemleri fotovoltaik aygıt yapısında yaygın olarak kullanılmaktadır. N tipi malzeme ve p tipi malzeme bir araya geldiğinde, Şekil 10’da görüldüğü gibi n tipinde bulunan çoğunluk taşıyıcılar olan elektronlar p-tipi yarıiletkene doğru geçerken p-tipi malzeme içerisinde bulunan çoğunluk taşıyıcılar olan boşluklar da n tipi yarıiletkene doğru geçerler. N tipi yarıiletken içerisindeki elektronlar p-tipi yarıiletken içerisine geçtiğinde yerlerinde pozitif (+) iyonlar kalmaktadır. Aynı şekilde p-tipi yarıiletken içerisindeki boşluklar n tipi yarıiletken tarafına geçtiğinde yerlerinde negatif (-) iyonlar kalmaktadır. Geride kalan bu pozitif ve negatif iyonların oluşturduğu $+Q$ ve $-Q$ yükleri eklem bölgesinde elektrik alanı oluşturur. Bu elektrik alan iki tarafta birbirine doğru oluşan doğal akım sıfırlanana kadar artar ve denge değerine ulaşır. Denge haline geldiğinde her iki taraftaki yük akışı duracak ve oluşan elektrik alan eklemden bir potansiyel fark oluşturacaktır. Bu alanın büyüklüğü de kullanılan malzeme ile alakalıdır. Bu alana “geçiş bölgesi” ya da “serbest yüklerden arındırılmış bölge” denir. Yüklerin oluşumundan tekrar birleşmesine yani rekombinasyona kadar geçen süreye yaşam süresi denilmektedir. Yaşam süresi parametresi solar hücre verimi açısından anahtar bir faktördür. Bu nedenle yaşam süresini iyileştirmek için pn eklem yapısı önemli bir rol oynamaktadır. Eklem içerisinde oluşan elektron boşluk çiftlerinin eklemin dışına çıkmaması için pasivasyon yöntemi kullanılmaktadır.

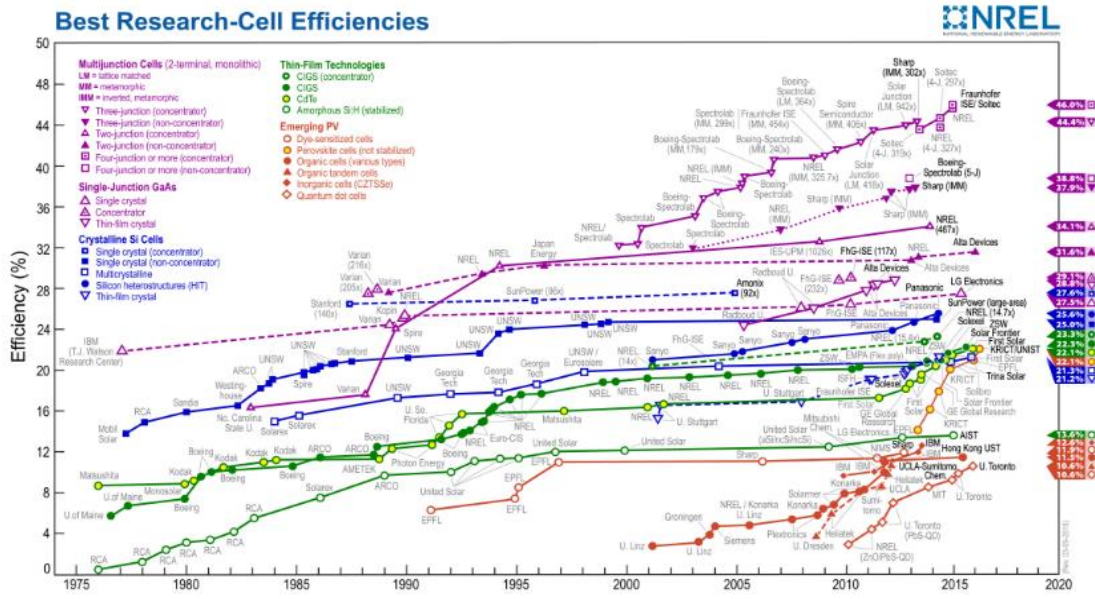


Şekil 10. n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemelerin p-n eklem yapısı

P-n eklem diyotları, sadece solar hücrelerin değil, aynı zamanda LED'ler, lazerler, fotodiyotlar gibi birçok elektronik cihazın temelini oluşturmaktadır. Bir p-n ekleminde rekombinasyon, tekrardan oluşum, difüzyon ve sürüklenme akımı aynı anda mevcuttur. Denge durumunda hem elektronlar hem de boşluklar için net akım sıfırdır çünkü difüzyon akımı ve sürüklenme akımı birbirine ters yönde ve eşittir.

Solar hücre çeşitlerine ve yıllara göre verimin değişimi

Solar hücre tasarımı yapılırken bazı prensipler göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 11'de NREL tarafından yayınlanmış olan en güncel solar hücre veriminde ulaşılan verimin yıllara göre iyileşmesi görülmektedir.



Şekil 11. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının en iyi hücre verimliliği sonuçları grafiği (NREL 2015)

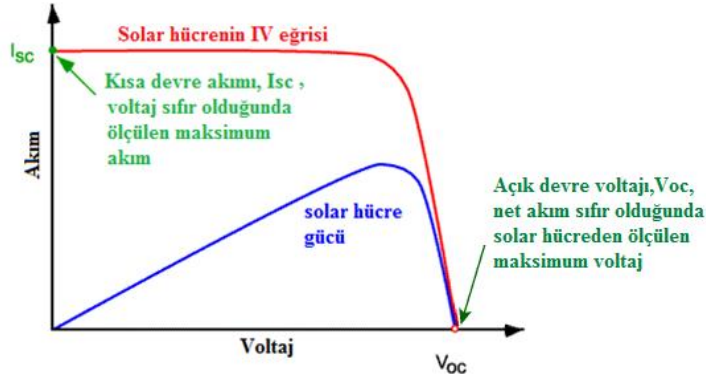
Fotovoltaik dönüşümün teorik verimi % 86.8'i aşmaktadır (Honsberg et al. 2001). Ancak uygulamada bir güneş ışığı altında solar hücrenin verimliliği yaklaşık %29'dur. AM1.5G altında ölçülen maksimum verim %24.7 seviyesindedir (Swanson 2005).

Tek eklemliler solar hücreleri tasarlarken verimi artırmak için dikkat edilmesi gereken faktörler şunlardır:

- Hücre tarafından toplanan ışık miktarının artırılması.
- p-n eklem vasıtasıyla ışıktan üretilen taşıyıcıların toplanmasının artırılması.
- İleri beslem karanlık akımını minimum düzeyde tutulması (front bias dark current).
- Seri direnç kayıpları olmadan hücreden akım çekilmesi.

Kısa devre akımı (ISC)

Kısa devre akımı (short-circuit current, I_{sc}): Eklemin iki ucu arasındaki yük direnci sıfır iken yani solar hücre boyunca gerilim sıfır olduğunda solar hücrenin içinden geçen akımdır. İdeal koşullarda bu değer, optik soğurma ile oluşturulan akım değerine eşittir. Kısa devre akımı, genellikle I_{sc} olarak yazılmış olan kısa devre akımı Şekil 12’de verilen I-V eğrisinde gösterilmiştir.



Şekil 12. Solar Hücreye ait I-V eğrisinde I_{sc} ve V_{oc} gösterimi

Direnç kayıp mekanizmaları ayarlanabilen ideal solar hücre için kısa devre akımı ve ışıktan üretilen akım özdeşdir. Bu nedenle kısa devre akımı solar hücreden çekilebilecek maksimum akımı ifade eder.

Kısa devre akımı şu faktörlere bağlıdır;

- Solar hücrenin alanına,
- Foton yoğunluğuna,
- Solar hücrenin optik özelliklerine (soğurma ve yansıma),
- Solar hücrenin foton toplayabilme kapasitesine; özellikle en üst yüzeyde ve tabandaki azınlık taşıyıcı yaşam süresine bağlıdır (Honsberg and Bowden 2017).

Deneysel ARGE çalışmalarında karşılaştırılabilir ölçümler için solar spektrum, AM1.5G’de standartize edilmiştir.

Aynı türden solar hücreler karşılaştırıldığında en önemli parametre difüzyon uzunluğu ve yüzey pasivasyonunun varlığıdır. Yüzeyi pasive edilmiş solar hücrede kısa devre akımı formülü şu şekildedir;

$$I_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (1.8)$$

Burada G , üretim oranını belirtmektedir. L_n ve L_p sırasıyla elektron ve boşluk difüzyon uzunluğudur.

Açık devre gerilimi (V_{OC})

Açık devre gerilimi, V_{OC} bir solar hücreden elde edilebilen maksimum gerilimdir ve bu, sıfır akımda gerçekleşir. Açık devre gerilimi, karanlık akım yoğunluğunun ışıktan üretilen akım yoğunluğunu kompanze ettiğinde hücredeki ileri beslem gerilimine karşılık gelir. Açık devre gerilimi Şekil 12’de verilen I-V eğrisinde gösterilmektedir.

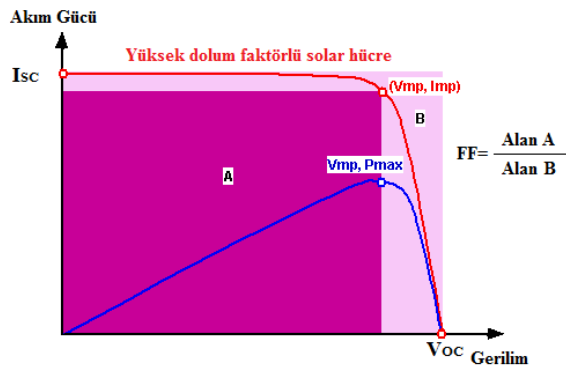
Net akım sıfır olduğunda V_{OC} eşitliği;

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.9)$$

ile verilir. Bu denklem solar hücrenin doyma akımına (I_0) ve ışıktan üretilen akıma (I_L) bağlı olduğunu göstermektedir. I_{SC} küçük bir varyasyona sahip olsa da ana etki satürasyon akımıdır. Doyma akımı I_0 , solar hücrede rekombinasyona bağlıdır. Açık devre gerilimi solar hücrede rekombinasyonun miktarının bir ölçüsüdür. Yüksek kalitede tek kristal silisyum olan solar hücreler güneş ışığı ve AM1.5 koşulları altında 764mV’ye kadar açık devre gerilimlerine sahipken, multi-kristal silisyum malzeme ile yapılmış ticari aygıtlar 600mV civarında açık devre gerilimine sahiptir (Augusto et al. 2017).

Dolum faktörü (FF)

Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi sırasıyla bir solar hücreden gelen maksimum akım ve gerilimdir. Bununla birlikte bu iki çalışma noktasında da hücreden ölçülen güç sıfırdır. ”FF” kısaltmasıyla bilinen “dolum faktörü” solar hücreden V_{OC} ve I_{SC} ile bağlantılı olarak solar hücreden alınabilecek maksimum gücü belirleyen bir parametredir. FF, solar hücreden gelen gücün, V_{OC} ve I_{SC} ’nin çarpımına oranı olarak bilinmektedir.



Şekil 13. I-V eğrisi üzerinden dolum faktörü hesaplanması

Şekil 13’te de görüldüğü gibi dolum faktörü aydınlatma altındaki akım-gerilim eğrisinde, gerilimlerin artı, akımların eksi olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ ’ye oranı olarak tanımlanır.

$$FF = \frac{(V_{mp} \times I_{mp})}{(V_{OC} \times I_{SC})} \quad (1.10)$$

Solar hücrenin çıkış gücü, $P_{\text{çıkış}}$, bu değişkenler cinsinden,

$$P_{\text{çıkış}} = V_{mp} \times I_{mp} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF \quad (1.11)$$

şeklinde verilebilir.

Solar hücre verimi

Verim solar hücreleri kıyaslamakta kullanılan en önemli parametredir. Verim, solar hücreden alınan enerjinin, solar hücreye gelen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Solar hücre veriminin solar hücre performansı hakkında en önemli parametre oluşunun yanı sıra, gelen ışığın yoğunluğuna, spektrumuna ve solar hücrenin sıcaklığına da bağlıdır. Bu nedenle kıyaslanmak istenen solar hücrelerin performansı ölçülürken bu parametrelerin ayarlanmasına dikkat edilmelidir. AM1.5 ve 25°C değerleri standart olarak alınıp solar hücre verimi ölçümleri bu parametreler ile yapılmaktadır.

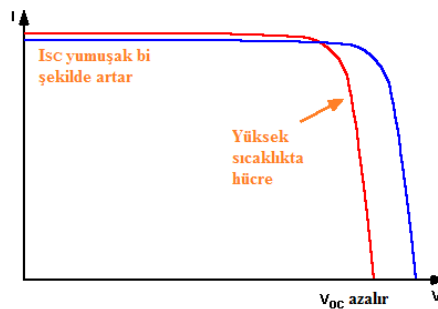
Solar hücre için verim eşitliği denklem 1.13'te gösterilen şekilde, hücreye gelen ışıma gücünün (P_{in}), hücreden çıkan güce (P_{max}) oranı olarak tanımlanır. Denklem 1.12'de verilen P_{max} , açık devre gerilimi, kısa devre gerilimi ve dolum faktörünün çarpımı şeklindedir.

$$P_{max} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF \quad (1.12)$$

$$N = \frac{V_{OC} \times I_{SC} \times FF}{P_{in}} \quad (1.13)$$

Sıcaklık

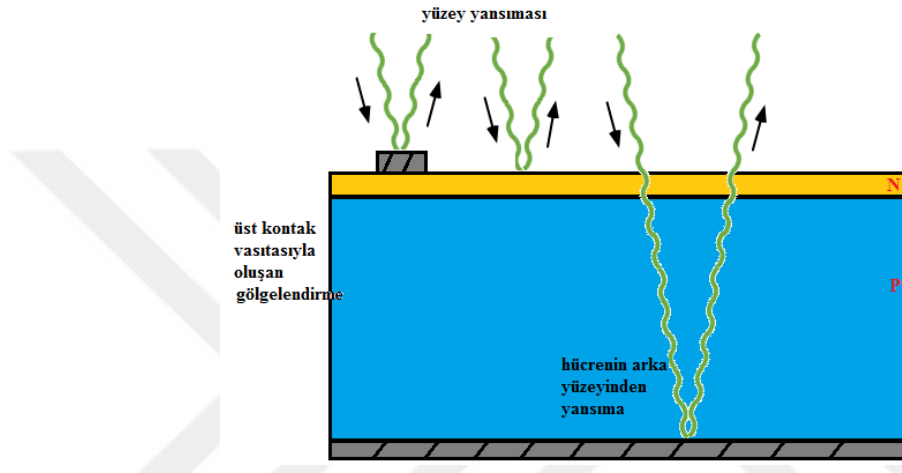
Diğer tüm yarıiletken cihazlarda olduğu gibi, solar hücreler de sıcaklığa karşı hassastır. Sıcaklık artışı bir yarıiletkende bant aralığını azaltır. Böylece diğer tüm parametreleri de etkiler. Sıcaklık artınca malzeme içindeki elektronların sayısı artar. Bir solar hücrede artan sıcaklıktan en çok etkilenen parametre V_{OC} 'dir. Artan sıcaklığın etkisi Şekil 14'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 14. I-V karakteristiği üzerinde sıcaklığın etkisi

Optik Kayıplar

Optik kayıplar, genel olarak kısa devre akımını düşürerek solar hücreden dışarıya transfer edilen gücü azaltır. Bir solar hücreye gelen ışığın ön yüzeyden yansması ya da ışığın solar hücre tarafından emilmemesi nedeniyle solar hücre içerisinde elektron-boşluk çifti oluşmaması optik kayıpları meydana getirir. Yarıiletken solar hücrelerde görünür spektrumun tamamı elektron-boşluk çiftleri oluşturmak için yeterli enerji dağılımına sahip değildir. Bu nedenle görünür ışık spektrumunun E_g 'den büyük enerjili fotonların tümü ideal şartlar altında emilebilir. Şekil 15'te solar hücredeki optik kayıpların kaynakları gösterilmiştir.



Şekil 15. Solar hücredeki optik kayıpların kaynakları

Bir hücrede optik kayıpları azaltmanın birkaç yolu vardır;

- Hücre yüzeyinin üst kontak alanı en aza indirilebilir (fakat bu işlem seri direncin artmasına neden olabilir),
- Üst yüzeyde yansımaya önleyici kaplama yapılabilir,
- Yüzey yapılandırması ile yansımalar azaltılabilir,
- Solar hücre emilimini arttırmak için daha kalın hale getirilebilir (Eklemden bir difüzyon uzunluğundan daha fazla emilen ışık düşük bir toplama olasılığına sahiptir),
- Solar hücre optik yol uzunluğu, yüzey yapılandırması ve ışık yakalama kombinasyonu ile arttırılabilir. Solar hücrede optik kayıpları önleme metodları “Materyal Yöntem” bölümünde anlatılacaktır.

KAYNAK ÖZETLERİ

Crotty *et al.* (1987), çalışmasında, solar hücre ön yüzey pasivasyonunda TiO_x/Al_2O_3 kaplaması ile yüzeyden geri yansımayı azaltan (Anti Reflection, AR) kaplama kullanılarak yeni bir metod tanımlanmıştır. Bu metod kullanılarak $800^\circ C$ 'de termal SiO_2 tabaka büyütme ile V_{OC} 'deki gelişim görülmektedir. Bununla birlikte son zamanlarda daha yüksek sıcaklıklardaki oksit büyütme yüzey pasivasyonunda daha iyi olduğu düşüncesi tartışılmaktadır. Hidrojen ortamında bir AR kaplama yapılmasının ve sonradan sinterlenmesinin silisyum solar hücreleri pasive ettiği gösterilmiştir. Bir TiO_x / Al_2O_3 AR kaplaması yapılmış SiO_2 pasivasyon tabakası içeren ve içermeyen hücreler, hidrojen ortamında 5 dakika süreyle $400^\circ C$ 'de ısıtılma işleminden sonra kısa dalga boyundaki spektral yanıtta ve açık devre geriliminde iyileşme görülmüştür. SiO_2 içermeyen hücrelerin açık devre gerilimindeki gelişme, işlem sırasında AR kaplaması ile ön yüzey pasivasyonuna katkı sağlamıştır. Bu çalışma bize, yansıma önleyici katmanın pasivasyondaki etkisi ve sinterlemede uygun sıcaklıklar konusunda bilgi vermektedir.

Richards *et al.* (2000), çalışmasında, öncelikle, uzun süren yüksek sıcaklık işlemlerinden sonra TiO_2 'de kirliliklerin olmadığı gösterilmiştir. İkincisi, TiO_2 'nin depozisyonundan sonra kısa süren bir oksidasyon yapılarak TiO_2/Si arayüzeyinde ince bir SiO_2 pasivasyon tabakası büyütülebilmektedir. Bu metodla geliştirilen yüzey pasivasyonunda emiter karanlık doyma akımı azaltılmıştır (TiO_2 kaplamasından sonra $4.1 \times 10^{-12} A/cm^2$, $800^\circ C$ 'de 10 dakika oksidasyonun ardından $4.5 \times 10^{-14} A/cm^2$). Üçüncü olarak, %1'i fosfor katkılı TiO_2 filmler emiter yüzey katkılama bir kaynak olarak araştırılmıştır. İlk sonuçlar ışık difüzyonlarının mümkün olduğunu göstermiştir. Son olarak, TiO_2 'nin bir fosfor difüzyon bariyeri olarak uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışma, TiO_2 'nin sahip olduğu optiksel özellikler sayesinde solar hücrede pasivasyona katkıları konusunda ışık tutmuştur.

Aberle (2000), çalışmasında, yüzey rekombinasyon oranının yüzey seviye yoğunluğunun ya da yüzey elektron ve boşluk konsantrasyonunun azaltılmasıyla minimize edildiği ortaya konmuştur. Dielektrik film ile kaplanmış silisyum yüzeyinde -elektrik yüklenmesinden ya da kapı voltajından kaynaklanan- alan etkili pasivasyon yöntemiyle veya silisyum yüzeyde katkılama yapma yöntemi ile yüzey rekombinasyonu azaltılmıştır. O günün teknolojisinin %20'yi aşan verimlerde solar hücre üretilebildiğini ortaya koymuştur. Düşük maliyette yüksek hızlı üretim amaçlandığı için düşük sıcaklık işlemlerinin popüler olmaya başladığını dile getirmiştir. Düşük maliyetli ve aynı zamanda yüksek kaliteli malzemeler

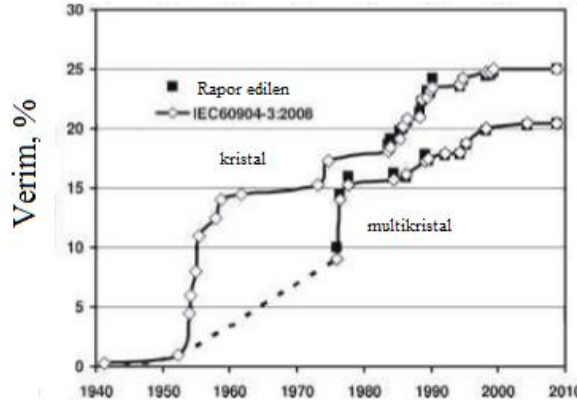
(multikristal Si , şerit Si ya da ince film polikristal Si gibi) tanıtılmıştır. P-n eklem fabrikasyonu ve sonrasında elde edilen silisyum yüzeyinin plazma silisyum nitrür ile pasive edilmesi ve bunun yanı sıra yüzey rekombinasyonunun ve yansıma kayıplarının azaltması, buna ek olarak kusurların pasivasyonunun çok verimli bir şekilde sağlanması için en umut verici pasivasyon metodları tanımlanmıştır.

Dittrich *et al.* (2004) çalışmasında, TiO₂'nin ultra-ince Al-oksit tabakaları ile sol-jel pasivasyonu araştırılmıştır. Araştırmada tranzient ve spektral fotovoltaiik (PV) teknikler kullanılmıştır. Ultra ince Al-oksit tabakaları, iyon-tabaka gaz reaksiyonu (ILGAR) tekniği ile hazırlanmıştır. Hava, vakum veya Ar / H₂S atmosferinde hazırlanan numunelere ısı işlemleri uygulanmıştır. Numunelerin karakterizasyonları, Elastik Geri Tepme Algılama Analizi (Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA), X Işını Fotoelektron Spektroskopisi (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) ve Temas Potansiyel Farkı (Contact Potential Difference, CPD) teknikleri ile yapılmıştır. Bir Al-oksit yüzey tabakası olmadığı durumda, vakum ve Ar/H₂S atmosferinde termal işlemler sırasında TiO₂'nin yasak bant aralığında elektronik seviyeler oluştuğu gözlenmiştir. Tuzak yoğunluğu, TiO₂/Al-oksit arayüzünde oldukça azalmıştır. Ara yüzey kusurların oluşumu, ultra-ince Al-oksit tabaka sayesinde engellenmiştir. Bu çalışmada bir dielektrik tabaka ile yapılan pasivasyonun kusurlar üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Diebold (2003) çalışmasında, titanyum dioksit, metal oksit yüzey bilimlerinde en çok araştırılan tek kristalli sistem olup, rutil (110), (100), (001) ve anataz yüzeyleri literatürü gözden geçirilmiştir. Teorik olarak öngörülen ve deneysel olarak belirlenen yüzey geometrilerinin relaksasyonları karşılaştırılmış ve taramalı tünel mikroskopisinde (STM) görsel kontrastın yanı sıra kusurlar (basamağın kenar yönelimleri, nokta ve çizgi kusurları, kirlilikler, kristalografik makaslama düzlemlerinin yüzey görünüşleri-CSPlar) tartışılmıştır. Sonuçta, titanyum dioksitin yüzey bilimi açısından önemli bir malzeme olduğu anlaşılmıştır.

Gad *et al.* (2016) çalışmasında, difüze edilmemiş 10Ωcm olan p-tipi kristal silisyum üzerine 1,5nm kalınlığında TiO₂ ile yüzey rekombinasyon hızının 14cm/s olduğu gösterilmiştir. TiO₂ tek tabakalar oksitlant olarak su ve öncüler ise Ti olmak üzere terakis dimetil amido titanyum kullanılarak 150°C ve 200°C’de termal atomik tabaka biriktirme yardımıyla oluşturulmuştur. Farklı sıcaklıklarda gaz oluşumuyla “post-depozisyon” tavlamanın etkileri araştırılmıştır. 350°C’deki FGA (Forming Gas Annealing) ile yapılan tavlamanın TiO₂ kalınlığı arttığında yüzey pasivasyon kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. 1,6nm olan arayüzey TiO₂ tabakasının kalınlığı hızlı termal oksidasyon altında 5,5nm ile 15nm arasında TiO₂ tabaka kalınlığının yüzey pasivasyonu sağlamıştır. Bu sonuçlar, 1,5nm kalınlığında olan ultra ince TiO₂ tabakaların, verimli bir c-Si yüzey pasivasyonu için kullanılabildiğini gösterilmiştir.

Green (2009) çalışmasında, 1941'de rapor edilen ilk silisyum solar hücrenin bir dönüm noktası olarak kabul edilen “%25” değerinden yalnızca %1 daha az enerji dönüşüm verimine sahip olduğu bildirilmiştir. Son ölçümler, 1983'de doğrulanmış sonuçlar ile arasında %57' lik bir iyileşme olduğunu göstermektedir. En son performans artışını sağlayan hücre yapısının özellikleri açıklanmış, kristal ve çok kristalli silisyum hücre verimindeki gelişmeler Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Kristal ve çok kristalli silisyum solar hücrelerin veriminin yıllara göre gelişimi

Richards *et al.* (2002) çalışmasında, ışık difüze edilmiş n tipi solar hücre emiterlerinin TiO_2 ince filmler kullanılarak ve bir fırın oksidasyon işlemi uygulanarak iyi bir yüzey pasivasyonu sağlanmıştır. Geçici PCD, XPS ve Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) ölçümleri ile TiO_2/Si arayüzeyinde oluşmuş olan SiO_2 alt tabakanın mükemmel yüzey pasivasyonu sağladığı görülmüştür. Bu metod ile emiter karanlık satürasyon akımının değeri $4,7 \times 10^{-14} \text{ A/cm}^2$ olarak ölçülmüştür. TiO_2 filmlerin yüksek verimli solar hücre yapıları ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

SEM ve XPS ölçümlerinde TiO_2 filmin altlık üzerinde yığılmasından sonra oksitlenen tabakanın oluşturduğu SiO_2 ince film tabakasının varlığı gösterilmiştir. SiO_2 ile yüzey pasivasyonunda bir artış sağlanmış ve J_{0e} akımı $\sim 2 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ ve TiO_2 depozisyonu ile $4,7-7,7 \times 10^{-14} \text{ A/cm}^2$ azalmıştır. Bu sonuçlar $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ yansıma önleyici kaplamanın mükemmel yüzey pasivasyonu sağladığı görülmüştür. Düşük J_{0e} ve yüksek $\tau_{kölçe}$ değeri 700mV değerindeki açık devre gerilimi ile solar hücrenin veriminin uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Schmidt *et al.* (2012) çalışmasında, Alüminyum oksidin (Al_2O_3) c-Si üzerindeki yüzey pasivasyon özellikleri, geleneksel silisyum nitrür pasivasyon sistemi (SiN_x) ile karşılaştırılmıştır. SiN_x üzerine Al_2O_3 ile kaplandığında, n tipi silisyum solar hücrelerin p^+ emiterinde olduğu kadar p tipi silisyum solar hücrelerin arkasında da, Al_2O_3 'ün sahip olduğu avantajlar gösterilmiştir. Al_2O_3 'ün, p-tipi silisyum solar hücrelerinin arka yüzeyine uygulandığında SiN_x üzerinde olduğu kadar n-tipi silisyum solar hücrelerin p^+ yayıcısı üzerinde

de avantajları olduğu gösterilmiştir. Al_2O_3 'ün endüstriyel solar hücre üretiminde kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada ayrıca uygun üç farklı biriktirme tekniğini, yani Atomik Katman Biriktirme (Atomic Layer Deposition, ALD), Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (Plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) ve saçırma yöntemleri değerlendirilmiştir. Piyasada birçok alanda kullanmak için PECVD sistemi, Al_2O_3 için tercih edilen kısa sürede biriktirme tekniklerinden en ideali olarak düşünülmüştür. Ayrıca ALD tekniği için de geliştirilmesi gereken özellikler sunulmuştur.

Geng *et al.* (2014) çalışmasında, Si solar hücrelerin verimini azaltan rekombinasyon kayıplarını azaltmak için ince yalıtkan katman kullanılarak yüzey pasivasyonu yapılmıştır. Burada gelişmiş bir pasivasyon için Al_2O_3 , HfO_2 materyalleri ve bileşiği olan $\text{H}(\text{Hf})\text{A}(\text{Al})\text{O}$ kullanılarak ALD tekniği ile depozite edildi. Hf ve Al oksit filmlerin kimyasal bileşenleri XPS ile belirlenmiştir.

ALD- Al_2O_3 film negatif sabit yük ($-6,4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) sağladığı ve HfO_2 film pozitif yük ($3,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) sağladığı tespit edilmiştir. Etkin yaşam süresinin, 1 dakika oksijen gazı altında tavlama yapıldıktan sonra arttığı görülmüştür. Solar hücrenin I-V karakteristiğinde önemli iyileşmeler görülmüştür. ALD- HfO_2 ALD- Al_2O_3 filmden daha iyi pasivasyon özelliklerini sergilediği görülmüştür.

Solar hücrenin ön ve arka tarafı ALD- HfO_2 ile pasivasyonu sonucu I-V karakteristiği Al_2O_3 ve HAO pasivasyonlarından daha üstün olduğu görülmüş, açık devre gerilimi V_{oc} değeri 0,43'ten 0,59V 'ye artmıştır. Verim ise %5,64'ten %15,54'e kadar artırılmıştır.

El Amrani *et al.* (2015) çalışmasında, çok-kristalli silisyum solar hücrelerin verimli bir şekilde pasivasyonunun gerçekleştirilmesini sağlayan bir PECVD silisyum nitrür (SiN) filminin biriktirme parametreleri araştırılmıştır. $\text{SiH}_4 / \text{NH}_3$ gaz akış hızı oranı, sıcaklık, güç ve kırılma indisi parametreleri incelenen parametrelerdir. Simetrik bir yapı olan SiN/Si/SiN ve Yarı-Kararlı Durumlu Foto İletkenlik (ing- QSSPC) karakterizasyonu ile, sırasıyla 380°C ve 4500 W'nin optimal sıcaklık ve optimum güç olduğunu bulmuşlardır. Ortalama azınlık taşıyıcı yaşam süreleri sırasıyla 10µs ve 11µs'dir. Optimum refraktif indeks, çok kristalli silisyum solar hücreleri üzerine yerleştirilen SiN filmlerinin optik ve elektriksel özelliklerini içeren bir yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Kısa devre akım yoğunluklarının hesaplanmasına dayanan bu yöntem, optimum kırılma indisinin 1.9 olduğunu ortaya koymuştur.

