

DERİN REAKTİF İYON AŞINDIRMA DEĞİŞKENLERİNİN SİLİSYUM VE SU8'İN AŞINDIRMA HIZLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ *

M. Ragıp ABDULLAHOĞLU

İTÜ, Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul
mragipabdullahoglu@gmail.com

Mahmut Can KARAKAYA

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul
mahmutcank@gmail.com

Hüseyin KIZIL

Yrd.Doç. Dr.,
İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul
kizilh@itu.edu.tr

Onur TUNÇER **

Yrd.Doç. Dr.,
İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi,
Uçak Mühendisliği Bölümü, İstanbul
tuncero@itu.edu.tr

Levent TRABZON

Doç.Dr., İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul
levent.trabzon@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada derin reaktif iyon aşındırma yöntemi için yapılan parametrik deneysel çalışmaların sonuçlarından bahsedilmektedir. Çalışmalarda altlık malzemesi olarak n tipi, <100> kristal yönelimli, 100mm çapında silisyum (Si) ve maske malzemesi olarak SU8-3050 (SU8) fotorezist kullanılmıştır. Derin reaktif iyon aşındırma işlemi çok yüksek vakum atmosferi altında RF (Radyo Frekansı) güç kaynakları yardımıyla oluşturulan plazmaya bir kısım özel aşındırıcı gazların belli şartlar altında ve belli oranlarda gönderilmesi yoluyla yapılmaktadır. Derin reaktif iyon aşındırma yöntemi mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) endüstrisinde yüksek en/boy oranlarına sahip mikro yapıların yüksek aşındırma hızlarıyla üretilmelerine olanak sağlamaktadır. Yapılan deneylerde altı farklı aşındırma değişkeninin aşındırma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu değişkenler: reaksiyon odasının basıncı (mTorr), RF plazma (Watt) gücü, RF altlık gücü (Watt), SF₆ gaz akış debisi (mm³/s), O₂ gaz akış debisi (mm³/s), He gaz akış debisidir (mm³/s). Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi biyolojik uygulamalar için kullanılan Mikro Elektromekanik Sistem (BIO-MEMS) Laboratuvarı'ndaki endüktif olarak eşleşmiş plazma (ICP) cihazında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar da mikro formların en ve boyları stylus profilometre cihazında ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Derin reaktif iyon aşındırma, aşındırma hızı, silisyum, SU8

The Effects of Deep Reactive Ion Etching (DRIE) Parameters on the Etch Rate of Silicon and SU8

ABSTRACT

It is mentioned about the parametric experiments for deep reactive ion etching (DRIE) method for n type, <100> oriented, 100mm (milimeter) Silicon as a substrate and SU8-3050 negative photo resist as a mask material in this study. DRIE process is performed in plasma that is produced by two RF (Radio Frequency) power sources with the additional specific etch gases under the high vacuum atmosphere. DRIE method is widely used in micro electro mechanical systems (MEMS) industry to produce high aspect ratio micro structure with high etch rates. The effects of six different DRIE variables on Si and SU8 etch rate were observed within this experimental study. This variables are: Chamber pressure (mTorr), RF plasma power (Watt), RF platen power (Watt), SF₆ gas flow rate (ml/s) as main etch gas, O₂ gas flow rate (ml/s), He gas flow rate ml/s). The experiment was performed with ICP plasma etching device in Istanbul Technical University Micro Electromechanic Systems for Biological Applications (BIO-MEMS) Laboratory. The results were measured by a stylus profile meter device.

Keywords : Deep reactive ion etching, etch rate, silicon, SU8

** İletişim Yazarı

* Geliş tarihi : 01.07.2011
Kabul tarihi : 05.10.2011

GİRİŞ

Bundan neredeyse yarım asır evvel “2000 yılı için” isimli konuşmasında Nobel ödüllü fizikçi R. P. Feynman, minyatürizasyonun elektronikten, bilgi depolamaya, mikro ölçekte elektro-mekanik sistemlerin üretimine, gelecekte oynayacağı rolü neredeyse kehanet derecesinde öngörmüştür [1]. Feynman'ın “aşağıda çok yer var” başlığıyla tanımladığı o günün hayal gücünü zorlayan birçok olgu bugün fazlasıyla gerçekleşmiştir. Her ne kadar Feynman konuşmasında güç üretim sistemlerinin minyatürizasyonundan bahsetmemiş olsa da, bugün teknolojinin geldiği noktada bu konuda da birçok gelişme kaydedilmiştir. Buna verilebilecek belki de en güzel örnek MIT'de Epstein ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen bir kol düğmesi büyüklüğündeki mikro-türbinlerdir [2]. Bunların yanı sıra mikro ölçekteki sistemlerin uzay araçlarına itki sağlamak için de kullanılabileceği öngörülmekte ve bu yönde hatırı sayılır miktarda araştırmalar yapılmaktadır. Bütün bu çalışmaların sağlıktan, savunma ve havacılık sektörlerine kadar yaygın manada toplumun refahına yapacağı katkılar gözardı edilemez [3].

Özellikle de makine mühendisliğinin geleceği düşünüldüğü zaman minyatürizasyonun ölçek manasında yeni nesil mühendislerin önüne birçok ufuklar açacağı yadsınamaz bir gerçektir. Mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) hem tasarımları hem de imalatları açısından makine mühendisliği, elektrik mühendisliği ile kimya mühendisliği disiplinlerini birbirlerine bağlayan, küçük ölçekte işleyen makinelerdir [3]. Bu sistemlerin mukavemet ile ısı geçişi hesapları, kontrolü gibi birçok konular makine mühendisliğinin doğrudan ilgi alanına giren konulardır. Aynı zamanda bu konularda çalışmak makine mühendislerini diğer temel mühendislik disiplinlerinden bireylerle yakın ilişkiye de zorlamaktadır.

