

**Ultra-İnce Silisyum Üzerinde Üretilen Silisyum Nanotellerin
Güneş Gözesi Uygulaması**

Program Kodu: 1002

Proje No: 115M155

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Hüsnü Emrah ÜNALAN

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. Raşit TURAN

Bursiyer(ler):

Dr. Pantea AURANG

Ağustos 2016
ANKARA

Önsöz

“Ultra-İnce Silisyum Üzerinde Üretilen Silisyum Nanotellerin Güneş Gözesi Uygulaması” başlıklı proje çalışmaları Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) desteği ile (Proje No: 115M155) yürütülmüştür.

Fotovoltaik teknolojilerin geleceğin artan enerji ihtiyaçlarına en etkin şekilde cevap vereceği düşünülmektedir. Laboratuvarlarda birçok güneş gözesi türü üretilmiş ve test edilmiş olsa da, ticari olarak halen birinci nesil silisyum bazlı gözeler etkindir. Silisyum, oldukça kararlı ve ucuzdur. Oksijenden sonra doğada en çok bulunan elementtir. Ayrıca, tranzistör gibi elektronik cihazlarda da kullanılması sebebiyle silisyumun işlenmesi ile ilgili şimdiye kadar yoğun bilgi birikimi ve tecrübe elde edilmiştir. Dolayısıyla silisyum güneş gözelerinin bir diğer avantajı yüksek verimlerinin yanısıra üretim teknolojisindeki olgunluktur.

Gözelerin üretiminde günümüzde genellikle 180 µm kalınlığındaki pullar kullanılmaktadır ve kullanılan silisyum miktarını ya da pul kalınlığını azaltmak göze maliyetini azaltmak için etkin bir yöntemdir. Ancak, pul kalınlığının azaltılması ile düşen ışık emilimi ihmal edilmemelidir. Bu doğrultuda başlatılan araştırma projemizde homoeklemlenmiş ultra-ince silisyum üzerinde üretilen silisyum nanotellerle güneş gözeleri geliştirilmiştir. Göze yüzeyine dik hizalı silisyum nanoteller ışığı hapsedme amacıyla çözelti esaslı yöntemle üretilmiştir.

Bu projenin çıktılarını bir doktora tezine konu olmuş, bir uluslararası kongre bildirisi sunulmuştur. Proje sonuçlarının kullanıldığı bir bilimsel makale sunulmak üzere hazırlanmaktadır. Projenin yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında katkılarından dolayı proje araştırma ekibini oluşturan Prof. Dr. Raşit Turan’ a ve doktora öğrencisi ve sonradan doktora sonrası araştırmacı olarak çalışan Dr. Pantea Aurang’ a teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla,

Doç. Dr. H. Emrah Ünal

Ağustos 2016, Ankara

İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	ii
Şekil Listeleri.....	iv
Tablo Listelri.....	vi
Özet.....	vii
Abstract.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 Güneş Gözelerinde İnce Silisyum Uygulamaları.....	3
2.2 Silisyumun İztropik ve Anizotropik Dağlanması.....	6
2.3 Güneş Gözeleri İçin Bir Boyutlu Nanoyapılar.....	7
2.4 Geleneksel Silisyum Nanotel Sentez Yöntemleri.....	8
2.4.1 Kimyasal Dağlama Yöntemi Mekanizmaları ve Reaksiyonları.....	9
2.4.2 Silisyum Nanotellerin Güneş Gözelerinde Kullanılması.....	11
3.GEREÇ VE YÖNTEM.....	15
3.1 Ultra-İnce Silisyumun Üretilmesi.....	15
3.1.1 Silikon Nitrür ile Pencerelelerin Tanımlanması (Mor Ötesi Fotolitografi).....	15
3.1.2 Potasyum Hidroksit (KOH) Aşındırması.....	16
3.2 Silisyum Nanotellerin Üretimi.....	17
3.3 Ultra-İnce Silisyum Pullar Üzerinde Üretilen Nanotellerle Üretilen Güneş Gözeleri.....	20
4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	22
4.1 Aşındırma Hızı ve Ultra-İnce Pulların Yüzey Pürüzlülüğü.....	22
4.2 Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Özellikleri.....	26
4.2.1 Optik Ölçümler.....	27
4.2.2 Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Akım Yoğunluğu - Voltaj Karakteristikle.....	29
4.2.3 Harici Kuantum Verimi.....	31
4.2.4 Üst Kontaklı Optimize Edilmiş Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Akım Yoğunluğu-Voltaj Karakteristikleri.....	32
4.2.5 EQE Üst Kontak Optimizasyonundan Sonra Harici Kuantum Verimi Ölçümleri.....	34
5.SONUÇLAR.....	36
6. KAYNAKLAR.....	38

Şekil Listeleri

- Şekil 1.** Ticari fovolttaik teknolojilerin performans ve fiyat kıyaslaması grafiği (UC of santa barbara, 2016).....3
- Şekil 2.** İnce silisyum esaslı üretim yöntemlerinden bazılarının şematik gösterimi. (a) Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile ince tabaka silisyum kaplanarak üretilen gözeler (Yomomoto vd., 1997), (b) gözenekli silisyum tabakası üzerinden kaldırılarak üretilen gözeler (Bergmann vd., 2001) ve (c) IMEC' in slim-cut yöntemi (Dross vd., 2007)4
- Şekil 3.** Silisyum maliyeti ve göze verimliliğinin hücre kalınlığı ile değişimi grafiği (Tiedje vd., 1984).....5
- Şekil 4.** İzotropik ve anizotropik silisyum aşındırmasının şematik gösterimleri (Lei vd., 2014) 6
- Şekil 5.** (a) Radyal, (b) eksen boyunca ve (c) alttaştan eklemlili nanotelli güneş gözelerinin şematik gösterimi7
- Şekil 6.** Silisyum nanotellerin üretiminde kullanılan yöntemler.....8
- Şekil 7.** Kimyasal dağlama yönteminin kesit ve üstten şematik gösterimi. (a), (b) Ag^+ iyonlarının silisyum yüzeyi ile temas geçtiği an. (c), (d) dikey olarak dağlanan silisyumun nanotelleri üretmesi. (e), (f) Gümüş dendritlerden arındırıldıktan sonra kesitten ve üstten alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Ozdemir vd., 2011a).....10
- Şekil 8.** Gümüş dendritler arındırılmadan önce kimyasal dağlama yöntemi ile üretilen silisyum nanoteller (Ozdemir vd., 2011a)10
- Şekil 9.** (a) 10 cm' lik silisyum pulun kimyasal dağlama öncesi (sağda) ve sonrası (solda) fotoğrafı. (b) Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen silisyum pulların dalga boyu bağımlı yansıma ölçümü grafiği (Ozdemir vd., 2011b).....12
- Şekil 10.** (a) Heteroeklemlili güneş gözelerinin şematik gösterimi, (b) akım–voltaj karakteristiği ve (c) harici kuantum verimliliği. Nanotelsiz gözelerin verileri de kıyaslama amaçlı verilmiştir. (d) Göze veriminin nanotellerin uzunluğu ile değişimi grafiği (Ozdemir vd., 2011b).....13
- Şekil 11.** Silisyum nanotellerin endüstriyel boyutlardaki güneş gözesinde uygulamaları. (a) Gözelerin nanotelli ve nanotelsiz fotoğrafları ile nanotellerin üst kontakla temas halindeykenki SEM görüntüsü. (b) Gözelerin farklı uzunluklardaki nanoteller ile akım-voltaj karakteristikleri ve (c) harici kuantum verimlilikleri (Kulakci vd., 2013)14
- Şekil 12.** Si_3N_4 kaplı 10 cm çaplı silisyum pulun litografi sonrası fotoğrafı16
- Şekil 13.** Nitrat maskesi ile ince silisyum üretiminin basamak basamak şematik gösterimi... 16
- Şekil 14.** 20 μm kalınlığındaki ultra-ince silisyum pulun fotoğrafları. Esnek silisyum pulun cımbızla bükülmüş hali (solda) ve arkasından lazer ışığı tutulmuş hali (sağda)17

Şekil 15. (a) KOH ile aşındırılarak elde edilen ultra-ince silisyum pulun nanotel üretimi öncesi (solda) ve sonrası (sağda) fotoğrafı. (b) 20 µm kalınlığındaki ultra-ince silisyum pulun üzerinde nanoteller üretildikten sonraki kesit SEM görüntüsü.19	
Şekil 16. Üretilen silisyum nanotellerin iki farklı büyütmeye TEM görüntüleri.20	
Şekil 17. Şematik olarak gözelerin üretiminde kullanılan basamaklar21	
Şekil 18. 80°C sabit sıcaklıkta aşındırma hızı ve silisyum pulların yüzey pürüzlülüğünün KOH konsantrasyonu değişimi grafiği. Çizgiler görsel yardım içindir22	
Şekil 19. Ağırlıkça %50 sabit çözelti konsantrasyonunda sıcaklıkla aşındırma hızı ve silisyum pulların yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Çizgiler görsel yardım içindir23	
Şekil 20. Üretilen farklı kalınlıklardaki (a) 5,8, (b) 8,5 and (c) 11 µm ultra-ince silisyum pulların kesit SEM görüntüleri24	
Şekil 21. (a) 80 ve (b) 90°C' de ağırlıkça %50' lik KOH çözeltisi kullanılarak üretilen ultra-ince silisyum pulların AFM yüzey görüntüleri.....25	
Şekil 22. Üretilen ultra-ince (solda) ve esnek (sağda) silisyum güneş gözelerinin fotoğrafları.26	
Şekil 23. Üretilen ultra-ince güneş gözelerinin kesit SEM görüntüsü26	
Şekil 24 Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen 25 µm kalınlığındaki silisyum pulların (a) geçirim ve (b) yansıma spektrası27	
Şekil 25. Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen 25 µm kalınlığındaki silisyum pulların ortalama ağırlıklı yansıma değerleri grafiği28	
Şekil 26. Nanotelli gözelerin gümüş üst kontağın doğrudan nanotellerin üzerine atılması ile üretilen gözelerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri29	
Şekil 27. Tavlama sonrası topaklanan üst kontak metalinin SEM görüntüsü30	
Şekil 28. Nanotelli ve nanotelsiz ultra-ince silisyum gözelerin harici kuantum verim grafiği. Grafikte karşılaştırma amaçlı 180 µm kalınlığında standard gözeye ait değerler de verilmiştir.31	
Şekil 29. Üst kontağın optimizasyonundan sonra nanotelli gözelerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri32	
Şekil 30. Üst kontağın optimizasyonundan sonra nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin harici kuantum verim grafiği33	

Tablo Listeleri

Tablo 1. Nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin parametreleri.....	29
Tablo 2. Üst kontak optimizasyonundan sonra nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin parametreleri	32

Özet

Silisyum bazlı gözelerin üretiminde kullanılan silisyum kalınlığının düşürülmesi üretim maliyetinin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, ince cihazlardaki kısa taşıma mesafeleri, elde edilen açık devre voltajının artmasını ve yeniden birleşme ihtimalinin azalmasını sağlamaktadır. Ancak, ince filmler düşük ışık emilimine sahiptir; makul verime ulaşmaları ve rekabetçi olmaları için gelişmiş ışık tutma stratejileri geliştirilmelidir.

Bu projede, ultra-ince silisyum pullar (25 μm) potasyum hidroksit (KOH) ile kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Ardından, ince pullardaki düşük ışık emilimini artırmak için ultra-ince silisyum yüzeyine dik hizalı silisyum nanoteller metal yardımcı aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Üzerinde nanotel üretilen ultra-ince pulların optik emiliminin arttığı ve bu etkinin ince pullarda daha çok olduğu gözlenmiştir. 25 μm kalınlığındaki pulun üzerine üretilen 1 μm boyundaki nanoteller ile yüzeyden ışığın geri yansımaları %51 oranında azaltılmıştır. Üzerinde nanotel üretilen ultra-ince pullar daha sonra güneş gözesi üretiminde kullanılmış ve fosforil klorür (POCl_3) ile aşılansmıştır. Gözelerin akım yoğunluğu-voltaj (J-V) ve harici kuantum verimliliği ölçümleri ön ve arka kontakların kaplanması sonrasında gerçekleştirilmiştir. Nanotel uzunluğunun gözelerin J-V karakteristiklerine ve göze verimine etkisi incelenmiştir. Üst kantağın optimizasyonu ile 25 μm kalınlığındaki nanotelli güneş gözesi için verim %9 olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: KOH aşındırma, silisyum nanoteller, ultra-ince güneş gözeleri, metal yardımcı aşındırma.

Abstract

Reducing silicon thickness in photovoltaic device industry has always been demanded for higher profitability. Further benefits such as short collection lengths, improved open circuit voltages and low surface recombination velocities can also be achieved by silicon thickness reduction. However, the problem with thin films is their poor light absorption. Therefore, advanced light trapping strategies are essential to attain competitive thin cells with enhanced efficiencies.

Here, ultrathin silicon wafers were fabricated via potassium hydroxide (KOH) etching the silicon wafers down to the desired thickness (25 μm). Subsequent to this, vertically aligned silicon nanowire arrays were formed on the ultrathin silicon surface via metal assisted etching method to retrieve poor light absorption of the wafers. Nanowire decorated ultrathin single crystalline silicon wafers showed enhancement in optical absorption and the advantage of silicon nanowires is more significant in thinner wafers as expected. Relative improvement in excess of 51% in the reflectivity was observed for 25 μm thick silicon wafer through the fabrication of 1 μm long silicon nanowires on top. The nanowire textured ultra-thin Si wafers were used to fabricate solar cells by doping through phosphoryl chloride (POCl_3) diffusion. Current density-voltage (J-V) characteristics and external quantum efficiency of the cells were measured following the deposition of front and rear contacts. The effect of nanowire length on J-V characteristics and consequently on photovoltaic conversion efficiency of the cells was investigated. Through the optimization of the top contact, a conversion efficiency of 9% was obtained for the nanowire textured cell with a thickness of 25 μm .

Keywords: KOH etching, silicon nanowires, ultra-thin solar cells, metal assisted etching.

1. GİRİŞ

Silisyum (Si) bugünün mikroelektronik ve fotovoltaik teknolojisinde temel malzemedir. Silisyumun özellikleri ile ilgili bilgi birikiminin seviyesi ve üretim teknolojisindeki ilerlemeler oldukça etkileyicidir. Oksijenden sonra yer yüzünde en çok bulunan element olması; çevreyi kirletmemesi ve ekonomik olması; geniş sıcaklık aralığında yarıiletken özelliklerinin değişmemesi bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Silisyum tabanlı güneş gözeleri, yüksek verimi, güvenilirliği, ve dayanıklılığı nedeni ile günümüz fotovoltaik piyasasına hakimdir. Yüksek teknoloji ürünü olan bu gözeler, küçük çatı uygulamalarından, çok büyük (300 MW' a kadar) güneş enerjisi santrallerine kadar birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Silisyum güneş gözelerinin ulaşabileceği verim değerleri Shockley-Queisser teorisinin belirlediği yaklaşık %30 değeri ile sınırlıdır. Bu teorik sınırlamanın yanı sıra, birçok teknolojik sorun nedeni ile günümüzde ticari olarak elde edilen silisyum gözelerinde verim %18-20 arasındadır. Malzeme ve üretim maliyetlerinin yüksek olması bu tür sistemlerde en önemli sorundur. Bu maliyeti düşürmek ve verimi artırmak için, ışık hapsedme özellikleri artırılmış yeni tasarım silisyum pullar kullanılmalıdır. Silisyum indirekt bant aralıklı yarıiletken bir malzeme olduğu için, pul kalınlığı 200 μm ' den ince olduğu zaman, güneş spektrumunun tamamı soğurulamamaktadır. Bu problemi aşabilmek için, ya daha kalın malzeme kullanılmalı ya da ışığın aldığı optik yol uzunluğu ve gelen fotonların saçılma ihtimalleri artırılmalıdır. Silisyum pul kalınlığının artması hacimli malzemedeki (bulk) yeniden birleşme kayıplarının artmasına ve yüksek malzeme tüketimine neden olur ve tercih edilmemektedir. Bunun yerine yarıiletkenin içinden geçen fotonun optik yol uzunluğu tuzaklama yoluyla artırılmalıdır. Yansıma önleyici kaplamalar ile çeşitli ışık tuzaklayıcı yapılar bu amaç için geliştirilmiştir. Bu amaçla, tekli kristal silisyum güneş gözeleri için, farklı kristal yönelimleri boyunca potasyum hidroksit (KOH) aşındırma özelliği kullanılarak piramit yapıların eldesi endüstride başarıyla kullanılmaktadır. Ancak çoklu kristal silisyum güneş gözelerinde farklı yönelimli taneciklerden ötürü piramit oluşumundan farklı yaklaşımlar gerekmektedir. İnce film güneş gözelerinde ise minimum özellik boyutlarının göze kalınlığından daha büyük olması gerektiği için de yine alternatif yaklaşımlar gerekmektedir.

