



# GaAs yarıiletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilmesi ve FLIM tekniği ile yüzey karakterizasyonu

## Fabrication of the micro grooves on GaAs semiconductor surfaces and surface characterization via FLIM technique

Sabriye Acikgoz<sup>1,\*</sup> , Hasan Yungevis<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman, Türkiye

### Öz

Farklı üretim koşulları altında gerçekleştirilen çift hücreli elektrokimyasal aşındırma metodu ile p-tipi Galyum arsenik (GaAs) yarıiletken üzerinde paralel mikro yarıklar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Mikro yarıkların yüzey morfolojisini analiz etmek için alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. GaAs yüzeyinde derinliği 210 ile 30 nm arasında değişen mikro yarıklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, mikro yarıkların kimyasal yapısı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) tekniği ile belirlenmiştir. EDS analizi mikro yarıkların yaklaşık olarak 1:1 atomik oranlarda galyum (Ga) ve arsenik (As) elementlerini içerdiğini doğrulamıştır. Mikro yapı GaAs yüzeyin zaman uyumlu foto ışınma özelliklerini incelenmek için floresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskopi (FLIM) tekniği uygulanmıştır. 210, 70 ve 30 nm derinliğe sahip olan mikro yarıkların üzerindeki taşıyıcı ömürleri sırasıyla 0.70, 0.37 and 0.25 ns olarak ölçülmüştür. Taşıyıcı rekombinasyon ömrünün, yüzey rekombinasyonlarından dolayı yarıkların derinliğine güçlü bir şekilde duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda, GaAs mikro yarıkların yüzey rekombinasyon hızı  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$  olarak hesaplanmıştır. Üretilen mikro yarıklar optoelektronik aygıt uygulamaları için ilgi çekici görünmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Galyum arsenik, Elektrokimyasal aşındırma, Mikro yarıklar, FLIM mikroskobu, Taşıyıcı rekombinasyon ömrü haritası

### 1 Giriş

Yüksek elektron mobilitesi, doğrudan geçişli bant yapısı, düşük güç tüketimi ve yüksek kırılma alanı gibi nadir özelliklere sahip olan GaAs modern optoelektronik aygıt teknolojisinde en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir [1-4]. Örneğin; foto detektörler [5], yüksek performanslı lazerler [6], kuantum bilgi işlenmesi [7] gibi pek çok aygıt için GaAs yarıiletkeni mükemmel bir alttaş malzemesi olmuştur. Aynı zamanda, GaAs yarıiletken yüzeyinde üretilen nano ve mikro boyuttaki homojen yapılar bu yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik özelliklerinin doğrudan kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Yasak bant aralığı mühendisliğinin de devreye girmesi ile

### Abstract

Paralel micro grooves were successfully fabricated on p-type gallium arsenide (GaAs) substrate by double cell electrochemical etching method under various growth conditions. The field emission scanning electron microscopy (FESEM) was used to analyze surface morphology of micro grooves. It is observed that micro grooves with a depth size ranging from 210 to 30 nm are formed on GaAs surface. Moreover, the chemical composition of micro grooves was determined by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) technique. The EDS analysis confirmed that the prepared grooves were composed dominantly of gallium (Ga) and arsenide (As) with atomic ratio of approximately 1:1. In order to probe time-resolved photoluminescence properties of micro structured GaAs surface, fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM) technique has been employed. The carrier lifetimes on microgrooves with varying dept 210, 70 and 30 nm are measured as 0.70, 0.37 and 0.25 ns, respectively. It has been concluded that the carrier recombination lifetime was strongly sensitive to the depth of grooves due to surface recombinations. Moreover, surface recombination velocity of GaAs micro grooves is calculated as  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$ . The grown micro grooves seem to be interesting for applications in optoelectronic devices.

**Keywords:** Gallium arsenide, Electrochemical etching, Micro grooves, FLIM Microscope, Carrier recombination lifetime map

GaAs temelli nano ve mikro yapılar ile üretilen optoelektronik aygıtların sayısı her geçen gün artmaktadır. Enerji bant yapısı ve yasak bant aralığının kontrollü bir şekilde ayarlanabildiği GaAs kuantum kuyular diyot lazer [8] ve ışık saçan diyot (LED) [9] uygulamalarında çokça karşımıza çıkmaktadır. Doğrudan geçişli bant yapısına sahip GaAs yarıiletkeni ile üretilen güneş hücreleri diğer yarıiletkenler ile üretilenlere göre oldukça yüksek verimlilik göstermektedir. Ancak GaAs kristalin yüksek maliyeti bu malzemenin güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılabilmesine engel teşkil etmektedir. Bu engeli bertaraf etmek ve daha az malzeme ile daha geniş aktif yüzey alanı elde edilmek için GaAs yüzeyinde nano teller üretilmiş ve

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sabriyeacikgoz@kmu.edu.tr (S. Acikgoz)  
Geliş / Recieved: 03.03.2022 Kabul / Accepted: 09.05.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1082122

güneş hücrelerinin verimlilikleri araştırılmıştır. Han ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada GaAs nano teller ile üretilen ve esnek yapıya sahip olan güneş hücrelerinin %16 civarında verimlilik gösterdiği tespit edilmiştir [10]. Ayrıca, düz GaAs yüzeyler ile kıyaslandığında çok daha düşük reflektans ve iyileştirilmiş absorptans değerleri sergileyen GaAs nano sütunlar, güneş hücresi [11], LED [12] ve lazer [13] uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Nano boyuttaki GaAs yüzeylerin yanı sıra mikro boyutta işlenmiş GaAs yüzeylerinde pek çok optoelektronik ve fotonik aygıt tasarımında avantaj sağladığı görülmektedir. GaAs mikro disk yapılarının lazer uygulamalarında tercih edildiği söylenebilir. Küçük oyuk hacmi ve yüksek kalite faktörüne sahip olan mikro disk lazerler, kendiliğinden ışımaya olanak sağlama nedeniyle olarak fısıldayan galeri modları (whispering gallery modes) açısından büyük bir avantaj oluşturmaktadır [14]. Ayrıca mikro boyutta üçgen şeklinde aşındırılan GaAs'ın yüzeyine doğru gelen ışığı tuzaklayarak anti-yansıtıcı yüzey gibi davrandığı söylenebilir [15]. Yansıtıcılık özelliğinin azalması ile birlikte, mikro boyutta yarıklar ihtiva eden GaAs yüzeyler ile üretilen güneş hücrelerinin verimliliğinin arttığını gösteren pek çok çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, düz ve mikro yarıklar içeren GaAs yüzeyleri ile üretilen güneş hücreleri kıyaslanmış ve GaAs yüzeyinde var olan yarıkların yüzey yansıtıcılığını azalttığı için güneş hücresinin kısa devre akımını %13 oranında artırdığı rapor edilmiştir [16].

Yarıiletken malzemelerin yüzeyinde mikro boyuttaki yarıklar odaklanmış iyon demeti litografisi, elektron demeti litografisi, lazer ablasyonu ve kimyasal aşındırma gibi farklı yöntemler kullanılarak üretilmektedir [17-21]. Söz konusu bu yöntemlerin her birinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, yüksek homojenliğe sahip yüzey üretiminin sağlanabildiği litografi teknikleri uzun süreli çalışmalar ve yüksek maliyetli cihazlar gerektirmektedir. Lazer ablasyonu ve kimyasal aşındırma yöntemlerinde ise üretilen yüzey morfolojisini doğrudan etkileyen kontrol parametrelerinin sayısı oldukça azdır. Son yıllarda düşük maliyetli ve kontrol parametreleri açısından oldukça zengin olan elektrokimyasal aşındırma tekniği de yarıiletken yüzeylerde nano ve mikro yapılar oluşturulması için kullanılabilmektedir [22-24].

Yarıiletken yüzeyinde nano ve mikro boyutta yüzeyler oluşturulması, yarıiletken malzeme yüzeyindeki taşıyıcı rekombinasyon ömrünün (carrier recombination lifetime) değişmesine neden olur. Taşıyıcı (elektron-boşluk) rekombinasyon süresi, yarıiletken malzemeleri karakterize eden ve bu malzemeler ile üretilen optoelektronik aygıtların verimliliği hakkında bilgi verebilecek olan en önemli parametrelerden biridir. Taşıyıcı ömrünü belirlemek için mikrodalga yansıması ile geçici fotoiletkenlik (Transient Photoconductivity by Microwave Reflection) [25], yarı kararlı durum fotoiletkenlik (Quasi-Steady-State Photoconductivity) [26], rezonans bağlantılı fotoiletkenlik bozunma eğrisi (Resonant Coupled Photoconductivity Decay) [27], iletim modülasyonlu fotoiletkenlik bozunma eğrisi (Transmission Modulated Photoconductivity Decay) [28] ve zaman uyumlu foto ışımaya ölçümleri (Time resolved