Reaktif iyon ile derin aşındırma veya plazma ile aşındırma yöntemleri ise MEMS endüstrisinde yüksek en/boy oranına, dik ve pürüzsüz yan duvar yapılarına ve mikron ve mikron altı boyutlara sahip formların üretimi için sıkça kullanılan imalat süreçlerinden bir tanesidir. Bu proses yüksek vakum atmosferine dayanıklı bir reaksiyon odasında gerçekleştirilmektedir. Aşındırma işlemi reaktif iyon ve/veya nötr bileşenlerle gerçekleştirilmektedir. Bunun için aşındırma işleminde kullanılan gazlar (Bu çalışmada kullanılan gazlar SF₆, Argon ve Oksijen) kütle akış kontrolleriyle istenen oranlarda reaksiyon odasına gönderilmektedir. Gazların iyonize olması 13.56 MHz'lık frekansa sahip iki adet RF kaynağıyla (RF plazma ve RF altlık gücü) oluşturulan plazma ortamı içerisinde oluşmaktadır. Plazmada iyonize olan F⁻, Ar⁺ ve O⁺ reaktif ve reaktif olmayan iyonların aşındırılmak istenen yüzey ile kimyasal reaksiyonu veya fiziksel olarak bombardımanı neticesinde aşındırma işlemi gerçekleşmektedir. Aşındırma işlemi altlık malzemesi üzerinde gerçekleştirilir.

Yüzeyde belli bir bölgede gerçekleştirilen bir işlem olduğu için sadece aşındırılmak istenen yüzey, açıkta kalacak şekilde diğer bölgeler aşınmaya çok daha dirençli bir malzeme yani fotorezist ile maskelenmektedir. Dolayısıyla uzun süreli aşındırma işlemlerinde aşındırmaya uzun süre dayanıklı maske malzemeleri kullanılmalıdır. Maske ve altlık malzemesi arasındaki aşınma hızı oranına seçicilik oranı adı verilmektedir.

Reaktif iyonlarla derin aşındırma işlemi üç farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar: Siyah silisyum yöntemi, Bosch prosesi, kriyojenik yöntemdir. Hansen ve arkadaşları 1995 yılında siyah silisyum yönteminden bahsetmişlerdir. Burada SF₆ aşındırıcı, O₂ oksit yapıcı ve fiziksel aşındırma CHF₃ ise aşınmaya dirençli ince pasivasyon tabakası oluşturmak için kullanılmaktadır. Plazma içerisinde bir yandan aşınma işlemi gerçekleşirken, bir yandan aşındırılan yüzeylerde anlık olarak çok ince pasivasyon tabakaları oluşmaktadır. Bu sayede yan duvar yapıları korunarak anizotropik aşınma işlemi gerçekleştirilmekte [4]. Ancak aşındırılan yapıların yüzeyinde pürüzlülüğün yüksek olması ve plazmada gazların dengesinin zor sağlanması nedeniyle bugün pek tercih edilmemektedir. Buna alternatif olarak geliştirilen ve hâlen kullanılmakta olan bir diğer yöntem olan Bosch prosesi, Laermer ve Schilp tarafından 1996 yılında ortaya atılmıştır. Bu yöntem aşınma ve pasivasyon adı verilen adımlarının kısa sürelerde birbiri ardınca sürekli tekrarlanmasıyla sağlanmaktadır. Bu sayede pasivasyon adımında yüzeyde aşınmaya dirençli ince film tabakası (CF₄ veya C₄F₈ gazlarıyla) oluşturulmaktadır. Diğer adımda ise aşınma işlemi (SF₆ gazı ile) gerçekleştirilmektedir. Aşındırılan yüzeye hızlandırılarak dik bir şekilde gelen iyonlar taban yüzeyine yan yüzeylere kıyasla daha yüksek hızda çarptığı için, pasivasyon tabakası taban yüzeylerde yan yüzeylere nazaran daha hızlı kalkmaktadır. Bu sayede aşınma işlemi anizotropik karakterde olmaktadır [5]. Kriyojenik yöntemde sıvı azot ile altlık -100 °C sıcaklığa kadar soğutulur. Bu imalat sürecinde sadece aşındırıcı SF₆ ve oksit oluşturucu O₂ gazları kullanılarak aşındırma işlemi gerçekleştiriliyor. Burada düşük sıcaklık sayesinde stabilitesi yükselen oksit tabakasıyla yan yüzeyler korunur taban yüzeyleri dik olarak gelen iyonlarla aşındırılır [6].

1999 senesinde Ayon ve arkadaşları, deneysel olarak silikon aşındırma hızı, ARDE, fotorezist aşındırma hızıyla anizotropi parametreleri üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır [7]. Buna ilaveten aralarında Ayon'un da bulunduğu farklı bir grup ise 2002 yılında aşındırma şartlarının silikon aşınma hızı, fotorezist aşınma hızı, fotorezist kaldırma hızı, uniformluk, anizotropi, ve yüzey morfolojileri arasındaki ilişkilerden bahsetmiştir [8]. 2001 yılında Ohara ve arkadaşları tarafından DRIE prosesinde O₂ oranı, altlık sıcaklığı ve yatay-dikey aşınma hızları arasındaki ilişkiler incelenmiştir [9]. 2004 yılındaki bir çalışmada kalın fotorezist malzeme olarak SU8'in