Son yıllarda yüksek verimli ve düşük maliyetli güneş gözelerinin kuantum noktalar (quantum dots) ve nanoteller gibi nanoyapılarla geliştirilmesi üzerine yürütülen çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle dik hizalı nanotellerle oluşturulmuş fotovoltaik yapılar, silindirik geometriden ötürü radyal eklem yapısına sahip olması ve ışığın soğurulmasını sağlayan doğal bir yansıtma önleyici yapıya sahip olması nedeniyle ilgi çekmektedir. Silisyum nanoteller eşsiz

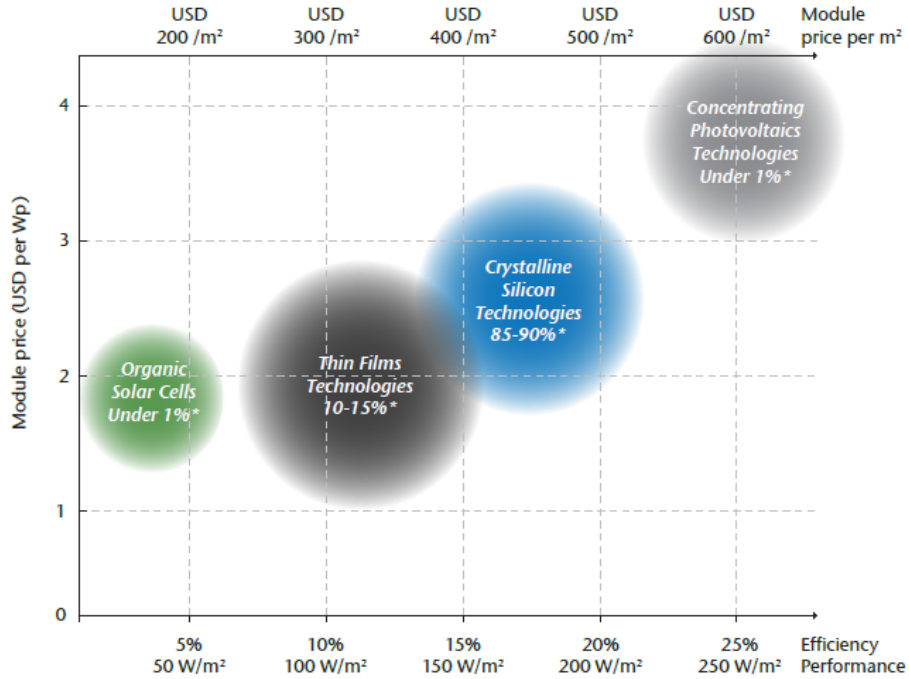
optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle düşük maliyetli üçüncü nesil yüksek verimli güneş gözeleri için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Alttaşa dik hizalı olarak üretilen silisyum nanoteller, ışığı güçlü bir şekilde hapsedebilmesi sayesinde genişbantlı optik soğurma özelliği göstermektedir. Optik özellikleri telin çapı, boyu ve periyodikliği gibi geometrik faktörlerden etkilenmektedir. Silisyum nanotellerin üretiminde buhar-sıvı-katı (VLS) büyütme, lazer ablasyon, metal yardımcı aşındırma (MYA) gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunların arasında, metal yardımcı aşındırma, az malzeme gerekliliği ve sanayi üretimine uyum sağlaması nedeniyle en elverişli ve ekonomik yöntemlerden biridir. Ayrıca diğer standart nanotel üretme yöntemlerinden farklı olarak katkılama MYA yöntemi için bir problem değildir. Bunun nedeni nanoteller silisyum pullardan aşındırılarak üretildiği için üretilen silisyum nanotellerin aşılama seviyesi ve büyüme yönelimi alttaş ile aynı olmaktadır. MYA yönteminin kontrolü genellikle doğrudan ve basit olarak sistemdeki kimyasal faktörlerin ve sıcaklığın değişimiyle incelenmektedir; ancak henüz üretilen nanotellerin çapları ve dağılımları kontrol edilememektedir.

Bu projede, ultra-ince silisyum pullar (20 - 35 μm kalınlık) kimyasal aşındırma yöntemiyle üretilmiş ve homoeiklemlili güneş gözelerinin üretiminde kullanılmıştır. Ultra-ince pullarda oluşan optik emilim kayıplarını azaltmak için ise pulların üzerine dik hizalı silisyum nanoteller metal yardımcı aşındırma yöntemi ile büyütülmüştür.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Güneş Gözelerinde İnce Silisyum Uygulamaları

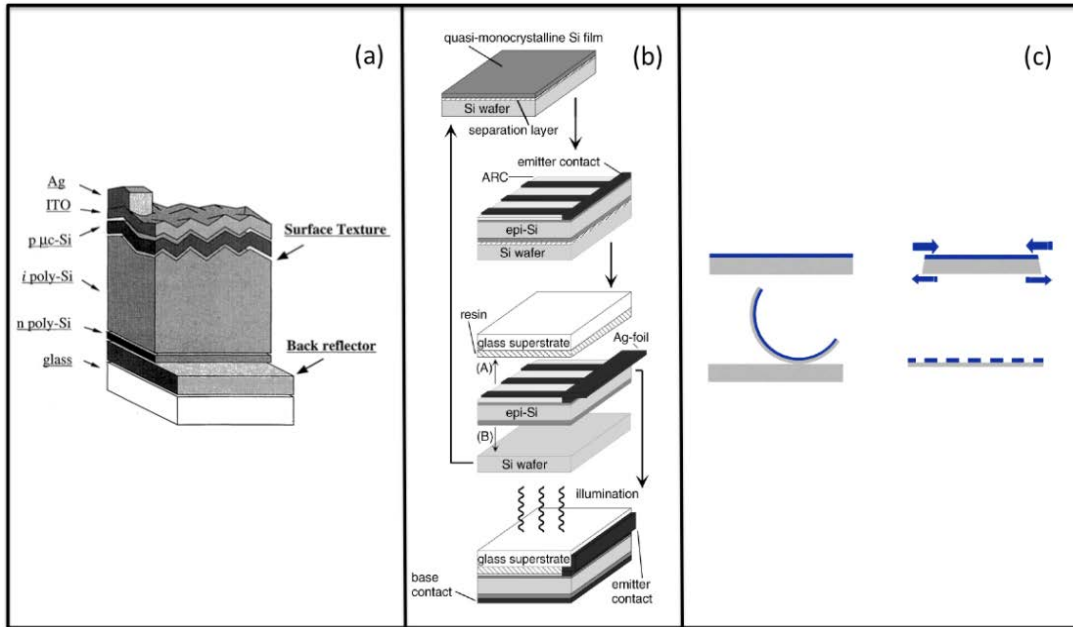
Her ne kadar laboratuvarlarda çok çeşitli malzemelerin güneş gözelerinde kullanılabilceği gösterilse de halen birinci nesil, tekli ve çoklu kristal silisyum güneş gözeleri fotovoltaik pazarının hakimidir. Diğer teknolojiler ile kıyaslandığında, silisyumun ucuzluğu ve bulunabilirliği sayesinde daha uzun yıllar da pazara hakim olacağı görünmektedir (IEA publication, 2010). Şekil 1' de ticari güneş gözelerinin performans ve fiyatları kıyaslanmıştır (UC of Santa Barbara, 2010). Bu grafiğe göre, silisyum gözelerin verimi oldukça yüksek (%15-20 civarında) ve üretim maliyetleri de orta seviyededir. Bugün satılan gözelerin %85' ini silisyum gözeler oluşturmaktadır. Elektronik, optoelektronik ve güneş gözesi endüstrisinin lideri olan silisyum, tek kristal, çok kristal, amorf ve nanokristal yapıda karşımıza çıkmaktadır. Kristal silisyumun fotovoltaik hücreler için cazip bir malzeme olmasının sebepleri arasında bol bulunan bir malzeme olması ve bu malzemeyi işleme konusunda geniş deneyim ve bilgi birikimine sahip olunması yer almaktadır.



Şekil 1. Ticari fotovoltaik teknolojilerin performans ve fiyat kıyaslaması grafiği (UC of Santa Barbara, 2010).

Silisyum göze maliyetindeki en önemli parametrelerin başında silisyum maliyeti yer almaktadır; ve pul kalınlığı azaltılarak maliyetler düşürülebilir. Silisyum doğrudan olmayan yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletken ve düşük optik emilim katsayısı sebebiyle gözelerde kalın pulların kullanımını (günümüzde yaklaşık 180 μm) gerektirmektedir. Ancak bu sayede güneş spektrumunun büyük bölümünde emilim gerçekleşebilir. Ayrıca, göze üretiminde kullanılan işleme teknolojisi şu anda 180 μm altında kalınlıkları işlemek için uygun değildir.

Kristal silisyum güneş gözelerinin maliyetini önemli ölçüde azaltmak için kullanılan ince silisyum üretimi esaslı yaklaşımlardan bazıları Şekil 2' de görülmektedir. Şekil 2 (a)' da ince silisyum kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiştir (Yamamoto vd., 1997). Şekil 2 (b)' de ince silisyum gözenekli silisyum tabakası üzerinden kaldırılarak üretilmiştir (Bergmann vd., 2001). Şekil 2 (c)' de de IMEC'te geliştirilen ince metal film yardımıyla stres altında mekanik (SLIM-cut) olarak silisyum ince filmleri kaldırmak yer almaktadır (Dross vd., 2007). Aktif malzemeleri ince tabakalar halinde kullanmak, kısa taşıyıcı difüzyon uzunluklarına sahip, kalitesi yüksek olmayan silisyum kullanılmasını sağlamakta ve dolum (fill) faktörleri ve geniş açık devre voltajına yol açan yeniden birleşmeyi (recombination) en aza indirmektedir (Swanson vd., 1986; Tiedje vd., 1984). Ultra-ince güneş gözelerinin bir diğer avantajı da hem çok hafif hem de esnek cihazların üretimine olanak sağlamalarıdır.



Şekil 2. İnce silisyum esaslı üretim yöntemlerinden bazılarının şematik gösterimi. (a) Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile ince tabaka silisyum kaplanarak üretilen gözeler (Yamamoto vd., 1997), (b) gözenekli silisyum tabakası üzerinden kaldırılarak üretilen gözeler (Bergmann vd., 2001) ve (c) IMEC' in slim-cut yöntemi (Dross vd., 2007).

Fakat beklenmedik bir şekilde, ultra-ince silisyum kağıt gibi makasla kesilebilmesine rağmen, cımbızla tutma, spin kaplama, litografik tanımlama, aşılama (doping), ıslak ve kuru aşındırma (etching), tavlama (anneal) ve metal kaplama gibi işlemlere karşı dayanıklılık göstermektedir. Bu durum, ultra-ince silisyum ile güneş gözelerinin üretimi ve yeni göze teknolojilerin geliştirilmesi açısından birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Wang ve ark., potasyum hidroksit (KOH) dağlaması ile kusursuz esneklik gösteren ve doğrudan makas ile kesilebilen geniş alanlı ultra-ince monokristal silisyum filmleri üretmiş ve aynı çalışmada, ultra-ince silisyum filmlerinde, iki yönlü piramitli nanoyapı tasarımı ile ışık tutma etkisini incelemiş ve ışık emiliminde büyük gelişme elde etmiştir (Wang vd., 2013).

Ancak silisyum kalınlığı azaldıkça hücre maliyeti azalsa da, güneş gözelerinin de verimi azalmaktadır. Bu etki Şekil 3' teki grafikte görülmektedir. Bu grafiğe göre hücre kalınlığı 200 μm ' den 50 μm ' ye düşürüldüğünde, hücre verimi %0,5 azalmaktayken malzeme kullanımı dörtte birine; hücre maliyeti ise üçte birine inmektedir. Daha ince hücrelerde ise göze veriminin daha da azaldığı ve neredeyse sıfırlandığı gözlenmektedir (Tiedje vd., 1984). Bunun sebebi ışık yakalayıcı mekanizmaların bu grafik çiziminde devreye alınmamış olmasıdır.

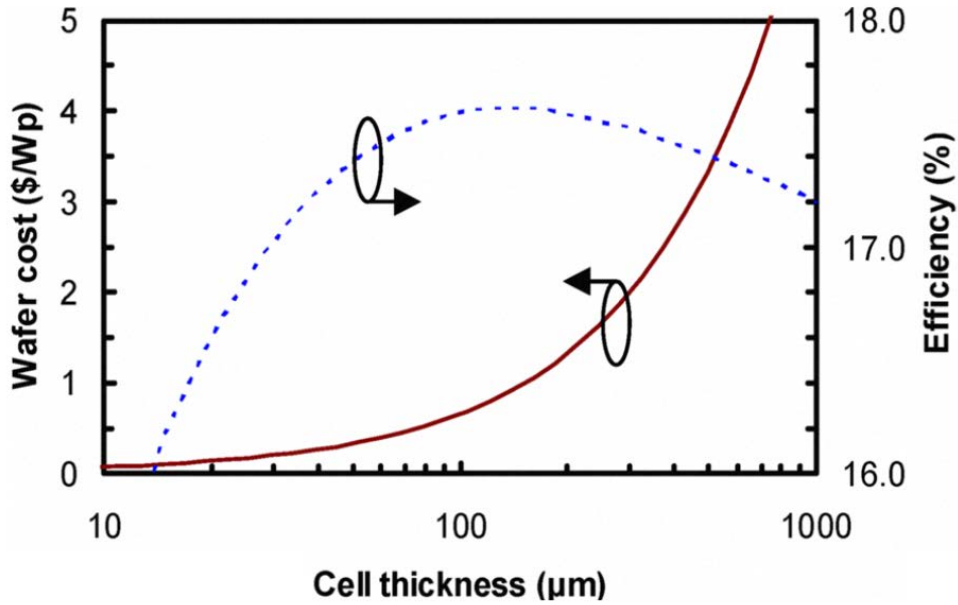


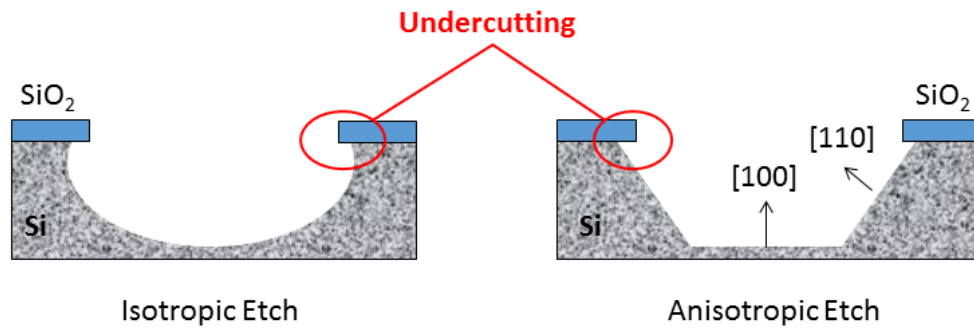
Figure 3. Silisyum maliyeti ve göze verimliliğinin hücre kalınlığı ile değişimi grafiği (Tiedje vd., 1984).