Balaji *et al.* (2015) çalışmasında, solar hücre 4maliyetini azaltmak için, fotovoltaiik c-Si endüstrisinde yüksek bir verime yönelik olarak daha ince tabaka 100µm ila 200µm arası kullanımına yönelenilmiştir. Bu alanda, c-Si arayüzeyindeki elektronik kayıpları azaltmak için verimli bir pasivasyon gereklidir.

Tablo 1. Farklı pasivasyon malzemelerinin pasivasyon etkileri ve endüstriyel uyumlulukları

Pasivasyon Malzemesi	Yükler	H Difüzyonu	ARC Katmanı	Endüstriyel Uyumluluk
Kuru SiO ₂	Nötr	Hayır (FGA İşlemi)	Evet	Hayır, Yüksek Sıcaklıktan Dolayı
SiN _x (N yoğun)	Pozitif Yüklü	Evet, Düşük	Evet	PECVD
SiN _x (Si yoğun)	Pozitif Yüklü	Evet, Yüksek	Zayıf	PECVD
i-a-Si:H	Nötr	Evet, Yüksek	Hayır	PECVD
Al ₂ O ₃	Negatif Yüklü	Hayır	...	Hayır

Tablo 2. c-Si solar hücre yüzey pasivasyon yöntemleri

Solar Hücre Tipleri	Pasivasyon Tabakası (s)	Hücre Verimleri (%)	Referans
PERL/LBSF	Termal SiO ₂	24,7	29-31
p-PERC	Al ₂ O ₃ +SiN _x	21,7	57
n-PERT	Al ₂ O ₃ /SiN _x	20,8	67
EWT	Al ₂ O ₃ /SiN _x	21,6	68
Bifacial	SiN _x	20,4	69
MIS Inversion	SiN _x	18,5	70
HIT	a-Si	24,7	65

Bu çalışmada, Tablo 1’de farklı pasivasyon malzemelerinin pasivasyon etkileri ve endüstriyel uyumlulukları verilmektedir. Tablo 2’de görüldüğü gibi yüksek verimli solar hücreler için mevcut olan en iyi pasivasyon şeması gösterilmektedir.

Bonilla *et al.* (2015) çalışmasında, harici kimyasal ve alan etkili pasivasyonunun Si üzerine yapılan pasivasyonun SiO₂ ile toplam elektriksel pasivasyon kalitesini hangi ölçüde artırabileceğini incelenmiştir. En iyi şekilde uygulandığında, harici pasivasyonunun 1Ωcm n-tipi Si yüzeyinde 1.2cm/s'nin altındaki yüzey rekombinasyon hızları üretebildiğini gösterilmektedir. Bunda, rekombinasyon hızını 2.13cm/s'nin altındaki değerlere kadar azaltan alan etkili pasivasyon bileşeninin eklenmesinin payı büyüktür. Yapılandırılmış yüzeylerde alan etkili pasivasyon karşılaştırılabilir yüzey rekombinasyon hızlarına ulaşılır. Yapılandırılmış yüzeyler alan etkili pasivasyonu karşılaştırılabilir etkiye sahiptir ve alan etkili pasivasyon iyi bir şekilde uygulandığında 32cm/s 'nin altındaki yüzey rekombinasyon hızlarına ulaşılmıştır. Hücre ve arka kontak birbirine kenetlendirildiğinde, pasivasyon harici yalıttan yüklerle optimize edilmiş ve verimde %0.1 bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, harici pasivasyonun, gelecekteki solar hücre üretiminde kullanılan yalıttan kaplamalar için önemli olduğunu göstermektedir.

Ameer (2015) çalışmasında, farklı enerjilere sahip olan kısa darbe lazerleri (600.700.800 ve 900mJ) küçük alan (2x1cm²) Si solar hücre alt tabakası üzerinde (100) yönünde oluşturulmuş ince bir SiO₂ filminde mikro ve nano ölçekli yüzey yapılandırılması elde etmek için kullanılmıştır. Lazerle yapılandırılmış yüzeylerin topoğrafyası FTIR, optik mikroskopi ve AFM gibi çeşitli test cihazlarına bağlı olarak araştırılmıştır. Üretilen solar

hücrelerin elektriksel parametreleri, standart AM 1.5 radyasyon altında aydınlatılan I-V parametrelerinin ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, bu yöntemle yapılandırılmış solar hücre veriminde çok iyi bir gelişme olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, p-n eklem solar hücrenin (c-Si) tabakasının <100> n-bölgesi üzerinde, Nd:YAG ikinci harmonik nanosaniye lazer darbesi SiO₂ ince filminin altındaki silisyum yüzeyini farklılaştırmış ve dolayısıyla bir enerji akışı ile yüzey yapılandırması başarıyla oluşturulmuştur. Oluşan lazer yüzey yapılandırması daha fazla ışığın hücreye girmesine yol açar, bu nedenle güneş hücrelerinin verimliliğini büyük oranda artırır. c-Si solar hücre performansında, sıradan solar hücre (%3.34) ile karşılaştırıldığında en yüksek dönüşüm verimi elde edilmiştir (~%9.6). Dokulu yüzeyin yapısal ve optik özellikleri, optik mikroskopi, AFM ve FTIR ölçümleri gibi farklı doğrulukların çeşitli test teknikleri kullanılarak incelenmiştir.

Bu teknikler, yapılandırılmış yüzeyde nanoyapılar, piramitler ve yüzey pürüzlülüğü meydana getirmiştir. Farklı dalga boyları ve güçleri olan lazerlerin kullanılması süreçteki önemli parametrelerdendir. Diğer lazer enerjilerine kıyasla 900mJ'lık ikinci harmonik 532nm lazer enerjisinin hakimiyeti hücrenin verimini artırmaktadır. Bu, (900mJ) lazer enerjisini uygularken normal silisyum solar hücreler (%3.34) ile karşılaştırıldığında verimlilik artmıştır.

Öztürk (2016) çalışmasında, pasive edilen yayıcı arka kontak güneş hücresi (ing-PERC) kullanılarak lokal arka yüzey alan kontakları ve arka yüzey pasivasyon katmanı oluşturulmuştur. Lazerden açılan delikler sayesinde solar hücredeki elektron ve boşluğun yeniden birleşmesi geciktirilmeye çalışılmıştır. Böylelikle solar hücre yaşam süresini uzatmak hedeflenmiştir. Yüzey pasivasyonu, arka yüzeye dielektrik katman büyütülmesiyle meydana getirilmiştir. Sonuçta %10 arka yüzey kaplama yüzdesinde en yüksek 14,1 verimlilik elde edilmiştir.

Bu çalışmada, yaşam süresi iyileştirmek için pasivasyon işlemi başarılı bir şekilde yapılan solar hücrelere daha önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılmayan iki boyutlu haritalama ile karakterizasyon yapılarak kusurların yerinde incelenmesine olanak tanınmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

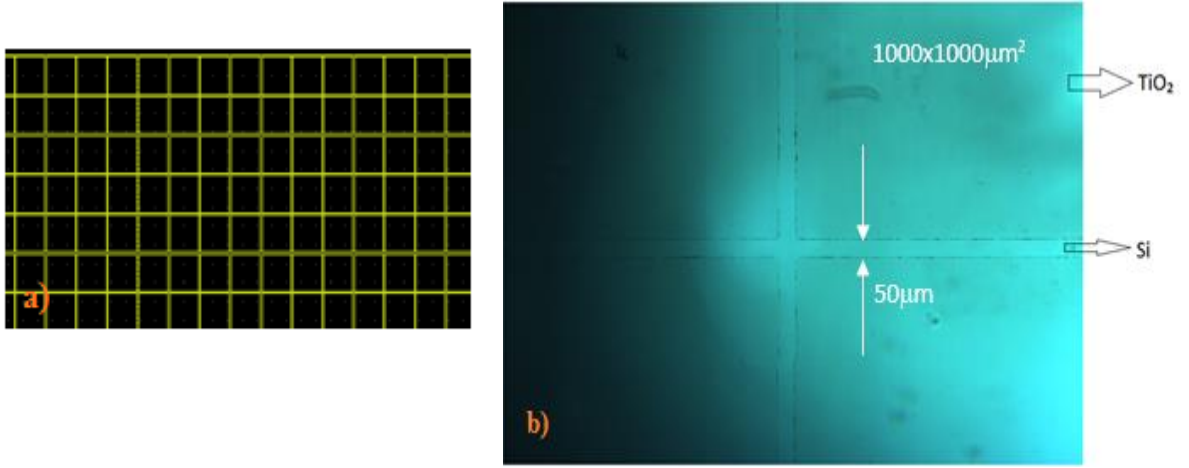
Bu çalışmada emiter yüzeyi yapılandırılmamış $n^+Si/p-Si$ hücresinin pasivasyon öncesi emitter yüzeylerine ön kontak için 0.5mm çapında Al metalizasyonu yapılmıştır. Pasivasyon için organik temizlik sonrası önceden yapılmış arka omik kontağı korumak üzere fotorezistle kaplama yapılarak 50°C’de fırınladı.

Seçilmiş alanlara TiO_2 kaplamanın yapılması için litografi tekniği kullanıldı. Bunun için Şekil 17.a’da gösterilen negatif maske kullanılarak şekilde verilen patern solar hücrenin emiter yüzeyine aktarıldı. Bu işlem için 3200rpm’de 40sn süre ile serilen fotorezist 50°C’de 20dk ve 90°C’de 20sn ısıtma işlemi yapılarak kurutuldu ve maske hizalayıcıda 70sn UV pozlandırma ile görüntü aktarıldı. 60sn film geliştiricide tutulan numune, DI durulama sonrası 90°C’de 20dk pişirme işlemine tabi tutuldu. Sputter sistemine yükleme öncesi numune BF HF(%10) çözeltisinde 30sn tutuldu DI ile durulandı ve kuru azot ile kurutuldu.

Şekil 17.b’de gösterilen patern, numunenin pozlanmış filmin geliştirme sonrası TiO_2 paternin lift-off tekniği ile altlığa aktarılmış halidir. Maske üzerindeki patern numuneye aktarıldıktan sonra saçırma tekniği ile 5×10^{-6} Torr taban vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra altlık üzerine, 30sccm Ar gaz akışı altında $3,64 \times 10^{-3}$ Torr basınçta ve 40°C altlık sıcaklığında 15nm kalınlığında TiO_2 kaplanmıştır. Numune 6 ayrı parçaya ayrılmış ve her bir numuneye ısıtma işlemi uygulanmıştır.

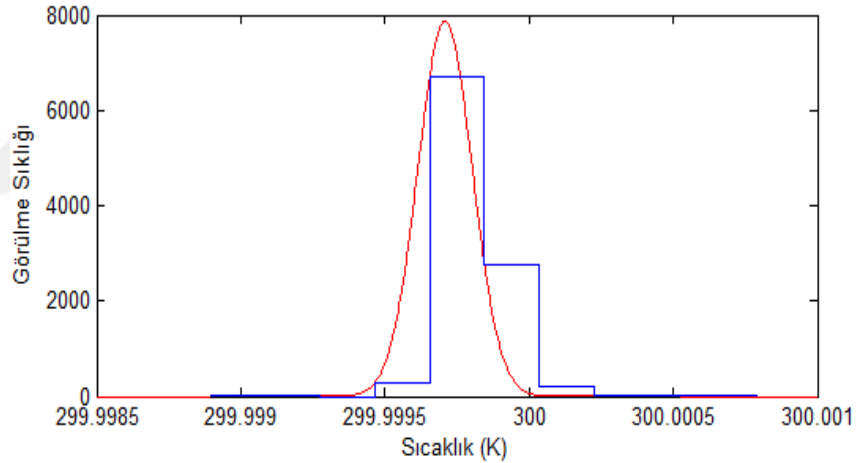
Yapılan bu çalışmada solar hücrenin TiO_2 ile kaplanması ve ısıtma işlemi ile aktivasyonu gerçekleştirilerek yaşam süresinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen solar hücrelerde iki boyutta haritalama yapılarak olası dağılım ve yüzeye ait etkin yaşam süresi dağılımları elde edilmiştir.

Pasivasyon işlemi tamamlanan numunelerden ısıtma işlemi uygulanmayan numune referans numune olarak ölçümlerde kullanıldı. Diğer numuneler ise sırasıyla 200, 300, 400, 500 ve 550°C sıcaklıkları altında “RTA (Hızlı Isıl Tavlama)” ünitesinde 120sn boyunca Ar gazı akışı altında ısıtma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 17. (a) Patern aktarmada kullanılan negatif maskenin LayOut çizimi. Hücreler $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ olup aralık $50 \mu\text{m}$ olarak tasarlanmıştır. (b) Solar hücre yüzeyinde oluşturulmuş TiO_2 kaplamanın optik görüntüsü

Şekil 17.b’de solar hücrenin emiter yüzeyinde $50 \mu\text{m}$ aralıklarla oluşturulan TiO_2 filmler görülmektedir. Emiter yüzeyinden elektriksel bağlantı bu yüzeyde oluşturulan ve $50 \mu\text{m}$ genişliğindeki açık alanları kısmen kaplayan Al metalizasyon ile sağlanmıştır.



Şekil 18. 400°C ’de 2D haritalama süresince eş zamanlı ölçülen numune sıcaklığındaki değişim. Değişimin 1mK altında sistemin ölçüm sınırlarında da olması numune sıcaklığının kararlı olduğunu göstermektedir.

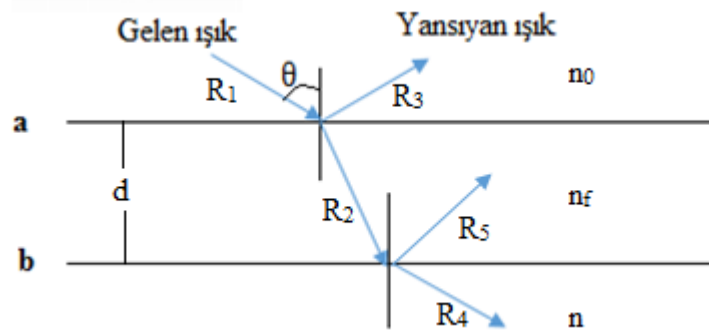
Sıcaklığı 300K ’e set edilmiş referans numunenin haritalaması sürecinde sıcaklık değişimi sıcaklık kontrol cihazının 1mK ölçüm sınırlarında olması ve sıcaklık dalgalanmasının bu mertebede kalması sıcaklığa bağlı deneysel hata oranını azaltmaktadır. Bu gözlem uzun süreli ölçüm süresince Şekil 18’de değişim aralığı 0.15mK olarak görülmekle birlikte yaşam süresinin her bir nokta için $\pm 1 \text{mK}$ aralığında ölçüldüğünü söyleyebiliriz.

Bu çalışmada solar hücredeki optiksel kayıpları önlemek adına kullanılan yöntemler, bunlara ait kavramlar ve solar hücre ölçüm mekanizmasına değinilecektir.

Solar Hücrede Optiksel Kayıpları Önleme Metodları

Yansıma önleyici kaplama

Bir silisyum solar hücre ,% 30'un üzerinde bir oranda yüzey yansımasına sahiptir. Yüzey yapılandırma ve yüzeye yansıma önleyici kaplamalar uygulayarak yansıma azaltılır (Bauer 1934).



Şekil 19. AR-kaplamanın temel prensibi

Solar hücrede yansımayı azaltmak için yapılan ARC katmanının kalınlığı Şekil 19'da de görüldüğü gibi "d" harfi ile gösterilir ve denklem 3.1'de verilen şekilde hesaplanır;

$$d = \frac{\lambda}{(4n_f)} \quad (3.1)$$

$$n_f = \sqrt{(n_0 + n)} \quad (3.2)$$

Denklem 3.1'de n_f , kaplanan malzemenin refraktif indeksini; λ ışığın dalga boyunu vermektedir. Denklem 3.2'de n_0 , havanın; n , üzeri kaplanacak olan tabakanın refraktif indeksidir ve Şekil 19'da verilen R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 ışığın izlediği yolları belirtmektedir (Thosar et al. 2014).

Anti-yansıtıcı kaplamalarda silisyum solar hücre yüzeyine tek tabaka ya da çift tabaka kaplama yapılabilir. Anti-yansıtıcı kaplamalar yapılırken depozite işlemi için çeşitli teknikler kullanılabilir: kimyasal buhar depolanması (CVD), sprey, döndürme (spin-on) veya ekran baskılama tekniği. Döndürme tekniği, çok verimli ve pahalı ekipmana ihtiyaç duymayan en basit tekniktir (Swatowska et al. 2011). Ancak bu yöntem sadece pürüzsüz, parlatılmış yüzeylerde kullanılabilir.

Yüzey yapılandırması

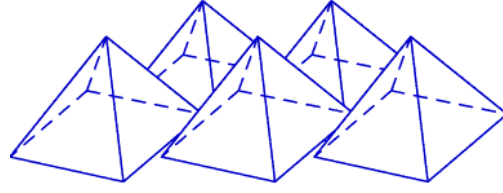
Güneş ışınlarının yansımasından kaynaklanan optik kayıplar, solar hücrelerin verimlerini sınırlayan en önemli faktörlerden biri olduğundan, yansımayı azaltmak için tekstüre edilmiş yani yapılandırılmış bir ön yüzeye ihtiyaç duyarlar. Yüzeyin "pürüzlendirilmesi",

yansıtılan ışığın havaya gitme değil de yüzeye geri dönme şansını arttırarak yansımayı azaltır (Dixit 1977). Yapılandırma yansımayı ve ışık yakalamayı etkilediğinden solar hücre verimi için önemli bir faktördür. Yüksek kalitede tekstüre edilen yüzey ince tabakalar ile verim artışı sağlanır. Böylelikle solar hücre maliyeti düşer (Vineis et al. 2013). Ayrıca kuantum verimliliği solar hücrenin enerji üretebilmesi için toplaması gereken fotonların sayısının oranıdır. Dalga boyunun ve enerjinin bir fonksiyonu olarak verilebilir. Belli bir dalga boyundaki tüm fotonlar emilir ve ortaya çıkan azınlık taşıyıcılar toplanır. Enerji içeren fotonların kuantum verimliliği bant aralığının altında sıfırdır. Fotovoltaik verimliliği artırmak için yapılan çalışmalarda solar hücre yüzeyi mesa (piramit) formda yapılandırıldığında yansımada azalma elde edilmiştir. Bunu farklı açılarla piramit formlar oluşturarak sağlamışlardır (Hamel 2016). Mesa yapı yüzeyin absorbe oranını artırır ve böylece yüzeyden daha fazla foton soğurulur (Gordon et al. 2005). Piramit yapı silisyum yongalarda toplam yansımada yaklaşık %25 ila 10 arasında azaltır (850-1000 nm dalga boyunda) (Ximello Quiebras 2013).

Yapılandırılmış numuneler yüzeyde mesa yapı oluşturulan numuneler anlamına gelmektedir. Mesa yapılı hücreler n ve p tabakası arasındaki yükseklik farkından kimyasal aşındırma ve fotolitografi kullanılarak yapılır (Desa et al. 2016). NaOH (sodyum hidroksit) ya da KOH (potasyum hidroksit), su ve izopropil alkol ile birlikte monokristal (100) solar hücrelerin işlenmesinde yüzey tabakasında piramidal aşındırmalar oluşturmak için en yaygın olarak kullanılan alkalın aşındırıcılardır (Carson, 2008). Bu çalışmada, kristal silisyumun tekstüre edilmesi işlemi alkali çözeltiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alkali çözelti olarak KOH kullanılır. Rastgele piramitlerin oluşumu anizotropik aşındırma ile sonuçlanmaktadır. Sonuçta, yüzey yapılandırması, yüzeyin yansımalarını azalır, böylece kısa devre akımını ve güneş pilinin dönüşüm verimliliğini artırır.

Bu piramidal yüzey şekli, alkali çözeltilerin kristalografik yönlendirmeler boyunca silisyumu aşındırması nedeniyle oluşur. Fotolitografi ile monokristal yüzey üzerinde düzenli piramitler üretilir. Nishimoto and Namba, 2000 çalışmalarında, düşük maliyetli bir ıslak aşındırma üretim işlemi geliştirmişler ve düşük maliyetli Na₂CO₃ alkalın solüsyonları ile monokristal silisyum yüzeyin yapılandırıldığını bildirmişlerdir. Gangopadhyay et al., 2006 çalışmasında *Tribazik sodyum fosfat solüsyonu* ile yüzey yapılandırmasında daha az izopropil alkol kullandığı için geleneksel yöntemden üstün olduğunu iddia ederek yeni bir tekstüre yöntemi geliştirdi.

Yüzeydeki piramitler Şekil 20'deki gibi temsil edilebilir;

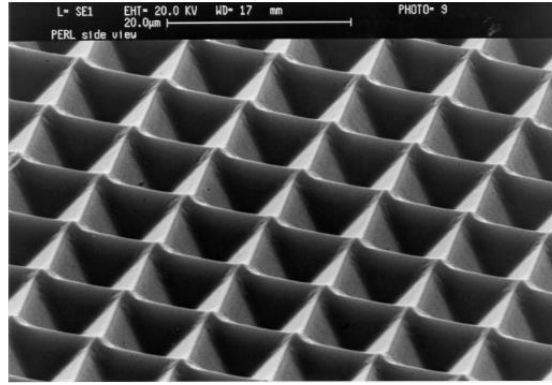


Şekil 20. Yüzeyi yapılandırılmış kristal silisyum yüzeyi karesel tabanlı piramit yapılar temsili (Honsberg and Bowden 2016)

Şekil 20’deki gibi yapılandırılmış yüzeye “rastgele piramitler” denir (Bailey 1979). Ve genellikle tek kristalli yapılarda kullanılır (Honsberg and Bowden 2016).

Diğer yüzey yapılandırma tekniği “tersinir piramitler” yapılandırması olarak adlandırılır.

Bu yapılandırma tekniği, Şekil 21’de SEM görüntüsü verilen aşındırmayı yüzeyden yukarı doğru yapmak yerine aşağı doğru yaparak ters piramitler oluşturma tekniğidir (Campbell and Green 2001).



Şekil 21. New South Wales University- The School of Photovoltaic & Renewable Energy Engineering görüntülerinden alınan yapılandırılmış yüzeye ait SEM görüntüsü

Yapılandırılmış TiO_2 ve pn eklem arasında doyurulmamış bağlar vardır. Yüzey yapılandırılmasının yapılmaması yaşam süresini azaltan bir faktördür. Çünkü yapılandırılmamış yüzeye gelen elektronlar derin seviyeler üzerinden rekombinasyona uğradığında yaşam süresi azalır. Ayrıca mesa yapılar base/emiter arasında pasivasyon sağlar (Hezel et al. 1991). Mesa yapılar, absorban tabakaların kalitesi hakkında bize hızlıca güvenilir bilgi sağlamaktadır. Mesa yapısının önemli bir dezavantajı; kontak noktasına ulaşmak zorunda olan çoğunluk taşıyıcıların mesafenin artmasından kaynaklanan seri direnç artışıdır (Gordon et al. 2005).

Metalizasyon

Metalizasyon, yüksek verimli solar hücre üretiminde en önemli adımlarından biridir. Metalizasyon bir alt tabaka yüzeyinde metal film tabakalarının oluşturulduğu bir işlemdir. Bu

metalik veya alaşımlı film katmanları, omik veya/ve Schottky kontakları olan cihaz elektrotları, IC'deki bağlantılar vb. için kullanılır. Dolayısıyla, cihazların ve devrelerin performansı açısından süreklilik, tekdüzellik ve yüzey özellikleri kritik öneme sahiptir. Bu metalik veya alaşım film katmanları (Al, Cu, Ag, Au, Pt veya TiW, WSi₂ ve diğerleri) çeşitli yöntemler kullanılarak oluşturulabilir.

Bir ara bağlantı hat direnci şu eşitlikle verilmektedir:

$$R = \rho \frac{L}{W \cdot h} = \rho_s \frac{L}{W} \quad (3.3)$$

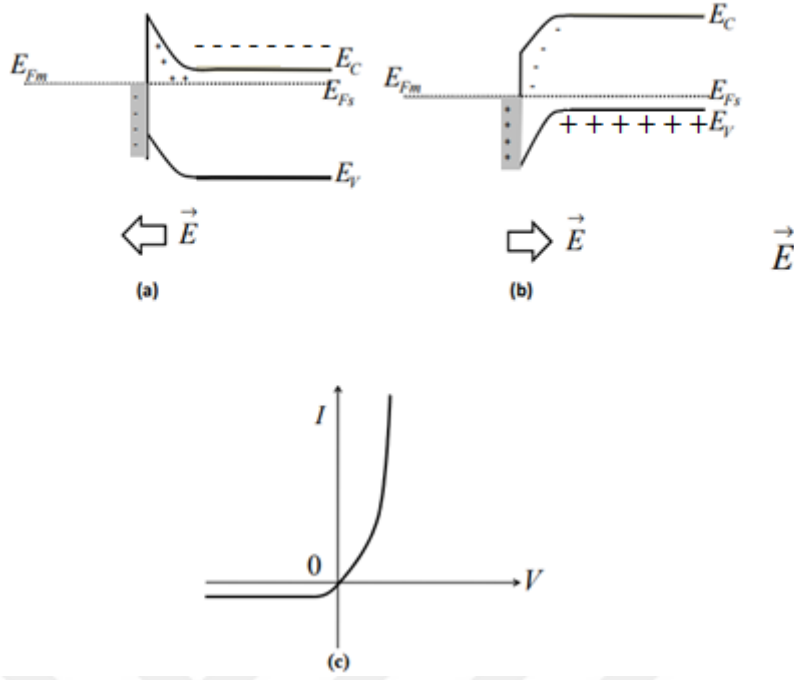
Burada ρ , ara bağlantı iletkeninin iç direncini, W , ara bağlantı genişliğini, L , ara bağlantı uzunluğunu, h , kalınlığını göstermektedir. $\rho_s = \rho/h$ tabaka direnci olup birim alan başına Ω değerini ifade etmektedir.

Schottky ve omik kontak

Kontak yapımı, bir kristal malzeme ve üzerine yapılacak olan kontak malzemesinin aralarındaki direnci en aza indireyecek şekilde temas ettirilmesi işlemidir. Malzeme yüzeyi temizliği ve pürüzsüzlüğü kontak yapımı açısından en önemli parametrelerdir (Brillson and Lu, 2011). Eklem oluşturulduğunda p ve n tipindeki bölgeler Fermi seviyeleri eşitlenene kadar yük akışı devam eder.

Metal ve yarıiletken arasında kurulan kontaklarda elektronun akış yönünü malzemelerin iş fonksiyonları farkı ve malzeme tipi belirler. Şöyleki; Φ_m ve Φ_s sırasıyla metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarını ifade etmektedir. $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda elektronların akış yönü yarıiletkenden metale doğrudur. Yarıiletken n-tipi ise elektronlar çoğunluk taşıyıcı olduğundan metale geçerler ve yükten arındırılmış bölge eklem civarında meydana gelmektedir. Harici beslem uygulanan eklem bir diyot gibi davranır ve genellikle “Schottky kontak” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 22’de Schottky kontağa ait metal ve yarıiletken iş fonksiyonlarına ve malzeme tipine bağlı olarak kontak oluşumu ve I-V karakteristiği verilmektedir.

Metal $\Phi_m > \Phi_s$ Yarıiletken **Metal $\Phi_m < \Phi_s$ Yarıiletken**



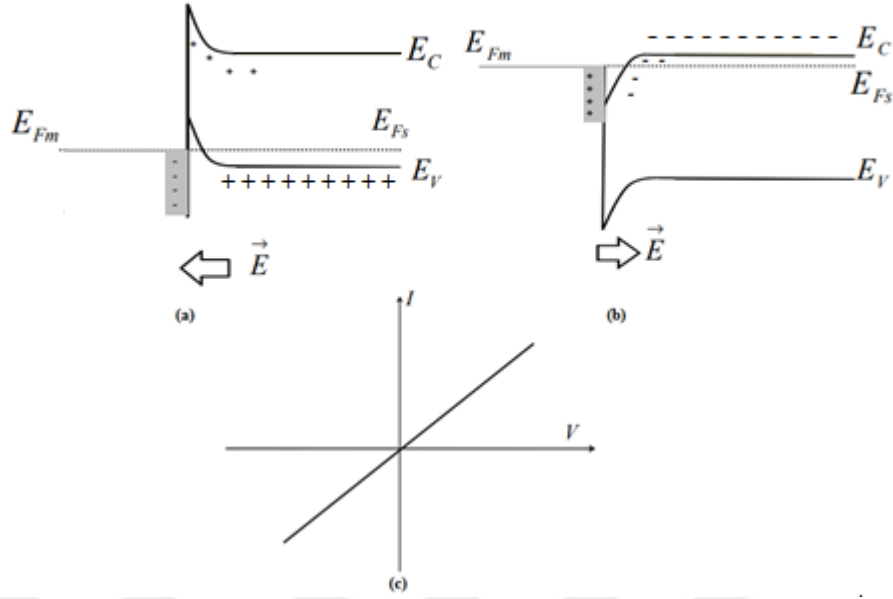
Şekil 22. a) $\Phi_m > \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi p-tipi olduğunda Schottky kontak oluşumu , b) $\Phi_m < \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi n-tipi olduğunda Schottky kontak oluşumu, c) Schottky kontağın I-V karakteristiği Metal $\Phi_m > \Phi_s$ Yarıiletken

Şekil 22.a’da p tipi yarıiletken Schottky kontak oluşumunda, E_c ’nin üzerinde yer alan bölge, serbest elektronları temsil etmektedir. E_v ’nin altında yer alan bölge de boşlukları temsil etmektedir. Şekil 22.b’de E_c ’nin üzerinde yer alan bölge elektronları ; E_v ’nin altında kalan bölge de boşlukları temsil etmektedir.

Yarıiletken p-tipi ise, metal taraftan daha fazla miktarda boşluk (çoğunluk taşıyıcı) ları oluşur. Yükten arındırılmış bölge oluşmaz. Çoğunluk taşıyıcılar ekleme yakın bölgede birikirler. Böylece her iki yönde de akış söz konusudur. Bu yapıya “omik kontak” denilmektedir ve akım/voltaj karakteristiği doğrusaldır.

Metal $\Phi_m > \Phi_s$ Yarıiletken

Metal $\Phi_m < \Phi_s$ Yarıiletken



Şekil 23. a) $\Phi_m > \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi p-tipi olduğunda omik kontak oluşumu , b) $\Phi_m < \Phi_s$ ve yarıiletken malzemesi n-tipi olduğunda omik kontak oluşumu, c) Omik kontakın I-V karakteristiği

Şekil 23’de Omik kontakta ait metal ve yarıiletken iş fonksiyonlarına ve malzeme tipine bağlı olarak kontak oluşumu ve I-V karakteristiği verilmektedir.

Şekil 23a’da p tipi yarıiletken omik kontak oluşumunda, E_C ‘nin üzerinde yer alan bölge, elektronları temsil etmektedir. E_V ’nin altında yer alan bölge de boşlukları temsil etmektedir. Şekil 23.b’de n tipi yarıiletken omik kontak oluşumunda E_C ‘nin üzerinde yer alan bölge elektronları; E_V ’nin altında kalan bölge de boşlukları temsil etmektedir.