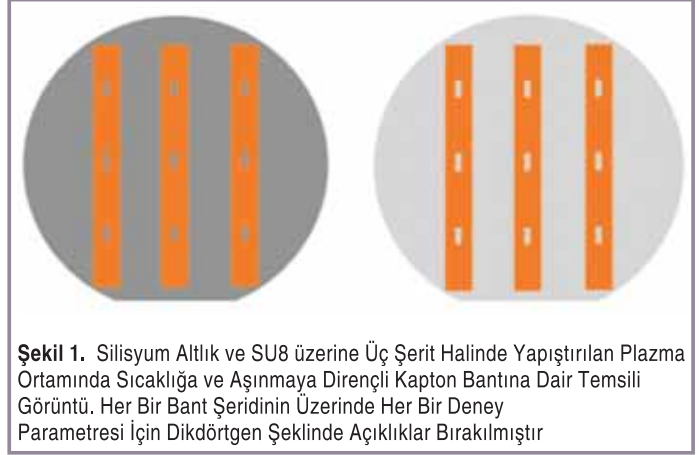
SF₆ ve O₂ plazma altındaki davranışları incelenmiş, yüksek aşınma hızı ve düşük alttan kesme özelliklerini sağlamak için Taguchi metodu ile optimizasyon yapılmıştır. Yapılan çalışmada saf O₂ plazmasında SU8'in aşınma hızının düşük olduğu, ancak uygun oranlarda SF₆ /O₂ karışımıyla oluşturulan plazmada dakikada çok daha yüksek aşınma hızlarına ulaşılabileceği sonucu bulunmuştur [10]. 2006 yılında Preadeep Dixit ve Jianmin Miao, SF₆ akış hızının aşındırılan yüzeyin profil yapısına ve pürüzlülüğe etkisini incelemiştir. Bu çalışmaya göre SF₆ akış oranı düşük SF₆ akış debisi ile daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmektedir [11]. Aynı yılda yapılan bir diğer deneysel çalışmada parametrelerin optimum etkisini incelemek için Taguchi metodu kullanılarak dört parametre üç farklı değerde test edilmiştir [12].

Bu çalışmada aşındırma işlemi sırasında pasive edici florokarbon bileşikleri kullanılmamıştır. Bunun yerine plazmaya aşındırıcı SF₆ gazı ile beraber O₂ ve Ar gazı ilavesi yapılmıştır ve bunların aşınma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma çoklu düzlemsel elektrosprey sisteminde yüksek en/boy (1:10) oranına sahip mikro formların üretimi öncesinde yapılan deneylerin bir bölümü içermektedir. Proses parametrelerinin değişiminin aşınma hızı üzerindeki etkileri bu çalışmanın ana konusudur. Bunun yanında yüksek en/boy oranı, yan duvar dikliği, yan duvar pürüzlülüğü vb. gibi farklı nitelikler için ayrı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Si altlık kullanılarak elektrosprey sistem parçaları üretilecektir. Dolayısıyla deneylerde aşındırılmak istenen malzeme altlık olarak kullanılan Si'dir ve maske malzemesi olarak SU8 kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarına göre SU8'in elektrosprey sistemi üretiminde uygun olup olmadığı

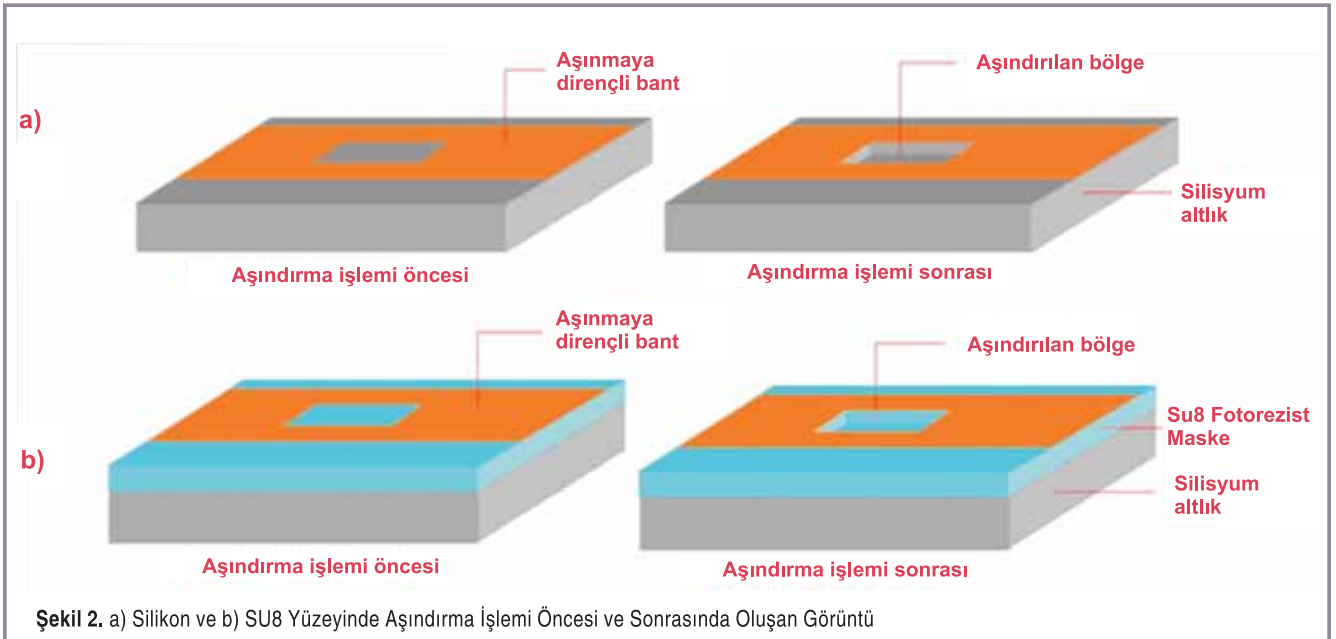
anlaşılabilecektir. Yapılan deneylerde altı farklı aşındırma değişkeninin aşınma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu değişkenler: Reaksiyon odasının basıncı, RF plazma gücü, RF altlık gücü, SF₆ gaz akış debisi, O₂ gaz akış debisi, He gaz akış debisidir. Çalışmalarda altlık malzemesi olarak silisyum (Si) ve maske malzemesi olarak SU8-3050 (SU8) kullanılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneylerde n tipi, <100> kristal yönelimli, 100mm çapında, 450-500µm kalınlığında Si altlık malzemesi kullanılmıştır. Maske olarak Microchem firmasından temin edilen SU8-3050 negatif fotorezist kullanılmıştır. Aşındırma değişkenlerinin aşındırma hızı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Aşındırma hızını belirleyebilmek için Si altlık üzerine ve üzeri SU8 kaplanmış Si altlık üzerine plazma ortamındaki sıcaklığa dayanıklı ve aşınmaya dirençli olan kapton tape bant kullanılmıştır. Aşındırma yüksekliğini belirlemek için Si altlık