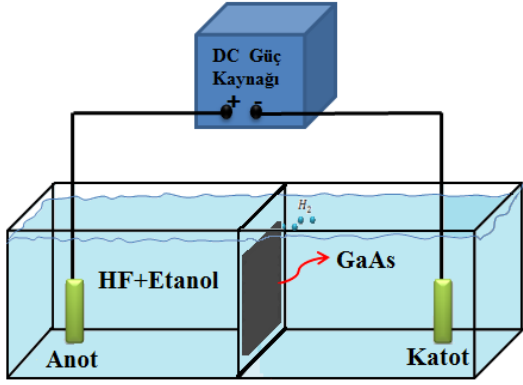
Photoluminescence) [29] gibi pek çok farklı yöntem kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada GaAs yarıiletken yüzeyinde çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile mikro boyutta yarıklar oluşturulmuştur. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedenleri ise düşük maliyetli, oldukça hızlı ve çok fazla kontrol parametresine sahip olan bir yöntem olmasıdır. Akım yoğunluğu, aşındırma süresi ve aydınlatma kaynağı gibi kontrol parametrelerinin yüzeyde oluşan yarıkların genişliği, derinliği ve yarıklar arasındaki mesafeye etkisi incelenmiştir. Literatürde, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi aracılığıyla GaAs yarıiletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilebileceğini gösteren bir bilimsel çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmamız, doğrudan geçişli bir yarıiletken olan GaAs yüzeyinde hızlı ve basit bir şekilde homojen ve farklı boyutlarda mikro yarıklar üretilebileceğini ispatlayarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, üretilen GaAs yüzeyler üzerindeki elektron-boşluk rekombinasyon süresi zaman uyumlu fotoışımaya tekniği ile incelenmiştir. Floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) ile GaAs yarıiletken yüzeyinin iki boyutlu yaşam ömrüne bağlı FLIM haritaları elde edilmiştir. Literatürde ilk kez, GaAs yüzey morfolojisinin yük taşıyıcıların rekombinasyon hızını nasıl değiştirdiği iki boyutlu FLIM haritaları kullanılarak belirlenmiştir. Yarıiletken yüzeylerde elektron-boşluk sürelerinin belirlenmesi, bu yarı iletken ile üretilen optoelektronik aygıtın performansı ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bu çalışmamızdan elde edilen sonuçlar GaAs yarıiletken ile üretilen aygıt teknolojisi için önemli bir ön çalışma niteliğindedir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Elektrokimyasal aşındırma ile mikro yarıkların üretilmesi

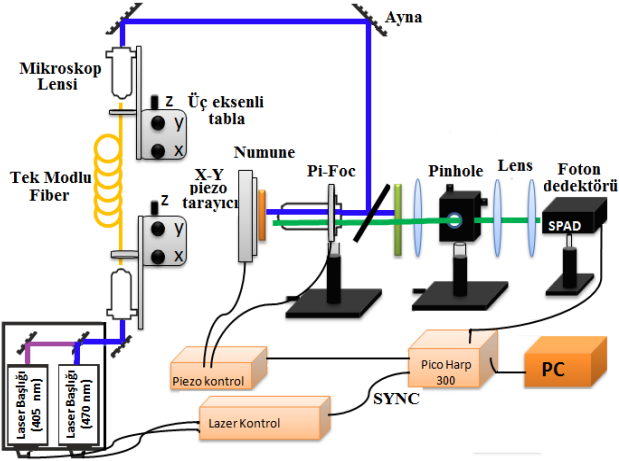
P-tipi (100) kristal yönelimli GaAs yüzeyindeki mikro yarıklar çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu yöntemde kullanılan deneysel düzenek Şekil 1'de verilmiştir. Aşındırma işlemi için yan yana yerleştirilmiş iki eşit asit hücresi kullanılır.  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  yüzey alanına sahip numuneler iki hücre arasında kalan yüzeye yerleştirilir. Hacimce (1:3) oranında HF ve Etanol ile hazırlanan elektrolit çözeltisinden her iki hücreye eşit miktarda konulur. Hücrelere özdeş platin elektrotlar yerleştirilir ve elektrotlardan biri güç kaynağının (-) kutbuna diğeri ise (+) kutbuna bağlanır. Elektrolit içeren asit hücreleri birbirinden izole edilmiştir. Bu nedenle, güç kaynağından sağlanan akım iki hücre arasındaki bölgeye yerleştirilen numunelerin üzerinden geçer ve elektriksel iletim numune üzerinden sağlanmış olur. Yarıiletken plaka yüzeyinde gerçekleşecek anodik çözünme yüzeyde bulunan pozitif yüklü boşlukların konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluk yoğunluğunu attırmak ve çözünmeye hızlandırmak için, elektrokimyasal aşındırma boyunca GaAs yarıiletkeninin yüzeyi bir ışık kaynağı ile aydınlatılabilir. Yarıiletken yüzeyinden geçen akım miktarı, aşındırma süresi ve aydınlatma kaynağının kullanımına göre, yarıiletken plaka yüzeyinde farklı boyutlarda mikro yarıklar oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma düzeneği

## 2.2 Floresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu

Elektron-boşluk rekombinasyon süresi ölçümlerinde zaman uyumlu tek foton sayma (Time-correlated single Photon Counting, TCSPC) tekniği kullanılmıştır. GaAs yarıiletken yüzeyindeki rekombinasyon süresi ölçümleri hem tek nokta ölçümleri ile hem de floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) aracılığıyla ard arda pek çok noktadan alınan verilerin birleştirilmesi ile yapılabilir. FLIM mikroskobu ile numune yüzeyinde seçilen özel bir bölgenin ışımaya şiddetine ve taşıyıcı yaşam ömrüne bağlı iki boyutlu yüzey haritaları elde edilebilmektedir. Ticari bir mikroskop kullanmaksızın çeşitli ayna, lens, filtreler ve foton sayma cihazları ile kurulan FLIM mikroskobunun şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. FLIM mikroskobunun deneysel düzeneği

FLIM mikroskobunda, dalga boyu 405 (Picoquant, LDH-C-D-405) ve 470 nm (Picoquant, LDH-C-D-470) olmak üzere iki farklı piko saniye atımlı darbeli lazer ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. Böylece, uyarılma spektrumları birbirinden farklı olan çok sayıda floresan malzeme ile çalışılabilmesi sağlanmıştır. Geometrilere bağlı olarak yarıiletken malzemelerden üretilen darbeli lazerlerin sağladıkları ışın demeti elips şeklindedir. Mikroskop düzeneğinde kullanılacak ışın demetinin Gauss formunda olması gerekmektedir. Lazer ışını tek modlu bir fiber içinden geçirilerek kolayca elipsten Gauss ışını formuna dönüştürülebilir. Bu amaçla lazer çıkışına tek modlu fiber

(Thorlabs, PAF-X-11-PC-A) yerleştirilmiş ve lazer ışığının bu fiberden geçmesi sağlanmıştır. Elde edilen Gauss formundaki lazer ışınının yönlendirilmesi için ise çeşitli aynalar kullanılır. Numuneye lazer ışını yönlendiren son ayna olarak ise özel bir ayna olan iki renkli ayna (Thorlabs, Dichroic mirror MD-498) kullanılır. Bu özel aynanın iki ayrı işlevi bulunmaktadır. Birinci işlevi, ışığın geliş doğrultusuna göre  $45^\circ$ ’lik açı ile konumlandırıldığında üzerine düşen lazer ışını düzlem ayna gibi davranarak numune üzerine yansıtmaktır. İkinci işlevi ise floresan malzeme üzerinde oluşan foto ışınımı içinden geçirerek foton dedektörüne kadar ulaşmasına imkân sağlamaktır. Büyütme oranı 100X olan bir mikroskop objektifi (Nikon, CFI L Plan Epi SLWD) numunenin hemen önüne yerleştirilir ve numuneye doğru gelen lazer ışını numune üzerine odaklanır. Düzeneğe eklenen objektifin odak uzaklığı (WD) 1 mm ve nümerik açıklığı (NA) 0.7’dir. Odak ayarının hassas bir şekilde yapılabilmesi için mikroskop objektifi z ekseninde nanometre mertebesinde hareket edebilen Pi-Foc (PI, P-721.CDA) piezo tabla üzerine yerleştirilmiştir. Maksimum odaklanma piezo tablanın SymphoTime bilgisayar programı kullanılarak hareket ettirilmesi ile sağlanır. Böylece, FLIM mikroskobunun çözünürlüğü iyileştirilmiş olur.

Numuneler iki boyutlu olarak maksimum  $100 \times 100 \mu\text{m}$  genişliğinde tarama yapabilen ve bilgisayar programı ile nanometre mertebesinde kontrol edilebilen özel bir piezo tabla (PI, P-733.2CD) üzerine yerleştirilir. Bu özel tablanın yapısında, boyutları X ve Y eksenlerine uygulanan gerilim değerlerine bağlı olarak artıp azalabilen piezo elektrik malzemeler kullanılmaktadır. Numune piezo tabla üzerine yerleştirildikten sonra, kontrollü bir şekilde tablaya elektriksel gerilim uygulanarak numunenin konumu değiştirilebilir. Foton sayma cihazı (Picoquant, PicoHarp-300) ile piezo tabla arasındaki iletişim SymphoTime bilgisayar yazılımı (Picoquant, SymphoTime 64) sayesinde kurulabilmektedir. FLIM analizi yapılacak bölgenin yüzey alanı ve ölçüm yapılacak adım aralığı SymphoTime bilgisayar yazılımı ile kolayca ayarlanabilmektedir.

Numunenin yüzeyi lazer ile aydınlatıldığı zaman, aynı anda numune üzerindeki pek çok farklı düzlemde ışımaya meydana gelecektir. Net bir FLIM görüntüsü elde edilebilmesi için, odak düzlemi dışından gelen bu ışınların yok edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, FLIM mikroskobu konfokal bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Farklı düzlemlerden gelen görüntüyü bertaraf edebilmek ve mikroskop objektifinin ön odak düzleminde gelen sinyali ayırt edebilmek için objektifinin arka odak düzlemine üzerinde mikron mertebesinde dairesel açıklık bulunan soğurma filtresi (Thorlabs, P75S) yerleştirilmiştir.

Yüzey taraması ve FLIM analizi yapılacak bölge ilk olarak SymphoTime 64 programı ile çok küçük parçalara (piksel) ayrılır. Ayrılan piksellerin konum bilgileri piezo tablaya elektriksel gerilim olarak iletilir. Tarama başlatıldığında, ilk pikselde bulunan molekül lazer tarafından uyarılır ve oluşan ışımının şiddeti ile foton dedektörüne ulaşma süresi (yaşam ömrü) zaman uyumlu tek foton sayma tekniği ile ölçülür. FLIM mikroskobumuzda, fotonların tespiti için tek foton çığ dedektörü (MPD, SPAD) tercih edilmiştir. Foton dedektörüne ulaşan optik sinyal

öncelikle elektriksel bir sinyale dönüştürülür ve daha sonra tek foton sayma cihazına gönderilir. Farklı piksellerdeki moleküller de peş peşe uyarılır ve her bir moleküle ait konum bilgisi ile numune yüzeyinde oluşan fotonların detektöre varma süresi (lifetime) kaydedilir. Her bir piksel de ölçülen yaşam ömrü ve ışınım şiddeti değerleri SymphoTime 64 programı ile 2 boyutlu bir FLIM resmi şeklinde birleştirilir. FLIM resimleri ile numune üzerinde her noktada ışınım şiddeti ve yaşamömrü değerleri görsel olarak ifade edilmiş olur.