2. 2 Silisyumun İzotropik ve Anizotropik Dağlanması

Alttaş üzerine kaplanan ince filmlerin ya da alttaşların doğrudan aşındırılması mikroeletromekanik sistemlerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Genel olarak 2 farklı aşındırma işlemi vardır. Bunlar:

1. Islak aşındırma: Malzemenin çözünmesi için kimyasal bir çözelti kullanılmaktadır.
2. Kuru aşındırma: Buhar fazındaki çözücü ya da reaktif iyonlar çözme işleminde kullanılmaktadır.

Islak aşındırma, aşındırma işlemleri arasında en kolay ve basit uygulanabilir olanıdır ve ince filmlerin üretiminde etkin şekilde kullanılmaktadır. Genellikle aşındırma çözeltisinde çözünmeyen ya da çok düşük çözünme hızı olan bir maske gerektirmektedir. Silisyum gibi bazı kristal malzemeler belirli kimyasallar içerisinde anizotropik olarak aşınmaktadır. Anizotropik aşındırma işlemlerinde aşındırma hızı değişik kristal yönelimlerinde farklıdır. Bunun aksine, izotropik aşındırma işleminde aşındırma hızı kristal yönelimine göre değişmemektedir. İzotropik aşındırmanın problemi aşındırma kalınlığı derinliğinde maske tabakasının altını oymasındır. Bunun klasik örneği $\langle 100 \rangle$ yönelimindeki silisyum pulda potasyum hidroksit gibi bir kimyasalla delik açma esnasında $\langle 111 \rangle$ kristal düzleminin yan duvarlarının belirgin hale gelmesidir. Bunun sonucu izotropik aşındırıcı ile açılan deliğin yuvarlak duvarlı değil piramit şeklinde duvarlara sahip olmasıdır. Anizotropik ve izotropik aşındırmanın şematik görüntüleri, sırasıyla, Şekil 4 (a) ve (b)'de verilmiştir (Lei, 2014).



Şekil 4. İzotropik ve anizotropik silisyum aşındırmasının şematik gösterimleri (Lei, 2014).

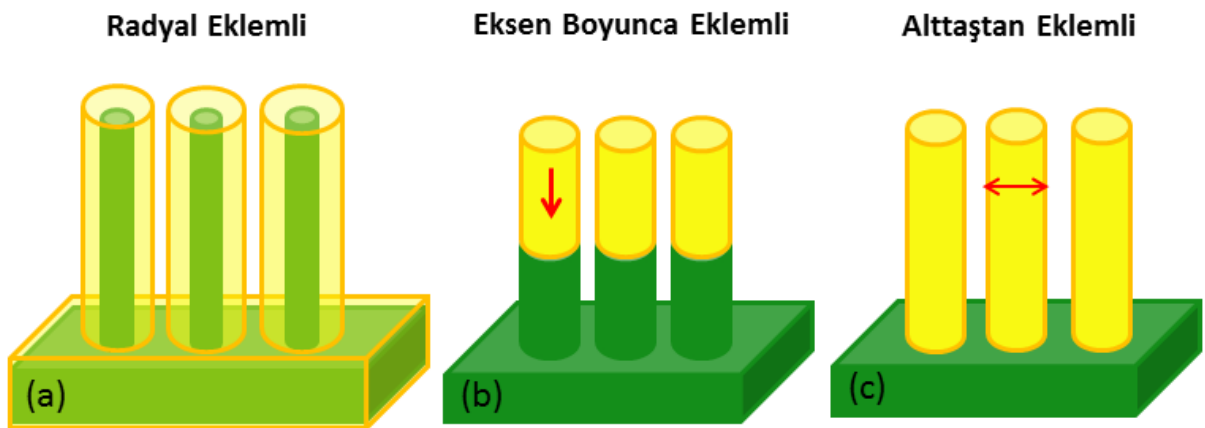
Silisyumun anizotropik aşındırması genellikle sulu potasyum hidroksit (KOH), tetrametilamonyum hidroksit (TMAH) gibi alkali veya sodyum hidroksit (NaOH) ve lityum hidroksit (LiOH) gibi alkali hidroksit aşındırıcılarla gerçekleştirilmektedir. Aşındırma hızı kristal

yönelimi ve aşındırıcı konsantrasyonuna bağlı olduğu için yöntem çok çeşitli silisyum yapılarının kontrollü ve tekrar edilebilir şekilde eldesine izin vermektedir. Dolayısıyla anizotropik (100) silisyum aşındırması mikroeletromekanik sistemlerin (MEMS) üretiminde ve üç boyutlu yapıların eldesinde anahtar konumdadır (Alvi vd.,2006).

Diğer kimyasalların aşındırma üzerine olan etkisini azaltmak, dolayısıyla daha kesin sonuçlar elde etmek için etilen diamin pirotekollu (EDP) ve izopropil alkollü (IPA) karışımlar yerine saf çözeltiler (örn. KOH çözeltisi) tercih edilmektedir (Tanaka vd., 2004).

2. 3 Güneş Gözeleri İçin Bir Boyutlu Nanoyapılar

Güneş gözelerinin düşük maliyetli üretimi ve daha yüksek verim değerleri eldesi, bilim adamlarını gözelerde nanoyapılı alternatif malzeme arayışlarına itmiştir (Cao vd., 2010; Gunawan vd., 2008; Ford vd., 2009; Xiang vd., 2006). Şekil 5' te şematik olarak gösterilen radyal, eksen boyunca ve alttaştan eklemli nanotelli güneş gözeleri klasik pul tabanlı gözelerle kıyasla birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Radyal eklemli gözeler gelişmiş ışık emilimi, yeni yük ayrışma mekanizmaları, mekanik gerilimi azaltma ve ucuzluk gibi avantajlara sahiptir. Eksen boyunca eklemli gözelerde yüklerin ayrışma verimi düşük olsa da halen gelişmiş ışık emiliminden faydalanılmaktadır (Garnett vd., 2010).



Şekil 5. (a) Radyal, (b) eksen boyunca ve (c) alttaştan eklemli nanotelli güneş gözelerinin şematik gösterimi.

Pratikte nanotelli güneş gözeleri henüz geleneksel mimariden daha yüksek verim değerlerine ulaşamasa da, pahalı malzeme ve üretim süreçleri gerektirmemeleri büyük bir avantajdır.

Şimdiye kadar, silisyum, germanyum, çinko oksit, kadmiyum tellür, kadmiyum selenit, bakır oksit, titanyum oksit, galyum nitür, indiyum galyum nitür, galyum arsenit, indiyum arsenit ve birçok polimer/nanotel kombinasyonu nanotelli güneş gözelerinin üretiminde kullanılmıştır (Cao vd., 2010; Garnett vd., 2010; Law vd., 2005; Wang vd., 2010; Fan vd., 2009; L'evy-Clement vd., 2005). Son yıllarda, nanotelli güneş gözelerinde gözle görünür verim artışları olsa da bu mimaride halen aşılması gereken zorluklar bulunmaktadır.

2.4 Geleneksel Silisyum Nanotel Sentez Yöntemleri

Silisyum nanotellerin üretiminde birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar aşağıdan-yukarı ya da yukarıdan-aşağı yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemlerin listesi Şekil 6' da verilmiştir. Aşağıdan-yukarıya üretim yapan yöntemlerden kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi pahalıdır, yüksek sıcaklıklar, vakum, karmaşık ekipman ve zehirli başlangıç kimyasalları gerektirmektedir. Ayrıca bu yöntem kullanılan ekipman gereği geniş alanlarda nanotel üretimine olanak vermemektedir. Yukarıdan-aşağıya yöntemlerde litografi ve derin reaktif iyon dağlama (DRIE) yöntemleri en çok tercih edilenlerdir.

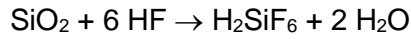
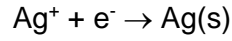
Metal yardımcı aşındırma (MYA) da yukarıdan-aşağıya bir yöntemdir. Çözelti içerisinde gerçekleştirilen bu yöntemde silisyum nanotel dizileri düşük sıcaklıkta ve geniş yüzeyler üzerinde üretilebilmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı üretilen nanotellerin başlangıç puluyla aynı özellikleri (taşıyıcı türü, taşıyıcı konsantrasyonu) taşımasıdır.



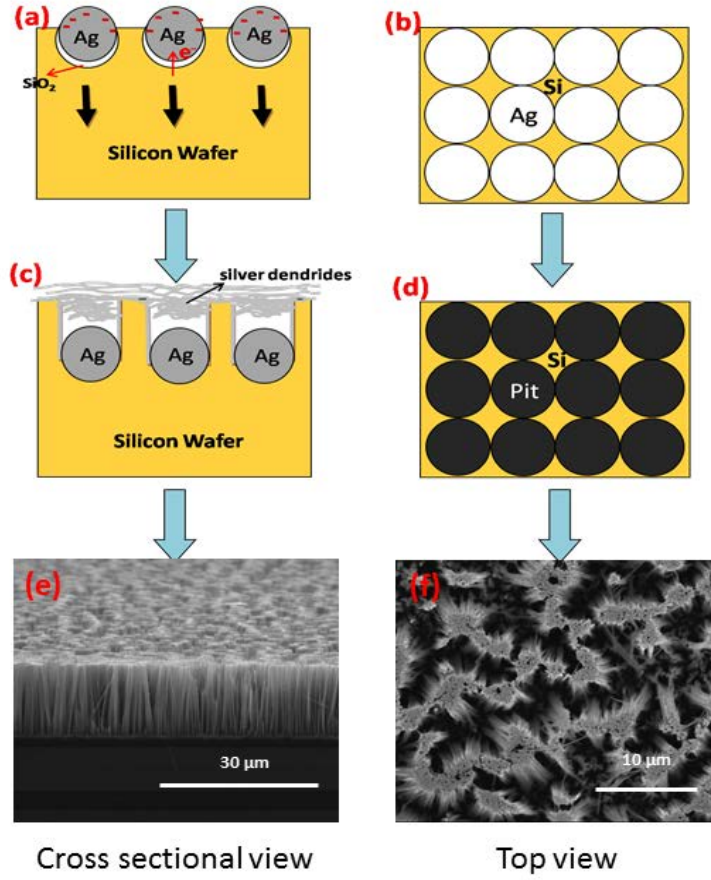
Şekil 6. Silisyum nanotellerin üretiminde kullanılan yöntemler.

2.4.1 Metal Yardımlı Aşındırma Yöntemi Mekanizmaları ve Reaksiyonları

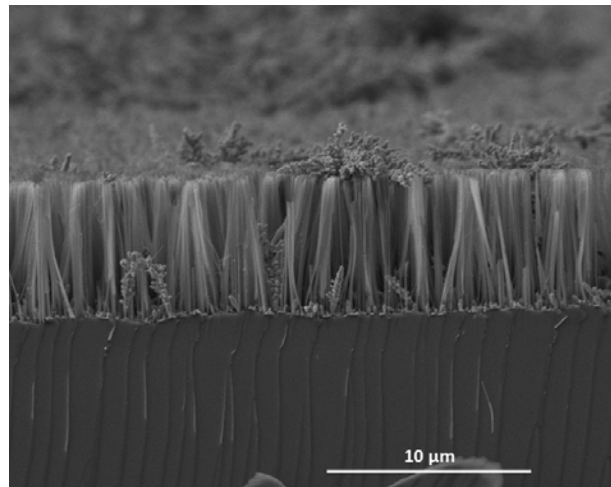
Metal yardımcı aşındırma yönteminde silisyum pullar, gümüş nitratlı (AgNO₃) hidroflorik asit (HF) çözeltisine daldırılmakta ve takiben gümüş (Ag) kaplama ve silisyum dağlama işlemleri başlamaktadır. Alttaş yüzeyine dik silisyum nanoteller ardışık yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile üretilmektedir. Metal yardımcı aşındırma sürecinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar şunlardır (Peng vd., 2006):



Si/AgNO₃/HF sistemi korozyon tipi redoks çiftinden oluşmakta; Ag⁺ iyonlarının katodik indirgenmesi ve muadili anodik oksitlenme ve silisyumun çözünmesi Ag çöküntülerinin olduğu noktada gerçekleşmektedir. Silisyum pulların çözeltiliye daldırılması ile birlikte Ag⁺ iyonları alttaş yüzeyine temas etmekte ve silisyumun valans bandından elektron çekerek Ag(s) çekirdek veya kümelenme oluşturmaktadır. Reaksiyon devamında Ag çekirdekler daha büyük öbekleri oluşturmaktadır. Beraberinde bölgesel oksitlenme ile Ag nanoparçacıklarının altında silisyum oksit (SiO₂) oluşmaktadır. SiO₂ oluşur oluşmaz ortamdaki HF ile dağlanarak Ag nanoparçacıklarının bulunduğu noktalarda çukurlar oluşmaktadır. Yüksek elektronegativite farkından ötürü bu çukurlara hapsolan Ag nanoparçacıkları yatay olarak hareket etmemektedir (Peng vd., 2006). Kimyasal dağlama mekanizması şematik olarak Şekil 7' de sunulmuştur. HF/AgNO₃ çözeltisi içerisindeki uzun dağlama sürelerinde çukurlara girmeyen Ag parçacıkları büyüyerek Şekil 8' de de görülen dendritleri oluşturmaktadır. Söz konusu gümüş dendritler reaksiyon sonrasında nitrik asit yardımıyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır.



Şekil 7. MYA yönteminin kesit ve üstten şematik gösterimi. (a), (b) Ag^+ iyonlarının silisyum yüzeyi ile temasa geçtiği an. (c), (d) Dikey olarak dağılan silisyumun nanotelleri üretmesi. (e), (f) Gümüş dendritlerden arındırıldıktan sonra kesitten ve üstten alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Ozdemir vd., 2011a).

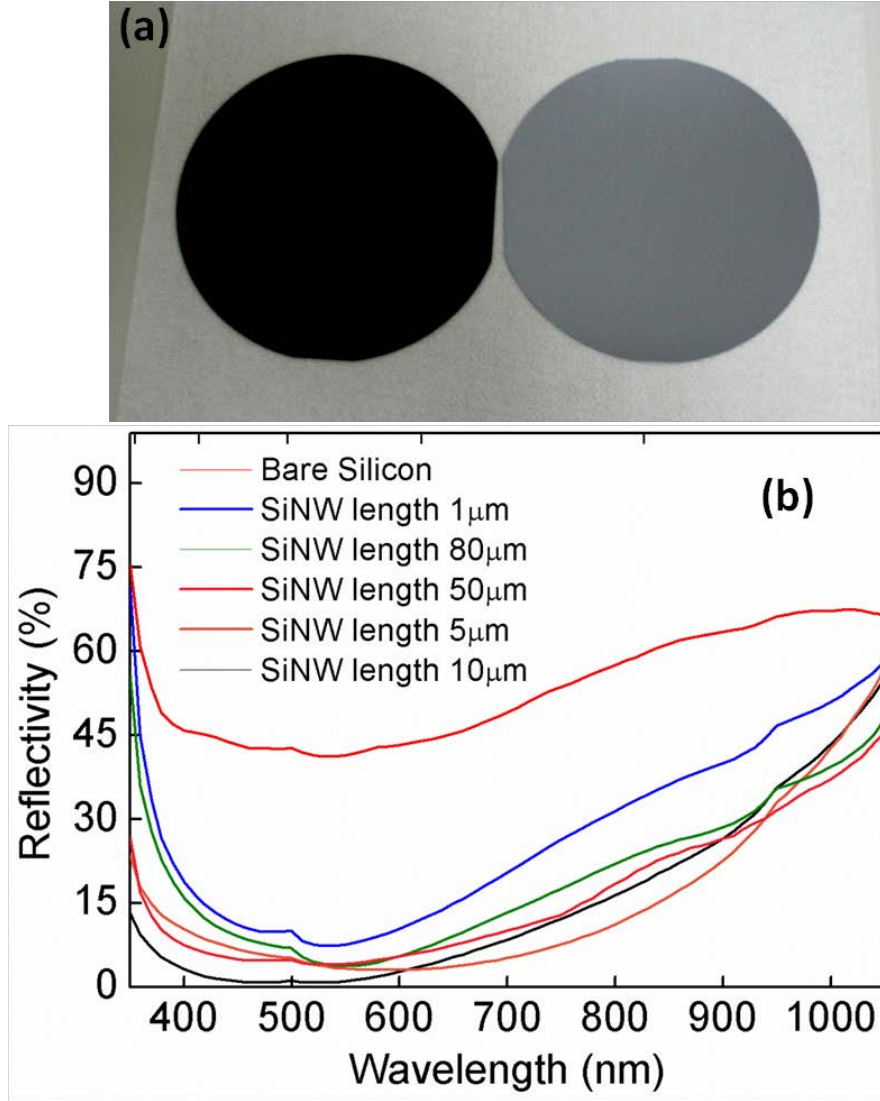


Şekil 8. Gümüş dendritler arındırılmadan önce MYA yöntemi ile üretilen silisyum nanoteller (Ozdemir vd., 2011a).