Şekil 1. Silisyum Altlık ve SU8 üzerine Üç Şerit Halinde Yapıştırılan Plazma Ortamında Sıcaklığa ve Aşınmaya Dirençli Kapton Bantına Dair Temsili Görüntü. Her Bir Bant Şeridinin Üzerinde Her Bir Deney Parametresi İçin Dikdörtgen Şeklinde Açıklıklar Bırakılmıştır



Şekil 2. a) Silikon ve b) SU8 Yüzeyinde Aşındırma İşlemi Öncesi ve Sonrasında Oluşan Görüntü

üzerine yan yana üç sıra halinde kapton tape bantı yapıştırılmıştır (Şekil 1). Her bir deney için her bir bant şeridinin üzerinde bir adet dikdörtgen şeklinde açıklık bırakılmıştır. Her bir deney sonrasında yüzeydeki bant tabakası kaldırılıp profilometre cihazında aşındırılan dikdörtgen bölgenin yüksekliği ölçülmüştür. Şekil 2'de ise aşındırma işlemi öncesi ve sonrası yüzeyde oluşan görüntünün temsili resmi gösterilmektedir. Yapılan deneyler süresince birden fazla Si altlık kullanılmıştır.

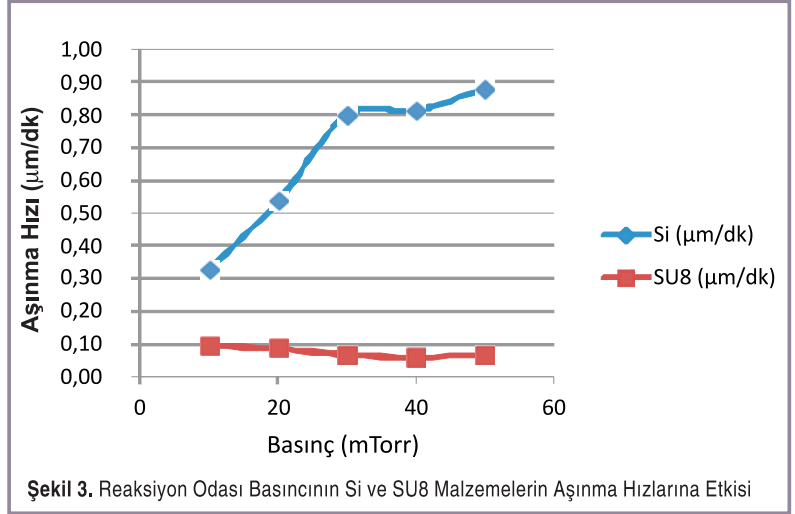
Aşındırma prosesi endüktif olarak eşleşmiş plazma (ICP) (Technol Science Co.) cihazında gerçekleştirilmiştir. Si ve SU8 üzerinde aşındırılan alanların ölçümü Ambios XP-2 Stylus Profilometre cihazında yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda arzu edilen maske malzemesi olarak kullanılan SU8'in minimum oranda aşınması ve Si'nin ise daha yüksek hızlarda aşınmasını sağlamaktır. Deney sisteminde altı farklı aşındırma değişkeninin aşındırma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu değişkenler: Reaksiyon odasının basıncı, RF plazma gücü, RF altlık gücü, SF₆ gaz akış debisi, O₂ gaz akış debisi, He gaz akış debisidir. Her bir aşındırma prosesi için deney süresi 15 dakika olarak tutulmuştur.

SONUÇ

Basıncın Aşınma Hızına Etkisi

Basıncın Si malzeme üzerinde iki zıt yönlü etkisi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; basınç yükseldikçe aşındırma gazı olarak kullanılan SF₆'nın plazma içerisinde ayrışma hızı artar. Bu sayede plazmadaki F⁻ iyonlarının konsantrasyonu artar. Bu durumda aşındırma hızı yükselen basınçla beraber artar. İkincisi ise yükselen basınçla birlikte altlık malzemesi üzerine gelen iyon akışı ve iyon enerjisi azalır. Bu durumda gelen iyonlar altlık yüzeyine düşük enerji ile çarparlar ve aşınma hızı düşer. Bunun yanında artan basınç fotorezist malzemenin (maske malzeme-sinin) aşınma hızını da benzer nedenden dolayı azaltır [8].