Hızlı Termal Tavlama (RTA)

RTA yarıiletken endüstrisinde katkılama aktivasyonu ve metal kontakın arayüz reaksiyonu için kullanılan bir ısıtım işlemidir. Bu sistemlerde numune sıcaklığının 10-30sn içerisinde yaklaşık 1000°C’e sıcaklığa ulaşılması sağlanır. Oda sıcaklığında başlayan işlem yine oda sıcaklığında sonlandırıldığı için fırından kaynaklanacak kirlenmeler minimum seviyede kalır.



Şekil 24. Laboratuvarımızda yer alan RTA ünitesi

İstenilen hızda ısıtılan numune birkaç saniye hedef sıcaklıkta tutulur, öngörülen süre sonunda sıcaklık kontrollü olarak düşürülür. Metal-yarıiletken arayüzey kalitesini artırmak için kullanılır.

Şekil 24’de laboratuvarımızda bulunan ve programlayıcı sayesinde süre ve sıcaklık değerlerinin set edildiği RTA ünitesi gösterilmektedir.

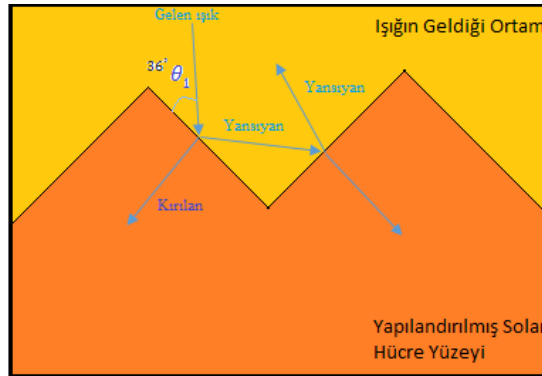
RTA;

- Katkılama seviyelerini kontrol eder.
- Arayüz kalitesini iyileştirir.
- Kusurları onarır.
- Doymamış bağları satüre eder.
- Düşük dirençli omik kontak yapımı sağlar.

Işık Yakalama

Laboratuvar ortamında tandem solar hücreler ışığın neredeyse yarısını (%44) elektriğe çevirirler. Ancak ticari solar hücrelerde bu oran çok daha azdır. Bunu geliştirmenin en iyi yolu solar hücreden yansıyan ve içinden iletilen ışığı en aza indirmektir. Geleneksel yaklaşım, özellikle hücrenin optimum frekanslarındaki yansımaları en aza indirmek üzere optimize edilebilecek bir yansıma önleyici kaplama kullanmaktır. Ancak bu kaplamalar yansımaları önlemeye iyi gelirken, hücreden geçip giden ışığı durduramazlar ve gelecek nesil ince film solar hücreler için bu önemli bir sorundur. Bazı durumlarda, ışığın neredeyse yarısı doğrudan geçer. Dolayısıyla son araştırmalar, gelen ışığı yakalayıp yüzeye sürükleyerek farklı bir yaklaşıma odaklanmıştır. Bu, yansıma ve iletimi önler ve dolayısıyla ince film solar hücrelerin verimliliğini önemli ölçüde artıracak bir potansiyele sahiptir. Şekil 24’de yüzeyi yapılandırılmış bir solar hücreye gelen ışığın yansıma ve kırılma düzlemleri gösterilmiştir.

Optimum aygıt kalınlığı, yalnızca ışığın tamamının emilmesine göre ayarlanmaz; örneğin ışık eklemnin bir difüzyon uzunluğu içerisinde emilemezse ışıktan üretilen taşıyıcılar rekombinasyon ile kaybolurlar. Buna ek olarak daha ince bir solar hücre kalın bir hücreden daha çok ışık emebilir ve verimi de daha yüksek olabilir. Sonuç olarak, optimum bir solar hücrenin optik yol uzunluğu aygıt kalınlığının birkaç katı kadar ışığı yakalayabilecektir. Burada aygıtın optik yol uzunluğu soğurulmamış bir fotonun aygıtın dışına çıkmadan önce alacağı mesafe olarak tanımlanabilir. Bu genellikle cihaz kalınlığı açısından tanımlanır.



Şekil 25. Yüzeyi Yapılandırılmış bir silisyum solar hücrenin yüzeyindeki yansıma ve iletimi

Yaşam Süresi

τ_n veya τ_p ile gösterilen azınlık taşıyıcı ömrü, bir taşıyıcının, yeniden birleşmeden önce elektron-boşluk üretimi sonrasında uyarılmış halde harcayabileceği ortalama zamandır. Malzemenin kararlılığı ile ilişkili değildir. Yapıya bağlı olarak azınlık taşıyıcı yaşam süresi uzun olan tabakalardan üretilen solar hücreler azınlık taşıyıcı yaşam süresi kısa olan tabakalardan üretilen solar hücreye göre daha verimlidir.

Bir yarıiletken yaşam süresi, azınlık taşıyıcılarının konsantrasyonuna bağlı olan rekombinasyon hızına bağlıdır. Yaşam süresi rekombinasyon türlerine bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanır. Yaşam süresi bir solar hücrenin verimliliğinin bir göstergesidir ve bu nedenle solar hücreler için malzeme seçiminde kilit husustur.

Azınlık taşıyıcıların sayısı, geçici harici uyarım ile (örneğin güneş ışığı) denge değerinin üzerine çıkar ancak azınlık taşıyıcıların fazlası rekombinasyon olayı ile taşıyıcı yoğunluğu dengeye gelmektedir.

Solar hücrede rekombinasyon oranı kritik bir parametredir. Rekombinasyon oranı, azınlık taşıyıcıların yoğunluğuna bağlıdır. Örneğin fazla miktarda azınlık taşıyıcısı yoksa rekombinasyon oranı düşük seviyede kalmalıdır. Rekombinasyon hızının bütünleşmiş iki parametresi, yük ömrü ve yük difüzyon uzunluğudur.

Düşük seviyede yük enjekte edilen yarıiletken (azınlık taşıyıcılarının sayısı katkılama az ise) yaşam süresi rekombinasyon hızı ilişkisi denklem 3.4'te verilir;

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (3.4)$$

Burada τ , azınlık taşıyıcı yaşam süresini göstermektedir. Δn , azınlık taşıyıcı konsantrasyonu ve R , rekombinasyon oranıdır.

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{band}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te elektron azınlık taşıyıcı yaşam süresinin, banttan bant rekombinasyon azınlık taşıyıcı yaşam süresi (τ_{band}), Auger rekombinasyona bağlı azınlık taşıyıcı yaşam süresi ve Shockley Hall rekombinasyonuna bağlı azınlık taşıyıcı yaşam süresine bağlı olan eşitiği verilmektedir.

Auger yaşam süresi, taşıyıcı konsantrasyonunun (N_A) bir fonksiyonudur ve şu eşitlikle verilir;

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{CN_A^2} \quad (3.6)$$

Burada C , Auger katsayısı silisyum için $1.66 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$ olarak verilmektedir (Sinton and Swanson 1987; Altermatt et al. 2001).

Difüzyon Uzunluğu

Difüzyon uzunluğu bir taşıyıcının üretilmesinden tekrardan karşıt yük ile birleşmesine kadar geçen sürede katettiği ortalama yoldur. Aşırı katkılanmış yarıiletken malzemeler daha fazla rekombinasyon oranlarına sahiptir dolayısıyla da daha kısa difüzyon uzunluklarına sahiptirler. Yüksek difüzyon uzunlukları, daha uzun yaşam süresine sahip malzemelerde görülmektedir ve bu nedenle yarıiletken malzemelerde göz önünde bulundurulması gereken bir özelliktir.

Azınlık taşıyıcı yaşam süresi ve difüzyon uzunluğu rekombinasyon türüne ve büyüklüğüne bağlıdır. Bir çok silisyum solar hücre türleri için, SRH rekombinasyon mekanizması baskındır. Rekombinasyon oranı, malzemede bulunan kusurların sayısı ile orantılıdır. Bu nedenle yarıiletken solar hücrede katkılama işlemi kusurları artırdığı için SRH rekombinasyonunu da artacaktır. Katkılandırılmış ve uyarılmış malzemede Auger rekombinasyonu katkılama miktarı arttıkça artar. Yarıiletken tabakanın fabrikasyonu ve

işlenmesi difüzyon uzunluğunu da etkileyecektir. Tek kristal silisyum solar hücrelerde genellikle difüzyon uzunluğu 100-300 μ m olur.

Yaşam süresi ve yayınımına bağlı difüzyon uzunluğu eşitliği şu şekilde verilmektedir;

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (3.7)$$

Burada L, difüzyon uzunluğu olup D, difüzyon katsayısı; τ ise yaşam süresini göstermektedir (Honsberg and Bowden 2016).

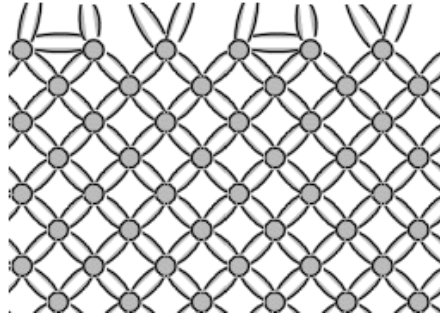
Yüzey Pasivasyonu

Silikon güneş pillerinin yüzey pasivasyonu, hücre yüzeyinde elektronların ve boşlukların birbirleriyle erken birleşmesini önleme işlemine verilen isimdir. Hücrenin enerji dönüşüm verimliliğini artırır ve böylece bir PV sistemi tarafından üretilen kWh başına maliyeti azaltır. Solar hücre ön yüzeyi, bir ince oksit tabaka ile kaplanarak pasive edilebilir. Kaplanacak ince film, geniş bant aralıklı ve yalıtkan olmalıdır. Bu tabaka yüzeye taşıyıcıların ulaşmasını engeller. Bundan dolayı yüzeydeki rekombinasyon oranı da azalır. Bu çalışmada solar hücre yüzeyi “TiO₂” ince film tabakası ile kaplandı.

Doymamış bağlar

Yarıiletken yüzeyindeki doymamış bağlar, o bölgedeki rekombinasyonun yüksek olmasına neden olur. Yarıiletken yüzeyindeki kusurlar, yarıiletken yüzeyde doymamış bağlara neden olan kristal kafesin periyodikliğinin kesilmesinden kaynaklanır. Doymamış bağların sayısının azaltılması ve dolayısıyla yüzey rekombinasyonunun azaltılması, yarıiletken yüzey üzerine bu doymamış bağlarla bağ yapan bir ince film büyütülmesiyle elde edilir. Doymamış bağların bu şekilde azaltılması yüzey pasivasyonu olarak bilinir. Şekil 26’da solar hücre yüzeyinde kusurlardan dolayı oluşan doymamış bağ oluşumu gösterilmektedir.

Yüzey rekombinasyonu azaltıldığında solar hücre yaşam süresi artar. Bunun temel nedeni yaşam süresinin, azınlık taşıyıcılarının konsantrasyonuna bağlı olmasıdır. Yüzey rekombinasyonunu sınırlamak, azınlık taşıyıcılarının tükenme oranını düşürebilir. Azınlık taşıyıcı kaybı azaltıldığında da yaşam süresi uzatılabilir.



Şekil 26. Kristal formda bir yarıiletkenin yüzeyde oluşan doymamış bağ oluşumu

Yüzey pasivasyonu ve rekombinasyon ilişkisi

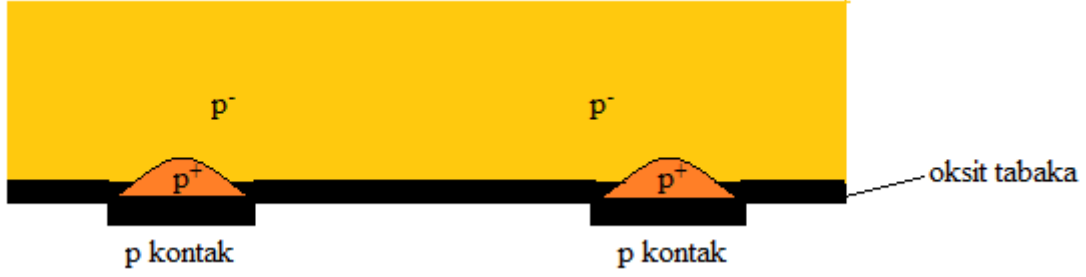
Solar hücre yüzeyi gibi kafesin bozulduğu kusurlu noktalarda rekombinasyon çok yüksektir. Rekombinasyon solar hücrenin özellikle yüzeyinde yüksektir ancak sınırlandırılabilir. Bu yüzey kusurlarını en aza indirmek daha verimli bir solar hücre yapmamızı sağlar. Aynı şekilde kusurlar ve kirlilikler solar hücrede rekombinasyonu artırır. Yüksek rekombinasyon azınlık taşıyıcıları yok eder. Azınlık taşıyıcılar, azınlık taşıyıcı konsantrasyonunun çok yoğun olduğu ortamdaki az yoğun olduğu ortama doğru diffüze olurlar. Böylelikle yüzey rekombinasyon hızı azınlık taşıyıcıların yüzeye gelme oranı ile sınırlanır ve birimi cm^2/sn 'dir. Taşıyıcıların yüzeye gelme oranı sıfırken yüzey rekombinasyonu görülmez ve yüzey rekombinasyon hızı da sıfırdır. Bir yerde rekombinasyonun sonsuz olsa bile yüzeye doğru taşıyıcıların hareketi maksimum hız ile sınırlanır.

Yüksek yüzey rekombinasyon oranına sahip silisyum hücrelerde yüzey üzerinde bir pasivasyon tabakası meydana getirmek gerekir. Solar hücre ön yüzeyi, bir ince oksit tabaka ile kaplanarak pasive edilebilir. Kaplanacak ince film, geniş bant aralıklı ve yalıtkan olmalıdır. Bu tabaka yüzeye taşıyıcıların ulaşmasını engeller. Bundan dolayı yüzeydeki rekombinasyon oranı da azalır. Bu çalışmada solar hücre yüzeyi " TiO_2 " ince film tabakası ile kaplandı.

Yüzeyde kaplama işlemi tamamlandıktan sonra silisyum yüzey ve TiO_2 ara yüzeyindeki kusurlar serbest bir silisyum yüzeyden çok daha azdır. Bu durumda yüzey rekombinasyonunu azalmasından dolayı yayıcı yüzeyde taşıyıcı kaybı azalır ve hücre verimi iyileşir.

Silisyum ve metal ara yüzeyi, silisyum ve metal-oksit ara yüzeyinden daha kusurludur. Arka yüzey rekombinasyonu, bir metal ile arka p tipi silisyum tabakaya kontak yapıldığında azaltılabilir. Bu nedenle kontağın olduğu kısımda rekombinasyon azalmış olur. Yüzeyin kontağın dışında kalan alanı da bir oksit ile pasive edilmiş ve rekombinasyon oranı azalmış olacaktır. Böylelikle yüzeyin tamamında rekombinasyon oranı ciddi bir şekilde azalmış olacaktır. Seri direnç kayıplarından kaçınmak için yarıiletkenin kontağa yakın bölgeleri

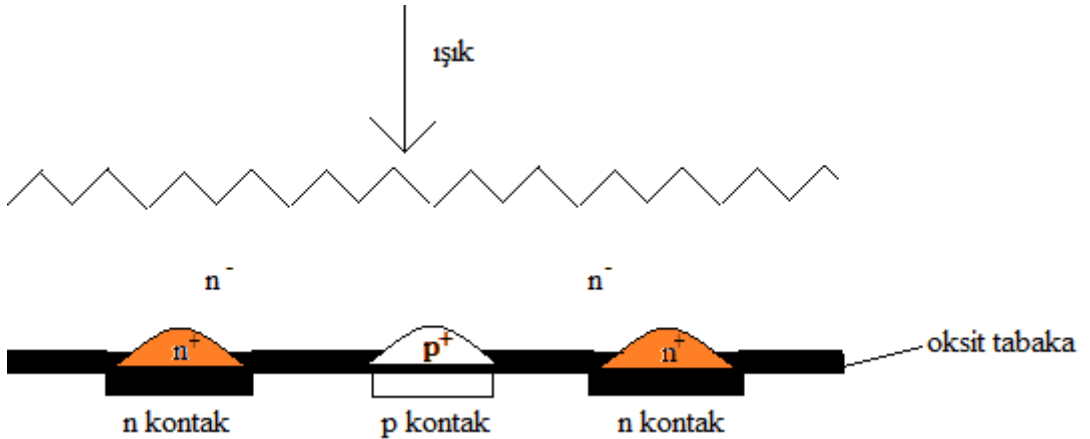
aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi p+ katkılı hale gelir. Şekil 27’de p-tipi yarıiletken malzemeye yapılan arka kontaklar gösterilmiştir.



Şekil 27. P tipi malzemede arka p kontakları.

Arka yüzeyi nokta kontaklı hücre

Arka yüzeyde n ve p kontaklarının her ikisi de yerleştirilmesiyle ön yüzeyde gölgeleme kayıpları azalır. 1992’de Stanford’da %22 verimle üretilmiştir. Bu hücre arka yüzeydeki kontaklara yakın ağır katkılı n ve p-tipi bölgelerle hafif katkılı n tipi silisyumdan yapılır. Ön yüzeyi pasive edilmiş ve yapılandırılmıştır. Bu hücre incedir ($100\mu\text{m}$) ve yüksek enjeksiyon seviyelerinde çalışmaya eğilimlidir. Bu yüzden ışık yakalama oranı önemlidir. Metalizasyon fraksiyonu bir arka kontaklı solar hücre tasarımındaki en temel parametredir. Metalizasyon fraksiyonunun küçük değerleri, arka kontak seri direnci ve taban parazitik yayılma direnci FF’nin daha fazla bozulmasına yol açan önemli hale gelir. Diğer bir taraftan, metalizasyon fraksiyonunun büyük değerleri de daha düşük rekombinasyon kayıplarına ve daha düşük verimli bir şekilde alt tabandan yansıma sağlar. Metalizasyon fraksiyonunun optimal değeri, p^+ lokalize difüzyonu varlığında, kontak büyüklüğüne, taban katkılama konsantrasyonuna ve arka kontak özdirencine çok güçlü şekilde bağlıdır. Bir arka nokta tasarımında verimliliği arttırmak için, hem arka kontak direncinin hem de delik boyutunun en aza indirilmesi gerekir. Şekil 28’de arka yüzeyi nokta kontaklı n-tipi yarıiletken solar hücre kesiti verilmektedir.



Şekil 28. Arka yüzeyi nokta kontaklı solar hücre kesiti

Yayıcı ve lokal arka yüzeyi pasive edilmiş solar hücre (PERL)

Yayıcı ve arka yüzeyi pasive edilmiş solar hücreler XJNSW’de %24 verimle geliştirilmiştir (Zhao 1996). Arka yüzeyde oluşan rekombinasyonu azaltmaya yönelik kontak tasarımı bu hücrelerin diğerlerine olan üstünlüğüdür.

Bu hücreler şu özelliklere sahiptir:

- Arka nokta kontaktları, yarıiletken-metal ara yüzeyin alanını azaltır. Ayrıca arka yüzeyde rekombinasyonun yüksek olduğu yerde oksitle kaplanmıştır.
- Ön yüzeyi pasive edici görevi görmesi için ön yüzeye kontaktlar yapılabilir.
- N tabakasının kontaktlara yakın olan kısımları ağır katkılı özellik göstermektedir.
- Yüzey yapılandırması ters piramitlerden oluşmaktadır.

Pasivasyon çeşitleri

Pasivasyon hücre verimi üzerinde en temel faktörlerden biridir. Yüksek verimli solar hücrelerde bu, iki metodla yapılmıştır: kimyasal pasivasyon (CP) ve alan etkili pasivasyon (FEP). Kimyasal pasivasyon yöntemi rekombinasyonu azaltmak amacıyla kusur seviyelerinin sayısını azaltmayı hedefler. Kimyasal pasivasyon n ve p tipi c-Si’lerin ikisi için de geçerlidir. Kimyasal pasivasyonda, H atomu kullanarak veya bir yalıtkan ya da yarıiletken katman büyütülmesiyle doymamış bağlar doyurulur ve böylelikle yüzey kusurları azaltılır, bu yöntemle n tipi ve p tipi silisyum tabanlı solar hücrelerin verimliliğini artırılır.

İkinci yüzey pasivasyon tekniği olan “alan etkili pasivasyon” ise yarıiletken ara yüzeyde bir elektrik alanı oluşturarak elektron ve boşluk konsantrasyonunu azaltmaya çalışmaktır. Rekombinasyon işlemi hem boşluk hem de elektron gerektirir. En yüksek rekombinasyon oranı, ara yüzeyde elektron ve boşluk konsantrasyonu büyüklük olarak hemen hemen eşit olduğunda elde edilir. Diğer durumlarda rekombinasyon oranı yüzeyde azınlık taşıyıcı yoğunluğuyla orantılıdır. Alan etkili pasivasyonda yarıiletken ara yüzeydeki elektron ve boşluk yoğunluğu ara yüzeydeki dahili elektrik alan üzerinden yük taşıyıcıların elektrostatik korumasıyla değiştirilmiştir. Bu dahili elektrik alan, yarıiletken ara yüzeyde sabit elektriksel yüklerin varlığı ile ve ara yüzeyin aşağısında bir katkılama ile elde edilir. Sonuç olarak, alan etkili pasivasyonun uygulama alanı sınırlıdır. Ama bu etki ledler ve solar hücreler gibi aygıtlarda başarılı bir şekilde çalışır.

Ön yüzey pasivasyonu

Solar hücrenin ön yüzeyini pasive etmek amacıyla genellikle solar hücre yüzeyi bir yalıtkan ince film ile kaplanmaktadır. En iyi sonucu Silisyum oksitin termal büyütülmesi işlemi

vermektedir ancak maliyeti fazla bir yöntem olduğundan sanayide tercih edilmez. Ayrıca işlem çok yüksek sıcaklık gerektirir ($\sim 1000^\circ\text{C}$) (Aberle 2000).

Ayrıca ön yüzeyde, pozitif ara yüzey yükleri kullanılarak alan etkili pasivasyon yapılmıştır, ARC görevi görmesi için kırılma indisi ayarlamaları yapılmıştır ve hidrojenlenmiş pasivasyon yapılmıştır (Aberle 2000; Nagel et al. 1999).

Arka yüzey pasivasyonu

Solar hücre üretilirken yüzey rekombinasyon kayıplarını azalttığı ve hücre verimini önemli ölçüde artırdığı için daha ince tabakalar halinde üretilmeye çalışılmaktadır ($< 200\mu\text{m}$). Ancak daha ince tabakalar arka yüzey rekombinasyonunu artırmaktadır (Aberle 2000).

Arka yüzeydeki rekombinasyon miktarını mümkün olduğu kadar en aza indirmek için arka yüzeye yalıtkan pasivasyon tabakası yapılmaktadır. Örneğin daha önce yapılan çalışmalarda ALD ile arka yüzeye Al_2O_3 büyütülmüş, Pirojenik buhar kullanarak ıslak oksidasyon işlemi yapılmış, a-Si:H/ SiO_2 yığını ya da $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ kullanarak pasivasyon işlemi yapılmış, fosfor katkılı bir a-SiC_xN_y :H(n) alaşımları kristal silisyum solar hücrelerde arka yüzey pasivasyonu işleminde sıklıkla tercih edilmiştir (Rahman and Khan 2012).

Rekombinasyona ilişkin teoriler

Bir silisyum altlıgın yüzeyleri veya ara yüzeyleri kristal yapısında ciddi bir süreksizlik gösterir (Rahman and Khan 2012). Yapısında çok fazla doymamış bağ bulunduğu için yarıiletken yüzeyine yakın bölgede ve bant aralığı içerisinde yoğun kusur seviyesi bulunmaktadır.

Yüzeyde tek bir kusur için yüzey rekombinasyonu oranı “ U_s ” ile gösterilirken eşitliği şu şekilde verilmektedir (Aberle 2000);

$$U_s = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\frac{n_s + n_i}{S_{p0}} + \frac{p_s + p_i}{S_{n0}}} \quad (3.8)$$

Burada n_s ve p_s sırasıyla elektron ve boşluk yoğunluğunu vermektedir. S_{p0} ve S_{n0} ise elektron ve boşluğun yüzey rekombinasyon hızlarını vermektedir. N_{st} , birim alandaki yüzey seviyelerinin sayısıdır. σ_n ve σ_p , elektron ve boşluğun yakalama kesit alanlarını; ϑ_{th} , spesifik kusurlar için termal hızı temsil eder.

$$S_{n0} = \sigma_n \vartheta_{th} N_{st} \quad (3.9)$$

$$S_{p0} = \sigma_p \vartheta_{th} N_{st} \quad (3.10)$$

Gerçekte, kusur seviyeleri çok fazladır ve böylece bant aralığı boyunca dağılımının homojen olduğu düşünülür ve yoğunluğu , yakalama kesit alanları enerji düzeylerine bağlı olacaktır. Rekombinasyon yaşam süresi $\left(\tau(\Delta n) = \frac{\Delta n}{U(\Delta n)}\right)$ tanımlamasına benzer şekilde yüzey rekombinasyon hızı S ,

$$U_S = S\Delta n_S \quad (3.11)$$

İfadesi ile verilir. Burada Δn_S ilave azınlık taşıyıcı yoğunluğunu göstermektedir. Bu nedenle yüzey rekombinasyon oranı, kusurların temel özellikleriyle ilişkilendirilebilir (Aberle 2000).

İnce Film Kaplama Teknikleri

İnce filmler optik cihazlar, çevre uygulamaları, telekomünikasyon cihazları, enerji depolama cihazlar gibi alanlarda modern çağ teknolojisi üzerinde büyük etkisi vardır. Kullanılan ince filmlerin morfolojisi biriktirme yöntemlerine bağlıdır. İnce filmler Tablo 3’de verilen fiziksel ve kimyasal yöntemlerle bir altlık üzerinde biriktirilir.

Tablo 3. İnce film kaplama teknikleri sınıflandırması

FİZİKSEL BİRİKTİRME	KİMYASAL BİRİKTİRME
Buharlaştırma Tekniği Vakum Termal Buharlaştırma Elektron Demeti Buharlaştırma Moleküler Demet Epitaksisi Darbeli Lazer Buharlaştırma Arc Buharlaştırma Saçtırma Tekniği Doğrudan Akım (DC) Saçtırma Radyo Frekans (RF) Saçtırma	Sol-Jel Tekniği Sprey Proliz Tekniği (SPT) Kimyasal Banyo Biriktirme Kaplama Akımlı Kaplama Akımsız Kaplama Kimyasal Biriktirme (CVD) Düşük Basınç Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD) Plazma Artırıcı Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) Atomik Tabaka Biriktirme (ALD)

Fiziksel biriktirme teknikleri

Buharlaştırma yöntemleri, malzemelerin ince tabakalı filmler şeklinde yaygın bir şekilde biriktirilmesi olarak düşünülür. Bu yöntemlerin genel mekanizması, maddenin fazını katı

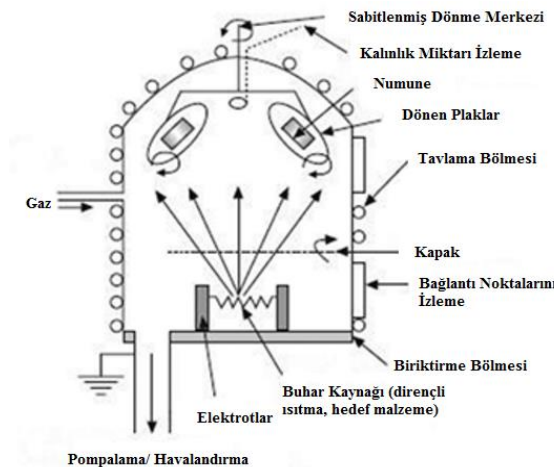
fazdan buhar fazına çevirerek ve tekrar altlık üzerinde katı fazına dönüştürerek oluşturulur. Vakum ortamında ya da çeşitli atmosfer koşulları altında işlem gerçekleştirilir.

Vakum termal buharlaştırma tekniği

Vakumla buharlaştırma aynı zamanda vakumlu depozisyon olarak da bilinir ve bu teknikte, kaplama için kullanılan malzeme termal olarak buharlaştırılır. Buharlaşan atomlar altlık üzerine gelerek yoğunlaşır. Normal vakum seviyeleri orta ila yüksek vakum olmak üzere; 10^{-5} ila 10^{-9} mbar aralığında değişir.

Vakumlu buharlaştırma tekniği, özellikle CdSSe, MnS, Ge-Te-Ga gibi kalkojen filmleri amorf yapıda hazırlanması için kullanılan en basit tekniktir. Genel olarak, metalizasyon, kalsiyojenür materyalleri, bellek anahtarlama uygulamaları faz değiştirme malzemeleri ve solar uygulamaları için kullanılabilir (Sangeetha et al. 2014; Salomé et al. 2015).

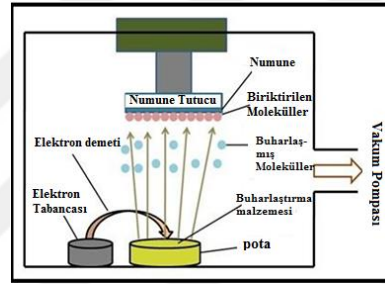
Termal buharlaştırma tekniği şu iki parametreye bağlıdır: birincisi, termal olarak buharlaşabilen bir malzeme ve ikincisi, yeterli vakum seviyesinin oluşturulmasıdır (Jilani et al. 2017). Dirençli ısıtma tekniğinde, malzeme filaman veya metal plakanın (evaporatör) içinden geçen bir elektrik akımı vasıtasıyla buharlaşana kadar ısıtılır, burada hedef materyal biriktirilir. Buharlaştırılmış materyal daha sonra bir altlık üzerinde yoğunlaştırılır. Kullanılan diğer bir yöntem ise şu şekildedir; bir grafiti çevreleyen bir RF bobini içinde malzeme buharlaştırılmasıdır. Tekniğin montajı basittir ve düşük erime sıcaklığına sahip metaller ve bazı bileşiklerin biriktirilmesi için uygun sonuçlar verir. Şekil 29'da görüldüğü gibi termal buharlaştırma sisteminde dönen plak sistemi, numune tutacağı ve buharlaşan kaynağın doğrudan üstünde bulunmaktadır.