### 2.3 Yarıiletkenlerde rekombinasyon süreçleri ve taşıyıcı ömrünün hesaplanması

Bir yarıiletkeni uygun şiddete sahip bir ışık kaynağı ile uyardığımızda, yarıiletkenin değerlik bandında bulunan elektronlar kazandıkları ekstra enerjiyi kullanarak iletim bandına geçebilir. İletim bandında bir süre kalan elektron değerlik bandındaki bir boşluk ile birleşerek değerlik bandına geri döner. Yığımsal (bulk) haldeki yarıiletkenlerde elektron-boşluk rekombinasyon süreci üç farklı şekilde meydana gelebilmektedir. Bu süreçlerden birincisi *ışımali (radiative) rekombinasyon* sürecidir. Bu süreçte, iletim bandındaki elektron doğrudan değerlik bandına geçiş yapar ve boşluk ile birleşir. Süreç sonunda iletim ve değerlik seviyeleri aradaki enerji farkına karşılık bir foton yayınlanır. İkinci rekombinasyon süreci ise *Shockley-Read-Hall (SRH)* olarak adlandırılır. SRH sürecinde ise yarıiletkenin kristal yapısında bulunan kusurlar ve düzensizliklerin oluşturduğu yeni tuzak enerji seviyeleri (trap states) etkin rol oynar. Kusurlar tarafından oluşturulan bu tuzak enerji seviyeleri sayesinde yarıiletkenin mevcut enerji bant yapısı modifiye edilmiş olur ve elektron-boşluk çiftleri bu tuzak enerji seviyelerini kullanarak ışınım yapmadan birleşebilirler. Enerji farkı ise madde içindeki fononlar aracılığı ile örgü titreşimlerine yani termal enerjiye dönüştürülür. Kristal içindeki kusur yoğunluğu arttıkça yeniden birleşim yaşam ömrü de kısalmır. Aynı zamanda, yarıiletkenin ön ve arka yüzey atomları iç kısımlarındaki diğer atomlar ile aynı bağ yapısına sahip değildir. Yüzeydeki atomların komşu bağlarında eksiklik vardır ve bu eksiklik yarıiletkenin yüzeyinde bağ kusurlarının oluşmasını sağlar. Bağ kusurlarının yoğunluğu nedeniyle yığımsal yarıiletkenlerin yüzeye yakın kısımlarında SRH rekombinasyon süreci daha baskın olarak gerçekleşir. Üçüncü elektron-boşluk rekombinasyon süreci ise *Auger*'dir. Işımsız bir süreç olarak nitelenen Auger rekombinasyon süreci gerçekte ışımali rekombinasyona benzer bir şekilde gerçekleşir. Ancak enerji farkının bir foton olarak yayınlanması yerine başka bir yük taşıyıcıya (elektron ya da boşluk) aktarılması söz konusudur. Bu yük taşıyıcı ise daha sonra termal olarak eski enerji seviyesine geri dönmektedir. Auger rekombinasyon süreci genellikle yüksek katkılanma oranına sahip (heavily doped) yarıiletkenlerde görülmektedir. Bu durumda yığımsal yarıiletkenler için etkin rekombinasyon yaşam ömrü ( $\tau_b$ ) **Denklem (1)**'de ki gibi yazılabilir [30-32].

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} \quad (1)$$

Burada  $\tau_{Rad}$ ,  $\tau_{SRH}$  ve  $\tau_{Aug}$  sırasıyla ışımali, *Shockley-Read-Hall* ve Auger rekombinasyon ömürlerini ifade etmektedir. Bir yarıiletkendeki uyarılan elektronun iletim bandında kalma süresi ya da elektronun-boşluk rekombinasyon yaşam ömrü (electron-hole recombination lifetime), bu yarıiletken ile tasarlanacak optoelektronik aygıtın verimliliği için önemli bir parametredir.

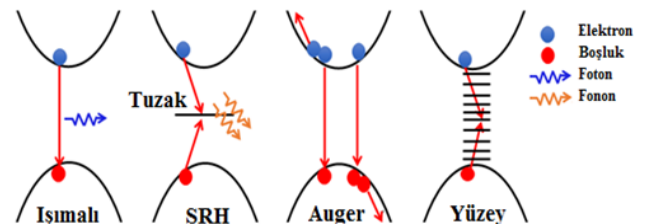
Elektron-boşluk rekombinasyon süresi yarıiletken yüzeyin boyutlarına bağlı olarak da değişkenlik gösterebilir. Özellikle nano yapıli yarıiletkenlerde yük taşıyıcıların difüzyon uzunluğu parçacık boyutu ile kıyaslanabilir olduğunda yüzey rekombinasyonlarının etkisi (surface recombination) ortaya çıkmaya başlar. Yarıiletken yüzeylerin nano ölçekteki boyutlarına bağlı olarak oluşan bu etki, yarıiletken içindeki yük taşıyıcıların oldukça küçük bir hacim içinde sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Kuantum sınırlama etkisinin bir sonucu olarak yarıiletken içinde yük taşıyıcıları tuzaklayan ve yeni elektron-boşluk birleşim merkezleri gibi davranan alt enerji seviyeleri oluşur. Bu yeni alt enerji seviyeleri elektron-boşluk rekombinasyon sürecinin kolaylaşmasını ve taşıyıcı ömrünün kısılmasını sağlayabilir. Alt enerji seviyelerinin oluşumunda yarıiletken nano yüzeyin yüzey/hacim oranı (surface-to-volume ratio) belirleyici rol oynar. Yüzey/hacim oranı azaldıkça enerji seviyelerinin yoğunluğu artar ve yüzey rekombinasyonlarının etkisi daha belirginleşir. Bu durumda nano yapıli yarıiletkenler de etkin taşıyıcı ömrü ( $\tau_{Etkin}$ ) **Denklem (2)**'de ki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\tau_{Etkin}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_s} \quad (2)$$

Burada  $\tau_s$  yüzey rekombinasyon ömrünü ifade etmektedir. Yüzey rekombinasyon oranı yarıiletken yüzeyin kalınlığı ( $d$ ) ve yüzey rekombinasyon hızına ( $S$ ) bağlı olarak değişir. Bu ilişki ise **Denklem (3)**'de verilmiştir [33]. Yarıiletken yüzeyin kalınlığı azaldıkça etkin taşıyıcı yaşam ömrü kısalmaktadır. Yarıiletkenlerde görülen farklı rekombinasyon süreçleri **Şekil 3**'te şematik olarak gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2S}{d} \quad (3)$$

Bu çalışmada, GaAs yüzeylerinde oluşan mikro yapıların şekil ve boyutlarına bağlı olarak etkin taşıyıcı ömrünün nasıl değiştiği detaylı bir şekilde incelenmiştir.



**Şekil 3.** Yarıiletkenlerde elektron-boşluk rekombinasyon süreçleri

### 3 Bulgular ve tartışma

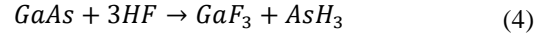
#### 3.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Bir yarıiletkenin asit ile etkileşime girmesi ve anodik çözünme sürecinin gerçekleşmesi için yarıiletken yüzeyinde yeterli miktarda pozitif yükün bulunması gerekmektedir. Yarıiletken yüzeyindeki boşlukların konsantrasyonuna bağlı olarak, asit ve yarıiletken ara yüzeyindeki atomlar çözünerek plakadan ayrılabilir. N-tipi yarıiletken malzemelerde baskın olan yük taşıyıcılar negatif yüklü elektronlardır. Bu tür yarıiletkenlerin anodik olarak çözünmesi için, yüzeydeki artı yüklü boşlukların sayısının çoğaltılması gerekir. Yarıiletken numunenin yüzeyinin uygun bir ışık kaynağı ile aydınlatılması yoluyla, yüzeydeki pozitif yük yoğunluğu kolayca artırılabilir. Fotonlara maruz bırakılan yarıiletken yüzeydeki atomların değerlik bandındaki elektronlar iletim bandına kolayca geçiş yapar ve geçiş yapan her elektron arkasında pozitif yüklü bir boşluk bırakır. Böylece, yarıiletken yüzeyindeki artı yüklerin konsantrasyonu giderek artar ve anodik çözünme koşulu sağlanmış olur. P-tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk yük taşıyıcılar boşluklardır. Bu nedenle yüzey aydınlatması yapılmadan da elektrokimyasal çözünme gerçekleşebilir. Bu çalışmada, p-tipi GaAs yarıiletken yüzeyler hacimce (1:3) oranında HF:Etanol ile hazırlanan asit çözeltisi içinde aşındırılmıştır. İlk olarak, karanlık bir ortamda farklı akım yoğunluklarının oluşacak yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. 15, 30 ve 45 mA/cm<sup>2</sup> olmak üzere üç farklı akım yoğunluğunda numuneler hazırlanmıştır. Karanlık bir ortamda 1 dk. süre ile aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri Şekil 4’de verilmiştir.