Yapılan deney sonuçlarına göre Si malzemenin aşınma hızı yükselen basınçla beraber artmakta olduğu görülmüştür (Şekil 3). Dolayısıyla bahsedilen basıncın ilk etkisinin baskın olduğu söylenebilir. Grafikte basınç 30 mTorr değerini geçince aşınma hızının artma hızının düştüğü görülmektedir. Bu durum artan basıncın yüzeye gelen iyonların enerjilerini azaltmış olmasından kaynaklanmaktadır. Burada 30 mTorr kritik bir seviyeyi temsil etmektedir. Ne var ki yine grafiğe göre SU8 fotorezist malzemesinin aşınma hızı artan basınçla beraber düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni plazma içerisindeki F⁻ bileşenlerinin SU8 ile tepkimeye girmemesindedir. Dolayısıyla



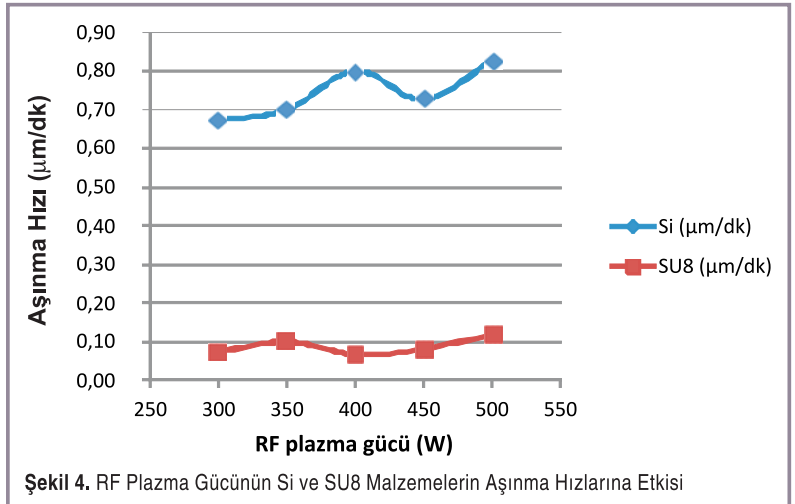
Şekil 3. Reaksiyon Odası Basıncının Si ve SU8 Malzemelerin Aşınma Hızlarına Etkisi

bu bileşenler reaktif olmayan iyonlar gibi davranmaktadır. Artan basınçla birlikte iyonların enerjisi azalmaktadır ve bu sayede SU8 fotorezistin aşınma hızı düşmektedir.

Elektrosprey sisteminde üretilmek istenen mikro formlar yüksek en/boy oranına sahip olmalıdır. Basınç değişimi aşınma hızına etki ettiği gibi, prosesin anizotropik karakterini de bir o kadar etkilemektedir. Altlık yüzeyine gelen iyonların enerjisi yükselen basınçla birlikte azaldığı için iyonların altlık yüzeyine çarpma açıları artar. Bu durumda iyonlar mikro formun yan duvarlarına çarpar ve yan duvarların daha çok aşınmasına neden olurlar. Dolayısıyla proses daha izotropik hâle gelir.

RF Plazma Güç Kaynağının Si ve SU8 Aşınma Hızına Etkisi

DC (Doğru Akım) altlık gerilimi, RF sargısının plazmayı oluşturmasıyla birlikte meydana gelmektedir. DC altlık geriliminin artmasıyla plazmadaki iyonların enerjileri de artar. RF plazma gücü arttıkça plazmadaki DC altlık gerilimi artar.



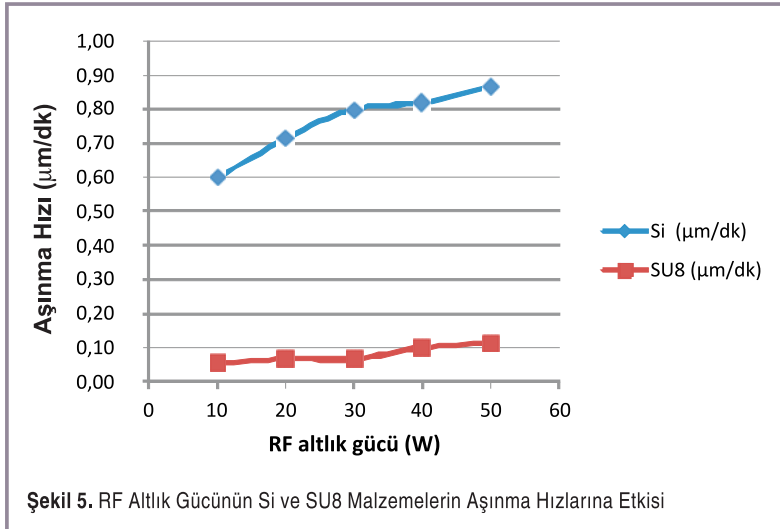
Şekil 4. RF Plazma Gücünün Si ve SU8 Malzemelerin Aşınma Hızlarına Etkisi

Sonuç olarak Si ve SU8'in aşınma hızı yükselen RF plazma gücünün artmasıyla birlikte artar. Ancak bütün bunlara rağmen aşındırma prosesi için oldukça önemli olan Si:SU8 seçicilik oranı bu durumdan kötü etkilenir. RF plazmanın artması seçiciliğin düşmesine neden olur. Bunun yanında RF plazma gücünün artmasıyla iyon akışı artar ve sürecin anizotropik olması sağlanır [8].

Şekil 4'te RF plazmanın aşınma hızına etkisi gösterilmektedir. RF plazma gücünün (Rf_{coil}) yükselmesiyle beraber silikon pulun aşınma hızı artış yönünde bir eğilim göstermektedir. Benzer bir şekilde SU8 fotorezistin aşınma hızı da RF plazma gücünün yükselmesiyle artmaktadır.