Şekil 29. Termal buharlaştırma sisteminin şematik olarak gösterimi (Orava et al. 2014)

Elektron demeti buharlaştırma

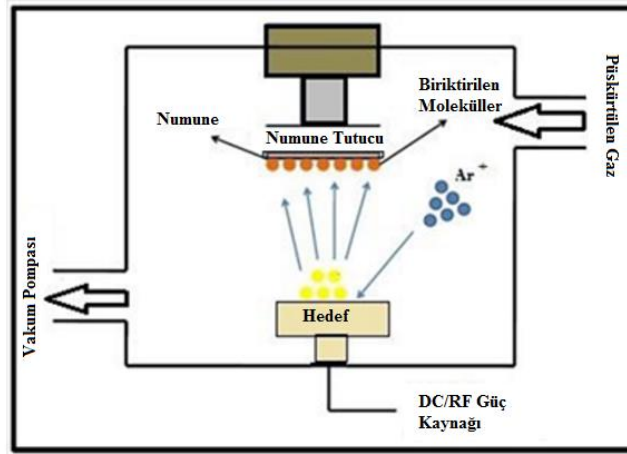
Elektron demeti ile ısıtma tekniği, yüksek enerjili elektron demetinin bombardımanı ile malzeme üzerinde depozisyon yapmak için ısıtma tekniğidir. Elektron demeti, akkor haldeki bir filaman tarafından üretilen elektronların termoiyonik emisyonunu kullanan bir elektron tabancasından üretilir. Yayılan elektronlar yüksek bir voltaj (kilovoltlar mertebesinde) ile hızlandırılır. Elektron tabancası buharlaştırma hattının altına yerleştirilerek elektron yörüngesini değiştirmek için bir manyetik alan kullanılır. Buharlaştırmak istenen malzemede lokalize bir ısıtma yapabilmek için elektronlar yüksek yoğunluklu bir buharlaştırma gücü için odaklandırılır. Özetle, elektron demeti hem elektrik alan hem de manyetik alan kullanarak vakum ortamında hedefe çarptırılarak hedef buharlaştırılır. Bu yöntemle hazırlanan ince filmler yüksek saflığa ve yüksek kaliteye sahiptir. Şekil 30'da elektron demeti buharlaşması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 30. Elektron demeti buharlaşmasının şematik diyagramı (Jilani et al. 2017)

Saçtırma tekniği

Saçtırma tekniği, kristal yapıyı ve yüzey pürüzlülüğünü kontrol ederek metal ve oksit filmlerin biriktirilmesi için kullanılmaktadır (Barranco et al. 2016). Saçtırma sistemi, metalik anot ve katot içeren boşaltılmış bir hazneden oluşur. Ayrıca, 0.01 mbar mertebesindeki inert gaz atmosferi altında birkaç yüz volt gerilim, film biriktirme için yeterlidir. Saçtırma işlemi, iyon bombardımanı sonrasında atomların katottan daha yüksek kinetik enerji ile koparılmasına yol açar. Bombardıman iyonlarının atom ağırlığı, hedef materyalin atom ağırlığına yakın olmalıdır. Yüzeyden ayrılan atomlar düz çizgiler halinde hareket ederler ve yoğun bir ince film oluşturmak için anot üzerine veya numune yüzeyinde birikirler (Angusmacleod 2013). Saçtırma sisteminin şeması Şekil 31'de gösterilmektedir

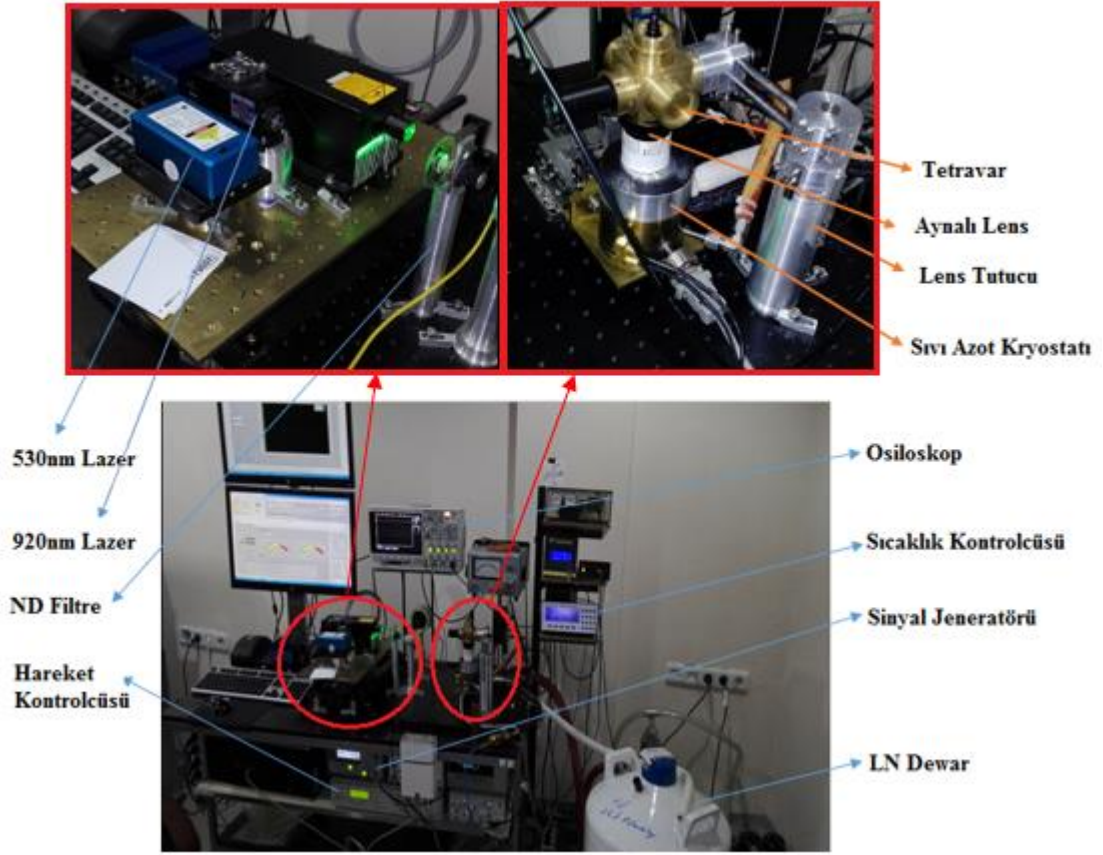


Şekil 31. Saçtırma sistemi şeması (Jilani *et al.* 2017)

Saçtırma tekniği birkaç avantaja sahiptir. Erime noktası yüksek olan malzemeler kolaylıkla saçtırma yoluyla kaplaması yapılabilir. Biriktirilen filmler, başlangıç malzemelerinin bileşimine benzer bir bileşime sahiptir. Saçtırma kaynakları, oksijen gibi reaktif gazlarla uyumludur. Buna karşın, kalın kaplamalar için pratik değildir ve karmaşık şekillerin kaplanmasında yetersizdir.

İki tip saçtırma işlemi vardır: Doğru akım (DC) ve radyo frekans (RF) saçtırma. İlki, iletken hedef malzemelerle kullanılır ve kaplama hızı uygulanan DC gerilimin gücüne bağlıdır. Düşük maliyet seçeneği ile kontrol edilmesi kolaydır. RF saçtırma tekniğinde çoğu yalıtkan malzeme için RF kullanılır (Jilani *et al.* 2017).

Ölçümlerde Kullanılan Deney Düzenegi



Şekil 32. Solar hücrelerde yaşam süresi ölçüm sistemi ve bileşenleri.

Şekil 32’de laboratuvarımızda bulunan solar hücrede iki boyutlu haritalama deney düzeneginde; sinyal jeneratörü (Keysight 33210a), sıcaklık kontrolörü (CryoCon 22C), osiloskop, rotary vakum pompası, optik pencereli sıvı azot kryostatı (77-350K), düşük akım (SR570) ve gerilim (SR560) amplifikatörleri ile 530nm(0-5W) ve 920nm(0-3W) lazerler, özel tasarım olan tetravar ve diğer optik destek sistemler kullanılmıştır. Lazer tetikleme gerilimi Keysight 33210a ile sağlanmış olup, minimum 8ns’lik darbe genişliğine sahiptir. Tüm deney düzenegi LabView programı aracılığıyla bilgisayardan yönetilmektedir. Ölçümlerde elde edilen analog veriler osiloskop aracılığı ile sayısallaştırıp bilgisayara aktarılmıştır.

Lab-View programı ile başlangıç şartlarına set edilen cihazlardan sistem hedef sıcaklığa vardığında osiloskopta lazer tetikleme sinyali ile senkronize ölçülen tranzient, program içinde kullanıcı tarafından tanımlanmış olan dizin içine otomatik olarak kaydedilmektedir. Tüm cihazlar IEEE 488 (USB dönüştürücü) üzerinden kontrol edilip veri akışı sağlanmaktadır. XYZ sürücüsüne monte edilen sıvı azot kryostatı üç boyutta 0.2µm hassasiyetle hareket ettirilebilmektedir. Bu tasarımda optik kısım sabit olup numune kryostat ile birlikte üç boyutta

hareket ettirilebilir. Optik tabla üzerinde sabit olan lazerler bir boyutta hareketle numuneye kolayca yönlendirilmektedir.

Yaşam süresi ölçümlerinde, sinyal jeneratörü ile tetiklenen 1ms'lik darbe genişliğine sahip lazer darbesini müteakip osiloskop ile her bir tranzient zamanın fonksiyonu olarak optimum kazançta sayısallaştırılıp kaydedilmektedir.



ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

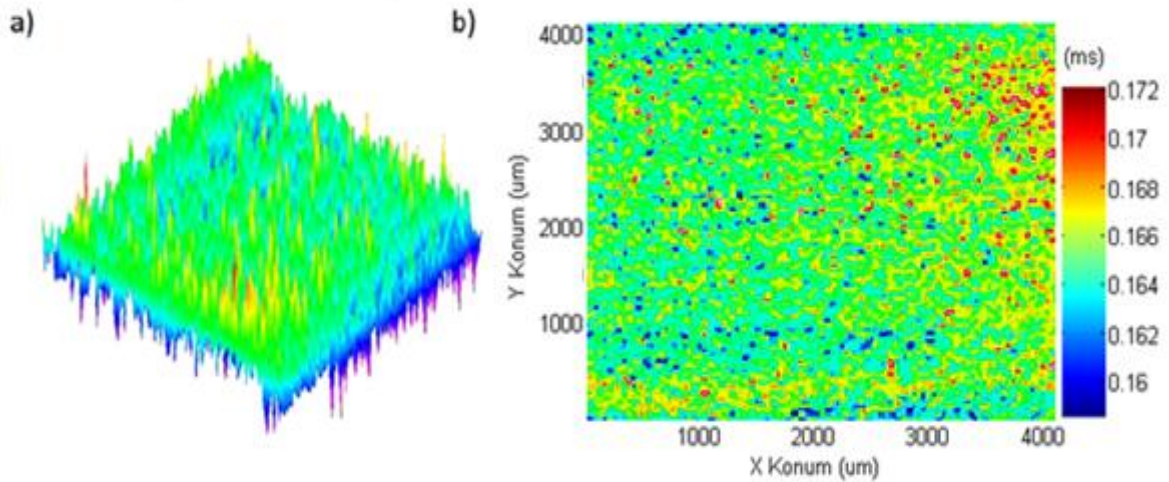
Yüzeyi Yapılandırılmamış Numunelerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde "Materyal Yöntem" bölümünde anlatılan yüzeyi yapılandırılmamış n^+ Si/p-Si hücresi ölçüme alınmış ve sonuçları sunulmuştur. Ölçümden önceki son aşamada solar hücre 11 parçaya ayrılarak her bir parçanın etkin yaşam süresi ölçümleri yapılmıştır. Uygulanan ısıtım işlem süresinin ve sıcaklık değerinin etkin yaşam süresi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için öncelikle başta ısıtım işlem uygulanmayan referans yapılandırılmamış numune olmak üzere 120sn boyunca 200, 300, 400, 500, 550°C sıcaklıklarda ve 400°C sıcaklıkta 10, 30, 60, 120, 180sn boyunca her bir numune RTA ünitesinde ısıtım işleme tabi tutuldu.

Tavlama sıcaklığına bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmamış numuneler

Referans numune

Bu numune, ısıtım işlemin solar hücre pasivasyon verimliliği üzerindeki etkisini ısıtım işlem gören ve görmeyen hücreler arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla referans kabul edilen işlem görmemiş numunedir. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılımı sırasıyla Şekil 33.a,b ve Şekil 34'de verilmiştir.



Şekil 33. (a) TiO₂ kaplanmış ve herhangi bir ısıtım işleme tabi tutulmamış referans numuneye ait üç boyutta, (b) iki boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm²’dir.

Şekil 33.a,b’de ısıtım işlem yapılmamış referans numuneye ait yaşam süresinin dağılımı verilmektedir. 40µm adımla 124x124 matris boyutunda olan tarama işlemi ile 4x4mm² alan

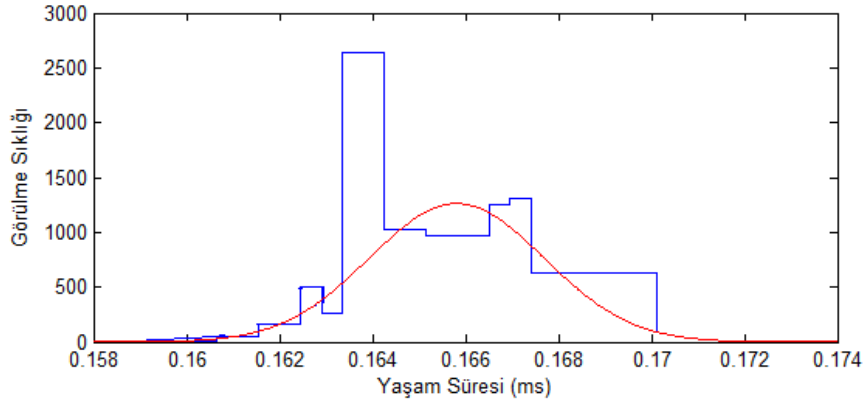
taranmıştır. Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.162-0.170ms aralığında değişim gözlenmiştir.

Hücrenin ön yüzünden yapılan ölçümle Şekil 34’de görüldüğü gibi yaşam süresi 0.164ms de yoğunlaşmasına karşın merkezi 0.167ms olan dağılımın baskın olduğu söylenebilir. Bunun sebebi ise TiO_2 ile kaplanan kısımlarda yüzeyin pasive olmuş olmasıdır. Daha önce yapılan çalışmalarda TiO_2 ’in bulunduğu yerlerde yaşam süresinin arttığı görülmüş ancak açıklanamamıştır (Richards et al. 2002).

En iyi pasivasyonlar öncelikle 5-30 nm arasında termal SiO_2 pasivasyon tabakası büyütülerek ve ardından TiO_2 ARC kaplama yapılarak elde edilmiştir (Crotty et al.1987; Swanson et al. 1999). Bu nedenle bu çalışmada da kaplama kalınlığı olarak 15nm tercih edilmiştir.

Solar hücre pasivasyonu için metal oksitlerden TiO_2 seçilmesinin ana sebeplerinden bir tanesi de mükemmel arayüzey termal kararlılığa sahip olmasıdır. TiO_2 tavlama sıcaklığı arttıkça oksijen atmosferinde absorpsiyon katsayısı azalır (Richards 2002).

Yüksek sıcaklıklı tavlama, filmlerin atomlarının veya moleküllerinin hareketliliğini artırır ve daha kırılğan ince filmlerin oluşumuna sebep olur ve bu da daha yüksek bir kırılma indisine yol açar. Film içerisinden geçen foton miktarını azaltacağından bu da istenmeyen bir durumdur (He et al. 2004).

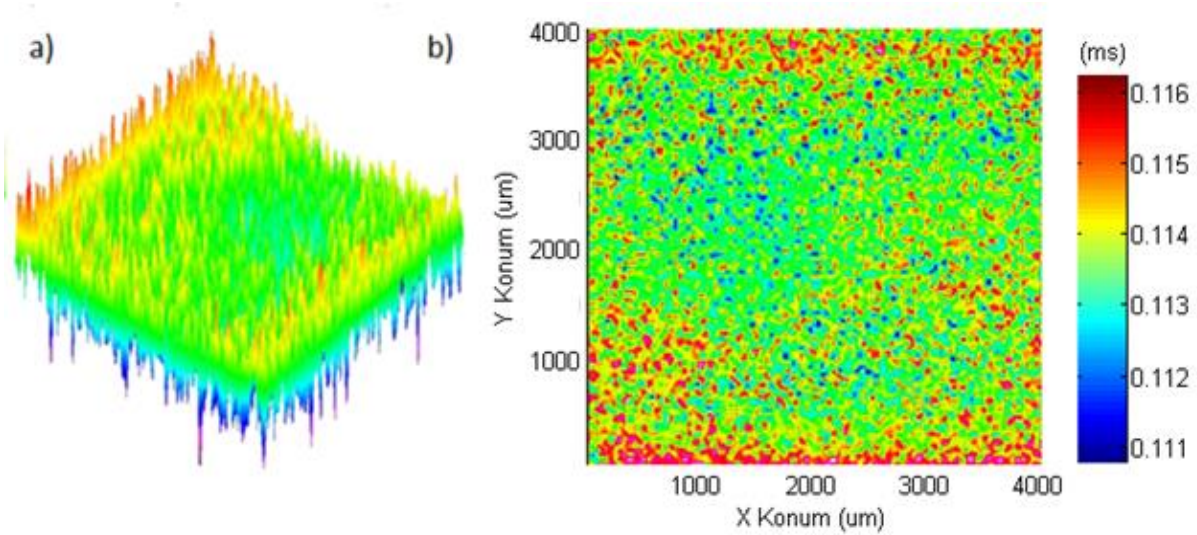


Şekil 34. Referans numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Ön yüzeydeki ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılım grafiğine ait değişim aralığı 4.4µs ve dağılım merkezi 0.166ms olarak hesaplanmıştır.

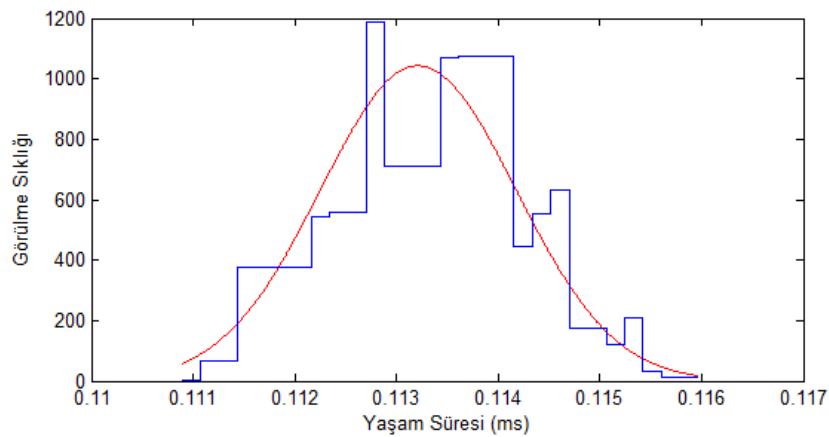
200°C’de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 200°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilen maksimum verimlilik baz alınarak ısıt işlemi taban sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 35.a,b ve Şekil 36’da verilmiştir.



Şekil 35. (a) 200°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresinin üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası

Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.111-0.116ms aralığında değişim gözlenmiştir.



Şekil 36. 200°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

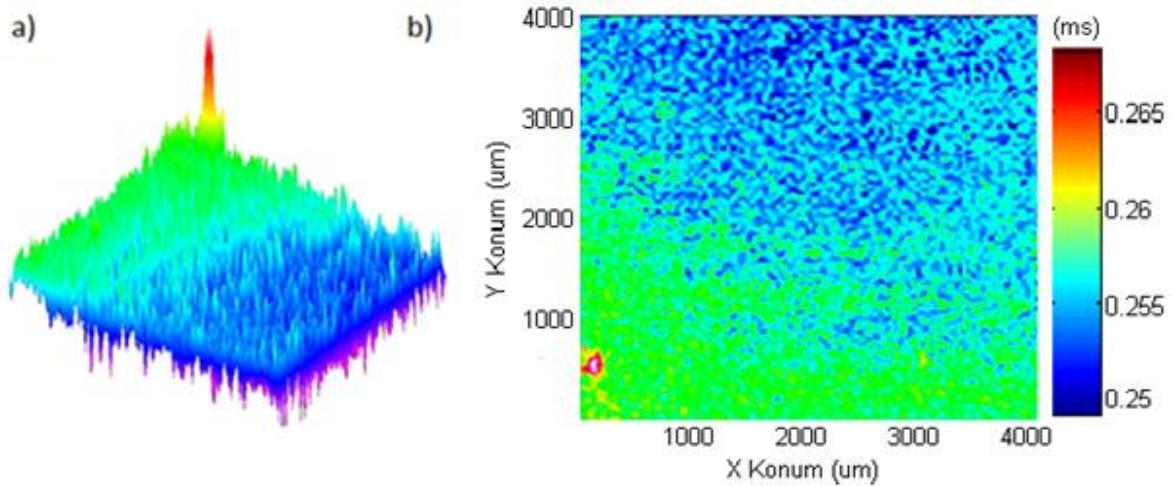
Solar hücre performansında kusur pasivasyonu, kusur giderme, katkı aktivasyonu etkilidir. Kusurlar yarıiletken yasak bantta rekombinasyon merkezleri oluşturur ve azınlık taşıyıcı yaşam süresini önemli ölçüde azaltır. 200°C’de 120sn ısıt işlem gören numunede yaşam süresi, ısıt işlem görmeyen referans numunesine oranla daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi

tavlamanın yetersiz sıcaklıkta yapılmış olmasıdır. Çünkü tavlama işleminde eğer sıcaklık yetersiz ve süre kısa tutulur ise doymamış bağlar doyurulamaz ve yüzeye yakın yeni kusur seviyeleri oluşur. Bu kusur seviyeleri rekombinasyon merkezleri oluşturur ve buna bağlı olarak da azınlık taşıyıcı süresi azalır (Liu 2016). 200°C’de yapılan tavlamada sıcaklık yetersiz kalmış ve yaşam süresi değeri hiç tavlama yapılmayan numunenin yaşam süresi değerinden düşük çıkmıştır.

Hücrenin ön yüzünden yapılan ölçümle Şekil 36’te görüldüğü gibi yaşam süresi dağılım grafiğine ait değişim aralığı $2.3\mu s$ olan dağılımın merkezi 0.113ms olarak elde edilmiştir.

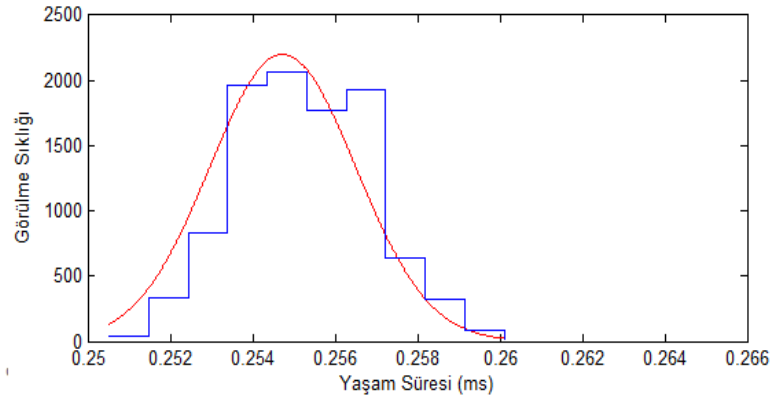
300°C’de 120sn ısıl işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 300°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıl işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 37.a,b ve Şekil 38’da verilmiştir.



Şekil 37. (a) 300°C’de 120sn ısıl işlem gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası

Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.250-0.265ms aralığında değişim gözlenmiştir.

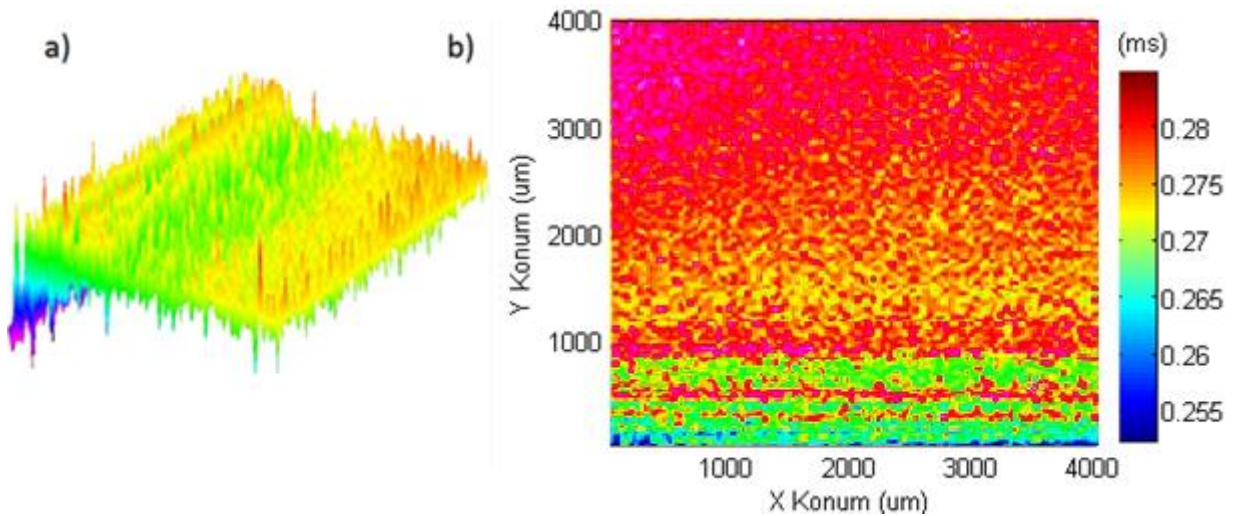


Şekil 38. 300°C'de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.

300°C'de ısıt işlem gören numunenin yaşam süresi verileri 200°C'de ısıt işlem gören numuneye ve referans numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. Şekil 38'de ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılım grafiğine ait değişim aralığı $4.2\mu s$ olan dağılımın merkezi 0.255ms'de görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen maksimum yaşam süresine ($500\mu s$) henüz ulaşılammıştır (Gad et al. 2016). Ancak yaşam süresindeki artış yalnızca uygun sıcaklıkta yapılan ısıt işlemin pasivasyon üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. RTA işlemi, arayüzeyde meydana gelen doymamış bağları doyurur ve verim iyileşir. Isıt işlem rekombinasyon merkezlerini azaltır.

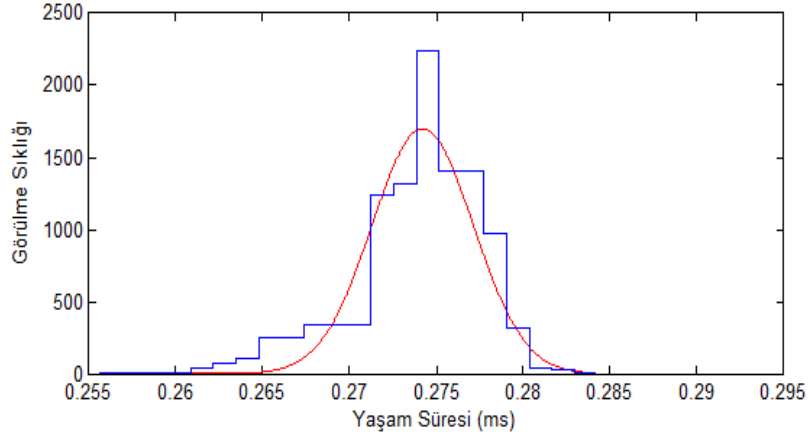
400°C'de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 39.a,b ve Şekil 40'de verilmiştir.



Şekil 39. (a) 400°C'de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu , (b) iki boyutlu yüzey haritası

Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.255-0.280ms aralığında değişim gözlenmiştir.

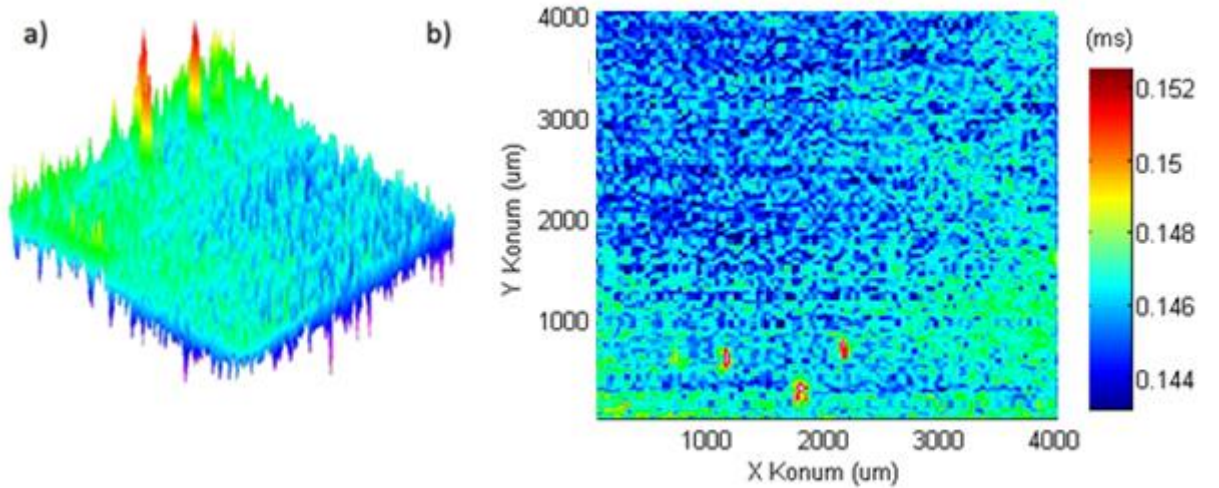


Şekil 40. 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

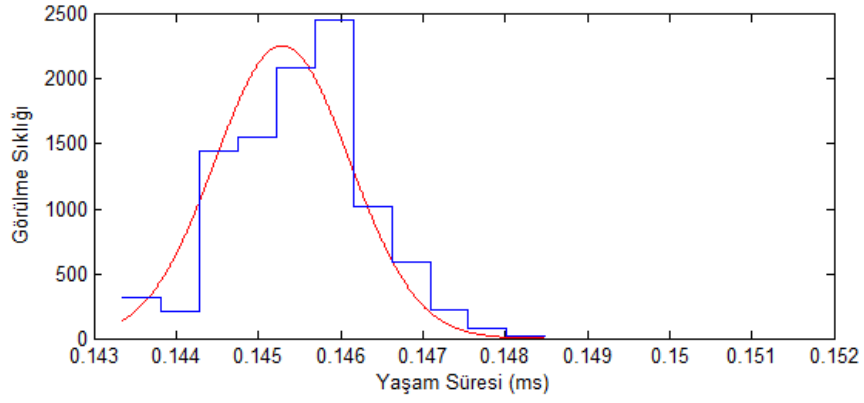
400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunede en iyi yaşam süresi elde edilmiştir. Yüzeyde TiO_2 bulunan kısımlarda pasivasyon en iyi şekilde sağlanmıştır. Şekil 40’de ön yüzeyde yapılan ölçümle yaşam süresi dağılımının merkezi 0.274ms ve değişim aralığı $6.1\mu s$ olduğu görülmüştür.