Anodik çözünme sürecinde en etkili parametrelerden biri akım yoğunluğudur. Öncelikle GaAs plaka iki özdeş hücre arasına yerleştirilip üzerinden 15 mA/cm<sup>2</sup> yoğunluğa sahip akım geçmesi sağlanmıştır. Şekil 4(a)’ya göre GaAs yüzeyinde çok az miktarda çözünme olmuştur. Akım yoğunluğunun iki katına çıkması (30 mA/cm<sup>2</sup>) durumunda ise çözünme oranının biraz daha fazla olduğu söylenebilir. Şekil 4(b)’de verilen SEM resminde düzenli bir yapı oluşumuna rastlanmamıştır. 45 mA/cm<sup>2</sup>’lik yüksek akım yoğunluğunda ise Şekil 4(c)’de görüldüğü gibi GaAs plaka yüzeyinde birbirine paralel mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe, yarıkların derinliği ve genişliği Image J programı kullanılarak belirlenmiştir. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.3 µm, yarık derinliği 180 nm ve yarık genişliği 270 nm olarak ölçülmüştür. Beklenildiği gibi, p-tipi GaAs plaka yüzeyinde herhangi bir yüzey

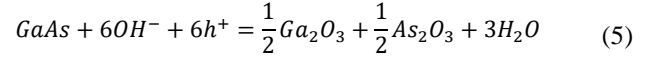
aydınlatılması yapılmadan anodik çözünme sağlanmış ve numune yüzeyinde homojen bir mikro yapı elde edilmiştir.

GaAs numuneler HF asit çözeltisi içine daldırıldığı zaman, ilk olarak senkron bağ değişim mekanizması aracılığı ile kimyasal çözünme başlar. Bu çözünme mekanizmasında Ga-As yüzey bağları birbirinden ayrılır ve ayrılan atomlar yeni Ga-F ve As-H bağlarını oluştururlar. Senkron bağ değişim mekanizması aşağıdaki kimyasal denklem ile verilir [34].

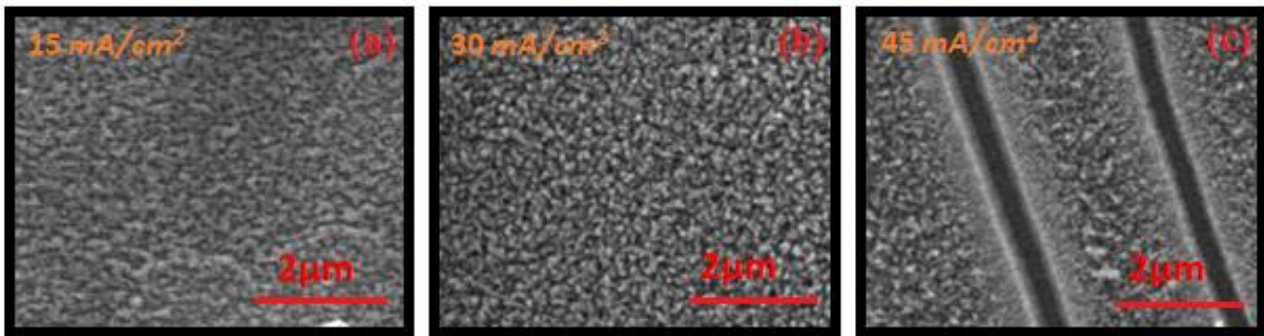


İkinci aşama ise yarıiletken yüzeyinden geçen akımın yol açtığı anodik çözünmedir. Bu aşamada asit çözeltisi içinde bulunan etanol ve yarıiletken içindeki boşluklar devreye girer. GaAs numune üzerinden geçen akım yarıiletken içindeki boşlukların yüzeye yakın bölgelerde birikmesini sağlar ve aşağıda verilen kimyasal reaksiyona göre yüzeydeki Ga ve As atomları anodik olarak çözünür. Bu sırada etanol oksitleyici bir ajan olarak davranır ve yüzeyde oksit bileşikleri de oluşabilir.

Anodik çözünme ile ilgili kimyasal reaksiyon ise Denklem (5)’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karanlık ortamda aşındırılan GaAs yüzeylerinde oksit oluşumuna rastlanmamıştır. 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğuna kadar yüzey aşınmasının başlamaması ve yüzeyde oksit oluşumuna rastlanmaması, yüzeydeki boşluk miktarının anodik çözünme reaksiyonunun gerçekleşmesi için yeterli olmadığının bir göstergesidir.

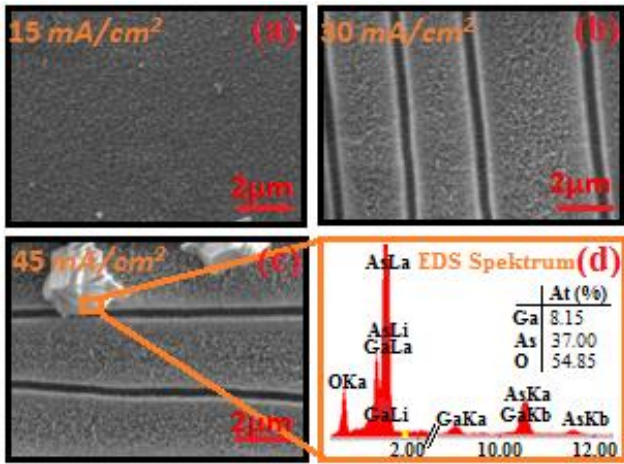


Anodik çözünme gerçekleşirken, yarıiletken yüzeyin kristal yönelimi de önem arz etmektedir. Bu çalışmada (100) kristal yönelimine sahip GaAs kullanılmıştır. Düşük aktivasyon enerjileri nedeniyle, (100) düzlemindeki atomların yüzeyden ayrılma oranı diğer düzlemlerdeki atomların ayrılma oranından daha fazladır [35]. Weber ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada GaAs yüzeyinde açılan yarıkların birbirine paralel olması, yarıiletkenin (100) olan kristal yönelimi ile ilişkilendirilmiştir [36]. HF asit çözeltisi içinde aşındırdığımız GaAs yüzeyinde birbirine paralel şekilde yerleşmiş mikro yarıkların oluşması literatürde verilen bilgiler ile uyum içindedir.



Şekil 4. Karanlıkta (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri

P-tipi yarıiletken yüzeyindeki boşluk konsantrasyonunu arttırmak ve mikro yapı oluşumunu biraz daha hızlandırmak için, yarıiletken yüzeyi halojen lamba ile aydınlatılmış ve özdeş elektrokimyasal aşındırma parametreleri kullanılarak yeni numuneler üretilmiştir. Halojen lamba ile 1 dk. boyunca 15, 30 ve 45 mA/cm<sup>2</sup> olacak şekilde üç farklı akım yoğunluğunda aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5(a)'da verilen SEM resmine göre, 15 mA/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğunun uygulanması durumunda yine GaAs yüzeyinde düzenli bir yapı oluşumu gerçekleşmemiştir. Akım yoğunluğunun 30 mA/cm<sup>2</sup> değerine artması durumunda ise Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi yüzeyde mikro yarıkların oluşmuştur. Halojen lamba ile yüzeyin aydınlatılması, daha düşük akım yoğunluğunda mikro yarıklar elde edilmesine imkân sağlamıştır. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.0 µm, yarıkların derinliği 160 nm ve yarıkların genişliği 220 nm olarak ölçülmüştür. 45 mA/cm<sup>2</sup>'lik bir akım uygulandığında ise Şekil 5(c)'de görüleceği üzere, benzer mikro yarıklar tekrar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe aynı (2.0 µm) kalırken, yarıkların genişliği 175 nm'ye azalmış ve daha homojen bir yüzey elde edilmiştir. (100) kristal yönelimine sahip düzlemlerden kopan atomlar nedeniyle mikro yarıklar oluşur. Akım yoğunluğundaki artış anodik çözünmenin gerçekleştiği düzlemlerin sayısının artmasına ve dolayısıyla da daha homojen bir yüzey oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, akım yoğunluğuna bağlı olarak GaAs yüzeyinde mikro boyutta kristal yapıların oluştuğu da gözlemlenmiştir. Bu kristallerin kimyasal yapısının belirlenebilmesi için EDS spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Mikro kristallerin EDS spektrumu Şekil 5'te verilmiştir.



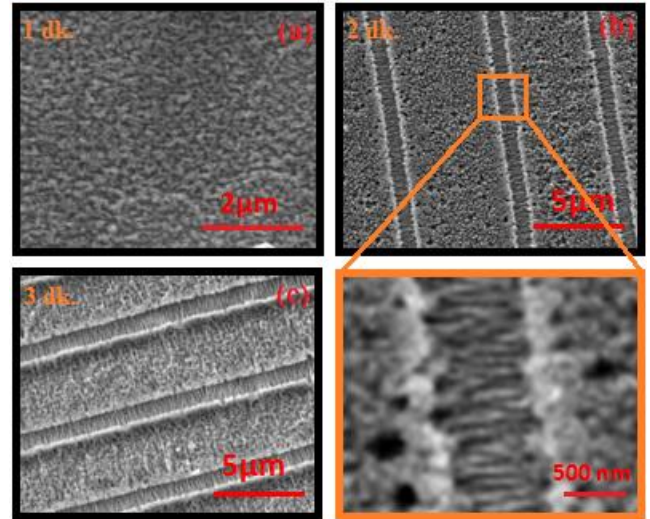
Şekil 5. Halojen lamba ile aydınlatılarak (a) 15, (b) 30 (c) 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda üretilen GaAs yüzeylerin SEM resimleri ve (d) mikro kristallerin EDS spektrumu

EDS spektrumunda sadece Ga, As ve O elementlerine ait pikler görülmüş ve bu elementlerin atomik yüzdeleri ise sırasıyla 8.15, 37.00 ve 54.85 olarak belirlenmiştir. Atomik yüzdeler kıyaslandığında mikro kristallerin yüksek oranda arsenik ve oksijen içerdiği açıkça görülmektedir. As ve O elementlerine ait atomik yüzdelerin oranı ise 0.67'dir. Bu

orana göre ilgili mikro kristallerin arsenik trioksit (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bileşik formuna sahip olduğu söylenebilir. Düşük miktardaki görülen Ga piki ise numunenin zemininden kaynaklanmaktadır. Elektrokimyasal aşındırma sürecine tabi tutulan GaAs yüzeyinde oksit bileşiklerinin oluşması olağan bir süreçtir. Smeenk ve arkadaşları, HF asit çözeltisi içinde aşındırılan GaAs yüzeyinde arsenik trioksit mikro kristallerinin oluştuğunu rapor etmiştir [37]. Halojen lamba ile aydınlatılan numunelerin yüzeyinde bu kristallere rastlanması ise, aydınlatma kaynağı kullanılmasıyla yüzeyde biriken boşluk konsantrasyonunu artırarak daha yüksek oranda anodik çözünme ve oksit oluşumuna neden olması ile açıklanabilir. Seyreltilmiş hidroklorik (HCl) asit kullanılarak yüzeyde oluşan bu As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mikro kristaller kolayca temizlenebilir.