RF Altlık Gücünün Aşınma Hızına Etkisi

RF altlık gücü (RF_{bias}) plazma ile aşındırma sürecinde oldukça önemli bir role sahiptir. Yüksek oranda yönlendirilmiş aşındırma, en boy oranı, düşük alttan kesme ve dikey yan duvar profilleri RF altlık gücünün etkisiyle yakından ilgilidir. RF altlık gücü arttıkça altlık yüzeyine gelen iyonların enerjileri artmaktadır. Bu durumda gelen iyonlar yönlendirilerek dikey bir şekilde altlık yüzeyine çarpmaktadır. Yan duvarlar gelen iyonlardan minimum oranda etkilenmektedir. Dolayısıyla altlık tabanı yan duvarlara göre daha fazla aşınmaktadır. Bu durum ise

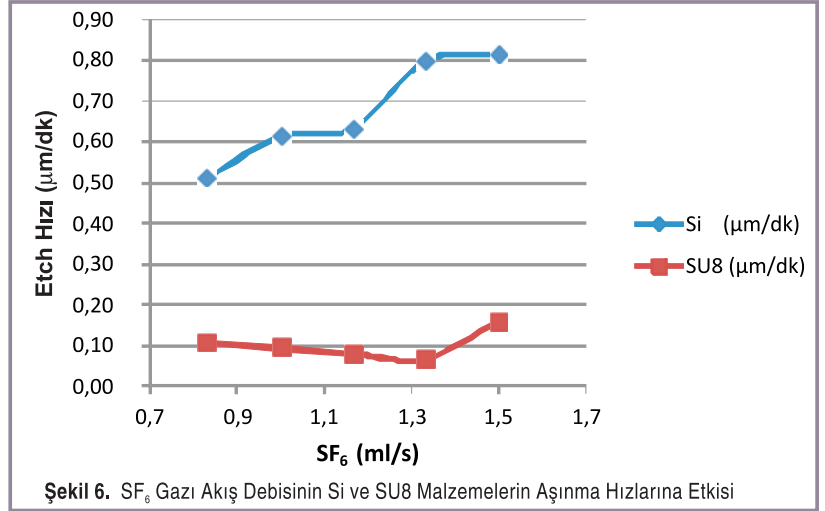


Şekil 5. RF Altlık Gücünün Si ve SU8 Malzemelerin Aşınma Hızlarına Etkisi

karşılığında elde edilmek istenilen mikro formun yüksek anizotropiye ve en/boy oranına sahip olmasını sağlar.

SF₆ Akış Debisinin Aşınma Hızına Etkisi

Yapılan deneylerde SF₆ ana aşındırma gazı olarak kullanılmıştır. SF₆'nın ayrışmasının ardından plazma içerisinde F⁻ reaktif bileşenleri oluşur. Bu F⁻ bileşenleri Si yüzeyi ile



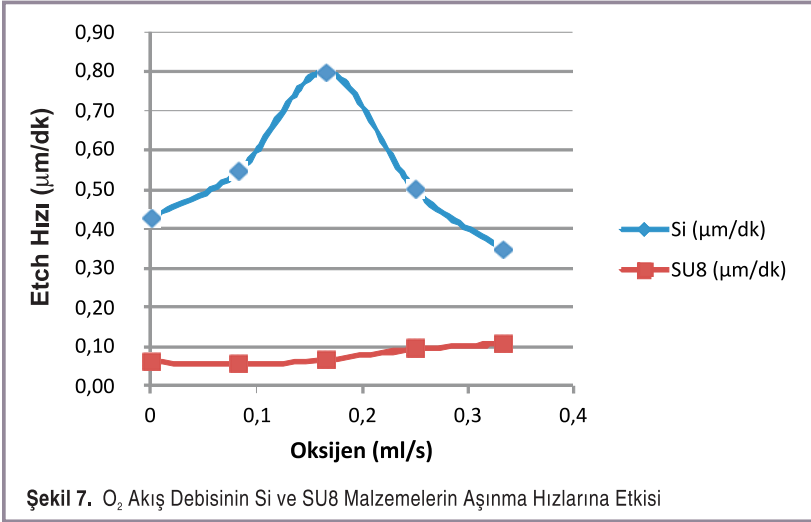
Şekil 6. SF₆ Gazı Akış Debisinin Si ve SU8 Malzemelerin Aşınma Hızlarına Etkisi

kimyasal reaksiyona girer ve reaksiyon sonunda uçucu SiF₄ aşınma ürünü oluşur. Plazmadaki F⁻ konsantrasyonu yükselen SF₆ gaz akışı hızıyla birlikte artar. Silikon yüzeyinde aşınma reaksiyonu yoğunluğu F⁻ bileşenlerinin artmasıyla artar ve Si pulun aşınma hızı artar [8].

Eğer oda basıncı sabit tutularak SF₆ akış debisi sürekli arttırılırsa reaksiyon odası basıncı içeride artan gaz miktarı dolayısıyla kısmi olarak yükselir. Bu durumda SF₆ gaz akış debisinin etkisi tıpkı basınç parametresinin etkisi gibi olur. Dolayısıyla DC altlık gerilimi artan basınçtan dolayı iyonların enerjisi azaldığı için düşer ve aşınma hızını düşürme yönünde bir etki yapar. Bunun yanında aşındırılan mikro formun anizotropisini düşürür [4,8,9]. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre SF₆ gaz akış debisinin artmasıyla birlikte Si malzemenin aşınma hızı artmaktadır (Şekil 6).

O₂ Akış Debisinin Aşınma Hızına Etkisi

RF plazma gücü ve altlık gerilimine bağlı olarak doğru akım altlık gerilimi (DC self bias) O₂ akış debisinin yükselmesiyle artmaktadır. Bu sayede iyonların enerjisi arttığı için aşınma hızı da artmaktadır. Ancak oksijen için aşınma prosesini etkileyen bir başka mekanizma daha vardır. Bu mekanizmada O⁻ radikalleri Si yüzeyiyle tepkimeye girer ve yüzeyde SiO_xF_y pasifleştirme bileşiğini oluşturur. Yani Si yüzeyinde oksit bir tabaka meydana gelir [8]. SiO_xF_y bileşiğinin yüzeyde birikme hızı plazmadaki O⁻ radikallerinin yoğunluğu ve kinetik enerjisine bağlıdır [9]. O₂ akış debisi arttıkça plazmadaki O⁻ radikallerinin konsantrasyonu da buna paralel artar ve Si yüzeylerde oksit bileşiğinin oluşma hızı da artar. Yan duvarların aşınma hızı pasivasyon tabakasının kalınlaşmasıyla düşer. O⁻ konsantrasyonunun artmasıyla alttan kesme (undercut) artar; ancak maske erozyonu yükselir [9]. Maske erozyonunun artması Si:SU8 seçicilik oranının