2.4.2 Silisyum Nanotellerin Güneş Gözelerinde Kullanılması

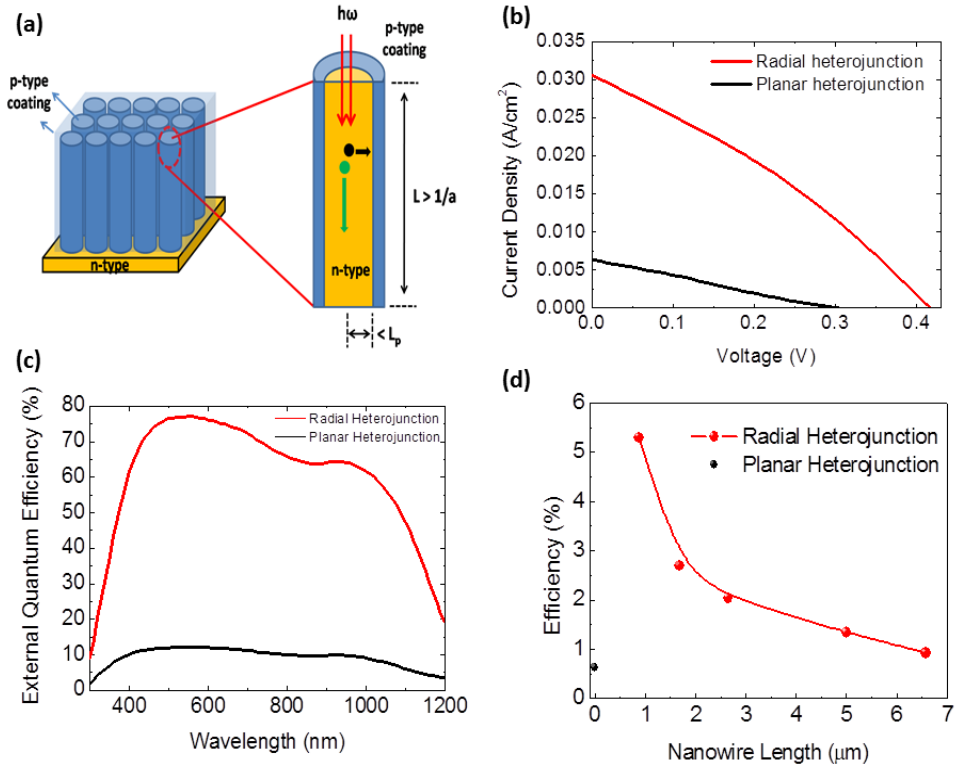
Silisyum nanoteller birçok prototip optoelektronik cihazda kullanılmıştır. Bu cihazlara güneş gözeleri (Kulakci vd., 2013; Ozdemir vd., 2011b), lityum bataryalar (Canadace vd., 2010), ışık yayan diyotlar (LEDler) (Qian vd., 2005) ve alan etkili tranzistörler (Schmidth vd., 2006) örnek verilebilir. Bu bölümde silisyum nanotellerin güneş gözelerinde kullanımını detaylandırılacaktır.

Dik hizali silisyum nanoteller ışığı hapsettikleri için ışık emilimini artırmaktadır. Satın alınan ve üzerinde nanotel üretilen silisyum pulların fotoğrafı Şekil 9 (a)' da verilmiştir. Üzerinde nanotel üretilen pulun koyu rengi iyileştirilmiş ışık emiliminin bir göstergesidir. Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen silisyum pulların dalga boyu bağımlı yansıma ölçümü Şekil 9 (b)' de gösterilmektedir. Karşılaştırma amaçlı aynı grafikte bir de satın alınan silisyum pul ölçümü de bulunmaktadır. Grafikten de görüleceği üzere, silisyum nanoteller alttaştan geri yansımaya belirgin şekilde önlemektedir. En düşük geri yansıtma 10 µm uzunluğundaki silisyum nanoteller için kaydedilmiştir. Nanotellerin boyunun daha uzun olması nanotellerin demet halini alması ile geri yansımanın artmasına sebep olmaktadır (Ozdemir vd., 2011b).



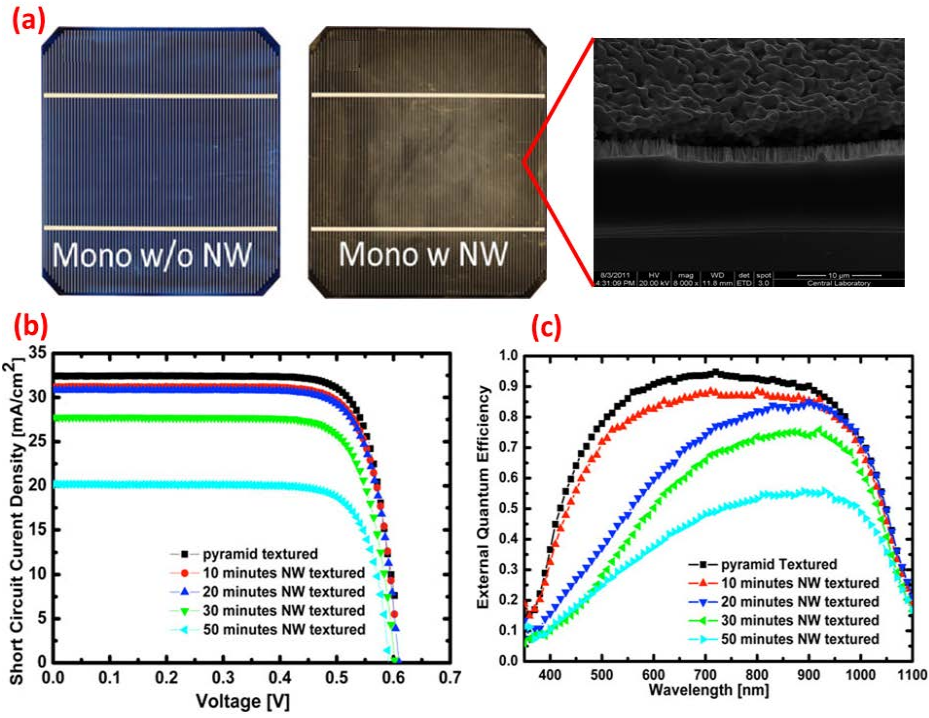
Şekil 9. (a) 10 cm' lik silisyum pulun MYA öncesi (sağda) ve sonrası (solda) fotoğrafı. (b) Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen silisyum pulların dalga boyu bağımlı yansımaya ölçümü grafiği (Ozdemir vd., 2011b).

Ozdemir ve ark. silisyum nanoteller ile tamamlayıcı p-tipi bir iletken polimer (PEDOT:PSS) kullanarak radyal heteroeklemlili güneş gözelerini üretmiştir. Gözelerin şematik yapısı Şekil 10 (a)' da verilmiştir. Radyal eklemlili gözelerin fotovoltajik performansı ve harici kuantum verimi nanotelsiz gözelerine göre çok daha iyidir (Şekil 10 (b) ve (c)). Ancak, nanotellerin boyları uzadıkça gözelerin veriminin düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 10 (d)) (Ozdemir vd., 2011b).



Şekil 10. (a) Heteroeklemlı güneş gözelerının şematik gösterimi, (b) akım yoğunluğu - voltaj karakteristiği ve (c) harici kuantum verimliliği. Nanotelsiz gözelerin verileri de kıyaslama amaçlı verilmiştir. (d) Göze veriminin nanotelerin uzunluğu ile değişimi grafiği (Ozdemir vd., 2011b).

Kulakci ve ark., silisyum nanotelleri MYA yöntemi ile üretmiş ve endüstriyel boyutlardaki (156 mm x 156 mm) tek kristalli güneş gözelerine uygulamıştır (Şekil 11 (a)). Bu uygulamada silisyum nanotellerin etkili bir şekilde ışığı hapsedici tabaka olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Nanotelli gözelerin verimi standart olarak piramitlerle üretilen gözelerin verimine çok yakındır ve nanotellerin gözelerde kullanım potansiyelini birkez daha ortaya koymuştur. Nanotellerin boyu artıkça göze verimi (Şekil 11(b)) ve harici kuantum verimi (Şekil 11(c)) düşmektedir. Bunun sebebi nanotellerin yüzeyinde taşıyıcıların yeniden birleşme ihtimalinin artmasıdır (Kulakci vd., 2013).



Şekil 11. Silisyum nanotellerin endüstriyel boyutlardaki güneş gözesinde uygulamaları. (a) Gözelerin nanotelli ve nanotelsiz fotoğrafları ile nanotellerin üst kontakla temas halindeykenki SEM görüntüsü. (b) Gözelerin farklı uzunluklardaki nanoteller ile akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri ve (c) harici kuantum verimlilikleri (Kulakci vd., 2013).

Bu projede ultra-ince silisyum pullar KOH ile dağlanarak üretilmiştir. 20 - 35 μm kalınlığındaki pullar üretilirken; çözelti konsantrasyonu ve sıcaklığın kontrollü şekilde takibi ile dağlama hızı ve silisyum (100) yüzey pürüzlülüğü arasındaki bağıntı da incelenmiştir. Elde edilen ultra-ince silisyum pullar ile homoeklemlili silisyum güneş gözeleri üretilmiştir. Pullardaki düşük ışık emilimi yüzeyde üretilen silisyum nanoteller ile giderilmiştir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Ultra-İnce Silisyumun Üretilmesi

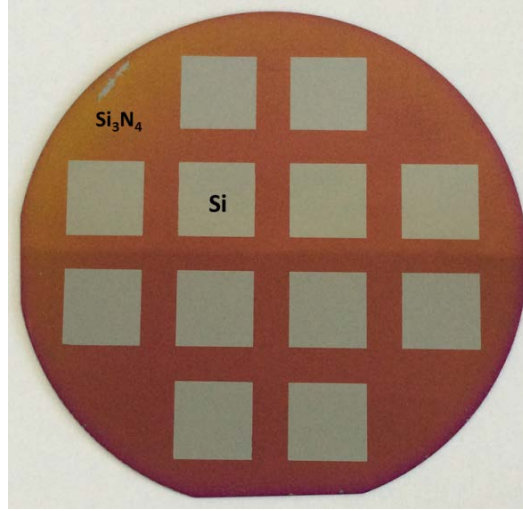
Deneylerde kullanılan tüm kimyasallar Merck firmasından alınmıştır ve saflaştırılmadan kullanılmıştır. Deneylerde sonuçların tekrar edilebilirliği açısından silisyumun aşındırılmasında saf KOH çözeltisi kullanılmıştır. Silisyumun kimyasal aşındırılması kristal yönelimine, sıcaklığa ve çözelti konsantrasyonuna bağlıdır.

Dağlama öncesi silisyum pullar (tek tarafı parlatılmış, 500 µm kalınlığında, (100) yöneliminde, p-tipi, öz direnci 1–10 Ω.cm) RCA temizleme işlemi ile temizlenmiş sonrasında doğal oksiti 1:10 oranında sulu HF çözeltisi ile kaldırılmıştır. Sonrasında pulların üzerine plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ile 400 °C’ de 160 nm kalınlığında silikon nitrür (Si_3N_4) kaplanmıştır. Si_3N_4 yüksek sıcaklıklarda KOH çözeltisi için maskeleme fonksiyonu görmektedir. 1.5 cm × 1.5 cm boyutlarındaki kare pencereler Si_3N_4 ile fotolitografi yardımı ile tanımlanmıştır. Söz konusu maskeleme işlemi inceltirilmiş pulların daha kolay tutulmasını ve işlenmesini sağlamaktadır.

3.1.1 Silikon Nitrür ile Pencerelerin Tanımlanması (Morötesi Fotolitografi)

Silikon nitrür, silisyumun KOH ile aşındırılması esnasında maske olarak kullanılmıştır. Bu amaçla Si_3N_4 kaplamanın içine pencereler fotolitografi ile açılmıştır. 10 cm çapındaki tek tarafı parlatılmış silisyum pulların üzerine Si_3N_4 ince filmler PECVD yöntemi ile kaplanmıştır. Nitrat kaplı pulların üzerine S1813 fotorezisti 500 rpm hızında 5 saniye, 2000 rpm hızında 30 saniye döndürmeli kaplandıktan sonra 115°C’ de 60 s tavlansmıştır. Fotorezist yaklaşık 2 µm kalınlığındadır. Pullar daha sonra litografi sistemine alınarak istenilen desendeki maske altında morötesi (UV) ışığa 5 saniye süreyle maruz bırakılmıştır. UV sonrası fotorezist MF-319 ile 40 saniye geliştirilmiş, yıkanmış ve kurutulmuştur. Pullar, sonrasında birkez daha 115°C’ de 3 dakika tavlansmıştır. Deneylerde pozitif fotorezist kullanıldığı için UV ışığına maruz bırakılan alanlar pul yüzeyinden kaldırılmıştır ve kullanılan maske deseninin aynısı pullar üzerinde oluşturulmuştur. Si_3N_4 tamponlu oksit çözücü (BOE) ile (6 kısım %40’ luk amonyum florür (NH_4F) ve 1 kısım %49’ luk HF) kaldırılmıştır. BOE çok seçici bir çözücüdür ve çözme esnasında silisyuma geldiğinde durmaktadır.

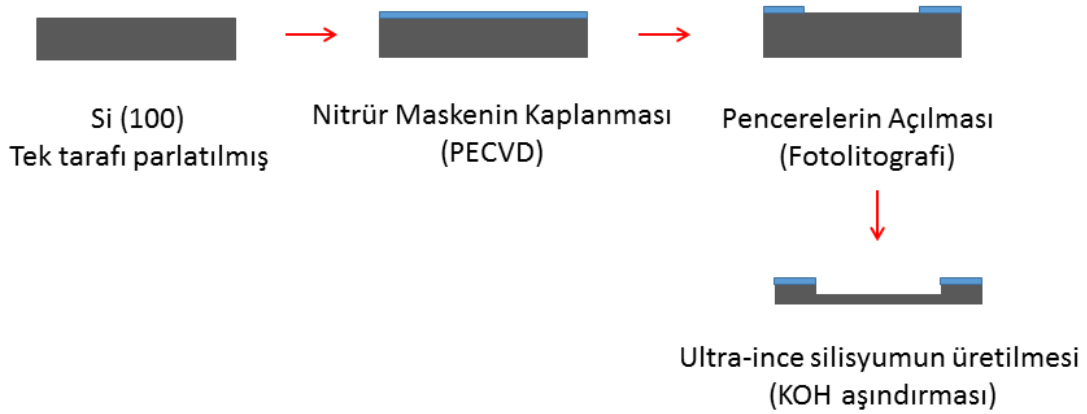
Aşındırma hızı 700 A°/dakika' dır. Silisyum görünmeye başladığında pullar çözeltiden çıkartılıp su ile yıkanmıştır. Son olarak, pulların üzerinde kalan fotorezist aseton ile birkaç saniyede kaldırılmıştır. Pullar sonrasında yıkanmış ve azot gazı ile kurutularak KOH çözeltisi ile dağlanmaya hazır hale getirilmiştir. Üretilen desenli bir pulun fotoğrafı Şekil 12' de görünmektedir.