### 3.2 Aşındırma süresinin etkisi

İkinci olarak ise aşındırma süresinin GaAs yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öncelikle karanlık bir ortamda 1, 2 ve 3 dk. olmak üzere üç farklı sürede elektrokimyasal aşındırma süreci gerçekleştirilmiştir. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 6'da özetlenmiştir.

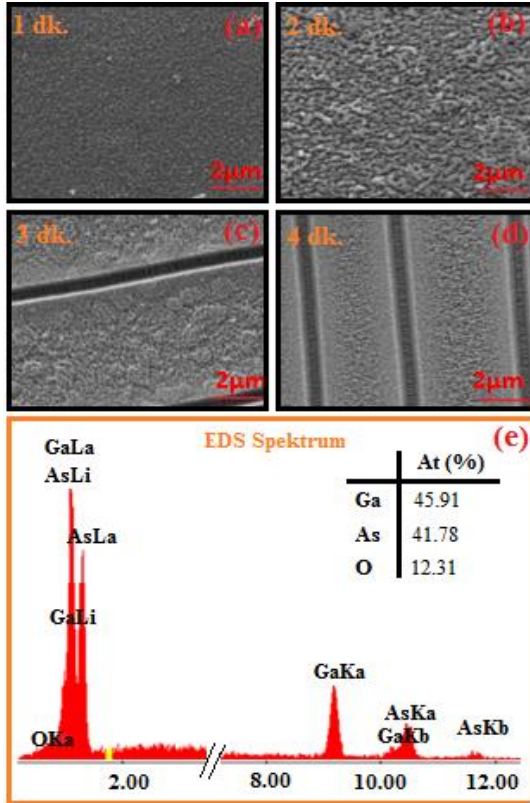


Şekil 6. Karanlık ortamda (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk süreyle aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri

Bütün numuneler hacimce (1:3) oranında HF:Etanol çözeltisi içine yerleştirilmiş ve 15 mA/cm<sup>2</sup> yoğunluğunda akım geçirilmiştir. Anodizasyon süresinin 1 dk. gibi kısa bir süre olarak ayarlanması durumunda, Şekil 6(a)'da görüldüğü üzere yüzeyde mikro yarıkların oluşumu gerçekleşmemiştir. GaAs yüzeyinin 2 dk. süre ile asit çözeltisi içinde aşındırılması durumunda ise Şekil 6(b)'de verilen SEM resminde yüzeyde mikro yarıkların oluştuğu görülmüştür. Yarıkların genişliğinin 800 nm'ye arttığı söylenebilir. SEM resimleri kullanılarak, mikro yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı (yarıkların derinliği) ise 70 nm olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda mikro yarıkların zemininde mikro yarıklara dik olarak yönelen ve genişliği 40 nm olan nano yarıklar oluşmuştur. Aşındırma süresinin 3 dk.'ya çıkarılması durumunda ise Şekil 6(c)'de görüldüğü üzere

yüzeyden kopan atom miktarı ve buna bağlı olarak mikro yarıkların genişliği artmıştır. Aynı zamanda yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı da 30 nm'ye kadar azalmıştır. SEM resimlerine göre yarıklar arasında kalan bölgenin genişliği ise 3.5  $\mu\text{m}$ 'dir. Bu numunenin Şekil 6(c)'de verilen SEM resminde, yarıklar arasındaki bölgelerin daha da aşındığı, nerdeyse yok olmaya başladığı ve altta kalan yeni yüzey morfolojisinin daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Yeni yüzey morfolojisi incelendiğinde birbirine yine paralel olarak dizilmiş nano boyutta yarıklar görülmektedir. Aşındırma süresinin biraz daha uzatılması halinde, bu bölgenin tamamen yok olacağı kesin bir şekilde söylenebilir. Uygun anodizasyon süresinde hazırlanan yüzeylerde mikro yarıklar içeren bir yapıdan nano yarıklar içeren bir yapıya geçiş yapılabileceği de görülmektedir.

Nano yarıklı GaAs yüzeylerin üretilmesinde genellikle ultra hızlı lazer ablasyonu ve iyon ışını bombardımanı teknikleri kullanılmaktadır [38, 39]. Yaptığımız bu çalışma, literatüre GaAs yüzeyinde nano yarıkların çok daha kolay bir şekilde üretilebilmesi için bir alternatif yöntem kazandırmış olacaktır. Nano yarıklar yarıletken yüzeyin yansıtıcılığını önemli ölçüde azaltır ve bu tür yüzeyler güneş hücreleri uygulamalarında daha yüksek verimlilik elde edilmesini sağlayabilir [40]. Aynı zamanda, periyodik yapıya sahip olan nano yarıklar LED uygulamalarında ışık ekstraksiyonunun iyileştirilmesine olanak verir [41]. Aktif yüzey alanının genişlemesi nedeniyle nano yarıklar içeren yüzeyler biyomoleküler sensör uygulamalarında da tercih edilmektedir [42,43].

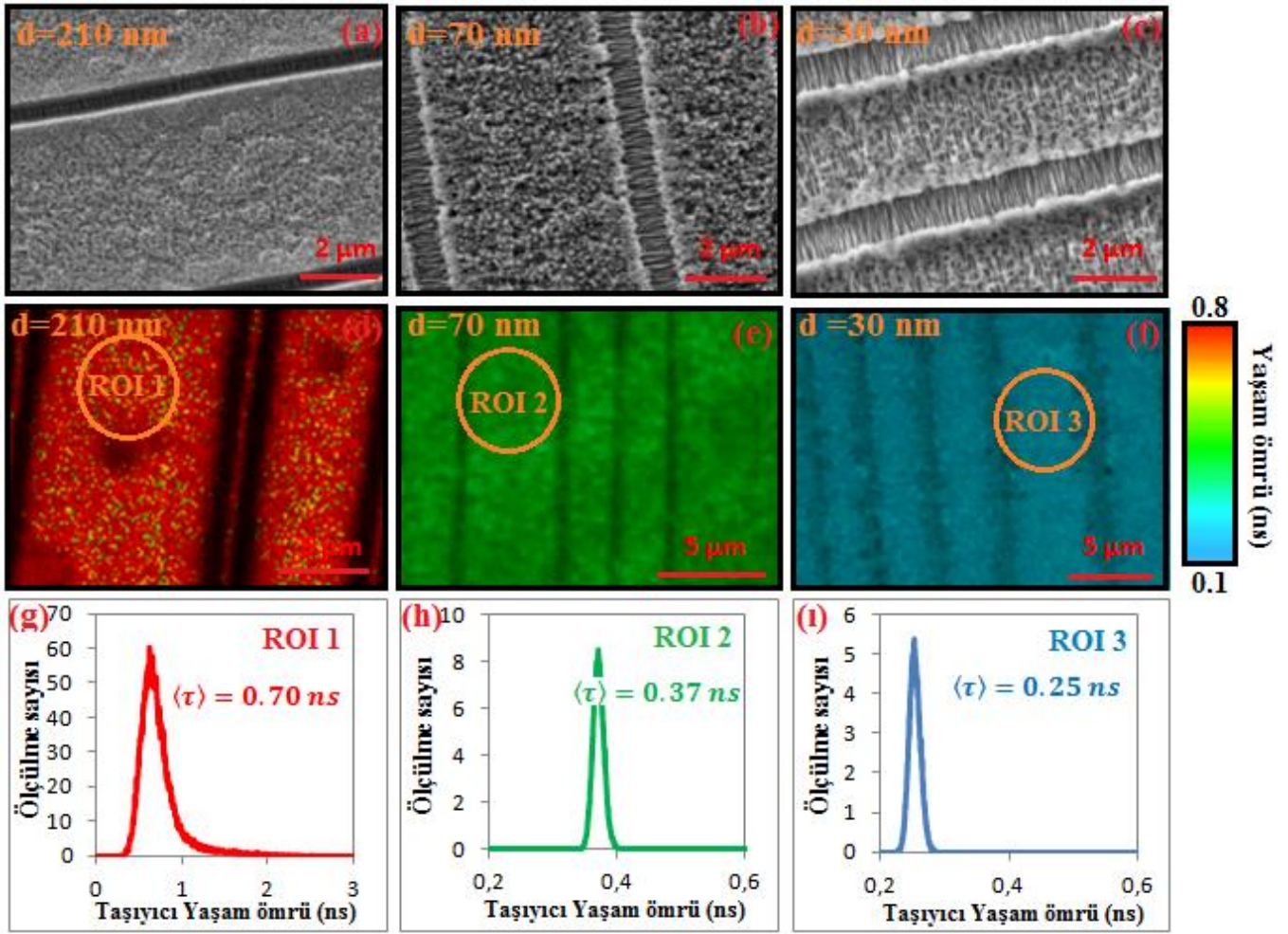


Şekil 7. Halojen lamba ile aydınlatılarak (a) 1, (b) 2, (c) 3 (d) 4 dk süreyle aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri ve (e) yüzeyin EDS spektrumu

Aşındırma süresine bağlı olarak yapılan deneysel çalışmalarda yüzey aydınlatmasının anodik çözünme süreci üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Halojen lamba ile aydınlatılan numuneler 1, 2, 3 ve 4 dk olmak üzere dört farklı aşındırma süresi boyunca 15 mA/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğuna maruz bırakılmıştır. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 7'de verilmiştir. Aşındırma süresinin 1 ve 2 dk olduğu numunelerin yüzeyinde Şekil 7(a) ve (b)'de görüldüğü üzere herhangi bir mikro yarıklar oluşumuna rastlanmamıştır. Aşındırma süresinin 3 dk.'ya çıkması durumunda ise Şekil 7(c)'de görüleceği gibi mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arası mesafe, yarıkların genişliği ve yarıkların derinliği sırasıyla 5  $\mu\text{m}$ , 330 nm ve 210 nm olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal aşındırma süresinin 4 dk.'ya uzatılması halinde ise Şekil 7(d)'de görülen mikro yarıklar oluşmuştur. Ancak aşındırma süresindeki artış, yarıklar arasındaki mesafenin 3.2  $\mu\text{m}$ 'ye kadar azalmasına neden olmuştur. GaAs mikro yarıklar üzerinde de EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7(e)'de görülen EDS spektrumuna göre yüzeyde atomik olarak %45.91 Ga, %41.78 As ve %12.31 oranında O elementi bulunmaktadır. Belirlenen atomik yüzdelere göre mikro yarıklar GaAs bileşik yapısına sahiptir.