4.1.1.5. 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 500°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 41.a,b ve Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 41. (a) 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası

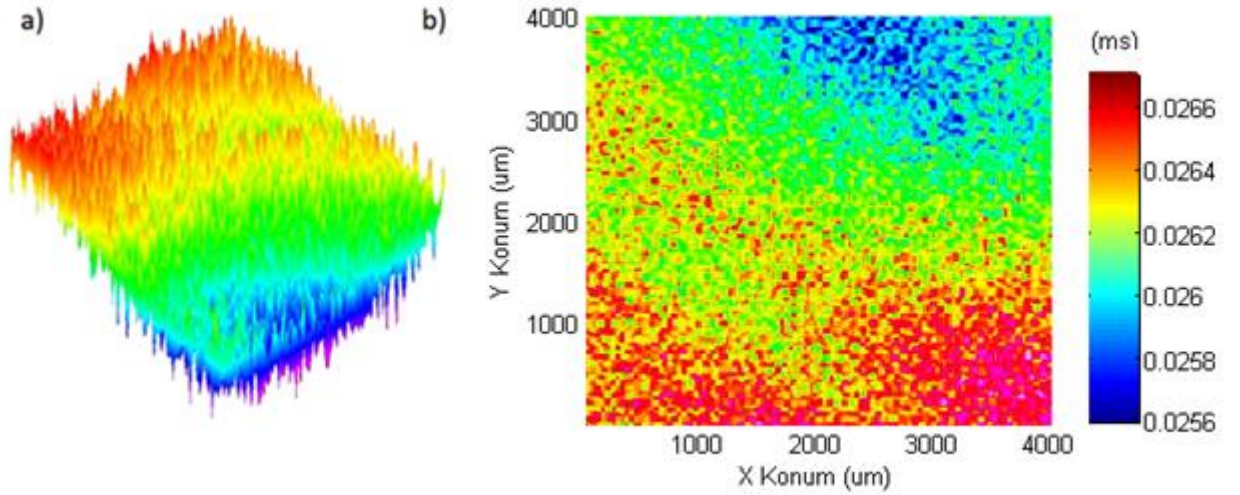


Şekil 42. 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

500°C’de 120sn ısıt işlem gören numunede çok düşük yaşam süresi görülmektedir. Bunun sebebi olarak literatürde sıcaklık artışıyla birlikte Si yüzeylerde bozulmalar meydana geldiğini gösterilmiştir; pasivasyonun bu numunede başarısız olmasına sebep olarak gösterilebilir. Şekil 4.42’de ön yüzeyde yapılan ölçümle yaşam süresi dağılımının merkezi 0.145ms ve değişim aralığı 1.9 μ s olduğu görülmüştür.

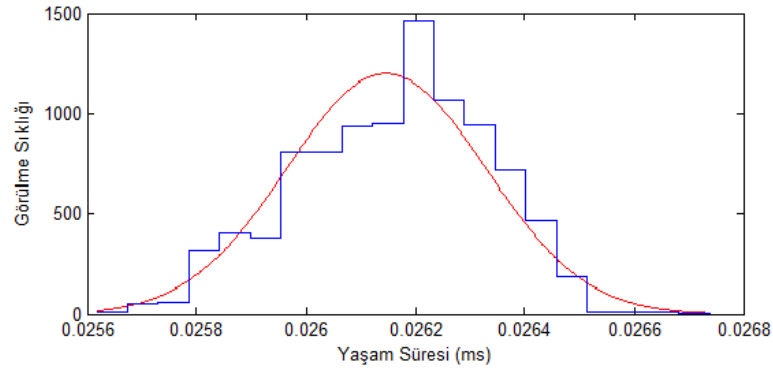
550°C’de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 550°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 43.a,b ve Şekil 44’de verilmiştir.



Şekil 43. (a)550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi üç boyutlu, (b) iki boyutlu yüzey haritası

Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait Şekil 43’deki verilerde 0.026-0.027ms aralığında değişim gözlenmiştir.



Şekil 44. 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.

550°C’de 120sn ısıt işlem gören numunede yaşam süresi iyice düşmüştür buna sebep olarak 500°C’de ısıt işlem gören numunede olduğu gibi sıcaklık artışına bağlı olarak Si yüzeyde meydana gelen bozulma gösterilebilir. Şekil 44’de ön yüzeyde yapılan ölçümle yaşam süresi dağılımının merkezi 0.0261ms ve değişim aralığı 0.43 μ s olduğu görülmüştür.

Solar hücre üzerindeki passivasyonun aktif olabilmesi için ısıt işlem gerekmektedir. TiO₂ tabanlı pasivasyonun aktivasyonu olarak adlandırılan ısıt işlemlere ait çalışmada gerekli sıcaklık 900°C olarak verilmektedir (Rahman and Khan,2012). p-n eklemli silisyum solar hücre yapısının bu sıcaklıkta konsantrasyonu değişeceğinden kararlı kalması söz konusu değildir ve 900°C ısıt işlemin uygulanabilirliği de söz konusu değildir. Bu çalışmada emiter yüzeyine elektriksel bağlantı 0.5mm Al kontakten alındı. Al 580°C’den daha yüksek sıcaklıklarda silisyum yapıya difüze olduğundan, çalışmamızda maksimum 550°C’de tavlama yapıldı.

Literatürde TiO₂ ile pasivasyon yapılan solar hücrelerde 300-400°C aralığında elde edilen azınlık taşıyıcı miktarı artmıştır (Thomson and McIntosh,2012). 400°C’de maksimuma ulaşmış ve 400°C’den daha yüksek sıcaklıklarda azalmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da buna uygundur. 300-400°C arasında azınlık taşıyıcı miktarının artmasının sebebi termal donör miktarının artmasıdır. Termal donörler azınlık taşıyıcı miktarını desteklemektedir. Termal donör 400°C’de maksimuma ulaşır ancak bu sıcaklıktan sonra düşer. Buna sebep olarak da literatürde TiO₂ pasivasyonundan kaynaklandığı gösterilmektedir (Thomson and McIntosh,2012).

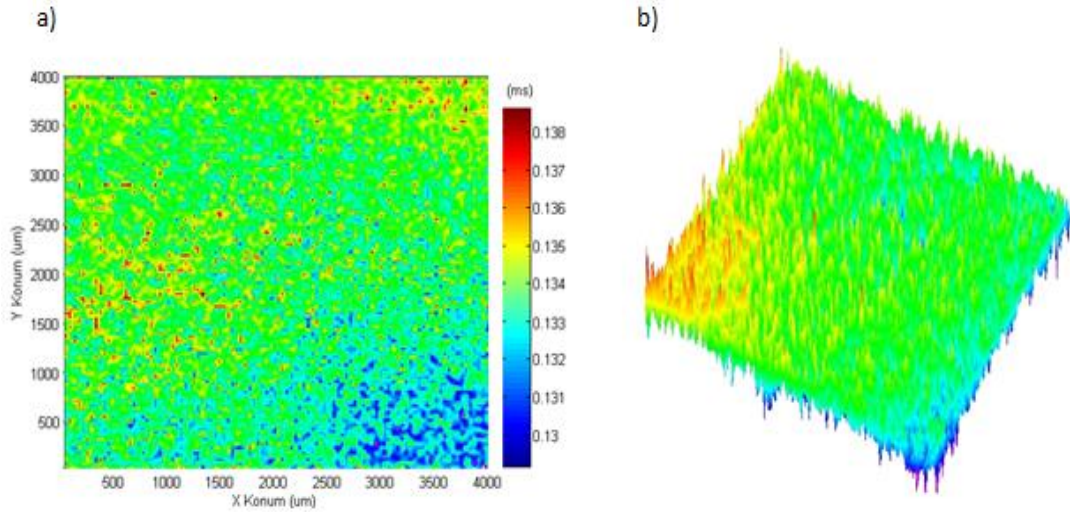
Tavlama süresine bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmamış numuneler

Bu çalışmada emiter yüzeyi yapılandırılmamış n⁺Si/p-Si hücresi kullanılmıştır ve daha önce ön yüzeyde RTA sıcaklığının pasivasyon üzerine etkisi incelenmek üzere hazırlanan emiter yüzeyi yapılandırılmamış n⁺Si/p-Si hücresine uygulanan temizlik prosedürü bu hücreye de uygulanmış ve ardından TiO₂ kaplama işlemlerinin tamamı uygulanmıştır. Ölçümden önceki son aşamada solar hücre 5 parçaya ayrılarak her bir parçanın etkin yaşam süresi ölçümleri

yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı önceki yapılandırılmamış numunelere uygulanan işlemlerin ardından elde edilen sonuçlar ışığında ısıtma işlemi en verimli sıcaklık değerinde yapmak ve numuneleri değişken sürelerde ısıtma işlemine tabi tutarak maksimum düzeyde yaşam süresi elde edilen optimal süreyi tespit edebilmektir. Nitekim önceki RTA sıcaklığına bağlı olarak yüzeyi yapılandırılmamış numunelerin ölçüm sonuçlarından hareketle maksimum yaşam süresi 400°C sıcaklıkta elde edilmiş ve bu çalışmada ısıtma işlem sıcaklığı her numune için sabit olmakla beraber 400°C olarak belirlenmiştir. Isıtma işlem süreleri herbir numuneye sırasıyla 10, 30, 60, 120, 180 sn olarak belirlenmiş ve bu süreler boyunca numuneler RTA ünitesinde tutulmuştur.

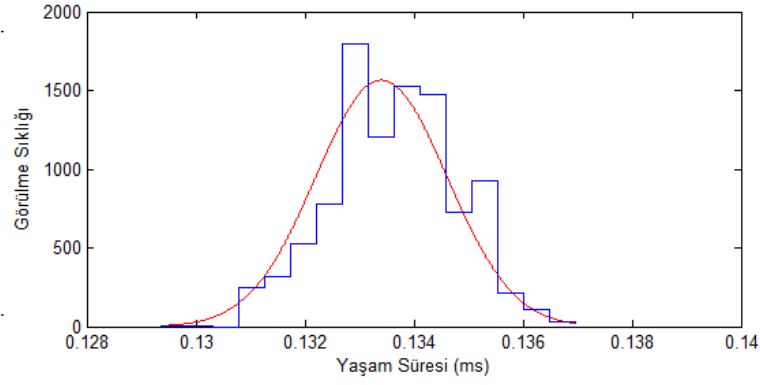
400°C’de 10 sn ısıtma işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 10sn tutularak ısıtma işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 45.a,b ve Şekil 46’da verilmiştir.



Şekil 45. (a) 400°C’de 10sn ısıtma işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

40μm adımıyla 124x124 matris boyutunda olan tarama işlemi ile 4x4mm² alan taranmıştır. Ölçümden elde edilen yaşam süresine ait verilerde Şekil 46’da görüldüğü gibi 0.130-0.138ms aralığında değişim gözlenmiştir.



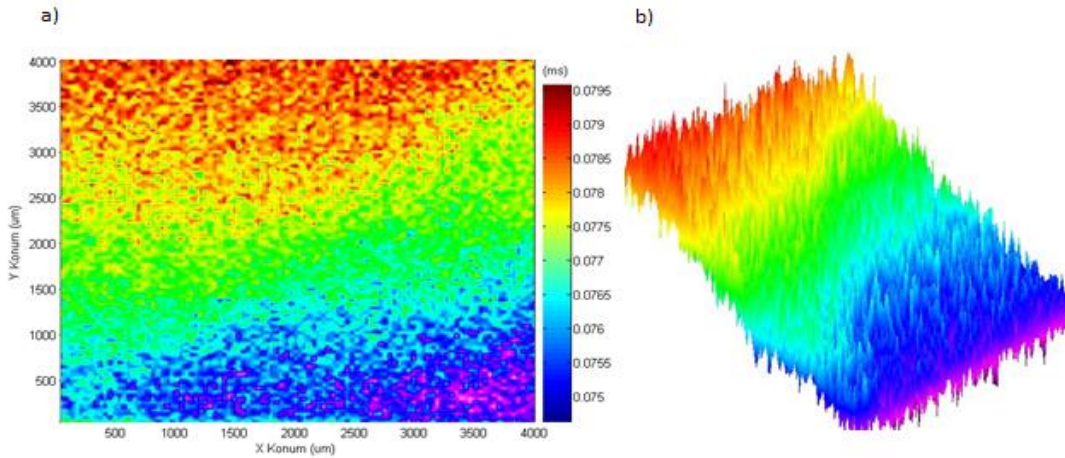
Şekil 46. 400°C’de 10sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 46’da ön yüzeyde yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılımında değişim aralığı $2.8\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.134ms olarak görülmektedir.

Solar numuneler için 400°C, en verimli ısıt işlem sıcaklığı olarak belirlendikten sonra yapılandırılmamış solar numune 10sn boyunca RTA ünitesinde tutulmuştur. Yukarıda görülen yüzey haritaları ve yaşam süresi dağılım grafiği verilerinden hareketle yüzeyi yapılandırılmamış solar numunenin yaşam süresinde hedeflenenin aksine büyük oranda düşüş meydana gelmiştir. Buna sebep olarak 10sn ısıt işlemin RTA’nın yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisini görmekte yetersiz olduğu söylenebilir. Tavlama işleminde eğer sıcaklık yetersiz ve süre kısa tutulur ise doymamış bağlar doyurulamaz ve yüzeye yakın yeni kusur seviyeleri oluşacağı için yaşam süresi düşük çıkmıştır denilebilir.

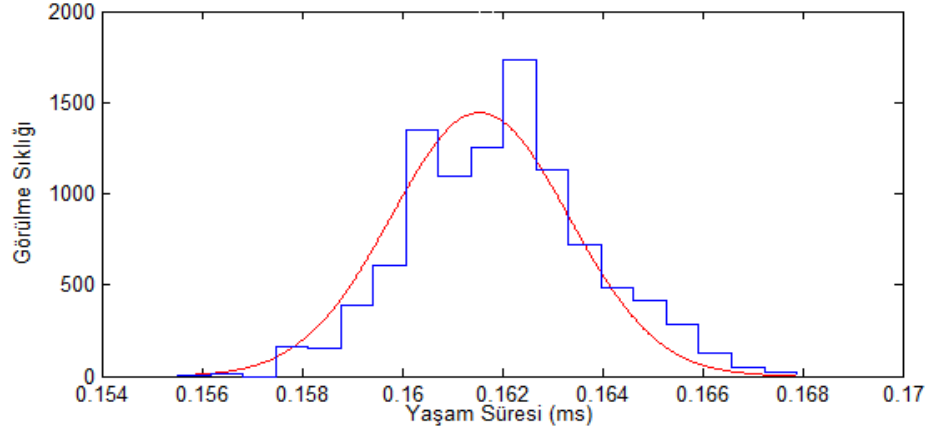
400°C ‘de 30 sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 30sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 47.a,b ve Şekil 48’de verilmiştir.



Şekil 47. (a) 400°C’de 30sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.075-0.0795ms aralığında değişim gözlenmiştir.

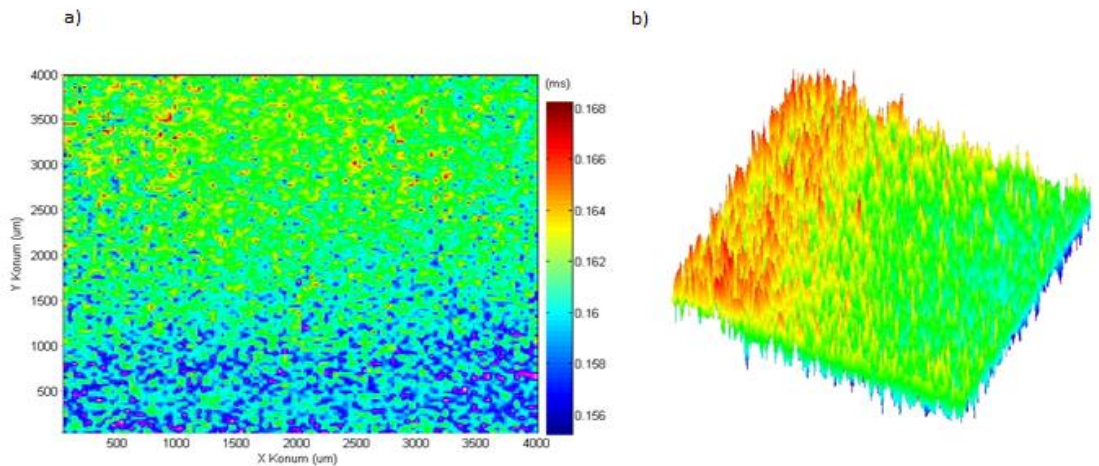


Şekil 48. 400°C’de 30sn ısıtım işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 48’de ön yüzeyde yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılımında değişim aralığı 2.6 μ s ve dağılımın merkezi 0.076ms olarak görülmektedir. 400°C’de 30sn ısıtım işlem gören numunenin maksimum yaşam süresi 10sn ısıtım işlem gören numuneye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak 30sn ısıtım işlemin RTA’nın yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisini görmekte yetersiz olduğu söylenebilir. Ayrıca RTA işlem sıcaklığı sabit tutulup süre artırılsa da hücrede istenen oranda yaşam süresi artışı görülememiş ve yaşam süresi 10sn ısıtım işlem gören numuneden daha düşük çıkmıştır.

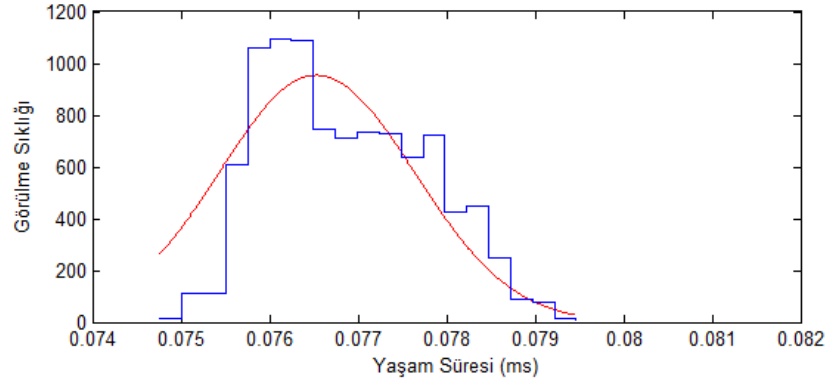
400°C’de 60sn ısıtım işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 60sn tutularak ısıtım işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 49.a,b ve Şekil 50’de verilmiştir.



Şekil 49. (a) 400°C’de 60sn ısıtım işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.156-0.168ms aralığında değişim gözlenmiştir.



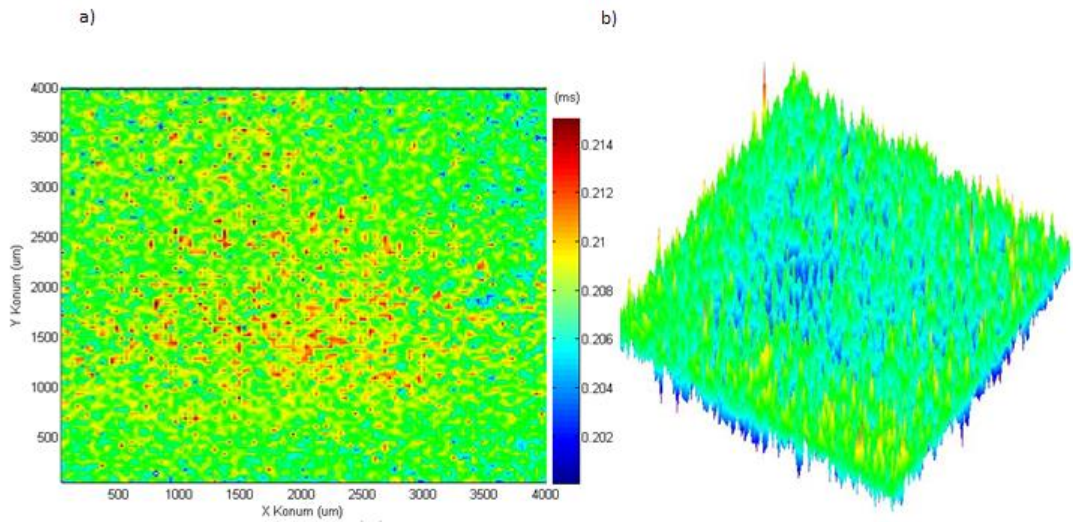
Şekil 50. 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.

Şekil 50’de ön yüzeyde yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılımında değişim aralığı 4.2 μ s ve dağılımın merkezi 0.162ms olarak görülmektedir.

60sn ısıt işlem gören numunede yaşam süresi beklenen ölçüde 10sn ve 30sn ısıt işlem gören numunelere oranla artmıştır. Bu numunede yapılan ölçümden hareketle RTA işleminin kısmen kusur onarımı ve doymamış bağların doyurulması işlevlerinden kaynaklanan bir olumlu etkisi söz konusu olduğu görülmektedir.

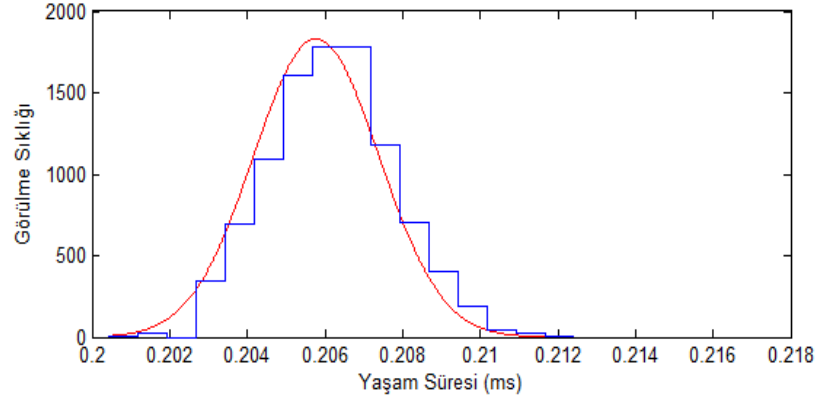
400°C ‘de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 51.a,b ve Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 51. (a) 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.202-0.214ms aralığında değişim gözlenmiştir.



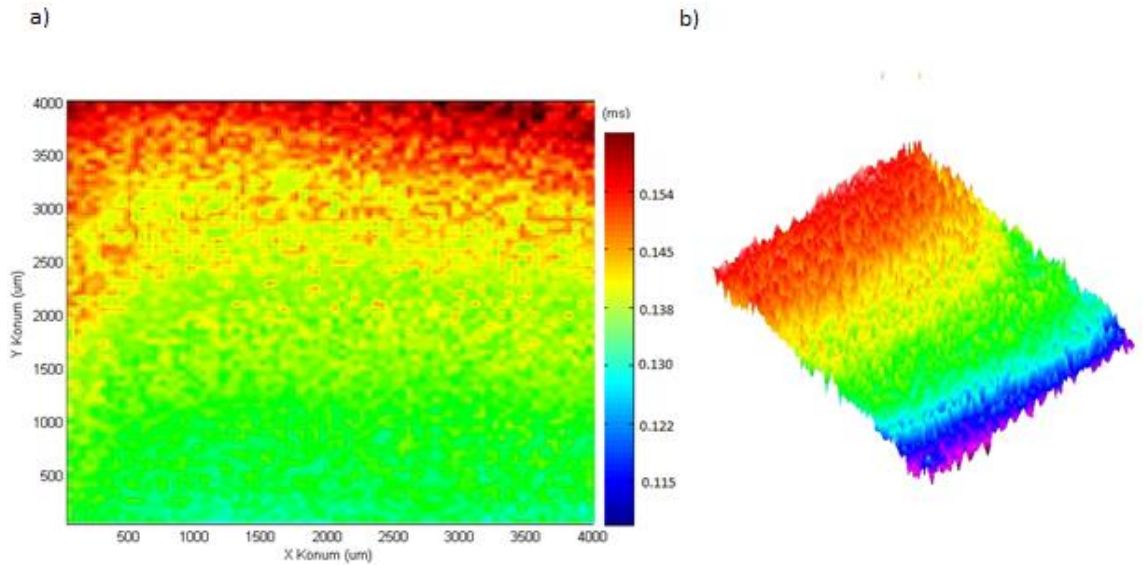
Şekil 52. 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 52’de ön yüzeyden yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılına ait değişim aralığı $3.8\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.206ms olarak görülmektedir.

120sn ısıt işlem gören numune yaşam süresi diğer numuneler arasında en yüksek yaşam süresine sahiptir.

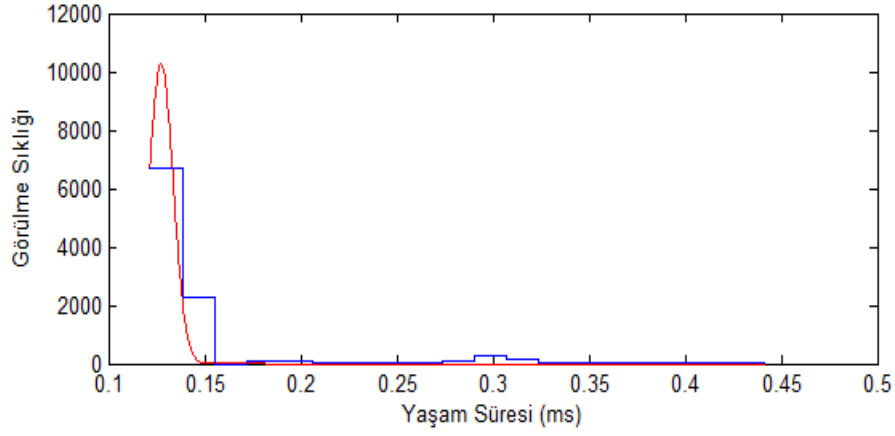
400°C’de 180sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 180sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 53.a,b ve Şekil 54’de verilmiştir.



Şekil 53. (a) 400°C’de 180sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresinin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.115-0.154ms aralığında değişim gözlenmiştir.



Şekil 54. 400°C’de 180sn ısıtma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 54’de ön yüzeyde yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılımına ait değişim aralığı $1.5\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.13ms olarak görülmektedir.

400°C’de 180sn ısıtma işlemi gören numunede ölçülen yaşam süresi 120sn ısıtma işlemi gören numuneye göre daha düşük çıkmıştır. RTA ünitesinde belirli süreden sonra tutulmaya devam eden numunelerde gereken süre (Bu süre, daha önce yapılan ölçümlerden elde edilen maksimum verime ait sonuç baz alınarak 120 sn olarak öngörülmektedir.) aşıldığında yaşam süresinin düştüğü gözlenmiştir. Bu da bize RTA ünitesinde numunelerin yüzey malzemesine göre belirli sıcaklık ve belirli süre içerisinde tutulması gerektiği ve ideal sıcaklık ve süreç belirlendiğinde pasivasyon sağlanacağını ve maksimum yaşam süresi elde edileceğinin göstergesidir.

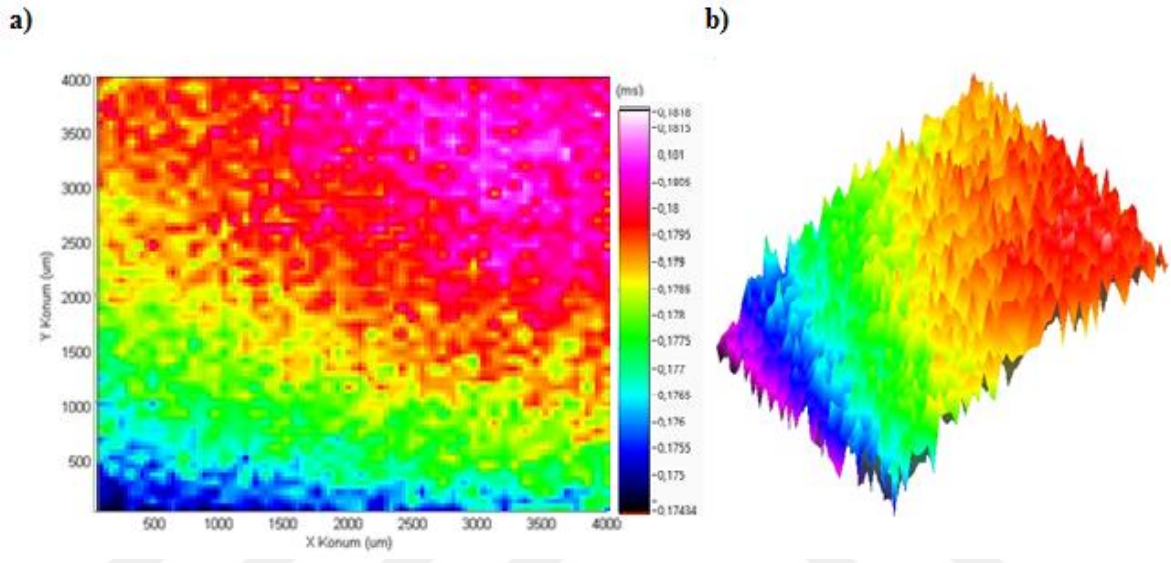
Yüzeyi Yapılandırılmış Numunelerin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada yüzeyi yapılandırılmış $n^+Si/p-Si$ hücresi kullanılmıştır ve daha önce emiter yüzeyi yapılandırılmamış $n^+Si/p-Si$ hücresine uygulanan temizlik prosedürü ardından TiO_2 kaplama işlemlerinin tamamı uygulanmıştır. Ölçümden önceki son aşamada solar hücre 11 parçaya ayrılarak her bir parçanın etkin yaşam süresi ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada yüzey yapılandırılması ODTÜ tarafından kimyasal aşındırma ile yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı hücre ön yüzünün yapılandırılmış olmasının etkin yaşam süresi üzerindeki etkisini görmektir. Uygulanan ısıtma işlem süresinin ve sıcaklık değerinin etkin yaşam süresi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için yüzeyi yapılandırılmamış numunelerde olduğu gibi öncelikle başta ısıtma işlemi uygulanmayan referans yapılandırılmış numune olmak üzere 120sn boyunca 200, 300, 400, 500, 550°C sıcaklıklarda ve 400°C sıcaklıkta 10, 30, 60, 120, 180sn boyunca her bir numune RTA ünitesinde ısıtma işlemine tabi tutuldu.

Tavlama sıcaklığına bağlı ölçümleri yapılan yüzeyi yapılandırılmış numuneler

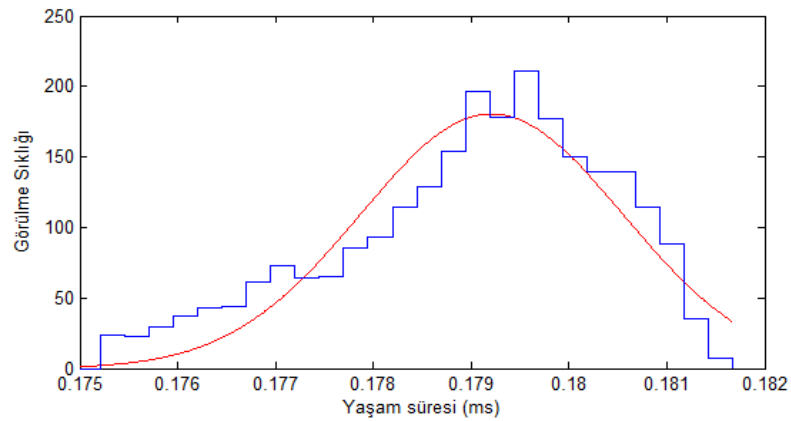
Referans numune

Bu numune, yüzeyi yapılandırılmış olup ısıtılma işlemi solar hücre pasivasyon verimliliği üzerindeki etkisini ısıtılma işlemi gören ve görmeyen hücreler arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla referans kabul edilen işlem görmemiş numunedir. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 55.a,b ve Şekil 56'da verilmiştir.



Şekil 55. (a) TiO_2 kaplanmış ve herhangi bir ısıtılma işlemi tabi tutulmamış referans numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 'dir.

Şekil 55.a,b'de ısıtılma işlemi yapılmamış yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait yaşam süresinin dağılımı verilmektedir. $40 \mu\text{m}$ adımla 124×124 matris boyutunda olan tarama işlemi ile $4 \times 4 \text{ mm}^2$ alan taranmıştır. Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.174-0.181ms aralığında değişim gözlenmiştir.