Şekil 12. Si₃N₄ kaplı 10 cm çaplı silisyum pulun litografi sonrası fotoğrafı.

3.1.2 Potasyum Hidroksit (KOH) Aşındırması

Kimyasal aşındırma işlemine hazırlık için uygulanan işlemler şematik olarak Şekil 13' te verilmiştir. Silisyumun aşındırılmasında ıslak aşındırma kullanılmıştır.



Şekil 13. Nitrat maskesi ile ultra-ince silisyum üretiminin basamak basamak şematik gösterimi.

İlk olarak KOH çözeltisinin derişiminin aşındırma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak ağırlıkça %10 ile %50 arasındaki konsantrasyonlarda KOH çözeltileri hazırlanmış ve 3 saat süreyle silisyum pullar bu çözeltilerde aşındırılmıştır.

Sıcaklığın etkisinin belirlenmesi için %50 konsantrasyonundaki çözelti 70 ile 90 °C. arasında aşındırılmıştır. Aşındırılan yüzeylerin kalitesi, pürüzlülüğü ve aşınma miktarı atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda ağırlıkça %50 KOH ve ortalama aşındırma sıcaklığı olarak 90°C silisyum pulların aşındırılmasındaki en iyi parametreler olarak belirlenmiştir. Şekil 14' te aşındırma sonrası 20 µm kalınlığındaki silisyum pulun fotoğrafları verilmiştir. Ayrıca, silisyum pulun 40 µm altı kalınlıklarda ışığı geçirmeye başladığı gözlemlenmiştir.

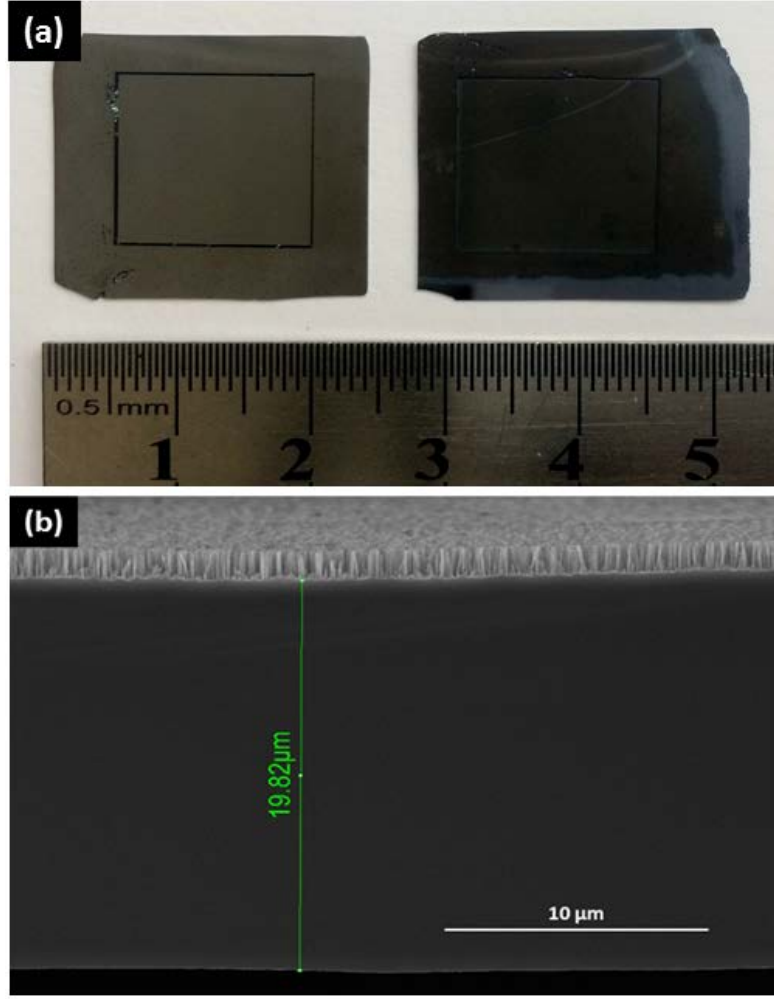


Şekil 14. 20 µm kalınlığındaki ultra-ince silisyum pulun fotoğrafları. Esnek silisyum pulun cımbızla bükülmüş hali (solda) ve arkasından lazer ışığı tutulmuş hali (sağda).

3.2 Silisyum Nanotellerin Üretimi

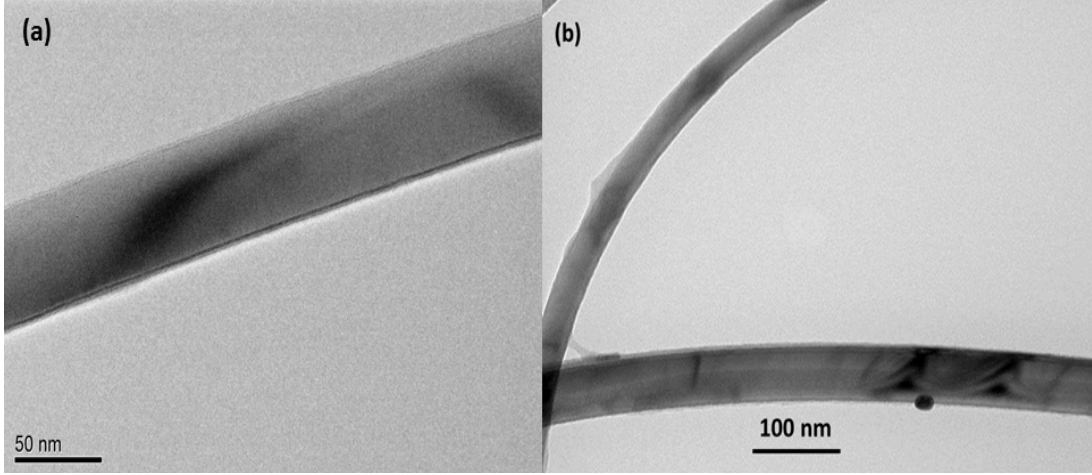
Silisyum pulların aşındırılmasından ve istenilen kalınlığa (20 - 35 µm) ulaşılmasından sonra, ultra-ince pullar kaynayan pirana çözeltisine (sülfürik asit (H_2SO_4 , 95%–97%) ve hidrojen peroksitin (H_2O_2 , 35%) hacimce 3:1 oranında karıştırılması ile elde edilmiştir) 20 dakika daldırılarak organik kirlerinden arındırılmıştır. RCA-2 çözeltisi de metal iyonlarından temizlik için kullanılmıştır. Pullar, ardından doğal oksit ve Si_3N_4 tabakalarını kaldırmak için hacimce 1:10 oranında karıştırılmış HF (38 - 40%) çözeltisine daldırılmıştır. Saf su ile yıkanan ve azot gazı ile kurutulan pullar silisyum nanotellerin üretimi için hazır hale getirilmiştir.

Önceden de belirtildiği gibi ultra-ince silisyum yüzeyine dik silisyum nanotellerin üretiminde metal yardımcı aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, HF (38%–40%) ve AgNO₃ (99.5%) çözeltisi 4.6 M: 0.02 M molar oranında karıştırılmıştır. Bütün dağlama işlemleri oda sıcaklığında yapılmıştır. İstenilen nanotel boyuna ulaşıldığında, dağlama işleri pulların saf su ile yıkanmasıyla son bulmuştur. Kimyasal dağlama işleminin yan ürünü olan gümüş dendritler, hacimce 1:3 oranında nitrik asit ve saf su karışımında pulların yıkanması ile arındırılmıştır. Nanotellerin morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (FEI Nova Nano SEM 430, 10 kV çalışma gerilimi) ve yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (JEOL TEM 2100 F, 200 kV çalışma gerilimi) ile incelenmiştir. Şekil 15 (a)' da dağlama öncesi ve sonrası ultra-ince silisyum pulların fotoğrafı, sırasıyla solda ve sağda, verilmiştir. Resimlerde görülen nanotelli örneğin siyah olması nanotellerin ışığı hapsettiğini ve ışık emiliminin arttığını göstermektedir. Şekil 15 (b)' de ise üzerinde dik hizalı nanotellerin üretildiği ultra-ince silisyum pulun kesit SEM görüntüsü verilmiştir. Pul kalınlığı ve nanotel uzunluğu, sırasıyla, yaklaşık 20 ve 1 µm' dir. Bu uzunluktaki nanoteller ile ultra ince silisyum pulun kaybettiği optik emilimi yeniden kazandığı görülmektedir.



Şekil 15. (a) KOH ile aşındırılarak elde edilen ultra-ince silisyum pulun nanotel üretimi öncesi (solda) ve sonrası (sağda) fotoğrafı. (b) 20 µm kalınlığındaki ultra-ince silisyum pulun üzerinde nanoteller üretildikten sonraki kesit SEM görüntüsü.

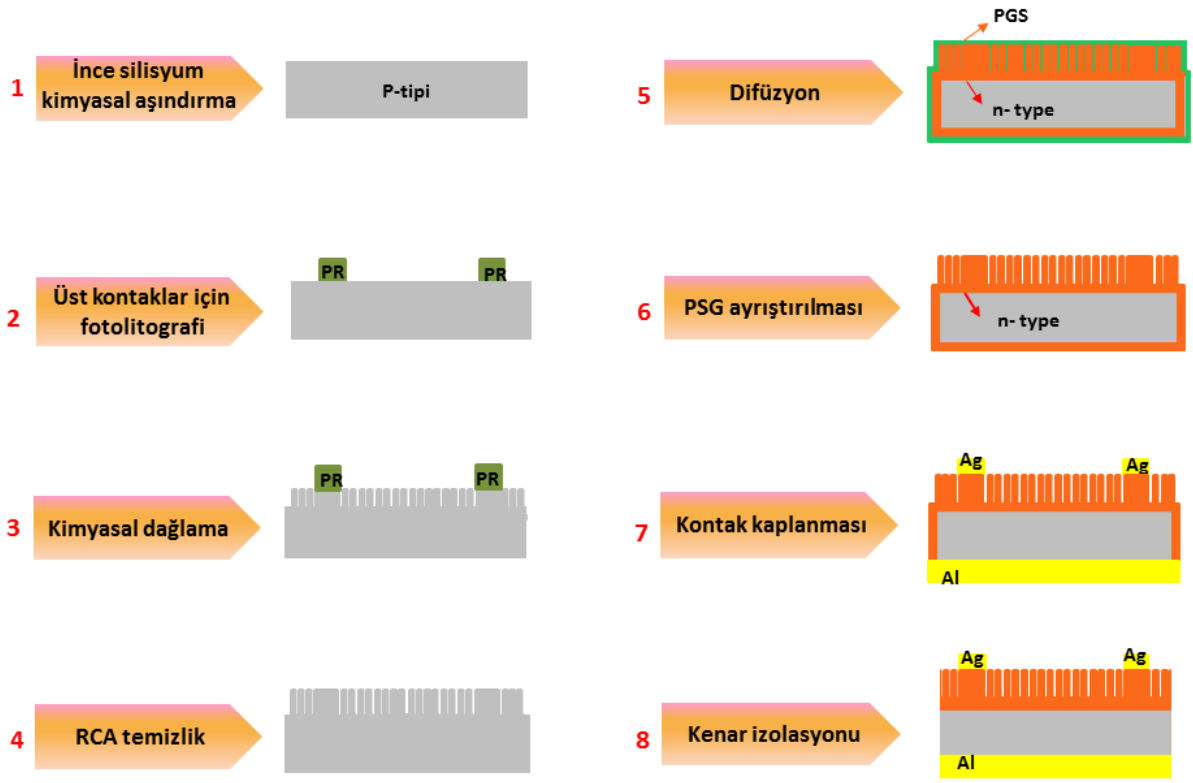
TEM numunelerini hazırlamak için silisyum pullar üzerinde üretilen nanoteller etanol içerisinde ultrasonik banyoda kırılmıştır. Sonrasında bu çözelti karbon kaplı bakır TEM alttaşlarının üzerine damlatılarak kurutulmuştur. İki farklı noktadan alınan TEM görüntüsü Şekil 16 (a) ve (b)' de verilmiştir. Üretilen silisyum nanotellerin çapları ortalama 100 nm' dir ve yüzeylerindeki ince oksit tabakası belirgindir. Kimyasal dağlama yönteminde AgNO_3 kullanılarak üretilen nanotellerde çap kontrolü mümkün değildir.



Şekil 16. Üretilen silisyum nanotellerin iki farklı büyütmeye TEM görüntüleri.

3.3 Ultra-İnce Silisyum Pullar Üzerinde Üretilen Nanotellerle Üretilen Güneş Gözeleri

Güneş gözelerinin üretim basamakları şematik olarak Şekil 17’ de verilmiştir. Silisyum nanotellerin üretiminden sonra RCA temizliği ve oksit kaldırma işlemleri tekrarlanmıştır. Temizlenen ve oksiti kaldırılan p-tipi pullar sonrasında difüzyon fırınına koyularak fosforil klorür (POCl_3) ile p-n eklemi üretmek için aşılmalıdır. Difüzyon fırınındaki oksidasyon gözelerin yüzeyinde önlenemez fosfosilikat camını (PSG) oluşturmuştur. PSG ayrıştırılması için hacimce 1:4 oranında hazırlanmış HF ve saf su karışımı kullanılmış ve pullar çözeltide 30 saniye bekletildikten sonra saf su ile yıkanarak azot gazı altında kurutulmuştur. Ohmik ön ve arka kontaklar termal buharlaştırma yöntemi ile kaplanmıştır. 500 nm kalınlığındaki alüminyum p-tipi silisyuma arka kontak olarak kaplanmış ve azot altında 800 °C’ de 40 dakika tavlansmıştır. Bu işlem ile p-tipi silisyumda arka yüzey alanı da (BSF) oluşmaktadır. Ön taraftaki gümüş parmak elektrotları, yine 500 nm kalınlığında metal maske aracılığı ile buharlaştırılmıştır. Ön kontaklar için 2 farklı yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde gümüş doğrudan silisyum nanotellerin üzerine kaplanmıştır. İkinci yöntemde ise gümüş nanotel olmayan ve fotorezist ile korunan düz silisyum üzerine kaplanmıştır. Bunun için kimyasal dağlama öncesi, ultra-ince pullar fotolitografi işlemine tabi tutularak üst kontağın kaplanacağı yerler desenlenmiştir. Aşılama ve diğer üretim basamakları aynen uygulanmıştır.