### 3.3 Mikro yarıklar içeren yüzeylerde rekombinasyon süreci

GaAs yarıletken yüzeyinde birbirine paralel olarak sıralanmış mikro yarıkların iç kısımlarında ve yarıklar arasında kalan bölgelerde ki elektron-boşluk rekombinasyon süreleri zaman uyumlu tek foton sayma tekniğinin kullanıldığı FLIM mikroskobu ile incelenmiştir. Dalgaboyu 470 nm olan piko saniye atımlı lazer ile GaAs yüzeyler uyarılmış ve yüzeyde oluşan foto ışınım verileri FLIM mikroskobu ile kaydedilmiştir. Bu analizler yapılırken farklı yarıkların derinliğine sahip üç numune seçilmiştir. Şekil 8(a), (b) ve (c)'de yarıkların derinliği 210, 70 ve 30 nm olan numunelerin SEM resimleri ve Şekil 8(d), (e) ve (f)'de ise yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri verilmiştir. FLIM resimlerinde görülen renk kontrastı numune yüzeyindeki taşıyıcı yaşam ömrünü temsil etmektedir. FLIM resimleri için 0.1 ve 0.8 ns aralığında değişen renk skalası seçilmiştir. Numuneler üzerinden alınan FLIM resimlerinden en kalın GaAs yüzeyinin ağırlıklı olarak kırmızı (Şekil 8(d)), orta kalınlığa sahip GaAs yüzeyinin yeşil (Şekil 8(e))ve en ince GaAs yüzeyinin mavi (Şekil 8(f)) renklere sahip olduğu görülmektedir. İlgili renk skalasına göre farklı kalınlıklara sahip GaAs yüzeylerde ki taşıyıcı yaşam ömrünün kalınlığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği söylenebilir. FLIM resimleri üzerindeki ağırlıklı taşıyıcı yaşam ömrünü belirlemek için yaşam ömrü histogramları kullanılabilir. Bu histogramlar numune yüzeyinde hangi yaşam ömrü değerinin kaç kez ölçüldüğü özetleyen grafiklerdir. Kalınlığı 210 nm olan numune yüzeyinden elde edilen histogramda Şekil 8(g)'de görüldüğü gibi pik değeri yaklaşık olarak 0.70 ns'dir. Başka bir deyişle numune yüzeyinde hakim olan taşıyıcı yaşam ömrü 0.70 ns'dir. Diğer numunelere ait histogramlar incelendiğinde ise, pik değerinin orta kalınlığa (70 nm) sahip numune yüzeyinde 0.37 ns (Şekil 8(h)) iken ince yüzeyde (30 nm) 0.25 ns (Şekil 8(i)) kadar düştüğü görülmektedir.



**Şekil 8.** Farklı kalınlıktaki mikro yarıkların (a), (b) ve (c) SEM resimleri, (d), (e) ve (f) yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri ve (g), (h) ve (i) seçilen ROI bölgelerindeki yaşam ömrü histogramları

Her bir yüzey için daha detaylı taşıyıcı yaşam ömrü analizi yapabilmek amacıyla ilgili FLIM resimleri üzerinde ROI (Region Of Interest) bölgeleri seçilmiştir. SymphoTime 64 programı yardımıyla ROI bölgelerindeki ortalama yaşam ömrü eğrileri tespit edilmiştir.

Yarıiletken yüzeylerden alınan ışımaya eğrileri oldukça hızlı bir şekilde azalan üstel fonksiyonlar olduğundan, yaşam ömrü analizi yapılırken bu eğriler iki ya da daha çok parçaya ayrılır. Işıma şiddeti [Denklem \(6\)](#)'te görüldüğü gibi çoklu-üstel (multi-exponential) bir fonksiyon ile verilir.

$$I(t) = \sum_i A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (6)$$

Bu fonksiyonda,  $\tau_i$  her bir parçanın yaşam ömrünü ve  $A_i$  ilgili parçanın ışımaya genliğini ifade etmektedir. Çoklu üstel

modelin kullanıldığı bu analizler de genellikle iki farklı ortalama yaşam süresi hesaplanır. Bunlardan birincisi, şiddet ağırlıklı (Intensity weighed) ortalama yaşam ömrüdür ve [Denklem \(7\)](#) ile verilir.

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum_i A_i \tau_i^2}{\sum_j A_j \tau_j} \quad (7)$$

İkincisi ise genlik ağırlıklı (Amplitude weighed) ortalama yaşam ömrüdür ve [Denklem \(8\)](#) ile hesaplanabilir.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i A_i \tau_i}{\sum_i A_i} \quad (8)$$

**Tablo 1.** Farklı kalınlığa sahip GaAs yüzeylerde hesaplanan ışımaya eğrisi parametreleri

ROI	d (nm)	A <sub>1</sub> (kCounts)	τ <sub>1</sub> (ns)	A <sub>2</sub> (kCounts)	τ <sub>2</sub> (ns)	⟨τ⟩ (ns)	$\bar{\tau}$ (ns)	χ <sup>2</sup>
1	210	1.783	0.228	0.0915	1.880	0.720	0.309	1.448
2	70	1161	0.281	11.6	1.670	0.359	0.295	1.985
3	30	144.8	0.290	83.2	0.092	0.260	0.218	1.125

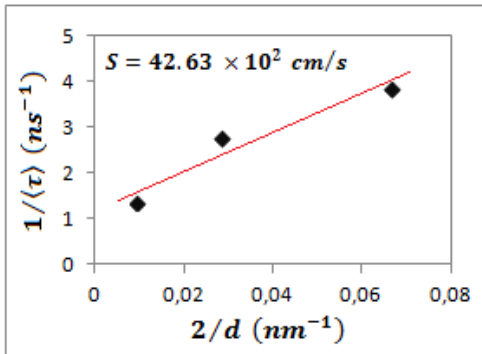


Yaşam ömrü hesaplarında, tanımlanan üstel fonksiyon ile gerçek ışına eğrisi arasındaki eşleşmeyi değerlendirmek üzere  $\chi^2$  parametresi tanımlanmıştır ve bu parametre minimize edilerek en iyi eşleşme sağlanır.

ROI bölgelerinden elde edilen ışına eğrileri çift üstel fonksiyonlar ile eşleştirilmiş ve ortalama taşıyıcı yaşam ömrü parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir. ROI analizlerinin ve yaşam ömrü histogramlarından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şiddet ağırlıklı ortalama yaşam ömrü değerleri kalınlıkları 210, 70 ve 30 nm olan numuneler için sırasıyla 0.720, 0.359 ve 0.260 ns olarak hesaplanmıştır. Mikro yarıkların derinliği azaldıkça yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı da buna bağlı olarak azalmaktadır. Yüzey kalınlığındaki değişime ise yüzey rekombinasyon oranlarını doğrudan etkilediği için GaAs yüzeyinde farklı taşıyıcı yaşam ömrü değerleri baskın hale gelmektedir.

Lush ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile farklı kalınlıklarda üretilen GaAs tabakalarda ki taşıyıcı rekombinasyon süresi zaman uyumlu fotoışına yöntemi ile incelenmiştir ve GaAs yüzeylerin kalınlığı azaldıkça rekombinasyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir [44]. Aynı zamanda, GaAs ile üretilen hetero-bağlantılı güneş hücrelerinde tabakaların kalınlığına bağlı olarak rekombinasyon süresinin değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [45]. Bu durumda, etkin rekombinasyon süresinin GaAs mikro yarıkların kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermesinin literatürde gözlemlenen sonuçlar ile uyum için de olduğu söylenebilir.