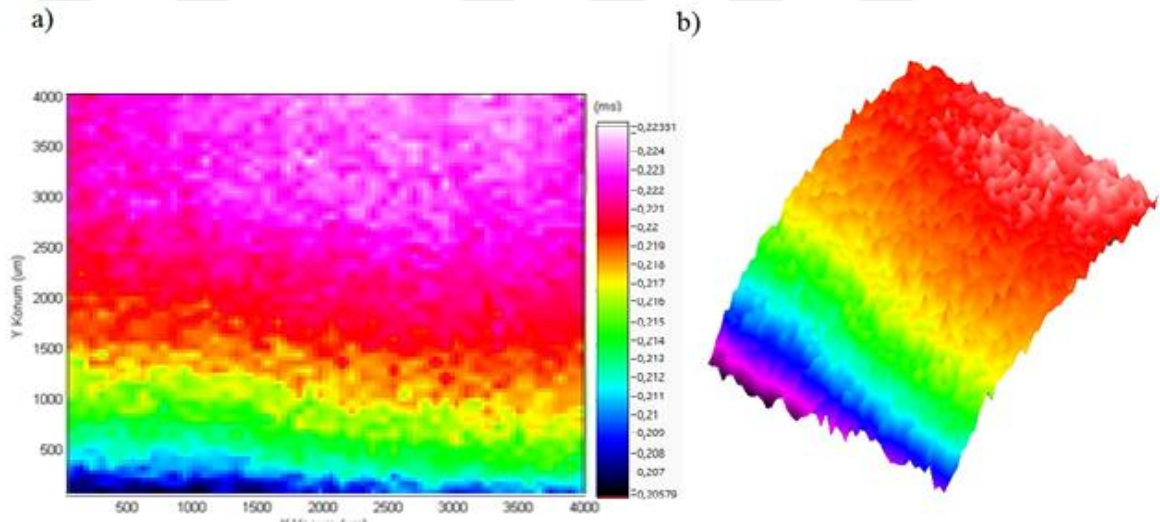
Şekil 56. Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 56'da değişim aralığı $3.3 \mu\text{s}$ ve dağılımın merkezi 0,179ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış referans numunede yapılan ölçüm sonuçlarından hareketle yaşam süresinin az olmasında ısıtılmanın yaşam süresini artırmadaki önemini görmekteyiz. Isıl işlem doymamış bağları doyurduğu için ve yüzey pasivasyonu sağladığı için yaşam süresi parametresi üzerinde etkili olduğu belirtilmişti. Ayrıca yüzeyi yapılandırılmamış referans numunede yaşam süresi 0,174ms çıkmıştı. Yüzeyi yapılandırılmış olan bu numunede yaşam süresinin daha yüksek çıkmış olması yüzey yapılandırmasının yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir.

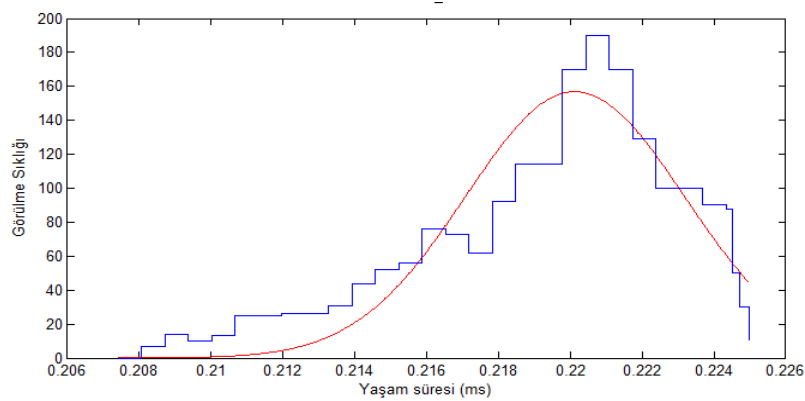
200°C 120sn ısıtılma işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 200°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıtılma işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 57.a,b ve Şekil 58’de verilmiştir.



Şekil 57. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 200°C’de 120sn ısıtılma işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnek alanı 4x4mm²’dir

Şekil 57’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.206-0.226ms aralığında değişim gözlenmiştir.

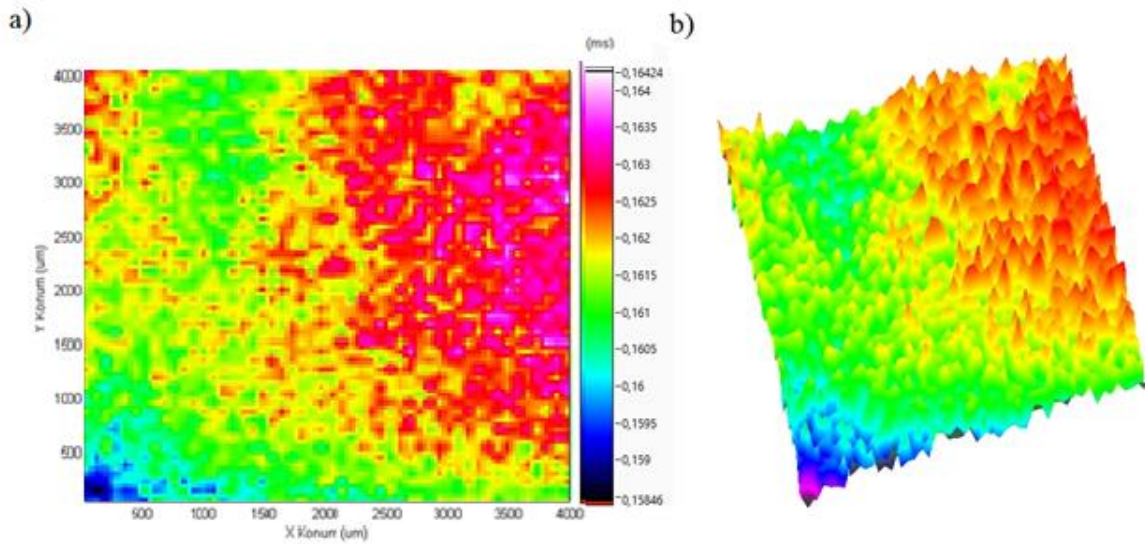


Şekil 58. 200°C’de 120sn ısıtılma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 58’de ön yüzeyde yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi dağılımına ait değişim aralığı $7.7\mu s$ ve dağılımın merkezi $0.22ms$ olarak görülmektedir. Yüzeyi yapılandırılmış olan $200^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye ait ölçümlerden hareketle referans numuneye göre ve yüzeyi yapılandırılmamış olan $200^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye göre solar hücre yaşam süresinin arttığı görülmektedir. Buna göre ısıtım işleminin ve yüzey yapılandırmasının yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisi bir arada görülmüştür.

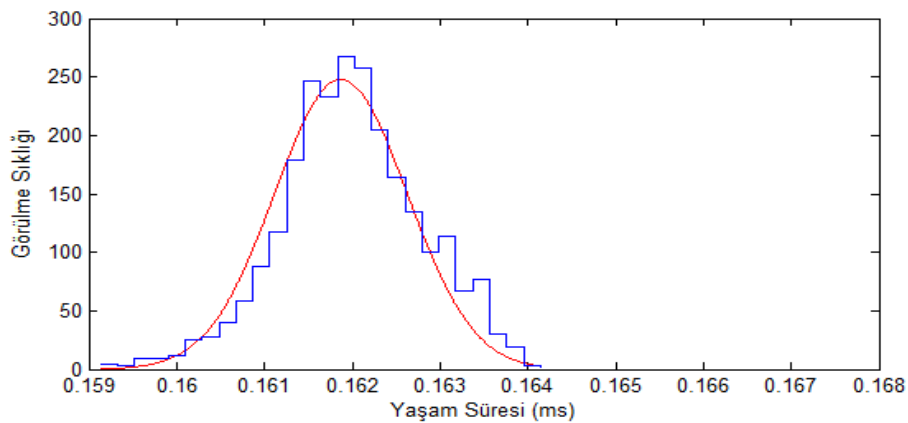
300°C 120sn ısıtım işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında $300^{\circ}C$ sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıtım işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 59 .a,b ve Şekil 60’da verilmiştir.



Şekil 59. (a) Yüzeyi yapılandırılmış $300^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnek alanı $4x4mm^2$ ’dir

Şekil 59’da ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde $0.159-0.168ms$ aralığında değişim gözlenmiştir.



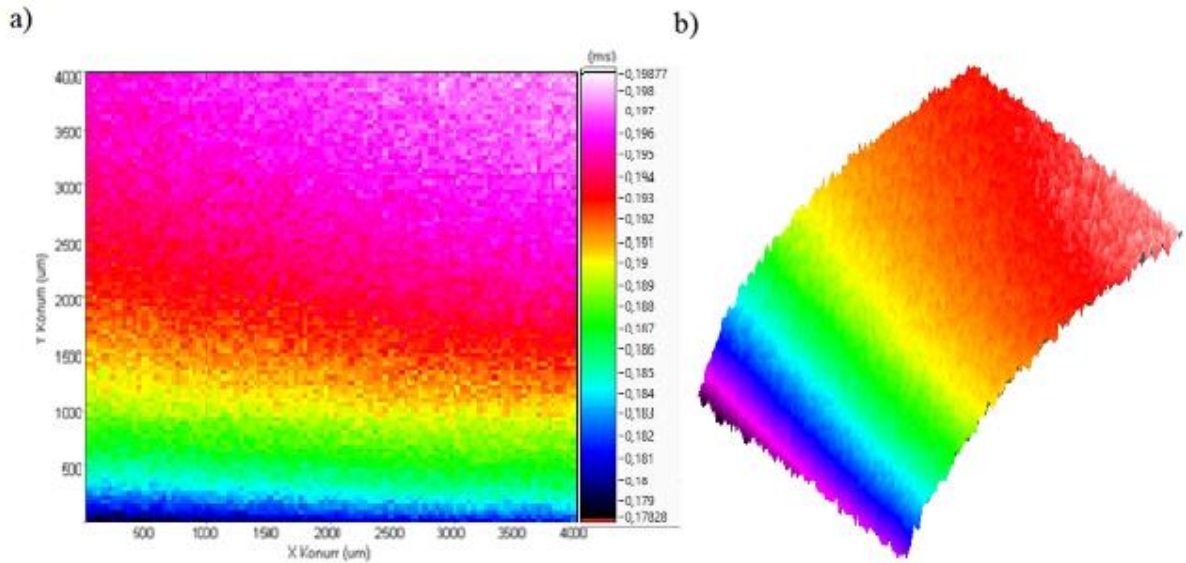
Şekil 60. $300^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği.

Şekil 60’da ön yüzeyde yapılan ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait dağılımın değişim aralığı $1.8\mu s$ ve dağılımın merkezi $0.162ms$ olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış ve $300^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtılma işlemi gören numunenin yaşam süresi beklenmedik bir şekilde düşük çıkmıştır. Yapılan ölçümün solar hücre içerisinde derin seviyelerin yoğun olarak bulunduğu kısmından alındığı düşünülmektedir.

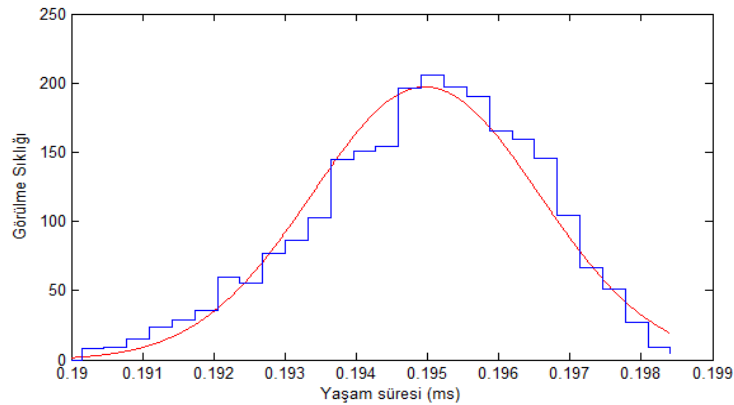
400°C’ de 120 sn ısıtılma işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında $400^{\circ}C$ sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıtılma işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 61.a,b ve Şekil 62’de verilmiştir.



Şekil 61. (a) Yüzeyi yapılandırılmış $400^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtılma işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı $4 \times 4mm^2$ ’dir

Ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde Şekil 61’de de görüldüğü gibi $0.190-0.199ms$ aralığında değişim gözlenmiştir.



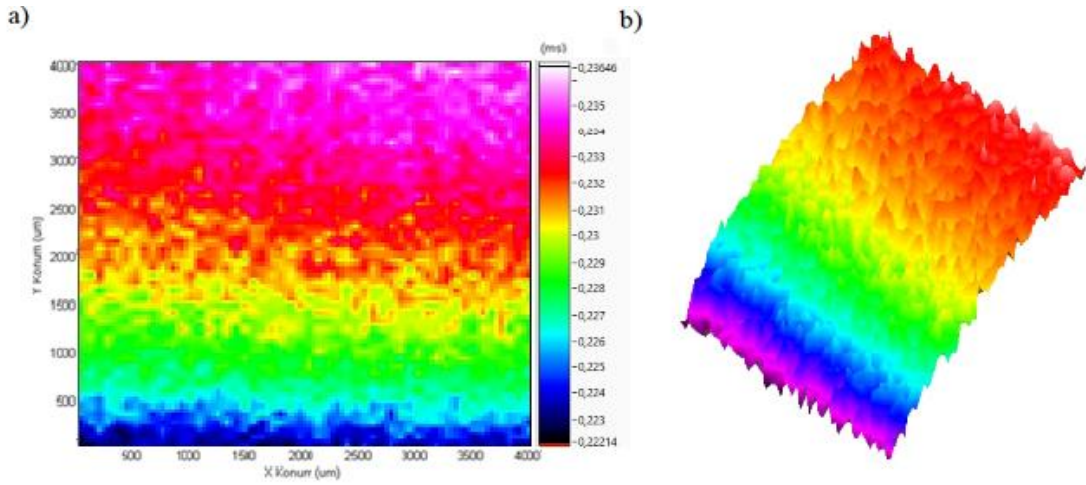
Şekil 62. $400^{\circ}C$ ’de 120sn ısıtılma işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 62’de değişim aralığı $3.7\mu s$ ve dağılımın merkezi $0.195ms$ olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış olan 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin yaşam süresi yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin yaşam süresi değerinden düşük çıkmıştır. Yüzey yapılandırması yapılmamış olan numunelerde 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin optimal sonuçları sağladığı görülmüştü. Ancak bu numunede 400°C sıcaklık yeterli olmamıştır. Bu sonuçlardan hareketle yüzey yapılandırması yapıldığında ısıt işlem sıcaklığının artırılması gerektiği savunulmaktadır.

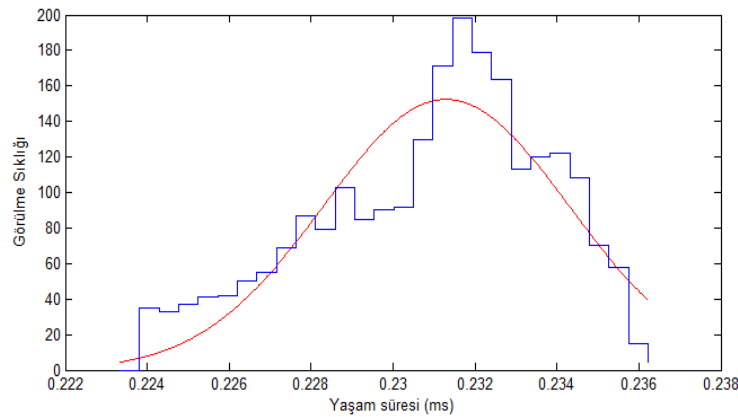
500°C’de 120 sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 500°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 63.a,b ve Şekil 64’de verilmiştir.



Şekil 63. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm²’dir

Şekil 63’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.222-0.238ms aralığında değişim gözlenmiştir.



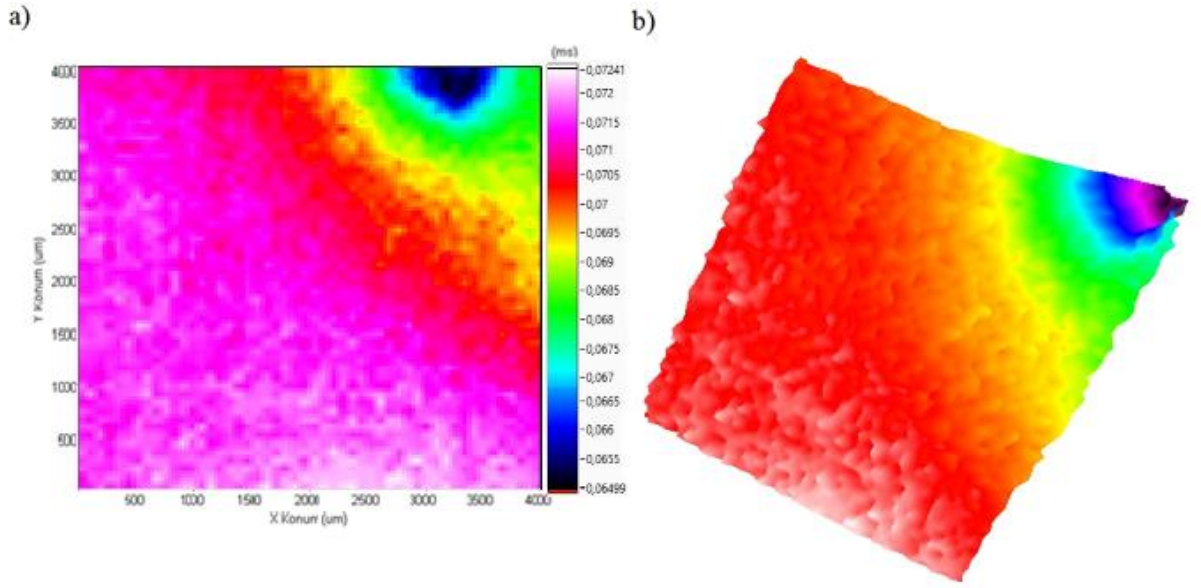
Şekil 64. 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 64’de değişim aralığı 8.2µs ve dağılımın merkezi 0.231ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numune ölçümünden yaşam süresi değeri optimal sonuç sağlanmıştır. Bu sonuç yaşam süresinin yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye göre daha yüksek çıkmasında yüzey yapılandırması olduğu zaman ısıtım işlem sıcaklığını artırmak gerektiği kanısını onaylamaktadır.

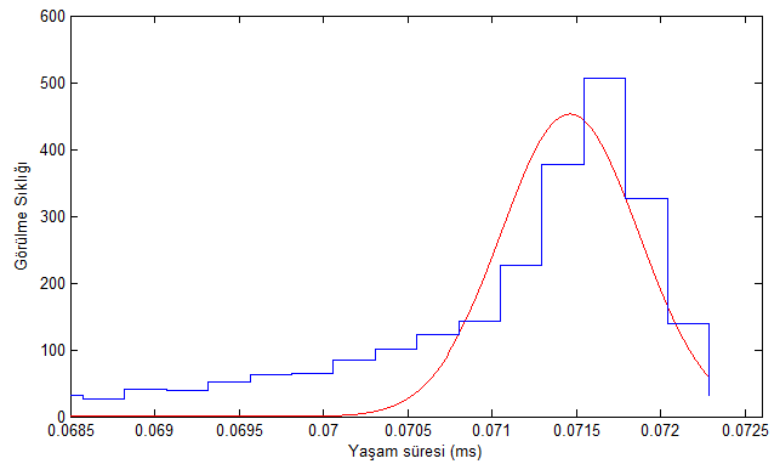
550°C’de 120 sn ısıtım işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 550°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıtım işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 65.a,b ve Şekil 67’te verilmiştir.



Şekil 65. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm²’dir

Şekil 65’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.069-0.073ms aralığında değişim gözlenmiştir.



Şekil 66. 550°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

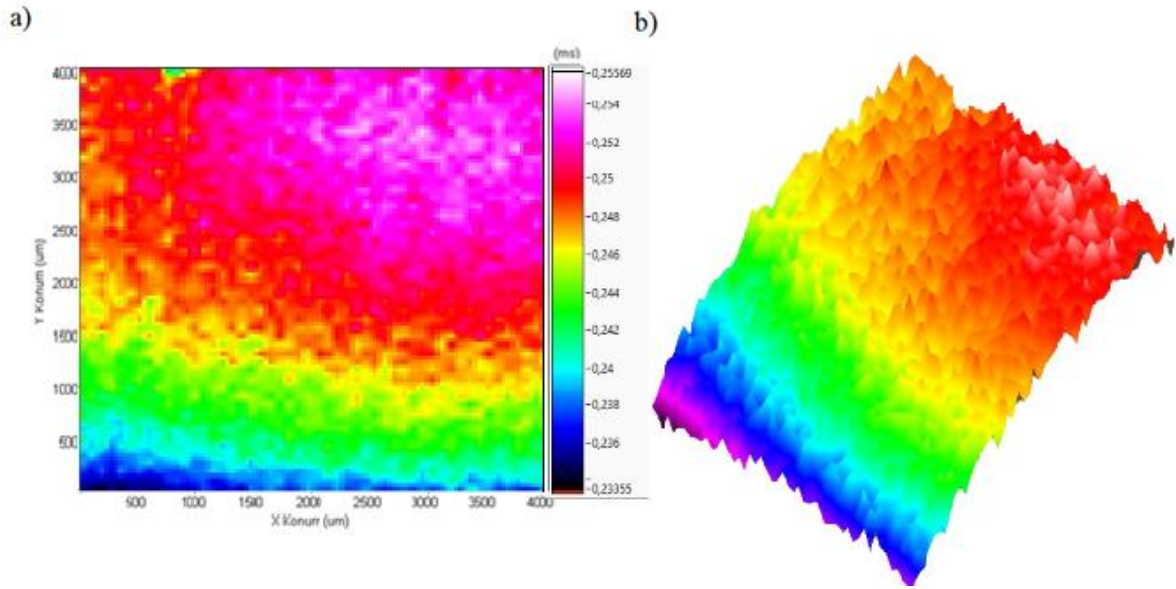
Şekil 66’da değişim aralığı 0.9µs ve dağılımın merkezi 0.0714ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi çok düşük çıkmıştır. Bunun sebebinin yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıtım işlemi gören numunede olduğu gibi aşırı ısıtım sıcaklığının hücre yapısını bozmuş olduğu düşünülmektedir.

Tavlama süresine bağlı olarak yapılan ölçümler

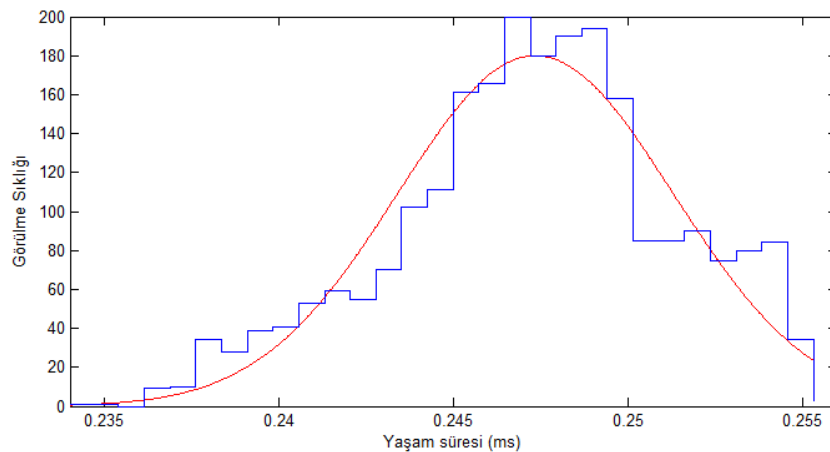
400°C’de 10sn ısıtım işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 10sn tutularak ısıtım işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 67.a,b ve Şekil 68’de verilmiştir.



Şekil 67. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 10sn ısıtım işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm²’dir

Şekil 67’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.235-0.255ms aralığında değişim gözlenmiştir.



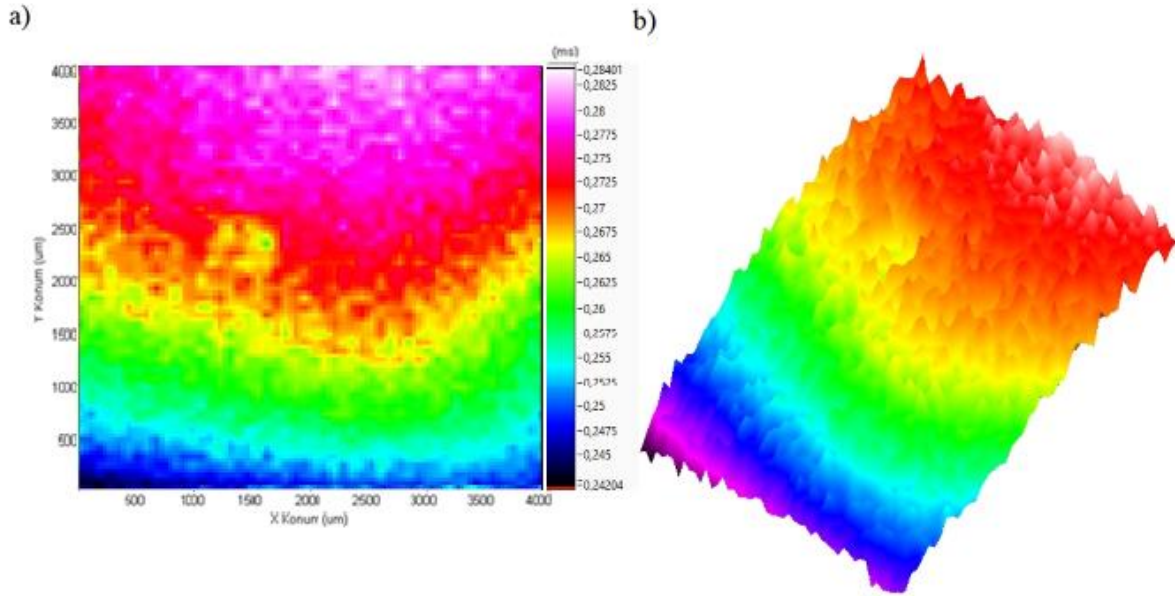
Şekil 68. 400°C’de 10sn ısıtım işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 68’de değişim aralığı $1\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.246ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış $400^{\circ}C$ ’de 10sn ısıtım işlemi gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresinin yüzeyi yapılandırılmamış $400^{\circ}C$ ’de 10sn ısıtım işlemi gören numuneden daha yüksek çıktığı görülmüştür. Buradan hareketle yüzey yapılandırmasının literatüre uygun olarak solar hücre performansı üzerindeki olumlu sonucunu görmekteyiz. Bu numuneden elde edilen sonuç optimal sonuç değildir. Buna sebep olarak 10sn ısıtım işlemi süresinin RTA’nın yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisini görmekte yetersiz olduğu söylenebilir. Tavlama işleminde eğer sıcaklık yetersiz ve süre kısa tutulur ise doymamış bağlar doyurulamaz ve yüzeye yakın yeni kusur seviyeleri oluşacağı için yaşam süresi düşük çıkmıştır denilebilir.

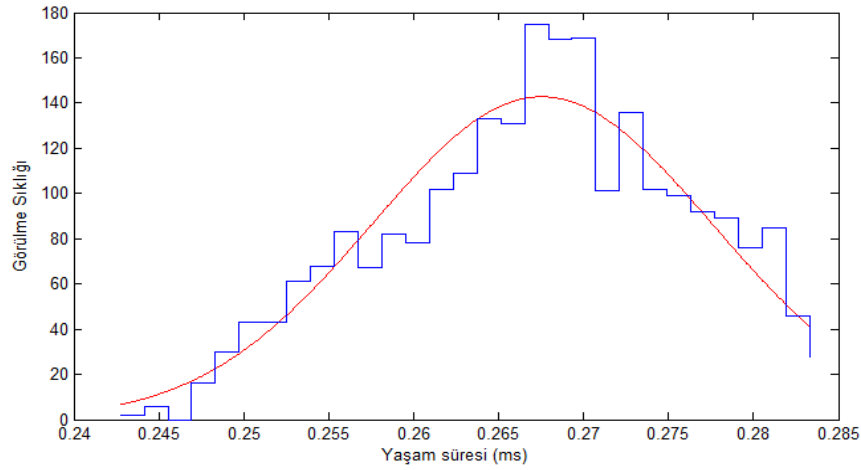
400°C’de 30sn ısıtım işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında $400^{\circ}C$ sıcaklıkta RTA ünitesinde 30sn tutularak ısıtım işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 69.a,b ve Şekil 70’de verilmiştir.



Şekil 69. (a) Yüzeyi yapılandırılmış $400^{\circ}C$ ’de 30sn ısıtım işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı $4x4mm^2$ ’dir.

Şekil 69’da ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.240-0.285ms aralığında değişim gözlenmiştir.



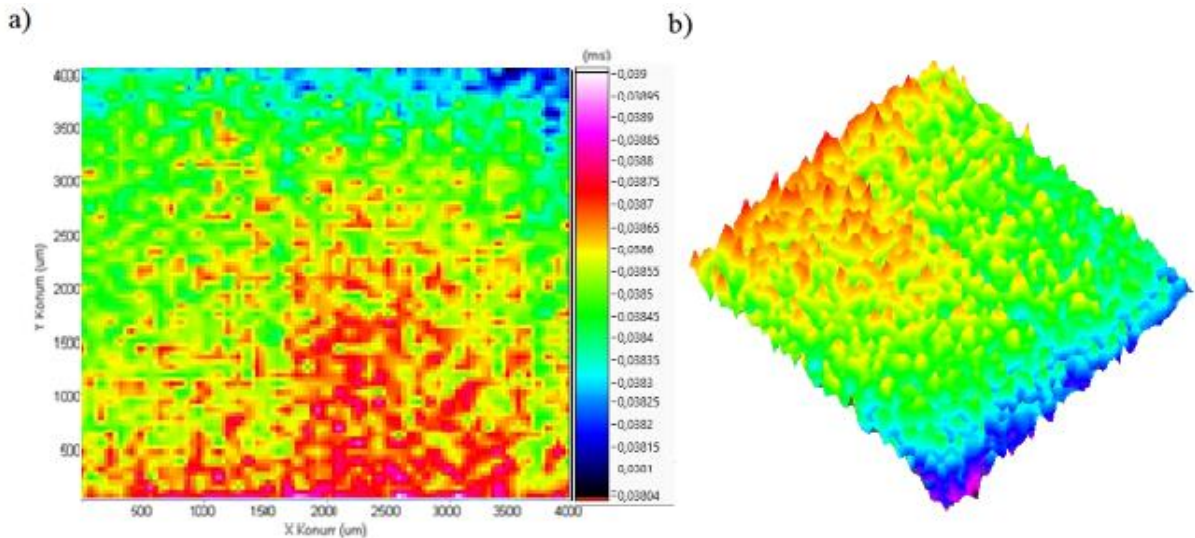
Şekil 70. 400°C'de 30sn ısıtım işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 70'de değişim aralığı $2.7\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.267ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 400°C'de 30sn ısıtım işlemi gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi değeri tüm numuneler içerisinde en yüksek değere sahiptir. Buna sebep olarak 30sn ısıtım süresinin yetersiz olmasına karşın yaşam süresini artıran başka bir etki söz konusu olduğu söylenebilir. Solar hücre verimliliğini artıran tüm parametreler göz önünde bulundurulduğunda hücre içerisinde rekombinasyonun ve derin seviye kusurlarının az olduğu bölgeden ölçüm alındığı düşünülmektedir. Ancak bu sonuçtan hareket ederek ısıtım işlemi optimal sürenin 30sn olduğunu söylenemez.