Şekil 17. Şematik olarak gözelerin üretiminde kullanılan basamaklar.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Aşındırma Hızı ve Ultra-İnce Pulların Yüzey Pürüzlülüğü

80 °C' de gerçekleştirilen aşındırma işlemi için çözelti konsantrasyonu ilintili aşındırma hızı ve ultra-ince silisyum (100) pulların yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 18' deki grafikte görülmektedir. Artan KOH konsantrasyonu ile aşındırma hızının azaldığı belirgindir. En yüksek aşındırma hızı (78 µm/h) ağırlıkça %10' luk KOH çözeltisi için elde edilmiştir. Hem OH⁻ hem de H₂O' nin yer aldığı KOH ile gerçekleşen reaksiyon şöyledir:

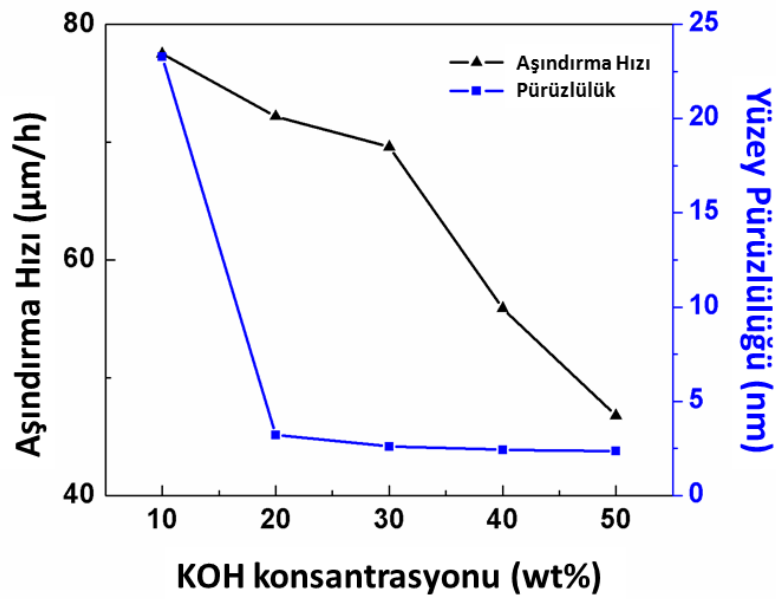
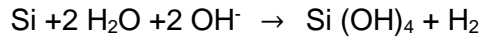
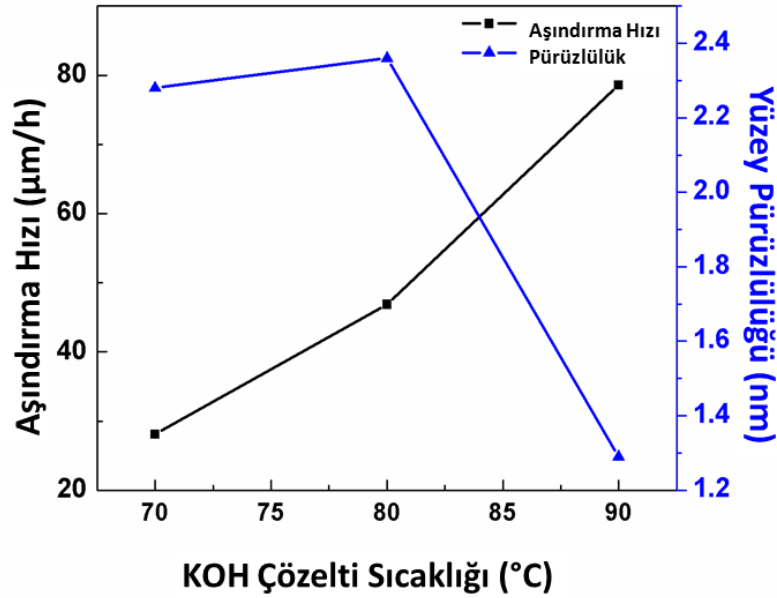


Figure 18. 80°C sabit sıcaklıkta aşındırma hızı ve silisyum pulların yüzey pürüzlülüğünün KOH konsantrasyonu değişimi grafiği. Çizgiler görsel yardım içindir.

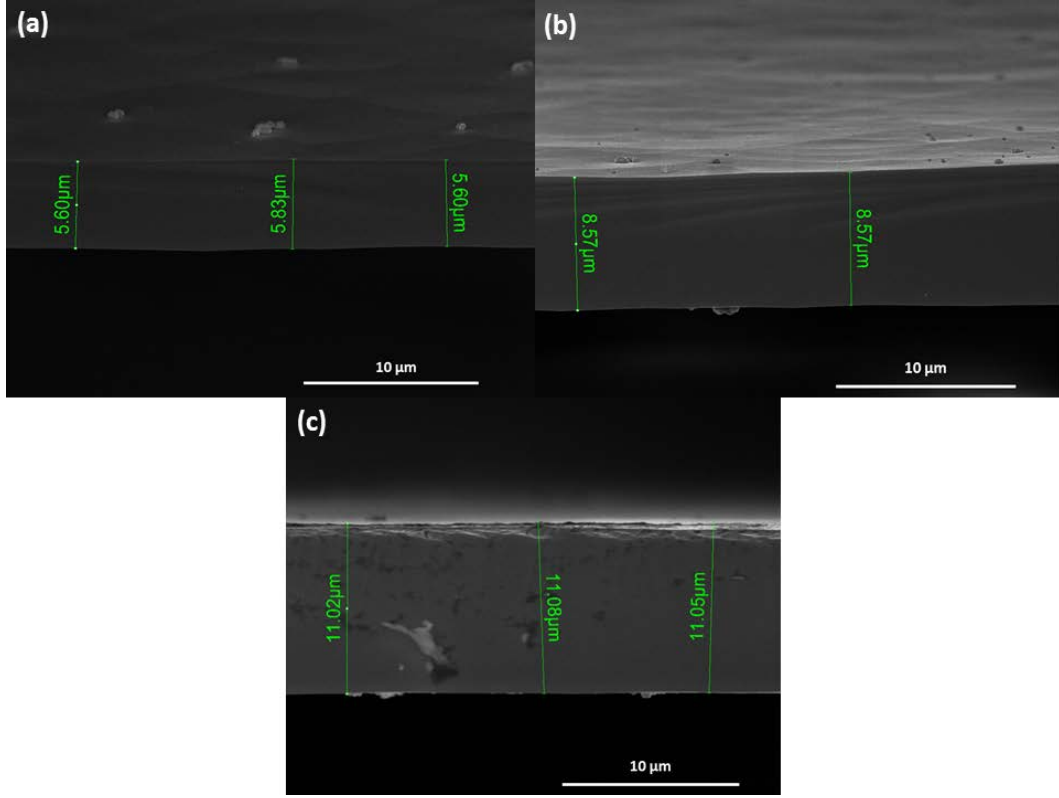
KOH içerisinde silisyumun aşındırılması sırasında hidrojen (H₂) baloncukları çıkmaktadır ve büyük oranda aşınan yüzey kalitesi bu balonların hangi hızda yüzeyden ayrıldığı ile ilintilidir. H₂ balonlarının oluşması KOH çözeltisi ile silisyum pulun yüzey etkileşimi ile alakalıdır. Eğer pulların yüzeyi hidrofilik ise küçük balonlar oluşur ve yüzey pürüzlülük değeri düşük olur. Öte yandan eğer yüzey hidrofobik ise büyük balonlar oluşarak yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Konsantrasyonu yüksek KOH çözeltisi silisyum yüzeyine daha çok yapışarak küçük balonların oluşmasını sağlar ve yüzey pürüzlülüğü düşük olur. Aslında balonlar aşındırma maskesi gibi

davranarak oluştukları noktada aşındırma işlemini durdurmaktadırlar. Gözlenen en düşük pürüzlülük değeri 80 °C' deki ağırlıkça %50 KOH çözeltisi için 2,4 nm' dir. Yüzey pürüzlülüğü çözelti konsantrasyonunu %30' un üzerine çıkartıldığında fazla değişmemektedir. Şekil 19 aşındırma hızı ve yüzey pürüzlülüğünün sıcaklık ile değişimini göstermektedir. Çözelti konsantrasyonu ağırlıkça %50' dir ve sabit tutulmuştur. Sıcaklığın 70 °C' den 90 °C' ye yükseltilmesi ile, aşındırma hızı artmıştır. Ortalama pürüzlülük değerinin sıcaklıkla arttığı ve (80°C' de 2,4 nm) ve 90 °C' ye gelindiğinde aniden düştüğü (1,3 nm) gözlemlenmiştir. Bu hususlar gözönüne alındığında yüksek aşındırma hızı ve düşük pürüzlülük için ideal sıcaklık ve konsantrasyon, sırasıyla, 90°C ve ağırlıkça %50 KOH çözeltisi olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında dağlama hızı ve yüzey pürüzlülüğü, sırasıyla, 78 $\mu\text{m}/\text{h}$ ve 1,3 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 19. Ağırlıkça %50 sabit çözelti konsantrasyonunda sıcaklıkla aşındırma hızı ve silisyum pulların yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Çizgiler görsel yardım içindir.

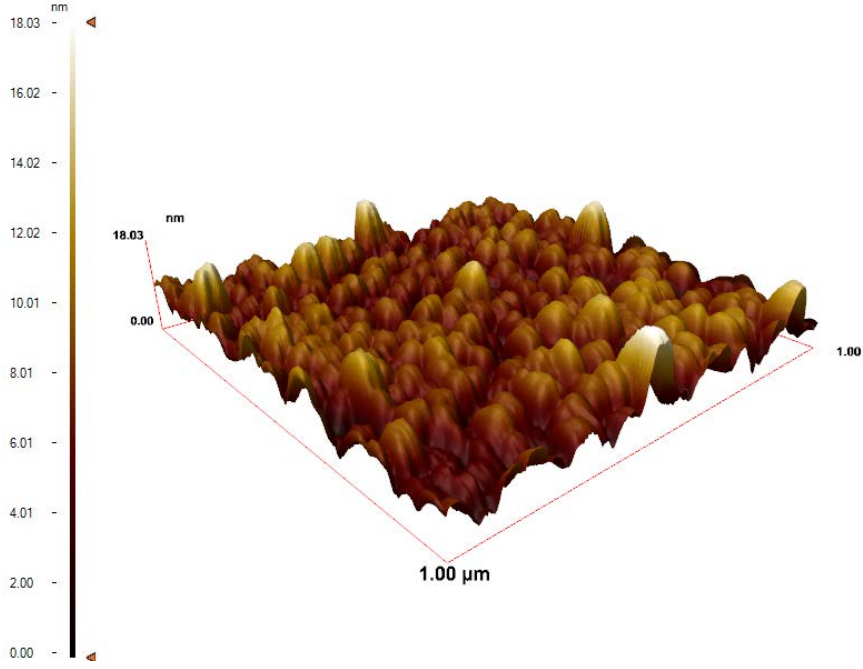
Aşındırılmış ultra-ince silisyum pulların kalınlığını ölçmek için SEM kullanılmıştır. 500 μm kalınlığındaki başlangıç puluyla 90°C' de ve ağırlıkça %50 KOH çözeltisi ile üretilen pulların kesit SEM görüntüleri Şekil 20 (a) - (c)' de verilmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi 11 μm ' den ince ve yüzeyi düz silisyum pullar KOH aşındırması yöntemi ile kolaylıkla üretilebilir. Ancak sözkonusu incelikteki pulların işlenmesindeki (aşılama, kontak kaplama vb.) zorluklar dolayısıyla gözelerin üretiminde 25 μm kalınlığındaki pullar tercih edilmiştir.



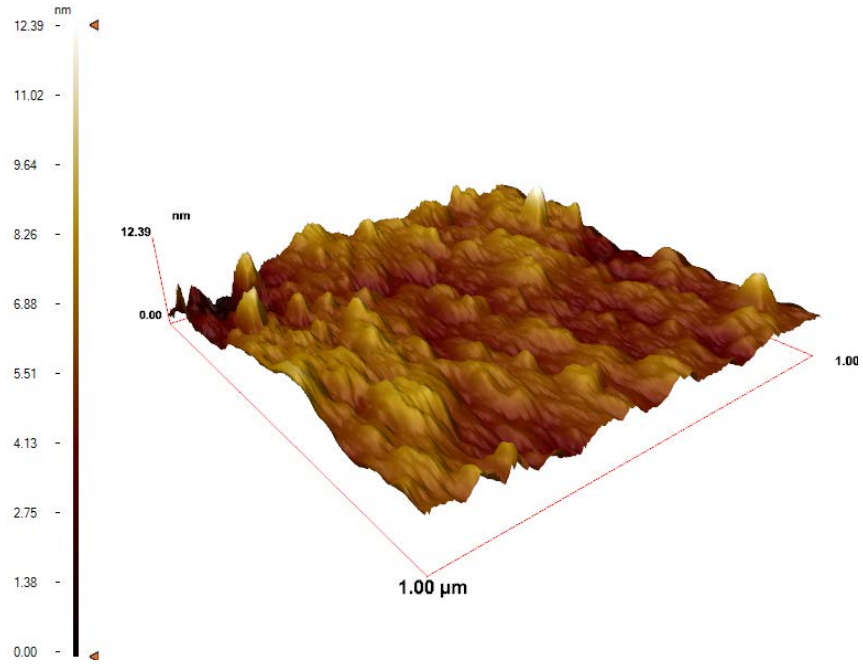
Şekil 20. Üretilen farklı kalınlıklardaki (a) 5,8, (b) 8,5 and (c) 11 µm ultra-ince silisyum pulların kesit SEM görüntüleri.

Ultra-ince silisyum pulların yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmıştır. Şekil 21 (a) ve (b)' de 3 saat süreyle ağırlıkça %50 KOH çözeltisinde, sırasıyla, 80 ve 90 °C' de üretilen pulların AFM görüntüleri verilmektedir. AFM ölçümleri sırasında 5 ayrı noktada 1 µm × 1 µm' luk bir alan taranarak ortalama pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Çözelti sıcaklığının 80 °C' den 90 °C' ye getirilmesi ortalama pürüz değerini 2,42' den 1,29' a düşürmüştür.

(a)



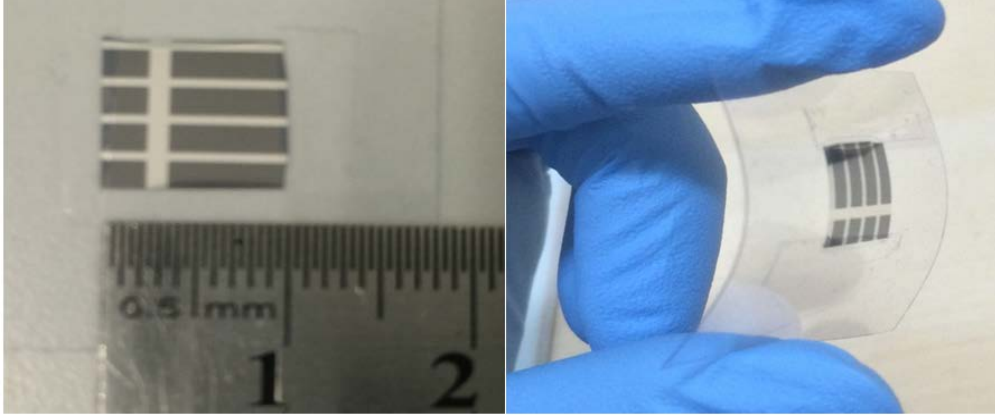
(b)



Şekil 21. (a) 80 ve (b) 90°C' de ağırlıkça %50' lik KOH çözeltisi kullanılarak üretilen ultra-ince silisyum pulların AFM yüzey görüntüleri.

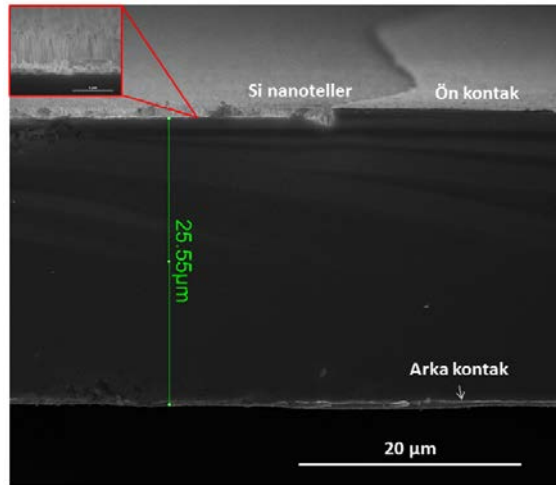
4.2 Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Özellikleri

Üretilen gözelerin kenar izolasyonundan sonraki resimleri Şekil 22' de verilmiştir. Gözelerin alanı 1 cm^2 dir ve esneklikleri şekilde belirgindir. Gözelerin koyu renkleri göze yüzeyine dik nanotellerden ötürüdür.



Şekil 22. Üretilen ultra-ince (solda) ve esnek (sağda) silisyum güneş gözelerinin fotoğrafları.