Yarıiletken yüzeyin kalınlığının rekombinasyon oranı üzerindeki etkisi Denklem (2) ve Denklem (3)’te verilmiştir. Yığmsal haldeki GaAs yüzeyin rekombinasyon ömrünün sabit olduğu varsayılırsa, bu denklemlere göre  $\frac{1}{\tau_{Etkin}}$  ve  $\frac{2}{d}$  parametreleri arasında lineer bir ilişki olduğu düşünülebilir. Lineer ilişkinin çizilecek bir grafik ile analizi sonucunda ise hem yığmsal haldeki GaAs’in rekombinasyon ömrü hem de yüzey rekombinasyon hızı (S) hesaplanabilir. Söz konusu  $\frac{1}{\tau_{Etkin}}$  ve  $\frac{2}{d}$  parametreleri arasındaki lineer ilişkiyi gösteren grafik Şekil 9’da verilmiştir. Grafiğin eğimi kullanılarak yüzey rekombinasyon hızı  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$  ve yığmsal haldeki GaAs yüzeyin rekombinasyon yaşam ömrü 0.83 ns olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Etkin taşıyıcı yaşam ömrü-kalınlık ilişkisi ve yüzey rekombinasyon hızının hesaplanması

Yüzey rekombinasyon hızı güneş hücrelerinin kısa devre akımını ve performansını doğrudan etkileyen parametrelerden biridir. Yarıiletken yüzeyinde rekombinasyon hızının yüksek olması, yük taşıyıcıların yüzeye yakın bölgelerdeki kusurlar aracılığıyla rekombine olmasına ve yarıiletken yüzeyinde kısa dalgaboyu aralığına karşı duyarsız olan ölü tabakaların oluşmasına eden olur [46]. Bu nedenle, rekombinasyon hızındaki artış kısa devre akımının azalması ve güneş hücresinin verimliliğinin düşmesi ile sonuçlanır [47]. Bey ve arkadaşları tarafından, GaAs güneş hücrelerinin elektriksel özellikleri ve yüzey rekombinasyon hızı arasındaki ilişkiyi inceleyen nümerik bir çalışma yapılmıştır [48]. Bu çalışmaya göre, GaAs güneş hücrelerinde en yüksek verimlilik yüzey rekombinasyon hızının 10<sup>2</sup> cm/s civarında olduğu yüzeylerde gözlemlenmiştir. Yığmsal haldeki GaAs yüzeyindeki rekombinasyon hızı ise 10<sup>5</sup> cm/s civarındadır [49]. GaAs yarıiletkeni ile verimliliği yüksek bir optoelektronik aygıt geliştirilmek isteniyorsa, yüzey rekombinasyon hızının düşürülmesi gerekmektedir. Yüzey rekombinasyon hızının azaltmak için uygulanan yöntemlerden biri, AlGaAs, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve GaN gibi geniş yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerin GaAs yüzeyinde epitaksiyel olarak büyütülmesidir [50-52]. İkinci yöntem ise çeşitli kimyasal uygulamalar ile GaAs yüzeyinin pasifleştirilmesidir. Örneğin; rutenyum iyonlarının GaAs yüzeyine kimyasal absorpsiyonu ile yüzeydeki rekombinasyon hızı 10<sup>4</sup> mertebesine düşürülebilmektedir [53]. Aynı zamanda sülfidasyon ya da nitridasyon işlemleri ile de GaAs yüzeyi pasifleştirilebilmekte ve yüzey rekombinasyonları en aza indirgenebilmektedir [54,55]. Bu çalışmamızda ise, HF asit çözeltisi içinde aşındırılan ve yüzeyinde mikro yarıklara oluşturulan GaAs üzerinde rekombinasyon hızı 10<sup>2</sup> cm/s mertebesine kadar düştüğü belirlenmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar, üretilen bu GaAs yüzeylerin başta güneş hücreleri olmak üzere pek çok optoelektronik aygıt üretimi için ideal olduğu göstermektedir.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma tekniği kullanılarak yığmsal haldeki GaAs yarıiletken plakalar üzerinde homojen mikro yarıklar ihtiva eden yüzeyler üretilmiştir. Aşındırma sürecinde GaAs yüzeyinden geçirilen akımın yoğunluğunun, aşındırma süresinin ve yüzey aydınlatmasının oluşacak yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan akım yoğunluğu ve aşındırma süresi, yüzeyde oluşan paralel mikro yarıkların derinliğinin ve birbirlerine olan uzaklığının azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde aşındırma esnasında aydınlatma kaynağının kullanılmasının yüzey morfolojisini etkilediği görülmüştür. Üretilen GaAs yüzeyler FLIM mikroskobu ile görüntülenmiş ve yarıiletken yüzeydeki etkin rekombinasyon süreçleri irdelenmiştir. Mikro yarıkların derinliği azaldıkça, yüzey rekombinasyonlarının etkisinin daha belirginleştiği ve etkin rekombinasyon yaşam ömrü değerinin 0.25 ns civarına kadar düştüğü görülmüştür. GaAs tabakanın kalınlığı ve etkin taşıyıcı yaşam ömrü arasındaki lineer ilişki vasıtasıyla, yığmsal GaAs yüzeyin

rekombinasyon oranı ve mikro yarıklar üzerindeki yük taşıyıcıların yüzey rekombinasyon hızı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, GaAs mikro yarıklar ile üretilebilecek pek çok optoelektronik aygıtlar için ön çalışma niteliğindedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114F451 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %4

#### Kaynaklar

- [1] V.V. Vainberg, A.S. Pylypchuk, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov, Electron mobility in the GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 16(2), 152-161, 2013. <https://doi.org/10.15407/spqeo16.02.152>
- [2] S. Kundu, A. Kumar, S. Banerjee, P. Banerji, Electrical properties and barrier modification of GaAs MIS Schottky device based on MEH-PPV organic interfacial layer, *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 15, 386-392, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.01.001>
- [3] D. Saxena, S. Mokkapatil, P. Parkinson, N. Jiang, Q. Gao, H.H. Tan, C. Jagadish, Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers, *Nature Photonics* 7, 963-968, 2013. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2013.303>
- [4] D. Jung, J. Faucher, R. Biswas, L. Shen, D. Kang, M.L. Lee, J. Yoon, High performance ultrathin GaAs solar cells enabled with heterogeneously integrated dielectric periodic nanostructures, *ACS Nano* 9(10), 10356-10365, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b05585>
- [5] J. Wu, D. Shao, V.G. Dorgan, A.Z. Li, S. Li, E.A. DeCuir, M.O. Manasreh, Z.M. Wang, Y.I. Mazur and G.J. Salamo, Intersublevel infrared photodetector with strain-free GaAs quantum dot pairs grown by high-temperature droplet epitaxy, *Nano Lett.* 10, 1512-1516, 2010. <https://doi.org/10.1021/nl100217k>
- [6] R.J. Warburton, Single spins in self-assembled quantum dots, *Nature Matter.* 12, 483-493, 2013.
- [7] R.P.G. McNeil, M. Kataoka, C.J.B. Ford, C.H.W. Barnes, D. Anderson, G.A.C. Jones, I. Farrer and D.A. Ritchie, On-demand single-electron transfer between distant quantum dots, *Nature* 477, 439-442, 2011.
- [8] M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, A.A. Padelitsa, T.A. Bagaev, A.Yu. Andreev, K.Yu. Telegin, A.V. Lobintsov, E.I. Davydova, S.M. Sapozhnikov, A.I. Danilov, A.V. Podkopaev, E.B. Ivanova, V.A. Simakov, Laser diode bars based on AlGaAs/GaAs quantum-well heterostructures with an efficiency up to 70%, *Quantum Electronics* 47(4), 291-293, 2017. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16365>
- [9] S. Chen, W. Li, Z. Zhang, D. Childs, K. Zhou, J. Orchard, K. Kennedy, M. Hugues, E. Clarke, I. Ross, O. Wada and R. Hogg, GaAs-Based Superluminescent Light-Emitting Diodes with 290-nm Emission Bandwidth by Using Hybrid Quantum Well/Quantum Dot Structures, *Nanoscale Research Letters* 10, 340, 2015. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1049-2>
- [10] N. Han, Z. Yang, F. Wang, G. Dong, S. Yip, X. Liang, T.F. Hung, Y. Chen, and J.C. Ho, High-Performance GaAs Nanowire Solar Cells for Flexible and Transparent Photovoltaics, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 20454-20459, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06452>
- [11] R. Sanatnia, K.M. Awan, S. Naureen, N. Anttu, E. Ebraert, and S. Anand, GaAs nanopillar arrays with suppressed broadband reflectance and high optical quality for photovoltaic applications, *Opt. Mater. Express* 2(11), 1671-1679, 2012. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001671>
- [12] P.K. Mohseni, S.H. Kim, X. Zhao, K. Balasundaram and J.D. Kim, GaAs pillar array-based light emitting diodes fabricated by metal-assisted chemical etching, *J. Appl. Phys.* 114, 064909, 2013. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4817424>
- [13] C. Kong, J.W. Leem, J.W. Lee, J.S. Yu and C.S. Kee, Characteristics of terahertz pulses from antireflective GaAs surfaces with nanopillars, *J. Appl. Phys.* 113, 203102, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4807407>
- [14] K.J. Luo, J.Y. Xu, H. Cao, Y. Ma, S.H. Chang, S.T. Ho and G.S. Solomon, Dynamics of GaAs/AlGaAs microdisk lasers, *Appl. Phys. Lett.* 77(15), 2304-2306, 2000. <https://doi.org/10.1063/1.1317544>
- [15] K. Kim, Y. Song and J. Oh, Nano/micro dual-textured antireflective subwavelength structures in anisotropically etched GaAs, *Optics Letters* 42(16), 3105-3108, 2017. <https://doi.org/10.1364/OL.42.003105>
- [16] S.G. Bailey, N.S. Fatemi, G.R. Landis, D.M. Wilt, R.D. Thomas and A. Arrison, A v-grooved GaAs solar cell, *Conference Record of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 625-628, 1988. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1988.105778>
- [17] M. Komuro, H. Hiroshima, H. Tanou and T. Kanayama, Maskless etching of a nanometer structure by focused ion beams, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1 (4), 985-989, 1983. <https://doi.org/10.1116/1.582719>
- [18] M.A. Al-Gawati, A.N. Alhazaa, A. N. Alodhayb, H.A. Albrithen, M.A. Shar, Z.A. Almutairi, Controlling the fabrication of sub-microgrooves on a silicon surface using a femtosecond laser, *Journal of King Saud University Science* 33, 101251- 101257, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101251>
- [19] J. Wang, D.A. Thompson and J.G. Simmons, Wet chemical etching for V-grooves into InP substrates, *J. Electrochem. Soc.* 145, 2931-2937, 1998.
- [20] V. Khuat, Y.C. Ma, J.H. Si, T. Chen, F. Chen and X. Hou, Fabrication of micro-grooves in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching, *Chin. Phys. Lett.* 31, 037901- 037904, 2014.
- [21] A. Pan, J. Si, T. Chen, Y. Ma, F. Chen and X. Hou, Fabrication of high-aspect-ratio grooves in silicon using femtosecond laser irradiation and oxygen-