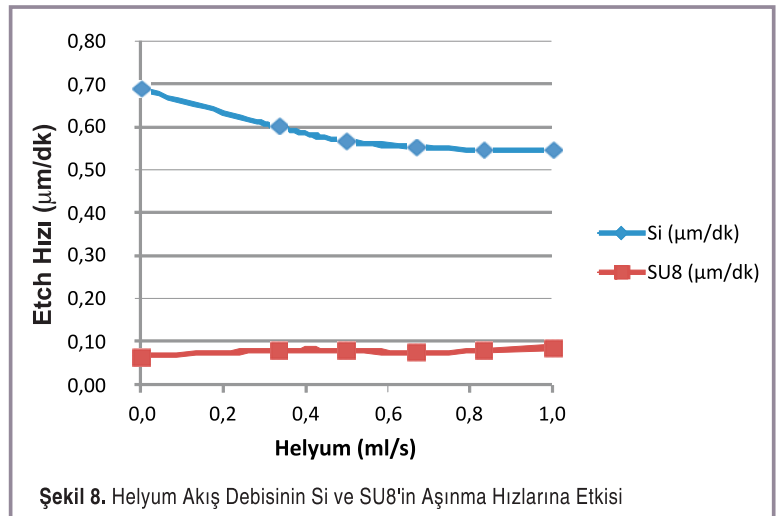
Şekil 7. O₂ Akış Debisinin Si ve SU8 Malzemelerin Aşınma Hızlarına Etkisi

azalmasına neden olur. Bunun yanında yan duvarların aşınma hızının tabana göre düşük olması sonucu proses daha anizotropik karakterde olur.

Yapılan deneylerde O₂ akış debisinin Si ve SU8 aşınma hızına etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre Si aşınma hızı O₂ akış debisi 0,16 ml/s'ye çıkana kadar yükselmiştir. Ardından düşmüştür. O₂ akış debisi 0,33 ml/s'ye kadar arttırılmıştır. Bu durumda plazmanın doğru akım altlık gerilimi (self bias) bu orana kadar yükselmiştir. Dolayısıyla plazmadaki iyonların enerjileri yükseldiği için silikonun aşınma hızında önce bir yükselme gözlemlenmiştir. Ancak O₂ akış debisi 10 ml/s değerini geçince Si yüzeyinde oluşan oksit tabakası kalınlaştığı için aşınma hızında düşme meydana gelmiştir. O[•] radikalleri SU8 ile reaksiyona girmediği için bu malzemeye karşı nötr iyon gibi davranır. Nötr iyonlar SU8 yüzeyini tıpkı bir iyon gibi bombardıman yoluyla aşındırır. Dolayısıyla O₂ akış debisi yükseldikçe O[•] radikallerinin enerjileri artar ve SU8 malzemenin aşınma hızı ise bu nedenden artar (Şekil 7).

Helyum Akış Debisinin Aşınma Hızına Etkisi

Aşındırma sürecinde altlık sıcaklığı oldukça önemli bir parametredir. Helyum gazı ile alttan soğutma yapılarak altlık sıcaklığı sabit tutulmaktadır [7]. Bu sayede Si malzemenin aşınma prosesinde daha tutarlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bunun yanında sıcaklığın düşmesiyle birlikte yan duvarların aşınma hızında bir azalma meydana gelmektedir [9]. Çünkü aşınma ürünlerinin uçuculuğu sıcaklık düştükçe azalmaktadır. Bu durumda aşınmayı engelleyici bir etki oluşmaktadır. Yan duvarların pasifleşmesi artmaktadır [6]. Düşük sıcaklıklar fotorezist maskenin aşınma hızını düşürür [7]. Deney sonuçlarına göre Si malzemenin aşınma hızı helyum gazının debisi arttıkça düşmekte ve SU8 fotorezist malzemenin



Şekil 8. Helyum Akış Debisinin Si ve SU8'in Aşınma Hızlarına Etkisi

aşınma hızı önemli oranda değişmemektedir (Şekil 8). Çünkü SU8 yüzeyinde herhangi bir oksit tabakası oluşmadığı için, He akış debisi SU8 aşınma hızına önemli oranda etki etmemektedir.

TARTIŞMA

Bu makalede makina mühendisliğinin geleceğinde önem arz edecek konulardan biri olan mikro elektro mekanik sistemlerin (MEMS), üretiminde sıklıkla kullanılan süreçlerden biri olan reaktif iyon ile derin aşındırma (DRIE) sürecinin üzerinde durulmuş ve bilhassa bu süreçteki değişik parametlerin silikon pul ile SU8 fotorezist malzemelerinin aşınma hızlarına olan etkileri incelenmiştir.