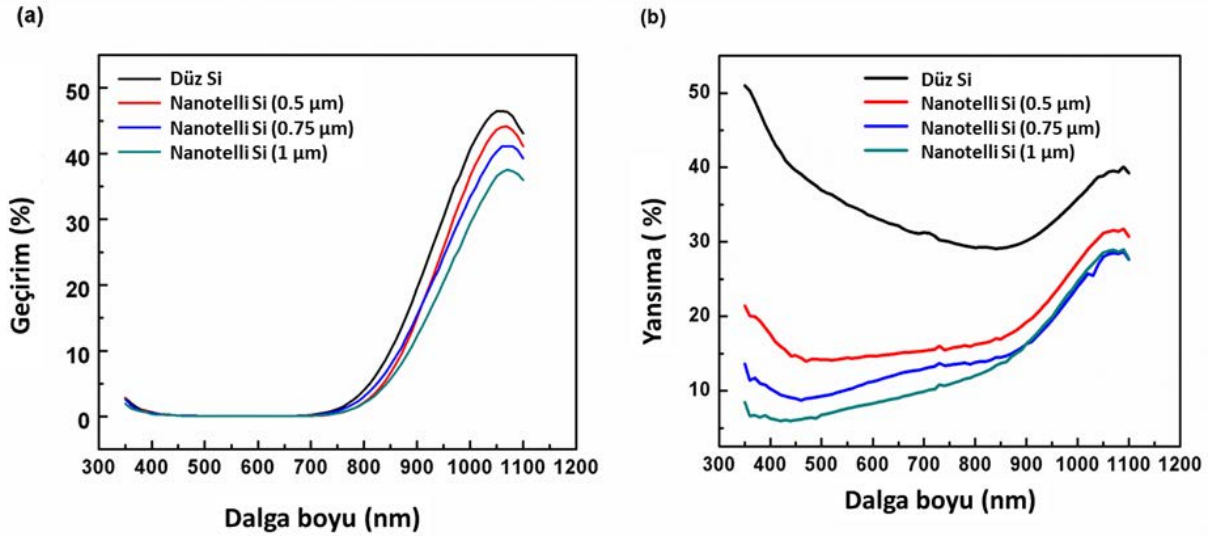
Üretilen gözelerin kesit SEM görüntüsü Şekil 23' te verilmiştir. Cihazın kalınlığı yaklaşık $25 \mu\text{m}$ ' dur ve nanotellerin uzunluğu da $0.75 \mu\text{m}$ ' dir. Ön ve arka kontaklar resim üzerinde işaretlenmiştir. İçresim göze yüzeyine dik silisyum nanotellerin yüksek çözünürlükteki SEM görüntüsüdür. Nanotellerin yüzeyindeki pürüzlülük PSG ayrıştırılması esnasında meydana gelmektedir.



Şekil 23. Üretilen ultra-ince güneş gözesinin kesit SEM görüntüsü.

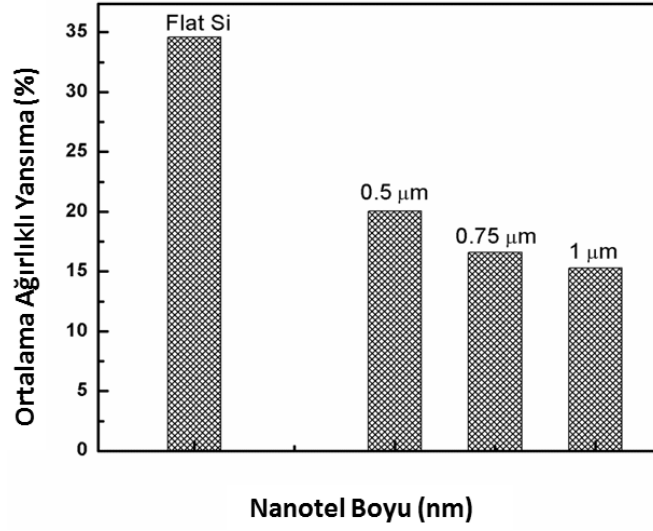
4.2.1 Optik Ölçümler

Bu çalışmada 25 μm kalınlığındaki silisyum pullarla güneş gözeleri üretilmiştir. Söz konusu pulların hem nanotelsiz hem de değişik uzunluklarda nanotellerle yansımaya ve geçirim spektralleri, sırasıyla Şekil 24 (a) ve (b)' de verilmiştir. Şekil 24 (a)' da 700 nm dalgaboyunda silisyum pulların ışığı geçirmeye başladıkları ve artan dalgaboyu ile pulların da geçirgenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak nanotellerin pul yüzeyinde üretilmesi ve nanotellerin boylarının artması ile optik geçirim azaldığı görülmektedir. Şekil 24 (b)' de, yansımaların nanotelli pullarda daha az olduğu belirgindir. Nanotel boyunun artması ile yansımaların daha da azaldığı görülmüştür.



Şekil 24 Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen 25 μm kalınlığındaki silisyum pulların (a) geçirim ve (b) yansımaya spektralleri.

Daha net olması açısından üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen 25 μm kalınlığındaki silisyum pulların ortalama ağırlıklı yansımaya değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 25' te gösterilmektedir. Nanotellerin üretilmesi ile ortalama ağırlıklı yansımaya değeri düz silisyum pulda %34,6 iken üzerinde 1 μm nanotel üretilen silisyum pulda bu değer %15,3 olarak hesaplanmıştır. Bu husus nanotellerin ışığı hapsediği ve ultra-ince pullarda ışık emilimini artırdığının bir göstergesidir.



Şekil 25. Üzerinde farklı boylarda nanotel üretilen 25 μm kalınlığındaki silisyum pulların ortalama ağırlıklı yansımada değerleri grafiği.

4.2.2 Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Akım Yoğunluğu - Voltaj Karakteristikleri

Nanotelli gözelerin gümüş üst kontakın doğrudan nanotellerin üzerine atılması ile üretilen gözelerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri eğrisi Şekil 26' da verilmiştir. Tablo 1' de ise elde edilen göze parametreleri listelenmiştir. Silisyum nanotellerin üretilmesi ile gözeler daha çok emilim gerçekleştirmekte, daha çok taşıyıcı üretmektedir. Gözelerden elde edilen akım yoğunluğu da bu sebeple artmaktadır. Ancak, dolum faktörü (FF) ve fotovoltaik çevrim veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi nanoteller ile seri direncin artması ve üst kontak metalinin nanotelli yüzey üzerine tutunamamasıdır. Ayrıca, tavlama ile üst kontak metali Şekil 27' de görüldüğü üzere nanotelleri ıslatmamış ve nanotel yüzeylerinde topaklanmıştır.

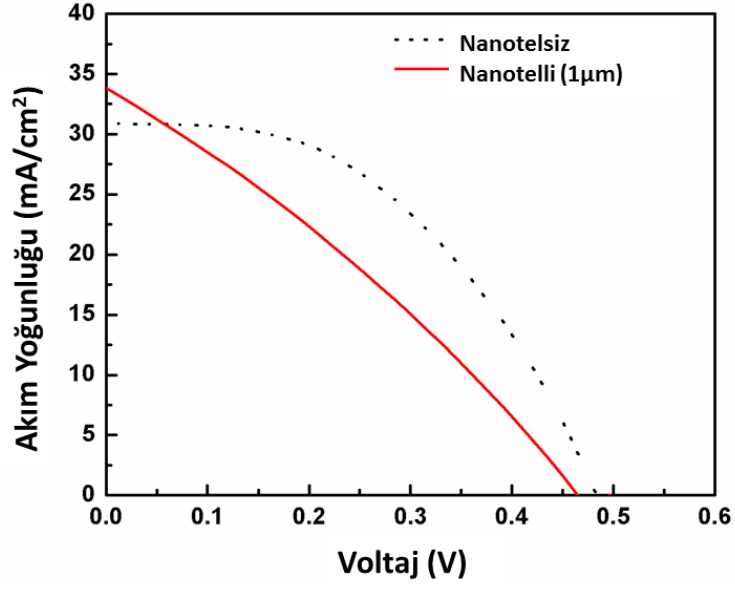
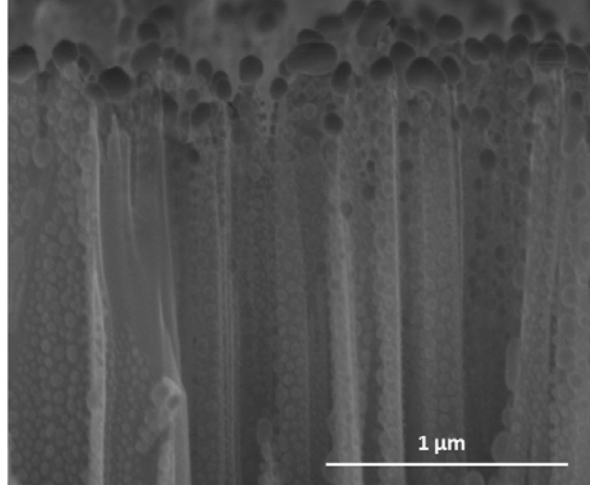


Figure 26. Nanotelli gözelerin gümüş üst kontağın doğrudan nanotellerin üzerine kaplanması ile üretilen gözelerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri.

Tablo 1. Nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin parametreleri.

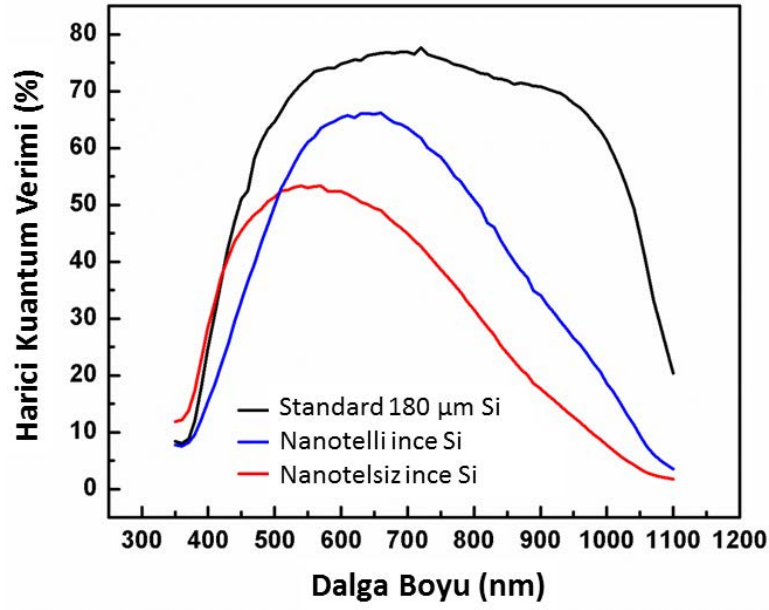
Numune	açık devre gerilimi V_{oc} (V)	kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} (mA/cm ²)	Dolum faktörü FF (%)	fotovoltaik çevrim verimi η (%)	seri direnç R_s	Şant direnci R_{sh}
Nanotelsiz	0,48	30,8	47,1	7	15,2	1933
Nanotelli	0,47	34,3	30	4,85	26,3	53,8



Şekil 27. Tavlama sonrası topaklanan üst kontak metalinin SEM görüntüsü.

4.2.3 Harici Kuantum Verimi

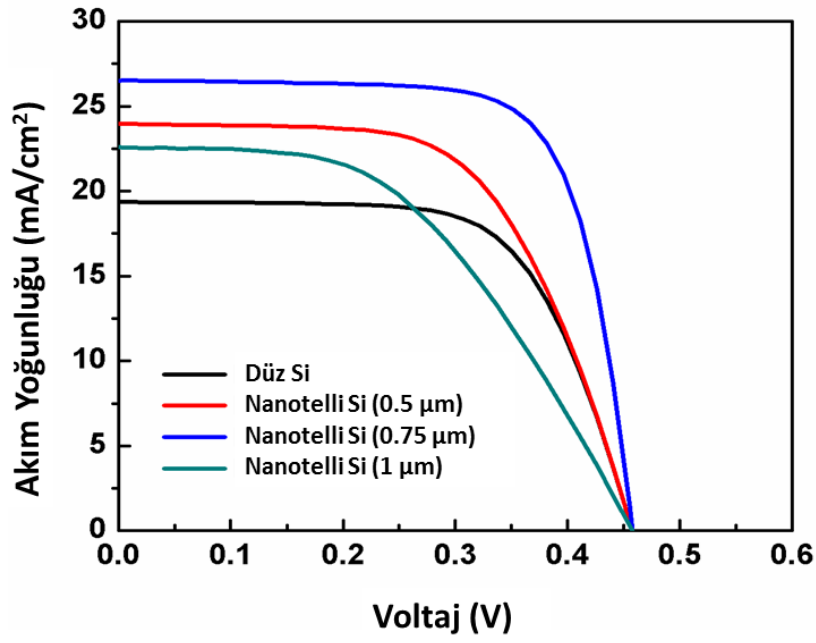
Şekil 28’ de üretilen gözelerin harici kuantum verim (EQE) eğrileri verilmiştir. Kıyaslama amaçlı standart üretimde kullanılan 180 μm kalınlığındaki silisyum güneş gözесinden elde edilen EQE eğrisi de aynı şekilde yer almaktadır. Gözelerde kullanılan silisyum kalınlığındaki azalış kuantum verimini de azaltmıştır. Bu azalma özellikle kızılötesi bölgede daha belirgindir; çünkü gözeler bu bölgede Şekil 24 (a)’ da görüldüğü gibi daha geçirgendir. Kızılötesi bölgede nanotelli ultra-ince gözelerin spektral tepkisi nanotelsiz gözeye göre daha iyidir. Bu husus nanotellerin ışığı hapsedme etkisinden ve daha çok taşıyıcı üretmesinden kaynaklanmaktadır. Nanotelli gözelerin kuantum veriminin mavi bölgede daha düşük olduğu görünmektedir. Bu durumun sebebi ise mavi dalga boylarının gözelerin yüzeye daha yakın bölgesinde emilmesi, üretilen taşıyıcıların nanoteller boyunca üst elektroda taşınması ve kusurlu nanotel yüzeylerinde yeniden birleşme ihtimalinin artmasıdır.



Şekil 28. Nanotelli ve nanotelsiz ultra-ince silisyum gözelerin harici kuantum verim grafiği. Grafikte karşılaştırma amaçlı 180 µm kalınlığında standart gözeye ait değerler de verilmiştir.

4.2.4 Üst Konağı Optimize Edilmiş Ultra-İnce Silisyum Güneş Gözelerinin Akım Yoğunluğu - Voltaj Karakteristikleri

Daha öncede belirtildiği gibi üst kontak optimizasyonu için fotolitografi işlemi ile silisyum nanotellerin üretileceği alan belirlenmiştir. Dolayısıyla üst konağın kaplanacağı alanlar metal yardımcı aşındırma çözeltisinden etkilenmemiştir. Bu şekilde üretilen gözelerin farklı nanotel boylarındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği Şekil 29' da verilmiştir. Tablo 2' de ise elde edilen göze parametreleri listelenmiştir. Nanotellerin üretilmesi ile ultra-ince silisyum gözelerden elde edilen akım yoğunluğu değeri 19,4' ten 26,5 mA/cm²'ye çıkmıştır. Aradaki bu %36,6' lık artış nanoteller sayesinde emilimin artması ve daha çok taşıyıcı üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Gözelerin fotovoltaik çevrim verimi nanotelsiz gözede %5,8 iken 0,5 µm uzunluğundaki nanotelli gözede %6,7' ye çıkmıştır. Maksimum fotovoltaik çevrim verimi 0,75 µm uzunluğundaki nanotelli gözede %8,8 olarak kaydedilmiştir. Dolayısıyla nanotellerin göze üzerinde üretilmesi ile (%5,8' den %8,8' e) %51' lik bir artış sağlanmıştır. Nanotel uzunluğunun 1 µm' ye artırılması ile kısa devre akım yoğunluğu ve dolayısıyla fotovoltaik çevrim veriminde düşüş yaşanmıştır. Bunun sebebi üretilen taşıyıcıların nanoteller boyunca üst elektroda taşınması ve kusurlu nanotel yüzeylerinde seri direncin artmasıdır.