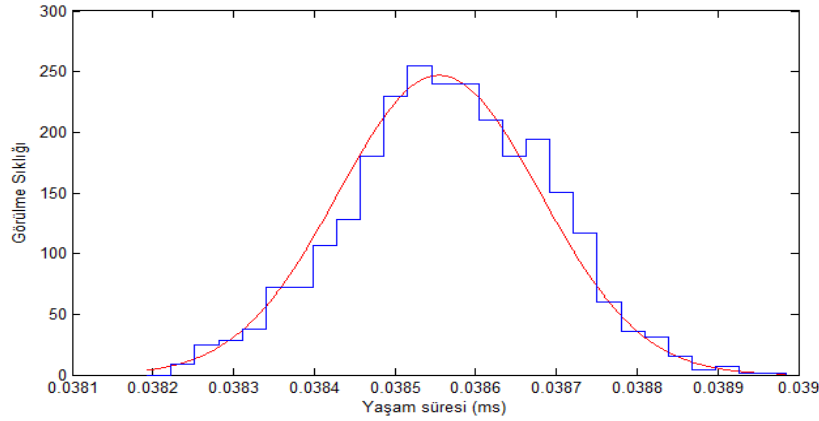
400°C'de 60sn ısıtım işlemi gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 60sn tutularak ısıtım işlemi görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 70.a,b ve Şekil 72'de verilmiştir.



Şekil 71. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C'de 60sn ısıtım işlemi gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnek alanı $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 'dir

Şekil 71’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.038-0.039ms aralığında değişim gözlenmiştir.



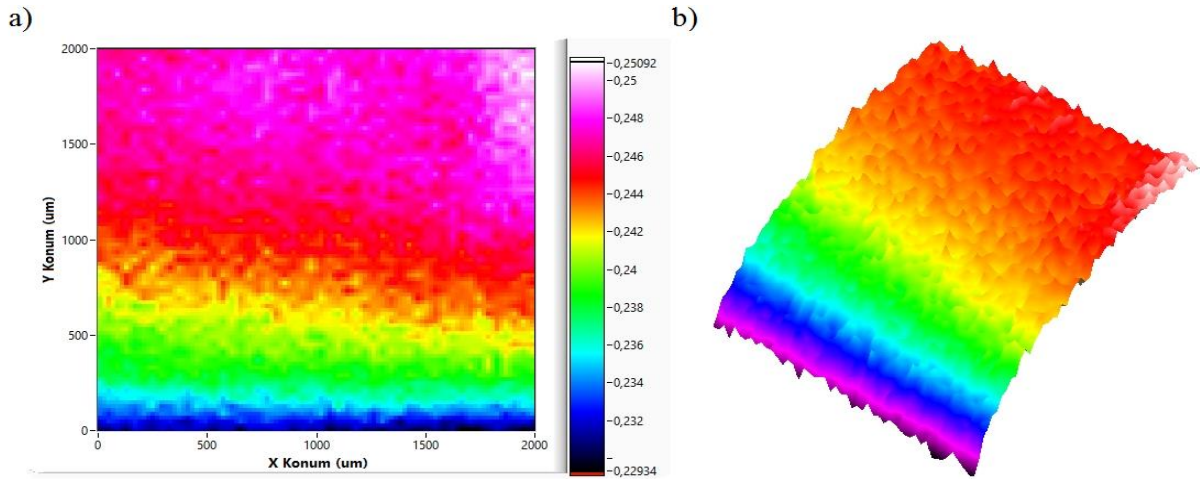
Şekil 72. 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 72’de değişim aralığı 0.3µs ve dağılımın merkezi 0.0385ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi oldukça düşük çıkmıştır. Yaşam süresi yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 60sn ısıt işlem gören numuneden de düşüktür. Bu sonuç yanıltıcı olup yaşam süresi üzerinde yüzey yapılandırmasının olumlu etkisini bertaraf etmiştir. Bu numunede yaşam süresinin düşmesinde 60sn ısıt işlemin yetersizliğinin yanı sıra yine yüzey kusurları veya ölçüm yapılarına kadar işlem basamaklarının biri ya da birkaçında solar hücre yaşam süresini olumsuz etkileyecek bir unsurun varlığından söz edilebilir.

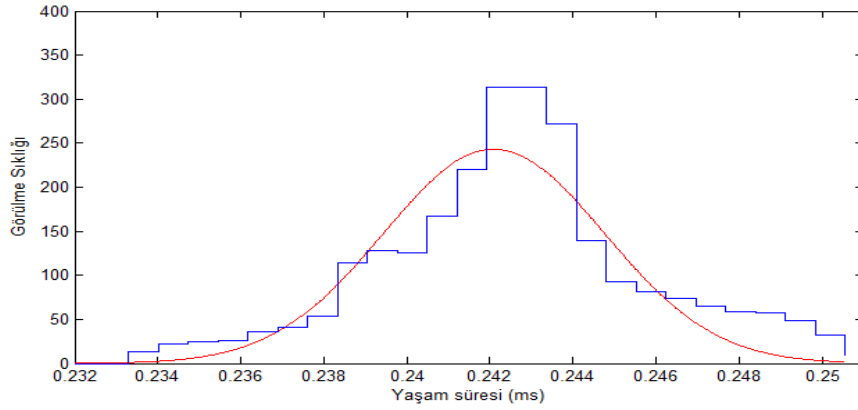
400°C’de 120sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 120sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 73.a,b ve Şekil 74’de verilmiştir.



Şekil 73. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı 4x4mm²’dir

Şekil 73’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.232-0.250ms aralığında değişim gözlenmiştir.



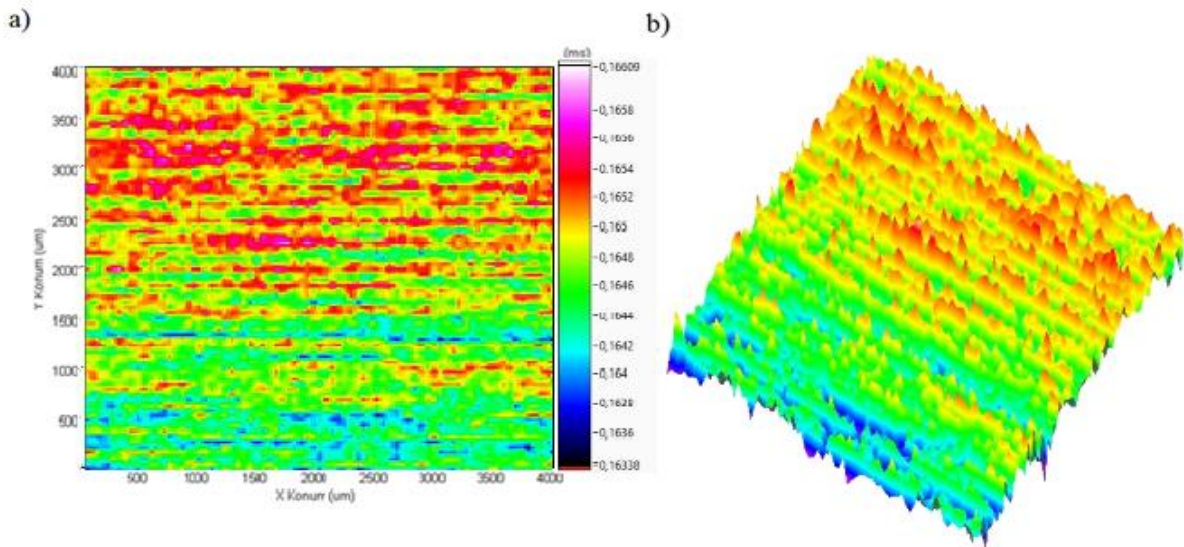
Şekil 74. 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 74’de değişim aralığı $6.6\mu s$ ve dağılımın merkezi 0.242ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi değeri beklenen şekilde yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneden yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle yüzey yapılandırmasının solar hücre yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisinin yanı sıra 400°C ve 120sn’nin RTA işlemi için optimal sonuçlar doğurduğu söylenebilir.

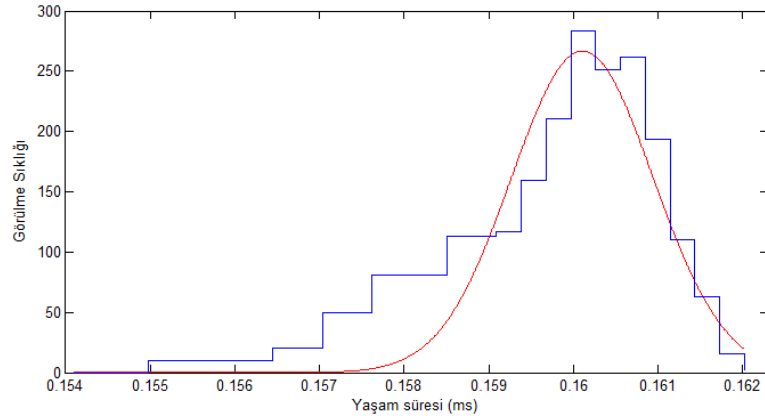
400°C’de 180 sn ısıt işlem gören numune

Solar numune Ar gaz akışı altında 400°C sıcaklıkta RTA ünitesinde 180sn tutularak ısıt işlem görmüştür. Bu numuneye ait üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey haritalamaları ile yaşam süresi dağılım grafiği sırasıyla Şekil 75.a,b ve Şekil 76’da verilmiştir.



Şekil 75. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 180sn ısıt işlem gören numuneye ait iki boyutta, (b) üç boyutta yaşam süresinin dağılımı. Örnekleme alanı $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ’dir

Şekil 75’de ölçümlerden elde edilen yaşam süresine ait verilerde 0.154-0.162ms aralığında değişim gözlenmiştir.



Şekil 76. 400°C’de 180sn ısıtım işlemi gören numuneye ait yaşam süresi dağılım grafiği

Şekil 76’da değişim aralığı 1µs ve dağılımın merkezi 0.16ms olarak görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 180sn ısıtım işlemi gören numunede yapılan ölçümden elde edilen yaşam süresi beklenen şekilde yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 180sn ısıtım işlemi gören numuneye göre yüksek çıkmıştır. Ancak 180 sn’nin bu numunelerde 400°C’de ısıtım işlemi için fazla olduğu görülmektedir.

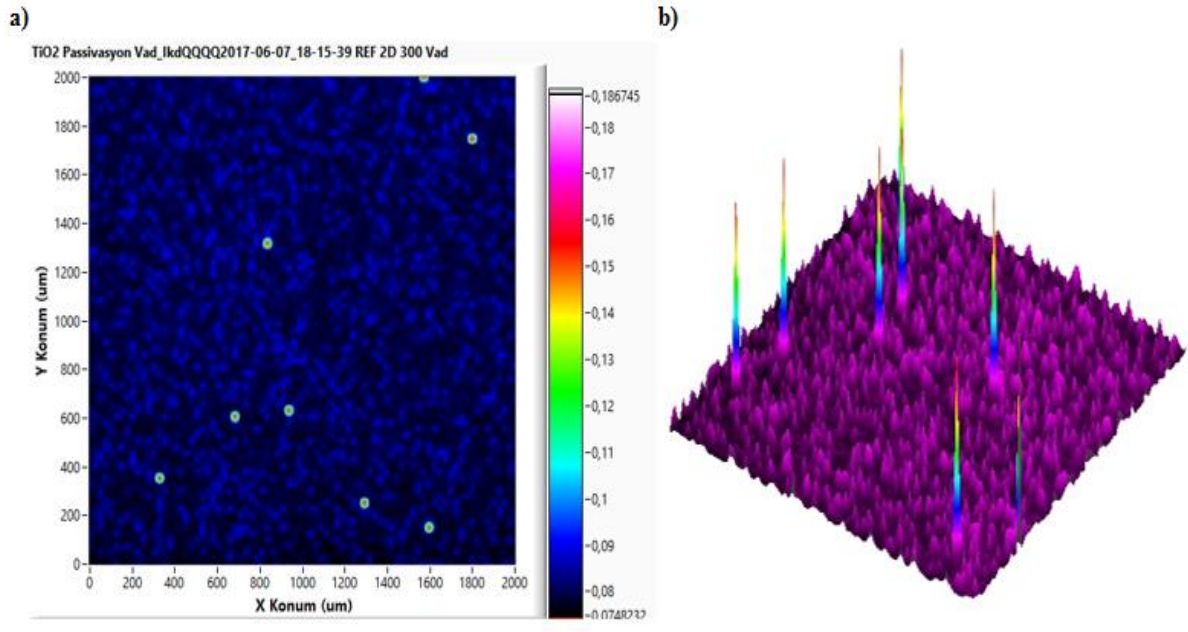
Daha önce yapılan çalışmalarda da piramit yapılandırılmış yüzey verimi yapılandırılmamış yüzeyden %3 daha fazla çıkmıştır. Bizim çalışmamızda bu sonuca uygundur (Kerr 2002).

Açık Devre Gerilimi-Kısa Devre Akımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış numunelere ait açık devre voltajı ve kısa devre akımı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde 530nm lazer ışığı kullanılmıştır. Ölçümler tüm numunelere uygulanmamış olup yalnızca en iyi ve en kötü sonuç elde edilen numuneler kullanılmıştır. Bunun yanında doğru bir performans ölçümü kıyaslaması yapabilmek için referans numunenin de açık devre voltajı ve kısa devre akımı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde 25µm adımla 124x124 matris boyutunda olan tarama işlemi ile 2x2mm² alan taranmıştır. Solar hücre verimi, çıkış gücünün açık devre gerilimi ve kısa devre akımına oranı olarak belirlendiği için açık devre gerilimi ve kısa devre akımı solar hücre dolum faktörü (FF) ve dolayısıyla solar hücre verimi üzerinde etkilidir. Bir solar hücrenin kısa devre akımı, hücrenin dahili direncinden, yani dahili kaçak akımından ötürü ışıktan üretilen akımdan daha düşüktür.

Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirilmesi

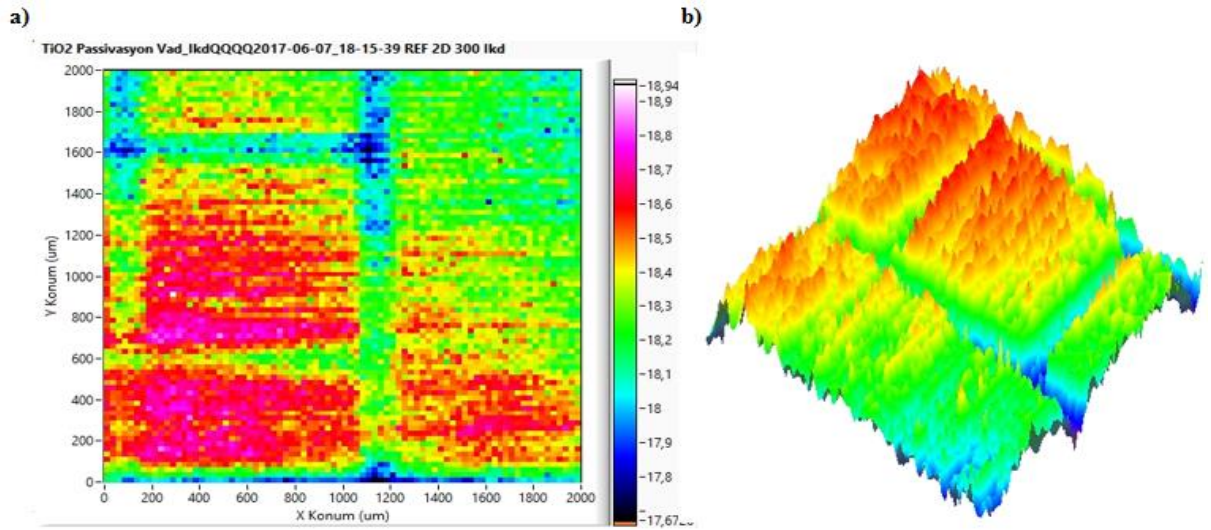
Bu bölümde yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümlerinin sonuçları değerlendirilecektir. Referans numuneye ait açık devre gerilimi ölçümüne ait görüntüler Şekil 77’de kısa devre akımı ölçümüne ait görüntüler ise Şekil 78’de iki boyutlu ve üç boyutlu gösterilmektedir.



Şekil 77. (a) Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Referans numuneye ait açık devre gerilimi maksimum 0,187 volt çıkmıştır. Solar hücre yüzeyinde birkaç noktasal bölge dışında açık devre geriliminin homojen bir şekilde dağılım gösterdiği söylenebilir. Bu noktasal bölgelerde açık devre gerilimi lokal olarak meydana gelen kusurlar sebebiyle düşmüş olabilir.

Açık devre gerilimi denklemde görüldüğü gibi solar hücre verimi ile doğru orantılı olduğundan artması olumlu bir sonuç doğurmaktadır.

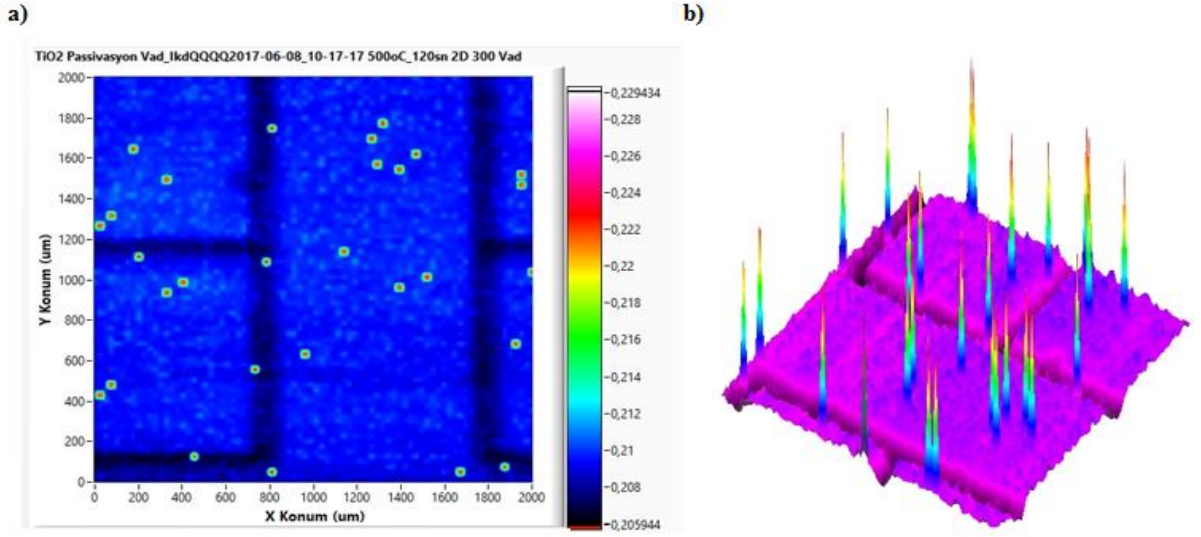


Şekil 78. (a) Yüzeyi yapılandırılmış referans numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Şekil 78’de yüzeyi yapılandırılmış referans numune $25\mu\text{m}$ adımla 80×80 matris boyutunda olan tarama işlemi ile $2\times 2\text{mm}^2$ alan taranmıştır. Referans numuneye ait kısa devre akımının en büyük değeri $18,9\mu\text{A}$ çıkmıştır. Şekil 78.a ve b’de iki boyutlu ve üç boyutlu haritalarda görüldüğü üzere yüzeyi yapılandırılmış referans numune yüzeyindeki TiO_2 ince film kaplanan kısımlarda kısa devre akımının arttığı gözlenmektedir. Si içeren solar hücre ön yüzünde ise renk spektrumunda kısa devre akımının düşük değerlerini gösteren renkler (mavi,yeşil) yer almaktadır. I_{SC} yüksek seri direnç etkisi nedeniyle ve yük taşıyıcılarının kaybına neden olan rekombinasyon nedeniyle düşer (Honsberg and Bowden, 2017). TiO_2 kaplanan bölgelerde pasivasyon meydana geldiği için rekombinasyon azalmış ve böylelikle I_{SC} değeri diğer bölgelerden yüksek çıkmış olabilir.

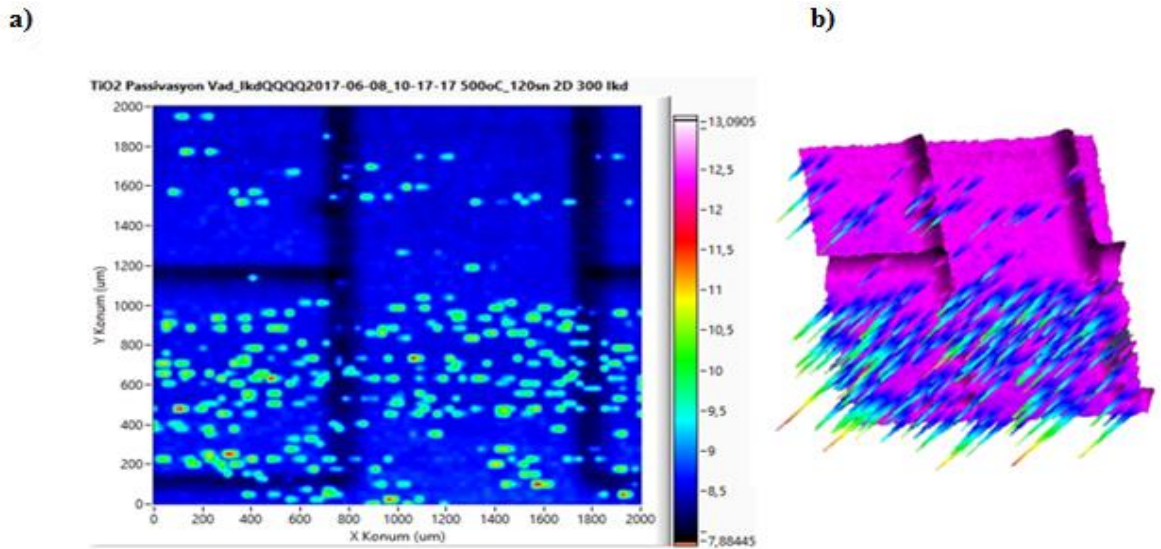
Yüzeyi yapılandırılmış 500°C 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi

Bu bölümde yüzeyi yapılandırılmış 500°C ’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümlerinin sonuçları değerlendirilecektir. Açık devre gerilimi ölçümüne ait görüntüler Şekil 79.a ve b’de kısa devre akımı ölçümüne ait görüntüler Şekil 80.a ve b’de iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gösterilmektedir.



Şekil 79. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin en yüksek değeri 0,229 volt çıkmıştır. Solar hücre yüzeyinde açık devre gerilimi hücre yüzeyinde homojen olarak çok yakın değerlere sahip çıkmış ancak birkaç noktasal bölgede o bölgelerde bulunan lokal kusurlar sebebiyle veya ortamdan kaynaklanan gürültüler sebebiyle yüksek çıkmıştır. Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numune, yapılandırılmış numuneler arasında yaşam süresi en yüksek numunedir. Beklenen şekilde bu numunede açık devre gerilimi de diğer yüzeyi yapılandırılmış numunelerden daha yüksek çıkmıştır.



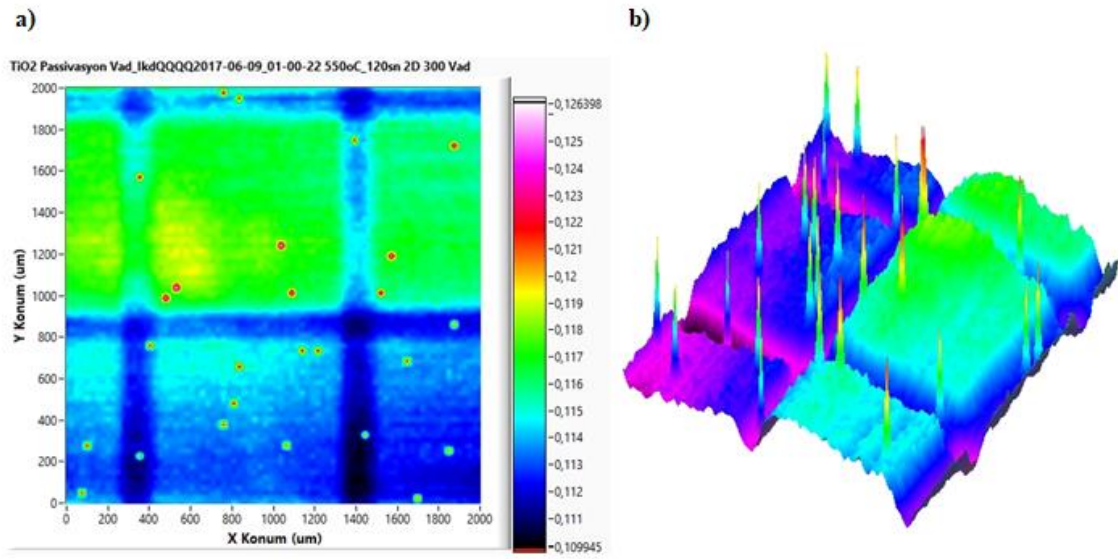
Şekil 80. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmış 500°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımı maksimum 13,09 μ A çıkmıştır. Kısa devre akımının yüksek olduğu bölgeler kontağa yakın

bölgelerdir. Şekil 80.b’de verilen üç boyutlu görüntüde omik kontağın numune yüzeyinin yarı hızasının altında kalan kısmında olduğu görülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmış 550°C 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirilmesi

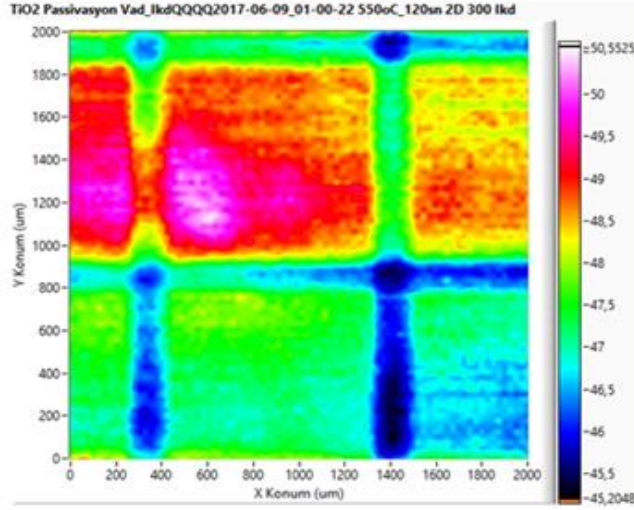
Bu bölümde yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümlerinin sonuçları değerlendirilecektir. Açık devre gerilimi ölçümüne ait görüntüler Şekil 81’de kısa devre akımı ölçümüne ait görüntüler Şekil 82’de iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gösterilmektedir.



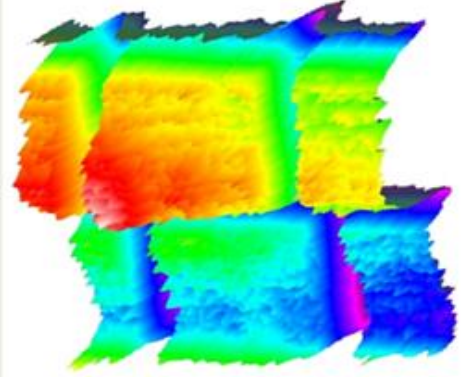
Şekil 81. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin açık devre gerilimi değeri hücre yüzeyinde maksimum 0,126V çıkmıştır. Bu numune yapılandırılmış numuneler arasında en düşük yaşam süresi değerine sahip numunedir. Açık devre gerilimi hücre verimi ile doğru orantılı olduğundan beklenen şekilde bu numune, yüzeyi yapılandırılmış numuneler arasında en düşük açık devre gerilimi değerine sahiptir. Şekil 82a ve b’de görülmektedir ki hücre yüzeyinde TiO₂ ince film kaplanan bölgenin açık devre gerilimi rengi siyaha yakın olan grid üzerindeki Si alanlardan bariz şekilde fazladır. TiO₂ ince film kaplanmış olan alanlarda pasivasyonun etkisiyle rekombinasyon düşmüş ve açık devre gerilimi artmıştır.

a)



b)



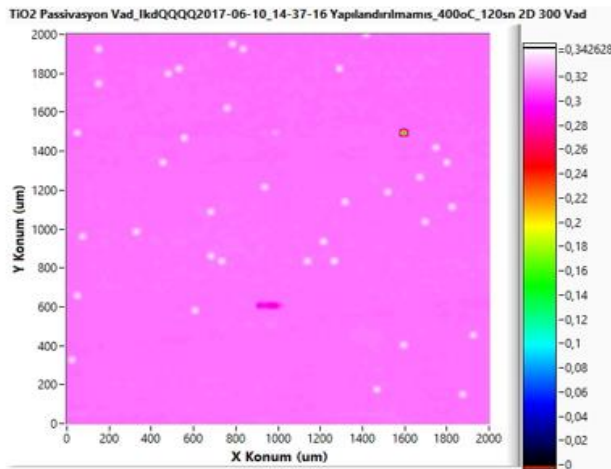
Şekil 82. (a) Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numune yüzeyinde kısa devre akımı maksimum 50,6 μ A çıkmıştır. Şekil 82a’da görülmektedir ki hücre yüzeyinde ölçümü alınan omik kontak hücrenin sol üst kısmındadır.

Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi

Bu bölümde yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümlerinin sonuçları değerlendirilecektir. Açık devre gerilimi ölçümüne ait görüntüler Şekil 83’de; kısa devre akımı ölçümüne ait görüntüler şekil 84’de iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gösterilmektedir.

a)

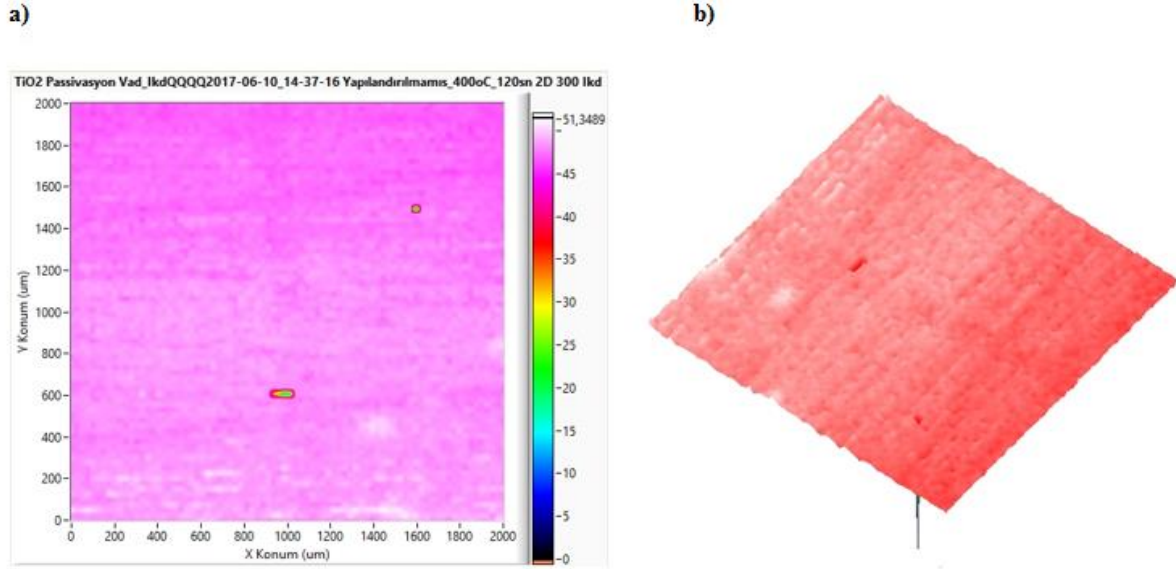


b)



Şekil 83. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin açık devre gerilimi değeri hücre yüzeyinde maksimum 0,342 V çıkmıştır. Bu numune yapılandırılmış ve yapılandırılmamış numuneler arasında yaşam süresi değeri en yüksek çıkmış olan numunedir. Pasivasyonun en iyi şekilde sonuç verdiği bu numunede açık devre gerilimi değeri de beklenen şekilde en yüksek değere sahiptir. Numuneler içinde solar performansı en iyi numune olduğu söylenebilir. Şekil 83.b’de görülen solar numunenin altında aşağı doğru açık devre geriliminin düştüğü uzantının ortamdaki gürültüden kaynaklandığı düşünülmektedir.



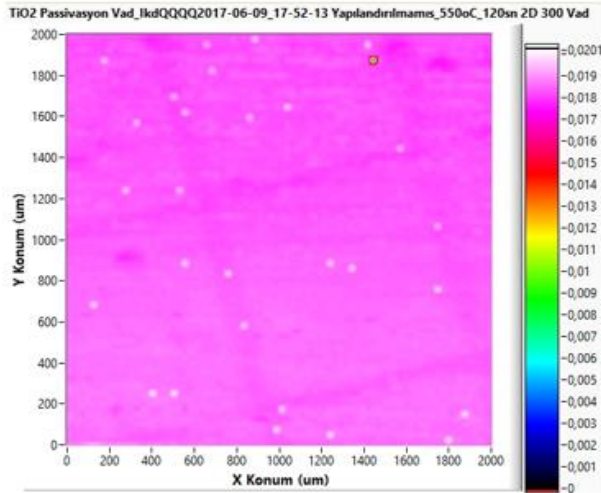
Şekil 84. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmış 400°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin kısa devre akımı değeri maksimum 51,3µA çıkmıştır. Kısa devre akımı numunenin yüzeyinde homojen bir dağılım gösterdiği için kontak bölgesi tespit edilememektedir. Şekil 84.b’de solar numunenin altında aşağı doğru kısa devre akımının düştüğü bir pik görülmektedir. Yüzeydeki bu uzantının ortamdaki gürültüden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçüm değerlendirmesi

Bu bölümde yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümlerinin sonuçları değerlendirilecektir. Açık devre gerilimi ölçümüne ait görüntüler Şekil 85’de; kısa devre akımı ölçümüne ait görüntüler Şekil 86’da iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gösterilmektedir.

a)



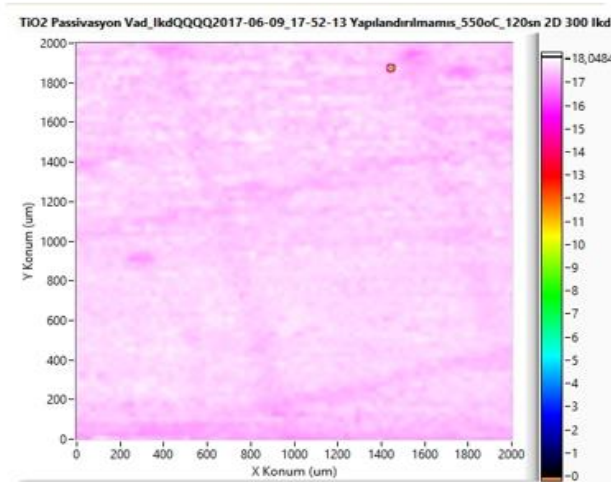
b)



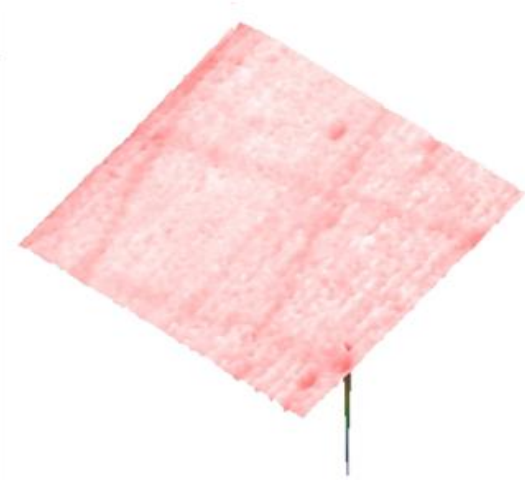
Şekil 85. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait açık devre geriliminin iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numunenin açık devre gerilimi değeri hücre yüzeyinde maksimum 0,02V çıkmıştır. Bu numune yapılandırılmamış numuneler arasında en düşük yaşam süresi değerine sahip numunedir. Açık devre gerilimi hücre verimi ile doğru orantılı olduğundan beklenen şekilde bu numune, yüzeyi yapılandırılmış numuneler arasında en düşük açık devre gerilimi değerine sahiptir. Şekil 85a ve b’de yüzeydeki TiO₂ ince film kaplı olan kısımlar az belirgin şekilde görülmektedir ve hücre yüzeyinde TiO₂ ince film kaplanan bölgenin açık devre geriliminin rengi siyaha yakın olan ızgara deseni üzerindeki Si alanlardan bariz şekilde fazla olduğu görülmektedir. TiO₂ ince film kaplanmış olan alanlarda pasivasyonun etkisiyle rekombinasyon düşmüş ve açık devre gerilimi artmıştır denebilir.

a)



b)



Şekil 86. (a) Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlem gören numuneye ait kısa devre akımının iki boyutlu, (b) üç boyutlu yüzey haritası

Yüzeyi yapılandırılmamış 550°C’de 120sn ısıt işlemleri gören numune yüzeyinde kısa devre akımı maksimum 18,04µA çıkmıştır. Kısa devre akımı bu numunenin yüzeyinde de homojen bir dağılım gösterdiği için kontak bölgesi tespit edilememektedir. Şekil 86b’de solar numunenin altında aşağı doğru kısa devre akımının düştüğü bir pik görülmektedir. Yüzeydeki bu uzantının ortamdaki gürültüden kaynaklandığı düşünülmektedir.



SONUÇLAR

Bu çalışmada yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış iki adet $n^+Si/p-Si$ solar hücre bulunmaktadır. Bu hücreler parçalara ayrılmış ve her bir parçasına önce süresi (120sn) sabit tutulup sıcaklığı değiştirilerek ve sonra sıcaklığı sabit tutulup (400°C) süresi değiştirilerek ısıtım işlemi yapılmıştır. Sabit tutulan süre literatür taramalarından elde edilmiş olup 120sn olarak belirlenmiştir (Güney et al. 2016). Ardından referans numuneyle birlikte 6 adet numunenin ölçümlerinden en iyi sonucun 400°C’de elde edildiği görülmüştür. Böylelikle ısıtım işlem süresine bağlı olarak yapılan çalışmada 400°C sabit tutulup sırasıyla 10, 30, 60, 120, 180sn süre ile numunelere ısıtım işlemi uygulanmıştır. Anlatılan bu iki işlem yüzeyi yapılandırılmış olan referans numune ile birlikte toplamda 11 adet numuneye de uygulanmıştır. Yüzey yapılandırmasının solar hücre performansına etkisini incelenmiş ve solar hücre üretimi sırasında verimi artıran ısıtım işleminin en uygun sıcaklık ve süresi değerlerini tespit edilmiştir.

Bununla birlikte yüzeyi yapılandırılmış olan numunelerden referans numuneye, en yüksek yaşam süresi değerinin elde edildiği 500°C 120sn ısıtım işlemi gören numuneye, en düşük yaşam süresi değerinin elde edildiği 550°C 120sn ısıtım işlemi gören numuneye; yüzeyi yapılandırılmamış olan numunelerden en iyi yaşam süresi değerinin elde edildiği 400°C 120sn ısıtım işlemi gören numuneye, en kötü yaşam süresi değerinin elde edildiği 550°C 120sn ısıtım işlemi gören numuneye yapılan açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümleri değerlendirilmiştir.

Isıtım İşlem Sıcaklığına Bağlı Olarak Yapılan Ölçümler

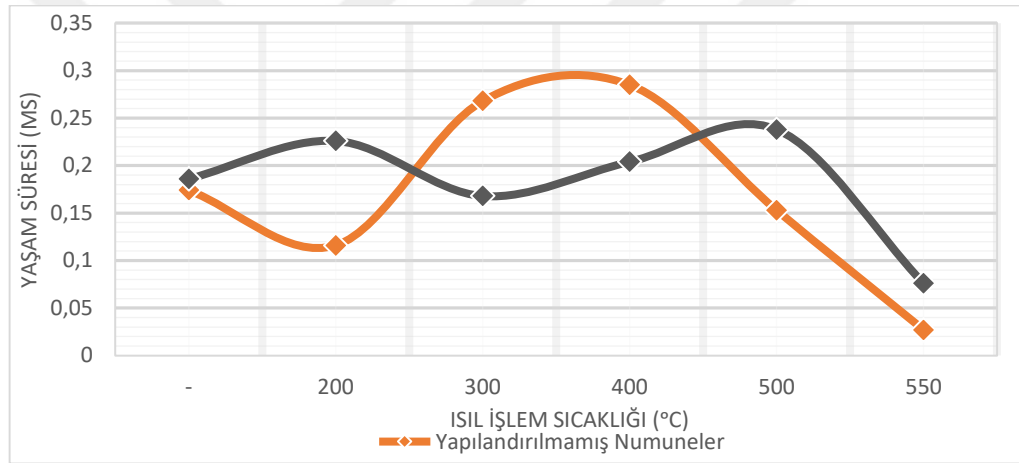
Yaşam süresi sonuçları

Yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış solar hücreleri sıcaklığa bağlı olarak 120sn boyunca ısıtım işlemi yapılmış olan yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış solar hücrelerin yaşam süresi değerleri Tablo 4’de ve grafiği Şekil 87’de verilmektedir.

Tablo 4. TiO₂ depozite edilen ve 120sn ısıtım işlemi gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış Si numunelere ait solar hücre performansı ölçümlerinden elde edilen yaşam süresi değerlerinin ısıtım işlem sıcaklığına bağlı sonuçları

NUMUNE NUMARASI	ISITIM İŞLEM SICAKLIĞI (°C)	YÜZEYİ YAPILANDIRILMAMIŞ NUMUNELER İÇİN YAŞAM SÜRESİ DEĞERLERİ (ms)	YÜZEYİ YAPILANDIRILMIŞ NUMUNELER İÇİN YAŞAM SÜRESİ DEĞERLERİ (ms)
1	-	0,174	0,186
2	200	0,116	0,226
3	300	0,268	0,168
4	400	0,280	0,204
5	500	0,153	0,238
6	550	0,027	0,076

Yüzeyi yapılandırılmamış numuneler arasında 400°C numuneler için en verimli sonucun elde edilmiş olduğu ideal ısıtım işlem sıcaklık değeridir. Yüzeyi yapılandırılmış olan numuneler için ideal ısıtım işlem sıcaklık değeri ise 500°C’dir.



Şekil 87. 120sn ısıtım işlemi gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olan Si numunelere ait yaşam süresi değerlerinin ısıtım işlem sıcaklığına bağlılığının grafiksel gösterimi

Isıtım İşlem Süresine Bağlı Olarak Yapılan Ölçümler

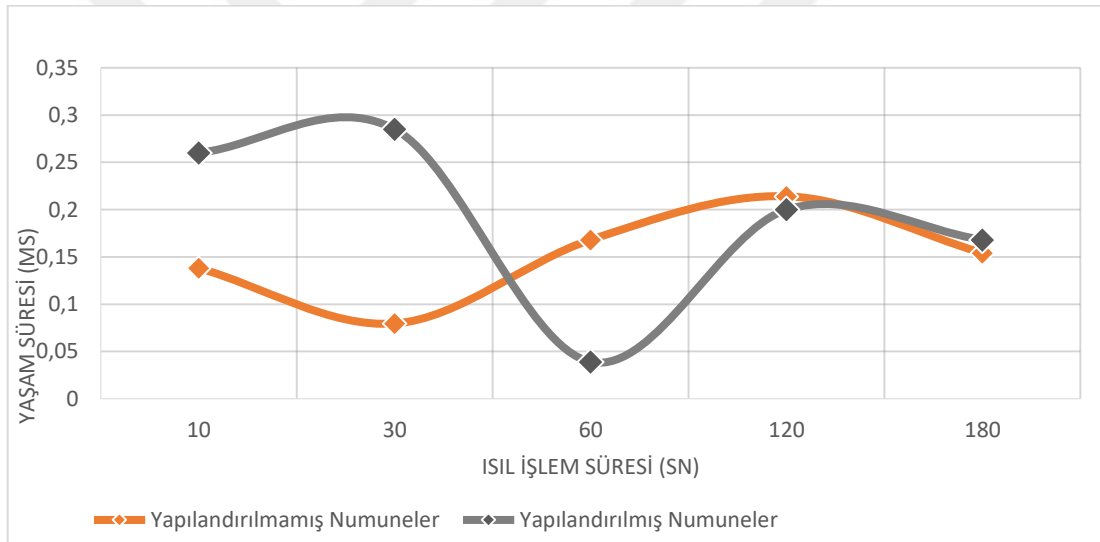
Yaşam süresi sonuçları

Yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış solar hücreleri ısıya bağlı olarak 400°C sıcaklıkla ısıtım işlemi yapılmış olan yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış solar hücrelerin yaşam süresi değerleri Tablo 5’de ve grafiği Şekil 88’de verilmektedir.

Tablo 5. TiO₂ depozite edilen ve 400°C’de ısıtıl işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış Si numunelere ait solar hücre performansı ölçümlerinden elde edilen yaşam süresi değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklığına bağlı sonuçları

NUMUNE NUMARASI	ISIL İŞLEM SÜRESİ (sn)	YÜZEYİ YAPILANDIRILMAMIŞ NUMUNELER İÇİN YAŞAM SÜRESİ DEĞERLERİ (ms)	YÜZEYİ YAPILANDIRILMIŞ NUMUNELER İÇİN YAŞAM SÜRESİ DEĞERLERİ (ms)
1	10	0,138	0,26
2	30	0,0795	0,285
3	60	0,168	0,039
4	120	0,214	0,2
5	180	0,154	0,168

Yüzeyi yapılandırılmış numuneler arasında 120sn numuneler için en verimli sonucun elde edilmiş olduğu ideal ısıtıl işlem süresidir. Yüzeyi yapılandırılmış olan numuneler için en yüksek yaşam süresi 30sn ısıtıl işlem gören numunede elde edilse de bu numunede yaşam süresi beklenmedik şekilde yükseldiğinden en ideal süre 120sn olarak tespit edilmiştir.



Şekil 88. 400°C’de ısıtıl işlem gören yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olan Si numunelere ait yaşam süresi değerlerinin ısıtıl işlem süresine bağlılığının grafiksel gösterimi

Değerlendirmelerin sonucunda yüzeyi yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olan tüm numunelerde TiO₂ kaplanarak pasive edilen bölgelerde yaşam süresi verilerinin TiO₂ kaplama yapılmayan bölgelerden daha yüksek çıktığı dolayısıyla pasivasyonun yaşam süresi üzerindeki olumlu etkisi gözlemlendi. Yüzeyi yapılandırılmamış numuneler arasında yaşam süresi en iyi olarak ölçülen numuneye ait RTA işlem sıcaklığı ve süresi literatüre de uygun olarak 400°C 120sn olduğu tespit edildi. Yüzeyi yapılandırılmış olan numunelerden en yüksek yaşam süresine sahip olan numuneye uygulanan işlem süresi 500°C 120sn olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle optimum yaşam süresinin elde edilebilmesi için yüzeyi yapılandırılmış numunenin yapılandırılmamış numuneye oranla yapılan RTA işlem sıcaklığının artırılması gerektiği savunulmaktadır. Tüm ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre optimum yaşam süresi

400°C 120sn ısıtıl işlem gören yüzeyi yapılandırılmamış numuneye aittir. Yüzeyi yapılandırılmamış olan bu numunede yüzeyi yapılandırılmış olan tüm numunelere oranla daha yüksek yaşam süresi elde edilmesinin sebebi olarak bu numunede yapılan pasivasyon işlemi diğer numunelerden daha başarılı olarak gerçekleştirilmiştir denilebilir. Solar hücre yaşam süresinde iyileştirmeler yapabilmek için yaşam süresini düşüren kusurların noktasal olarak tespit edilmesi bu sorunların oluşma sebebinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Bu çalışmada kullanılan iki boyutlu yüzey haritalama karakterizasyon tekniğinin sunmuş olduğu avantaj solar hücrede var olan kusurların noktasal bazda tespit edilebilmesi ve karakterizasyonun daha iyi elde edilmesidir. Dolayısıyla yaşam süresinin düşük olarak tespit edildiği noktada var olan kusurun sebebi daha rahat anlaşılabilir ve iyileştirme çalışmaları buna yönelik olarak yapılabilir. Bu yorumdan hareketle bu çalışmada kullanılan iki boyutlu haritalama karakterizasyon tekniğinin solar tabanlı tüm çalışmalarda kullanılabileceği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Aberle, A., 2000. Crystalline Silicon Solar Cells: Advanced Surface Passivation and Analysis. Progress in Crystalline Silicon Solar Cells, 8(5), 473-487.
2. Angusmacleod, H., 2013. Recent developments in deposition techniques for optical thin films and coatings. In Optical Thin Films and Coatings (pp. 3-25). Woodhead Publishing.
3. Altermatt, P. P., Sinton, R. A., and Heiser, G., 2001. Improvements in numerical modelling of highly injected crystalline silicon solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, (65), 149-155.
4. Ameer, S. A. M. S. B. F. A., 2015. Fabrication of Light Trapping Thin Film Structure for Efficient Si Solar Cell by Laser Treatment. International Journal of Science and Research (IJSR), 6(3), 2008-2012.
5. Auger, P., 1923. Sur les rayons β secondaires produits dans un gaz par des rayons X, C.R.A.S., France, 169-171.
6. Augusto, A., Herasimenka, S. Y., King, R. R., Bowden, S. G., Honsberg, C. (2017). Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset. Journal of Applied Physics, 121(20), 205704.
7. Bailey, W. L., Coleman, M. G., Harris, C. B., and Lesk, I. A., 1979. Texture etching of silicon: method .United States Patent: 4137123 , USA.
8. Balaji, N., Hussain, S. Q., Park, C., Raja, J., Yi, J., Jeyakumar, R. (2015). Surface Passivation Schemes for High-Efficiency c-Si Solar Cells-A Review. Trans Electr Electro, 16(5), 227-233.
9. Barranco, A., Borrás, A., Gonzalez-Elipe, A. R., and Palmero, A., 2016. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices. Progress in Materials Science, 76, 59-153
10. Bauer, G., 1934. Absolutwerte der optischen Absorptionskonstanten von Alkalihalogenidkristallen im Gebiet ihrer ultravioletten Eigenfrequenzen. Annalen der Physik, 411(4), 434 – 464.
11. Bonilla, R. S., Reichel, C., Hermle, M., Martins, G., and Wilshaw, P. R., 2015. Extrinsic passivation of silicon surfaces for solar cells. Energy Procedia, 77, 774-778.
12. Brillson, L. J., & Lu, Y., 2011. ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts. Journal of Applied Physics, 109(12), 8.
13. Campbell, R. P. and Green, M. A., 2001. High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 65(1-4), 369 – 375.
14. Carson, J.A., 2008. Solar Cell Research Progress. Nova Science Publishers, Inc., 331, New York.
15. Chen, F., Wang, L. (2011). Light trapping design in silicon-based solar cells. In Solar Cells-Silicon Wafer-Based Technologies. InTech.
16. Chen, J., 2015. Recent Developments on Silicon Based Solar Cell Technologies and their Industrial Applications, Energy Efficiency Improvements in Smart Grid Components, Ed: Prof. Moustafa Eissa , P.R. China, 271-286.
17. Crotty, G., Daud, T., Kachare, R. (1987). Front surface passivation of silicon solar cells with antireflection coating. Journal of applied physics, 61(8), 3077-3079.
18. Desa, M. M., Sapeai, S., Azhari, A. W., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Amin, N., Zaidi, S. H., 2016. Silicon back contact solar cell configuration: A pathway towards higher efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 1516-1532.

19. Diebold, U., 2003. The surface science of titanium dioxide. *Surface science reports*, 48(5-8), 53-229.
20. Dittrich, T., Muffler, H. J., Vogel, M., Guminskaya, T., Ogacho, A., Belaidi, A., ... Lux-Steiner, M. C., 2005. Passivation of TiO₂ by ultra-thin Al-oxide. *Applied surface science*, 240(1-4), 236-243.
21. Dixit, S. G., 1977. Fabrication of textured surface solar cells with the help of anisotropic etching. MS Thesis, University of Arizona, USA.
22. El Amrani, A., Bekhtari, A., El Kechai, A., Menari, H., Mahiou, L., Maoudj, M., 2015. Efficient passivation of solar cells by silicon nitride. *Vacuum*, 120, 95-99.
23. Gad, K. M., Vössing, D., Richter, A., Rayner, B., Reindl, L. M., Mohnney, S. E., and Kasemann, M., 2016. Ultrathin titanium dioxide nanolayers by atomic layer deposition for surface passivation of crystalline silicon. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(3), 649-653.
24. Gangopadhyay, U., Kim, K. H., Dhungel, S. K., Manna, U., Basu, P. K., Banerjee, M., Yi, J., 2006. A novel low cost texturization method for large area commercial mono-crystalline silicon solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 90(20), 3557-3567.
25. Geng, H., Lin, T., Letha, A. J., Hwang, H. L., Kyznetsov, F. A., Smirnova, T. P., Kaichev, V. V., 2014. Advanced passivation techniques for Si solar cells with high- κ dielectric materials. *Applied Physics Letters*, 105(12), 123905.
26. Gordon, I., Van Gestel, D., Van Nieuwenhuysen, K., Cernel, L., Beaucarne, G., Poortmans, J., 2005. Thin-film polycrystalline silicon solar cells on ceramic substrates by aluminium-induced crystallization. *Thin Solid Films*, 487(1), 113-117.
27. Gray, J. L., 2005. The Physics of the Solar Cell. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Second Edition ,eds A. Luque and S. Hegedus). Chichester, UK, 82-128.
28. Green, M. A., 2009. The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(3), 183-189.
29. Güney, H. Y., Avdan, Z., & Yetkin, H., 2019. Optimization of annealing temperature and the annealing effect on life time and stability of P3HT: PCBM-based organic solar cells. *Materials Research Express*.
30. Hall, R. N., 1952. Electron-Hole Recombination in Germanium, *Physical Review*, USA, 387-388.
31. Hamel, A., 2016. Improvement of quantum efficiency using surface texture of solar cell in the form of pyramid. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(1), 69-73.
32. Hannachi, A., Segura, A., and Maghraoui-Meherzi, H., 2016. Growth of manganese sulfide (α -MnS) thin films by thermal vacuum evaporation: Structural, morphological and optical properties. *Materials Chemistry and Physics*, 181, 326-332.
33. Hassanien, A. S., and Akl, A. A., 2016. Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films. *Superlattices and Microstructures*, 89, 153-169.
34. He, G., Fang, Q., Zhu, L., Liu, M., Zhang, L., 2004. The structure and thermal stability of TiO₂ grown by the plasma oxidation of sputtered metallic Ti thin films. *Chemical physics letters*, 395(4-6), 259-263.
35. Honsberg, C. B., Corkish, R., and Bremner, S. P., 2001. A New Generalized Detailed Balance Formulation to Calculate Solar Cell Efficiency Limits. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany.
36. Honsberg, C., Bowden, S., 2016. Diffusion Length. QESST-NSF-DOE Engineering Research Center, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/diffusion-length> (7.11.2016).
37. Honsberg, C., Bowden, S., 2016. Short Circuit Current. QESST-NSF-DOE Engineering Research Center, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/short-circuit-current> (20.04.2017).

38. Jilani, A., Abdel-wahab, M. S., Hammad, A. H., 2017. Advance Deposition Techniques for Thin Film and Coating. In Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings. InTech.
39. Kerr, M. J., 2002. Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells. Doktora Tezi, Australian National University, Avustralya.
40. Kerr, M. J., Cuevas, A., 2002. General parameterization of Auger recombination in crystalline silicon. Journal of Applied Physics, 91(4), 2473-2480.
41. Hezel, R., Krimmel, E. F., 1991. Si Silicon: Silicon Nitride in Microelectronics and Solar Cells. Springer Berlin Heidelberg, Almanya.
42. Kumar, R. A., Das, C., Lekha, P. C., Asokan, S., Sanjeeviraja, C., Padiyan, D. P., 2014. Enhancement in threshold voltage with thickness in memory switch fabricated using GeSe_{1.5}S_{0.5} thin films. Journal of Alloys and Compounds, 615, 629-635.
43. Liu, G., Ren, P., Zhang, D., Wang, W., and Li, J. 2016. Investigation of near-surface defects induced by spike rapid thermal annealing in c-silicon solar cells. Surface Review and Letters, 23(02), 1550107.
44. Luque, A., Sala, G., Palz, W., dos Santos, G., and Helm, P., 2012. Tenth EC Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceedings of the International Conference, Held at Lisbon, Portugal, 8–12 April 1991. Springer.
45. Malligavathy, M., Kumar, R. A., Das, C., Asokan, S., Padiyan, D. P., 2015. Growth and characteristics of amorphous Sb₂Se₃ thin films of various thicknesses for memory switching applications. Journal of Non-Crystalline Solids, 429, 93-97.
46. Nagel, H., Aberle, A. G., and Hezel, R., 1999. Optimised antireflection coatings for planar silicon solar cells using remote PECVD silicon nitride and porous silicon dioxide. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 7(4), 245-260.
47. Nelson, J., 2003. The Physics of Solar Cell. London, 363, UK.
48. NREL, 2015. Best Research Solar Cell Efficiencies. National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (25.03.2016)
49. Orava, J., Kohoutek, T., Wagner, T. (2014). Deposition techniques for chalcogenide thin films. In *Chalcogenide Glasses*, 265-309. Woodhead Publishing.
50. Öztürk, Z. N., 2016. Passivated Emitter Rear Side Contact Solar Cells. Doktora tezi, Middle East Technical University.
51. Rafea, M. A., Farid, H., 2009. Phase change and optical band gap behavior of Se_{0.8}S_{0.2} chalcogenide glass films. Materials Chemistry and Physics, 113(2), 868-872.
52. Rahman, M. Z., and Khan, S. I., 2012. Advances in surface passivation of c-Si solar cells. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 1(1), 1.
53. Richards, B. S., Cotter, J. E., Honsberg, C. B., Wenham, S. R., 2000. Novel uses of TiO₂/sub 2/in crystalline silicon solar cells. In Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE (pp. 375-378).
54. Richards, B. S., Cotter, J. E., and Honsberg, C. B., 2002. Enhancing the surface passivation of TiO₂ coated silicon wafers. Applied physics letters, 80(7), 1123-1125.
55. Richards, B. S., 2002. Novel uses of titanium dioxide for silicon solar cells. Center for Photovoltaic Engineering.
56. Salomé, P. M. P., Rodriguez-Alvarez, H., Sadewasser, S., 2015. Incorporation of alkali metals in chalcogenide solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 143, 9-20.
57. Sangeetha, B. G., Joseph, C. M., Suresh, K., 2014. Preparation and characterization of Ge₁Sb₂Te₄ thin films for phase change memory applications. Microelectronic Engineering, 127, 77-80.
58. Schmidt, J., Werner, F., Veith, B., Zielke, D., Steingrube, S., Altermatt, P. P., ...Brendel, R., 2012. Advances in the surface passivation of silicon solar cells. Energy Procedia, 15, 30-39.

59. Shockley, W. and Read, W. T., 1952. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons, *Physical Review* , ed: M. Thoennessen ,USA, 835-842 .
60. Sinton, R. A. and Swanson, R. M., 1987. Recombination in highly injected silicon, *Electron Devices. IEEE Transactions* , (34), 1380 – 1389.
61. Sproul, A., 2003. Understanding the p-n junction. Resources for the secondary science teacher, http://www2.pv.unsw.edu.au/nsite-files/pdfs/UNSW_Understanding_the_p-n_Junction.pdf(19.07.2017).
62. Swanson,R., 2005. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake buena Vista, FL, USA.
63. Swanson, R. M., Verlinden, P. J., & Sinton, R. A., 1999. U.S. Patent No. 5,907,766. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
64. Swatowska, B., Stapinski, T., Drabczyk, K., Panek, P., 2011. The role of antireflective coatings in silicon solar cells–the influence on their electrical parameters. *Optica Applicata*, 41(2), 487-492.
65. Thomson, A. F., McIntosh, K. R., 2012. Light-enhanced surface passivation of TiO₂-coated silicon. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(3), 343-349.
66. Thosar, A. J., Thosar, M., Khanna, R. K. (2014). Optimization of anti-reflection coating for improving the performance of GaAs solar cell. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(5), 637.
67. Vineis, C., Levy-Finklshtein, M., Carey, J., Knight, G., Wefringhaus, E., Harney, R. Ultrafast laser texturing for enhanced solar cell performance and lower cost.
68. Zhao, J., Wang, A., Green, M. A., 1999. 24· 5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24· 7% efficiency PERL cells on FZ substrates. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7(6), 471-474.
69. Wang, G., Nie, Q., Shen, X., Chen, F., Li, J., Zhang, W., and Dai, S. 2012. Phase change and optical band gap behavior of Ge–Te–Ga thin films prepared by thermal evaporation. *Vacuum*, 86(10), 1572-1575.
70. Weber, E.R., 1982. Transition metals in silicon. *Applied Physics A*, 30.1 (1983), 1-22.
71. Ximello Quiebras, J. N., 2013. Wet chemical textures for crystalline silicon solar cells. *Doktora tezi*, Faculty of Sciences Department of Physics, Almanyia.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Zeynep Elif GÜLDÜREN
Doğum tarihi:	18 Kasım 1993
Doğum Yeri:	Palandöken/ERZURUM
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Tel:	05422667552
E-mail:	zeynepelifozerbas@hotmail.com
Eğitim	
Lise:	Niğde Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi
Lisans:	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İleri
Çalıştığı Kurumlar:	
(01.01.2014-31.05.2015) Kayseri Efektif Enerji A.Ş	
(30.10.2015-30.10.2015) Tübitak AR-GE Projesi Asistanlığı	