- dependent acid etching, *Optics Express* 21, 16657-16662, 2013. <https://doi.org/10.1364/OE.21.016657>
- [22] S. Acikgoz, H. Yungevis, E. Özunal and A. Şahin, Low-cost, fast and easy production of germanium nanostructures and interfacial electron transfer dynamics of BODIPY–germanium nanostructure system, *J Mater. Sci.* 52, 13149-13162, 2017.
- [23] K. Yamada, M. Yamada, H. Maki and K.M. Itoh, Fabrication of arrays of tapered silicon micro-/nanopillars by metal-assisted chemical etching and anisotropic wet etching, *Nanotechnology* 29(28), 28LT01, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aac04b>
- [24] M. DeJarld, J.C. Shin, W. Chern, D. Chanda, K. Balasundaram, J. A. Rogers and X. Li, Formation of High Aspect Ratio GaAs Nanostructures with Metal-Assisted Chemical Etching, *Nano Lett.* 11, 5259-5263, 2011. <https://doi.org/10.1021/nl202708d>
- [25] R.K. Ahrenkiel and S.W. Johnston, Lifetime analysis of silicon solar cells by microwave reflection, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92, 830-835, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.01.022>
- [26] K. M. W. Boyd and R. N. Kleiman, Quasi-Steady-State Free Carrier Absorption Measurements of Effective Carrier Lifetime in Silicon, *IEEE Journal of Photovoltaics* 9(1), 64-71, 2019. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2874973>.
- [27] R.K. Ahrenkiel, Resonant coupling for contactless measurement of carrier lifetime, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 31, 04D113, (2013). <http://dx.doi.org/10.1116/1.4813757>
- [28] B. J. Simonds, B. Yan, G. Yue, R. K. Ahrenkiel and P. C. Taylor, Generation rate dependence of carrier lifetime measurements in nanocrystalline silicon using transmission modulated photoconductive decay, *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 003743-003747, 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616574>
- [29] B. Julsgaard, N. Driesch, P.T. Lichtenberg, C. Pedersen, Z. Ikonik, and D. Buca, Carrier lifetime of GeSn measured by spectrally resolved picosecond photoluminescence spectroscopy, *Photon. Res.* 8, 788-798, 2020. <https://doi.org/10.1364/PRJ.385096>
- [30] T. P. Weiss, B. Bissig, T. Feurer, R. Carron, S. Buecheler and A.N. Tiwari, Bulk and surface recombination properties in thin film semiconductors with different surface treatments from time resolved photoluminescence measurements, *Scientific Reports* 9, 5385, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41716-x>
- [31] R. Hidayat, A.A.Nurunnizar, A. Fariz, E.S. Rosa, T. Oizumi, A. Fujii, M. Ozaki, Revealing the charge carrier kinetics in perovskite solar cells affected by mesoscopic structures and defect states from simple transient photovoltage measurements, *Scientific Reports* 10, 19197, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74603-x>
- [32] S. Gupta, R. Sircar, D. Prakash and B. Tripathi, Optimization of recombination parameters to enhance minority carrier lifetime, *International Journal of Pure and Applied Physics* 5(2), 133–141, 2009.
- [33] X.H. Zhao, M.J. Dinezza, S. Liu, C.M. Campbell, Y. Zhao and Y.H. Zhang, Determination of CdTe bulk carrier lifetime and interface recombination velocity of CdTe/MgCdTe double heterostructures grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 105, 252101, (2014). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904993>
- [34] Y.A. Bioud, A. Boucherif, A. Belarouci, E. Paradis, D. Drouin, R. Ares, Chemical Composition of Nanoporous Layer Formed by Electrochemical Etching of p-Type GaAs, *Nanoscale Res. Lett.* 11, 446, 2016. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1642-z>
- [35] W. Chen, Y. Liu, L. Yang, J. Wu, Q. Chen, Y. Zhao, Y. Wang and X. Du, Difference in anisotropic etching characteristics of alkaline and copper based acid solutions for single-crystalline Si, *Scientific Reports* 8, 3408, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21877-x>
- [36] Z.L. Weber, A. Claverie, J. Washburn, F. Smith and R. Calawa, Microstructure of Annealed Low-Temperature-Grown GaAs Layers, *Appl. Phys. A* 53, 141-146, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00323874>
- [37] N.J. Smeenk, J. Engel, P. Mulder, G.J. Bauhuis, G.M.M.W. Bissels, J.J. Schermer, E. Vlieg, and J.J. Kellyb, Arsenic Formation on GaAs during Etching in HF Solutions: Relevance for the Epitaxial Lift-Off Process, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2 (3) 58-65, 2013.
- [38] A. Borowieca and H.K. Haugen, Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.* 82, 4462-4464, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1586457>
- [39] T. Kumar, M. Kumar, S. Verma and D. Kanjilal, Fabrication of ordered ripple patterns on GaAs(100) surface using 60 keV Arz beam irradiation, *Surface Engineering* 29(7), 543, 2013. <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000146>
- [40] L. Hong, Rusli, X.C. Wang, H.Y. Zheng, H. Wang, H.Y. Yu, Femtosecond laser fabrication of large-area periodic surface ripple structure on Si substrate, *Applied Surface Science* 297, 134-138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.100>
- [41] Q. Liu, Z. Wang, L. Zhu, X. Cheng, J. Wang, Nanogrooves etching on top of GaN-LED for light extraction enhancement, *Optics and Laser Technology* 138, 106842, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106842>
- [42] I. Saleem, W.K. Chu, Gold nano-ripple structure with potential for bio molecular sensing applications, *Sensing and Bio-Sensing Research* 11, 14-19, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbsr.2016.09.004>
- [43] R. DellAnna, C. Masciullo, E. Iacob, M. Barozzi, D. Giubertoni, R. Böttger, M. Cecchini and G. Pepponi, Multiscale structured germanium nanoripples as templates for bioactive surfaces, *RSC Adv.* 7, 9024-9030, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6RA28531G>

- [44] G.B. Lush, H.F. MacMillan, B.M. Keyes, D.H. Levi, M.R. Melloch, R.K. Ahrenkiel, M.S. Lundstrom, A study of minority carrier lifetime versus doping concentration in n-type GaAs grown by metalorganic chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.* 72 (4), 1436-1442, 1992. <http://dx.doi.org/10.1063/1.351704>
- [45] R.R. King, J.H. Ermer, D.E. Joslin, M. Haddad, J.W. Eldredge, N.H. Karam, B. Keyes and R.K. Ahrenkiel, Double heterostructures for characterization of bulk lifetime and interface recombination velocity in III-V multijunction solar cells, *Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 86-90, 1998.
- [46] K. Ali, H.M. Khan, M. Anmal, I.A. Ahmad, W.A. Farooq, B.A. Al-Asabi, S.M. Qaid, H.M. Ghathan, Effect of surface recombination velocity (SRV) on the efficiency of silicon solar cells, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 22, 251-255, 2020.
- [47] E. Chahid, M.I. Oumhand, M. Feddaoui, A. Malaoui, Study of the physical parameters on the GaAs Solar Cell Efficiency, *Journal of Ovonic Research* 13, 119-128, 2017.
- [48] A.B. Bey, A. Talbi, M. Hebali, M. Berka, F. Ducroquet, Numerical Study of the Impact of Junction Depth and the Surface Recombination Velocity on Electrical Parameters of GaAs-Solar Cell, *Int. J. Adv. Sci. Eng.* 5(3), 1064-1071, 2019.
- [49] N.L. Dmitruk, V.I. Lyashenko, A.K. Tereshenko, S.A. Spektor, Investigation of surface recombination on epitaxial GaAs films, *Phys. Stat. Sol. (A)* 20, 53-62, 1973. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210200103>
- [50] A. Aierken, J. Riikonen, M. Mattila, T. Hakkarainen, M. Sopanen, H. Lipsanen, GaAs Surface Passivation by Ultra-Thin Epitaxial GaP Layer and Surface As-P Exchange. *Appl. Surf. Sci.* 253, 6232-6235, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.069>
- [51] N.M. Kumar, A. Chikhalkar, R.R. King, Effect of Deposited Passivation Materials and Doping on Recombination at III-V Surfaces, *IEEE Photovolt. Spec. Conf.* 1039-1043, 2019. <https://doi.org/10.1109/pvsc40753.2019.8980913S>
- [52] Anantathanasarn, S.Y. Otomo, T. Hashizume and H. Hasegawa, Surface Passivation of GaAs by Ultra-Thin Cubic GaN Layer, *Appl. Surf. Sci.* 159-160, 456-461, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00077-5)
- [53] R.J. Nelson, J.S. Williams, H.J. Leamy, B. Miller, H.C. Casey, B.A. Parkinson, and A. Heller, Reduction of GaAs surface recombination velocity by chemical treatment, *Applied Physics Letters* 36, 76-79, 1980. <http://dx.doi.org/10.1063/1.91280>
- [54] V.L. Berkovits, V.P. Ulin, M. Losurdo, P. Capezzuto, G. Bruno, Wet Chemical Treatment in Hydrazine-Sulfide Solutions for Sulfide and Nitride Monomolecular Surface Films on GaAs(100), *J. Electrochem. Soc.* 152, 349-353, 2005. <https://doi.org/10.1149/1.1878032>
- [55] X. Zou, C. Li, X. Su, Y. Liu, D. F. Shapiro, W. Zhang, and A. Yartsev, Carrier Recombination Processes in GaAs Wafers Passivated by Wet Nitridation, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12(25), 28360-28367, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04892>