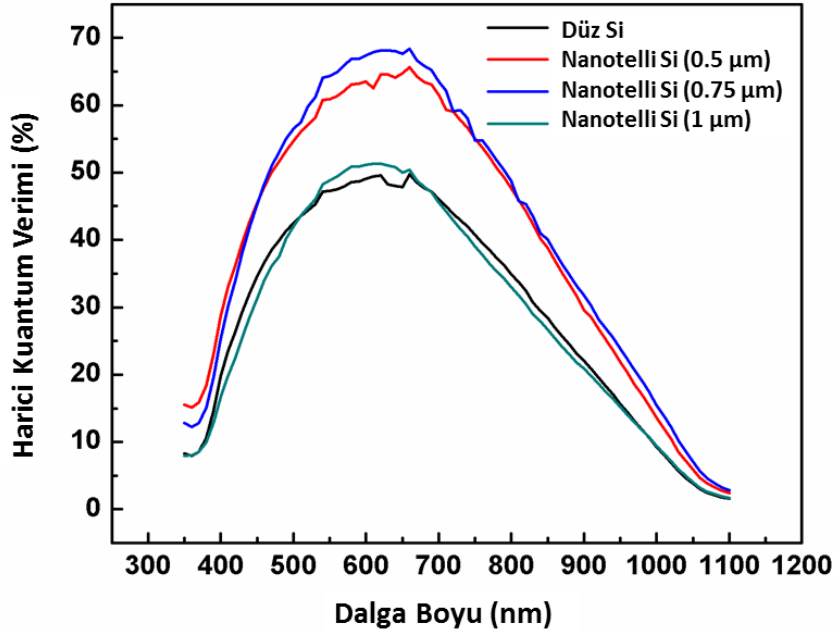
Şekil 29. Üst kontağın optimizasyonundan sonra nanotelli gözelerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri.

Tablo 2. Üst kontak optimizasyonundan sonra nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin parametreleri.

Numune	açık devre gerilimi V_{oc} (V)	kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} (mA/cm ²)	dolum faktörü FF (%)	fotovoltaik çevrim verimi η (%)	seri direnç R_s	şant direnci R_{sh}
Nanotelsiz	0,46	19,37	65,7	5,82	44,3	24855
0,5 µm nanotelli	0,46	23,93	60,61	6,70	33,5	19874
0,75 µm nanotelli	0,46	26,49	72,68	8,83	26,3	44700
1 µm nanotelli	0,44	22,56	48,03	4,81	67,8	7789

4.2.5 Üst Kontak Optimizasyonundan Sonra Harici Kuantum Verimi Ölçümleri

Üst kontakın optimizasyonundan sonra nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin harici kuantum verim grafiği Şekil 30' da verilmiştir. Bütün gözelerde harici kuantum verim grafiği 700 nm' nin üzerindeki dalgalarda azalmıştır. Bu husus geçirim spektrası (Şekil 24 (a)) ile uyum içerisindedir. Söz konusu dalga boylarında geçirim spektrasındaki artış azalan ışık emilimi ve taşıyıcı üretiminden kaynaklanmaktadır. 0,5 ve 0,75 μm uzunluğundaki nanotelli gözelerde harici kuantum verimi nanotelsiz göze kıyasla incelenen dalga boyu aralığında belirgin şekilde artmıştır. Bu husus ışığın nanoteller arasında hapsolmesi ile daha fazla taşıyıcı üretiminin gerçekleşmesi sayesinde. 0,75 μm uzunluğundaki nanotelli gözeden en yüksek harici kuantum verimi elde edilmiştir ve fotovoltaik çevrim verimi ile uyumludur. En uzun nanotellerin (1 μm) üretildiği gözelerde harici kuantum veriminin düştüğü ve artan ışık emilimi ile artan üretilmiş taşıyıcıların hepsinin seri direnç ve yeniden birleşme yüzünden kaybedildiği açıktır. Nanotelli gözelerde üst kontak doğrudan nanotellerin üzerine kaplanmadığı için göze yüzeyine yakın üretilen taşıyıcılar (mavi ışık emilimi ile) nanoteller üzerinden elektrotlara gitmek zorunda değildir. Dolayısıyla harici kuantum verimi grafiğinin spektrumun mavi bölgesinde herhangi bir azalma görünmemektedir.



Şekil 30. Üst kontakın optimizasyonundan sonra nanotelli ultra-ince silisyum gözelerin harici kuantum verim grafiği.

5. SONUÇLAR

Bu projede silisyum bazlı güneş gözelerinde kullanılan silisyum pulların kalınlığının düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda sıcaklık ve çözelti konsantrasyonunun aşındırma hızı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi belirlenmiştir. Pulların inceltmesi ile azalan optik emilimi geri kazanmak için silisyum pulların yüzeyine dik silisyum nanoteller metal yardımcı aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Üzerinde dik hizalı nanoteller üretilmiş ultra-ince silisyum pullar ile sonrasında güneş gözeleri üretilmiştir. Cihazlarda nanotel uzunluğunun ve üst kontak mimarisinin cihaz verimine olan etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Nanoteller kullanıldığı için gözelerin üst yüzeyinde yansımayı önleyici kaplama kullanılmasına gerek kalmamıştır. Hem inceltme hem de nanotel üretiminde kullanılan yöntemler ucuz ve basittir. Kolaylıkla uygulanabilir ve üretim hattına entegre edilebilir.

Ultra-ince silisyum pullar KOH ile aşındırılarak elde edilmiş ve homoeklemlili silisyum güneş gözelerinin üretiminde kullanılmıştır. Silisyum nanotellerin üretiminde ise metal yardımcı dağlama yöntemi kullanılmıştır. Gözeler 25 μm kalınlığındaki silisyum pullar ile üretilmiştir. Daha düşük kalınlıktaki pullar (10-15 μm) kimyasal aşındırma yöntemi ile tekrar edilebilir şekilde üretilmesine rağmen mekanik olarak göze üretim işlemlerine (aşılama, kontak kaplama vb.) dayanamamaktadır. Nanotellerin boyları ise 0.5, 0.75 ve 1 μm ' dur. Nanoteller göze yüzeyinde tekrar edilebilir şekilde üretilebilmektedir. Gözelerin yüzeyinde 1 μm uzunluğunda nanotellerin üretilmesi ile %56'lık bir yansıma azalımı elde edilmiştir. Nanotelli gözelerdeki fotovoltaik çevrim veriminin nanotelsiz gözelerle kıyasla daha düşük olduğu görülmüş, problemin kaynağının üst kontak metalinde olduğu tesbit edilmiş ve üst kontak geometrisi değiştirilmiştir. Üst kontakın doğrudan nanotellerin üzerine değil fotolitografi ile önceden tanımlanan düz yüzeyler üzerine kaplanması ile gözelerin veriminde %51'lik bir artışla yaklaşık %9 verim elde edilmiştir. Bu artışın sebebi dik hizalı silisyum nanotellerin ışığı hapsedmesi, ışık emiliminin artması ve dolayısıyla daha fazla taşıyıcının üretilmesidir. Üst kontakın optimizasyonu ile harici kuantum veriminin mavi bölgesinde görülen azalma giderilmiştir. Söz konusu gözelerde mavi ışık ile üretilen taşıyıcılar nanoteller üzerinden değil; doğrudan silisyum pul üzerinden kolayca üst elektrota ulaşmaktadır.

Projede geliştirilen, üzerinde nanoteller üretilen ultra-ince silisyum pullar ile ayrıca heteroeklemlili ve hibrit gözeler de üretilebilir. Bu amaçla p-n eklemi oluşturmak için tamamlayıcı katman olarak yarıiletken polimerler, çeşitli metal oksit ve amorf-silisyum ince filmler kullanılabilir. Nanotellerle geliştirilen ultra-ince silisyum gözelerin üretiminde yansımayı önleyici

kaplama ve pasivasyon tabakası bulunmamaktadır. Silisyum nanotellerin üretimi ile artan yüzey alanı ve beraberinde gelen artan yeniden birleşme oranını azaltmak için yüzey pasivasyon tabakası kullanılabilir. Bu husus özellikle silisyum gibi yeniden birleşme hızının yüksek olduğu malzemelerde önem taşımaktadır. Bu amaçla birkaç nanometre kalınlığındaki kristal hata miktarı az olan bir metal oksit tabakası nanotellerin üzerine kaplanabilir. Sözkonusu ince metal oksit ince filmlerin kaplanmasında atomik katman biriktirme (ALD) yöntemi kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Alvi, P. A., Lourembam, B.D., "A process to fabricate Si₃N₄ and SiO₂ micro-membrane using front side lateral etching technology," *Sensor Review*, 26 (3), 179-185 (2006).
- Bergmann, R., Rinke, T., Wagner, T. and Werner, J. "Thin film solar cells on glass based on the transfer of monocrystalline Si films", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 65(1-4), 355–361 (2001).
- Candace K. C., Reken, N. P., O'Connell, M.J., Korgel, B.A., and Cui, Y., "Solution-Grown Si Nanowires for Lithium-Ion Battery Anodes", *ACS Nano*, 4(3),1443-1450 (2010).
- Cao, L., Park, J., Fan, P., Clemens, B., Brongersma, M.L., "Resonant germanium nanoantenna photodetectors," *Nano Lett.*, 10(4):1229–33 (2010).
- Dross, F., Robbelein, J., Vandeveld, B., Van Kerschaver, E., Gordon, I., Beaucarne, G., Poortmans, J. "Stress-induced large-area lift-off of crystalline Si films", *Applied Physics A*, 89(1), 149–152 (2007).
- Fan, Z., Razavi, H., Do, J., Moriwaki, A., Ergen, O., "Three-dimensional nanopillar-array photovoltaics on low-cost and flexible substrates", *Nature Mater.*, 8(8):648–53 (2009).
- Ford, A.C., Ho, J.C., Chueh, Y., Tseng, Y., Fan, Z., "Diameter-dependent electron mobility of InAs nanowires", *Nano Lett.*, 9(1):360–65 (2009).
- Garnett, E.G., Brongersma, M. L., Cui, Y., McGehee, M.D., "Nanowire Solar Cells", *Annu. Rev. Mater. Res.*, 41:269–95 (2011).
- Garnett, E., Yang, P., "Light trapping in Si nanowire solar cells," *Nano Lett.*, 10(3):1082–87 (2010).
- Gunawan, O., Sekaric, L., Majumdar, A., Rooks, M., Appenzeller, J., "Measurement of carrier mobility in Si nanowires", *Nano Lett.*, 8(6):1566–71(2008).
- International Energy Agency (IEA publication), "Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy," [Online] Available: <http://iea.org/papers/2010/pv-raodmap.pdf>, [Accessed: 6-July-2016].
- Kulakci, M., Es, F., Ozdemir, B., Unalan, H. E., and Turan, R., "Si nanowire network metal-semiconductor-metal photodetectors", *IEEE J. Photovoltaics*, 3(1), 548–553 (2013).
- Law, M., Greene, L.E., Johnson, J.C., Saykally, R., Yang, P., "Nanowire dye-sensitized solar cells", *Nat. Mater.*, 4(6):455–59 (2005).
- Lei, K. F., "Materials and Fabrication Techniques for Nano- and Microfluidic Devices, in *Microfluidics in Detection Science: Lab-on-a-chip Technologies*", pp. 1-28 (2014).
- L'evy-Clement, C., Tena-Zaera, R., Ryan, M.A., Katty, A., Hodes, G., "CdSe-sensitized p-CuSCN/nanowire n-ZnO heterojunctions", *Adv. Mater.*, 17(12):1512–15 (2005).

Ozdemir, B., "Fabrication of Si nanowires by electroless etching and investigation of their photovoltaic applications in metallurgical and materials engineering", middle east technical university, 12 (2011).

Ozdemir, B., Kulakci, M., Turan, R. and Unalan, H.E "Si nanowire – poly (3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) heterojunction solar cells", Appl. Phys. Lett., 99, 113510 (2011).

Peng, K., Fang, H., Hu, J., Wu, Y., Zhu, J., Yan, Y., and Lee, S., "Metal-Particle-Induced, Highly Localized Site-Specific Etching of Si and Formation of Single-Crystalline Si Nanowires in Aqueous Fluoride Solution," Chemistry a European Journal, 12, 7942 – 7947 (2006).

Qian, F., Gradecak, S., Li, Y., Wen, C.Y., Lieber, C.M., "Core/multishell nanowire heterostructures as multicolor, high-efficiency light-emitting diodes", Nano Lett., 5(11), 2287-91 (2005).

Schmidt, V., Riel, H. Senz, S. Karg, S., Riess, W., Go"sele, U., "Realization of a silicon nanowire vertical surround-gate field-effect transistor", Small, 2, 85-88 (2006).

Swanson, R.M. "Point-contact solar cells - Modeling and experiment", Sol. Cells, 17(1), 85–118 (1986).

Tanaka, H., Yamashita, S., Abe, Y. "Thin-film crystalline Si solar cells obtained by separation of a porous Si sacrificial layer", Sensors and Actuators, A114, 516-520 (2004).

Tiedje, T., Yablonovitch, E., Cody, G.D. and Brooks, B.G. "Limiting Efficiency of Si Solar Cells", IEEE Trans. Electron. Dev., 31(5), 711–716 (1984).

UC of Santa Barbara - Department of geography News, [Online] Available: <http://www.geog.ucsb.edu/events/department-news/723/inventor-of-dye-sensitized-solar-cells-awarded-millennium-technology-prize>, [Accessed: 6-July-2016].

Wang, S., Weil, B.D., Li, Y., Wang, K.X. "Large-area free-standing ultrathin single-crystal Si as processable materials", Nano Lett., 13 (9), 4393–4398 (2013).

Wang, K., Chen, J.J., Zeng, Z.M., Tarr, J., Zhou, W.L., "Synthesis and photovoltaic effect of vertically aligned ZnO/ZnS core/shell nanowire arrays", Appl. Phys. Lett., 96(12):123105 (2010).

Xiang, J., Lu, W., Hu, Y., Wu, Y., Yan, H., Lieber, C.M., "Ge/Si nanowire heterostructures as high performance field-effect transistors", Nature, 441(7092):489–93 (2006).

Yamamoto, K., Suzuki, T., Yoshimi, M., Nakajima, A., "Optical Confinement effect for below 5 μm Thin Film Poly-Si Solar Cell on Glass Substrate", Jpn. J. Appl. Phys., 36 (Part 2, No. 5A), L569–L572 (1997).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 115M155
Proje Başlığı: Ultra-İnce Silisyum Üzerinde Üretilen Silisyum Nanotellerin Güneş Gözesi Uygulaması
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç. Dr. Hüsnü Emrah Ünalın Prof. Dr. Raşit Turan Dr. Pantea Aurang
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Üniversiteler Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı No:1 Çankaya/ ANKARA 06800
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.07.2015 – 01.07.2016
Öz (en çok 70 kelime) Önerilen projede öncelikle 20 ila 35 µm kalınlığında ultra-ince silisyum pullar üretilmiştir. Üretimde kimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Detaylı parametrik çalışmanın ardından ultra-ince silisyum üzerinde dik hizalı silisyum nanoteller metal yardımcı aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Ultra-ince tek kristalli silisyum üzerinde üretilen nanotellerin yapısal ve optik özellikleri (yansıtma, geçirgenlik, emilim vb.) detaylı şekilde incelenmiştir. Sonrasında ultra-ince silisyum ile tamamiyle çalışır halde homoeklemlenmiş güneş gözeleri üretilmiş ve cihazların verimlilikleri incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Ultra-ince silisyum, optik özellikler, silisyum nanoteller, güneş gözeleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/>
<small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
Projeden Yapılan Yayınlar: Projeden henüz yapılan yayın yoktur.

1. Proje yürütücüsü iletişim bilgileri:

Adı – Soyadı : Hüsnü Emrah Ünalın, ODTÜ Metalürji ve malzeme Mühendisliği Bölümü, 06800
Ankara
Unvanı : Doç.Dr.
Telefon : (312) 210 59 39
E-posta adresi : unalan@metu.edu.tr