Takdir edilmelidir ki bu iki malzemenin aşınma hızları arasındaki seçicilik oranı ne kadar yüksek olursa o kadar yüksek kalitede bir mikro imalat gerçekleştirmek mümkündür. Elde edilen deney sonuçlarına göre reaksiyon odası basıncının artmasıyla SF₆ aşındırma gazının ayrışma hızını ve dolayısıyla F⁻ iyonlarının konsantrasyonunu arttırdığı için Si'nin aşınma hızını artırır, basıncın artması belli kritik bir seviyeden sonra aşınma hızının artma hızını yavaşlatmaktadır. Bu durum yükselen basınçla birlikte iyonların enerjilerinin azalması neticesinde meydana gelmektedir. Bunun yanında iyonların enerjilerini düşürdüğü için basıncın artması SU8'in aşınma hızını da azalmaktadır. RF plazma gücünün artmasıyla beraber DC altlık geriliminin artmasını dolayısıyla plazmadaki iyonların enerjilerinin artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle RF plazma gücü arttıkça Si ve SU8'in aşınma hızı artmaktadır. RF altlık gücü arttıkça Si ve SU8 yüzeyine gelen reaktif ve reaktif olmayan iyonların enerjileri ve yönlendirmeleri (yüzeye dik olarak) artar. Bu sayede RF altlık gücü artması Si ve SU8'in aşınma hızını

arttırmaktadır. SF_6 gaz akış debisinin artması plazma içerisindeki F^- bileşenleri artacağı için Si ve SU8'in aşınma hızını artırıcı yönde etki yapmaktadır. O_2 akış debisinin artmasıyla Si'nin aşınma hızı önce artmakta ondan sonra azalmaktadır. Bunun nedeni ilk önce O_2 'nin plazmadaki iyonların enerjilerini arttırmasıdır. Ardından O^- konstant-rasyonu arttıkça yüzeylerde kalın SiO_xF_y bileşiği oluşacağı için Si aşınma hızı azalmaktadır. SU8 yüzeyinde oksitlenme olmadığı için SU8'in aşınma hızı sürekli artmaktadır. He akış debisi arttıkça düşen altlık sıcaklığı neticesinde Si yüzeyindeki oksit tabakanın kalkması zorlaşacağı için Si'nin aşınma hızı azalmaktadır. SU8 yüzeyinde oksit oluşmadığı için He akış debisinin artması SU8'in aşınma hızına önemli oranda etki etmemektedir.

Yapılan bu çalışmalar neticesinde arzu edilen aşınma hızı optimum parametrelerle sağlanabilmektedir. Deneysel çalışmalarda elde edilen en yüksek aşınma hızı $0,9 \mu\text{m/dk}$ olmaktadır. Aşınma hızının yüksek olması yapılacak üretim çalışmalarının daha hızlı ve dolayısıyla daha düşük maliyetli olması anlamına gelmektedir. Elbette bu önemli bir avantajdır; ancak aşınma hızının artmasının üretilen mikro veya mikron altı yapının anizotropisini, pürüzlülüğünü vb. diğer özelliklerini nasıl etkilediği de en az bunun kadar önemli bir konudur. Dolayısıyla bu özelliklerin her biri ayrı deneysel çalışmalarla irdelenmeli, birbirlerine olan etkileri anlaşılmalıdır. Üretilmesi düşünülen düzlemsel çoklu elektrosprey sistemi için, aşındırma konusunda bundan sonraki deneylerde bu bahsedilen etkiler üzerinde durulacaktır. Aşındırma konusunda daha önce yapılmış çalışmalar, bu konunun temellerinin anlaşılmasında fayda sağlamaktadır; ancak yeterli olmamaktadır. Elde edilen veriler aşındırma fiziğinin daha iyi anlaşılmasına olanak sağlayacaktır.

SEMBOLLER

$\mu\text{m/dk}$	Aşınma hızı
ml/s	Gaz akış debisi
SF_6	Sülfürhekzaflorür
O_2	Oksijen
He	Helyum
F^-	Florin reaktif bileşeni
O^-	Oksijen iyonları
RF	Radyo Frekans
"	İnç (uzunluk ölçüsü)
W	Watt (Güç birimi)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DRIE	Deep Reactive Ion Etching (Derin Reaktif İyon Aşındırma)

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 109M449) en derin şükranlarımızı sunarız. Bununla beraber makaleye değerli görüşleriyle katkıda bulunan hakemlere de ayrıca teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Feynman, R.** 1992. "There's Plenty of Room at the Bottom," Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 1, no. 1, p. 60-66.
2. **Epstein, A.H.** 2003. "Millimeter-Scale MEMS Gas Turbine Engines," Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, ASME Makale no: GT-2003-38866, Atlanta, Georgia, ABD.
3. **Liu, C.** 2011. Foundations of MEMS, Prentice Hall, New Jersey, ABD.
4. **Jansen, H., vd.** 1995. "The Black Silicon Method: A Universal Method for Determining the Parameter Setting of Fluorine-Based Ion Etcher Reactive Silicon Etcher in Deep Silicon Trench Etching with Profile Control," J. Micromech. Microeng. p.115-120.
5. **Laermer, F., Schilp, A.** 1996. "Method of Anisotropically Etching Silicon," US Patent no: 5501893.
6. **Marcel, W. Pruessner vd.** 2006. "Cryogenic Etch Process Development for Profile Control of High Aspect-Ratio Submicron Silicon Trenches," Journal of Vacuum Science Technol.
7. **Ayón, A., vd.** 1999. "Characterization of Time Multiplexed Inductively Coupled Plasma Etcher," Journal of the Electrochemical Society,
8. **Kuo-Shen Chen vd.** 2002. "Effect Of Process Parameters On The Surface Morphology And Mechanical Performance of Si Structures After Deep Reactive Ion Etching (DRIE)," Journal of Micro Electromechanical Systems, vol. 11, no. 3.
9. **Ohara, J., vd.** 2001. "Improvement of Si/SiO₂ Mask Etching Selectivity in the New DRIE Process"
10. **Hong, G., vd.** 2004. "SU8 Resist Plasma Etching and Its Optimization," Microsystem Technologies, vol 10, syf.357-359.
11. **Dixit, P., Miao, J.** 2006. "Effect of SF_6 Flow Rate on The Etched Surface Profile and Bottom Grass Formation in DRIE Process," Journal of Physics, Conferans Serileri: 34, p. 577-582.
12. **Chen, S. C., vd.** 2007. "Parameter Optimization for an ICP Deep Silicon Etching System," Microsyst. Technol.