

# MikroElektroMekanik Sistemler (MEMS): Genel bir Tanıtım

## Melik Dölen

Dr. Mak. Yük. Müh.  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü  
06531 ANKARA

## Halit Kaplan

Dr. Mak. Yük. Müh.  
Wisconsin Üniversitesi  
Mak. Müh. Bölümü  
Madison, WI 53706, A.B.D.

Bu makale yeni bir araştırma dalı olan mikro-elektro-mekanik sistem teknolojilerini tanıtmayı hedeflemektedir. Makalede, yüzey/gövde mikro-ışılama, elektro-erozyon, lazerle işleme ve yüksek derinlik oranlarına sahip mikro yapıların üretiminde kullanılan LIGA teknikleri gibi başlıca mikro-üretim yöntemleri kısaca ele alınıp, karşılaştırmalı olarak tanıtılacaktır. Bu üretim teknikleriyle yapılmış silisyum tabanlı mikro-duyucu ("micro-sensors") ve mikro eyleyicilere ("micro-actuators") çeşitli örnekler verilecektir. Bu makalede ayrıca mikro-mekanik sistemlerin (dizgelerin) tasarlanmasında kullanılan ölçeklendirme kanunları ele alınacaktır.

## GİRİŞ

En genel anlamıyla mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) küçük ölçekli elektro-mekanik düzeneklerin ve sistemlerin incelendiği disiplinler arası bir bilim dalıdır. İlgili sistemlerin karakteristik boyutu çoğunlukla birkaç mikrondan ( $\mu\text{m}$ ) birkaç cm'ye kadar değişebilir. Bu araştırma alanının bilimsel kaynaklarda çok değişik isimleri vardır: mikro-mekanik sistemler, mikro sistem teknolojisi (MST) ve mikro-mühendislik bunlardan sadece bazılarıdır. Kimi bilimsel çevrelerde, bu bilim dalı nano-teknoloji olarak da anılır. Ancak nano-teknoloji çoğunlukla bir nanometreden bir mikrona kadar değişen boyuttaki sistemleri kapsar ve MEMS'in aksine, ilgilendiği sistemleri atomik seviyeden başlayarak oluşturmaya çalışır.

Bir mekanik sistemi mikro ölçekli olarak küçültmenin birçok yararı vardır. Öncelikle böyle bir sistemde, hacimle ilgili kuvvetler (ağırlık/atalet) önemini yitirir. Bunun doğal sonucu ise, çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada gerçekleştirile-bileceğidir. Böylece anlık hareket ettirilip/durdurulabilen mekanizmalardan çok büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek duyuculara kadar, birçok sistemi (mikro-ölçekli dünyada) hayata geçirmek mümkün olur. Ayrıca mikro-mekanik

sistemler büyük ölçekli makina sistemlerine göre daha az yer kaplayıp, daha az güç harcarlar. Uygun seri-üretim teknikleriyle, bu tip sistemlerin çok ucuza da imal edilebilecekleri önemli bir gerçektir.

Aslında mikro-mekanik sistemler kendi başlarına da önemli uygulama alanları bulsa, MEMS teknolojisinin en temel amacı bu tip sistemleri mikro-elektronik teknolojisiyle bütünleştirerek, aynı yapı (kırıkmık) altında uygun bir işlevi yerine getirecek tümleşik sistemi yaratmaktır. Günümüzde olgunlaşma aşamasına gelen mikro-elektronik teknolojisinin üretim teknikleriyle, hiç şüphesiz minyatürleştirilmiş mekanik, elektro-mekanik, ve optik sistemlerin üretilmesi mümkündür. En geniş anlamıyla, bu üç farklı sistemi bir araya getiren bilim dalına mikro-opto-elektro-mekanik sistem (MOEMS) teknolojisi adı da verilebilir; teknik kaynaklarda MEMS, MOEMS'i de kapsayan bir kavram olarak kullanılmaktadır.

MEMS'in mikro-elektronik teknolojisiyle önemli benzerlikleri vardır. MEMS çoğunlukla ana malzeme olarak silisyumu kullanmasının yanında; fotolitografi, katkılama, kimyasal buharla biriktirme vs. gibi mikro-elektronik teknolojisinin temel üretim tekniklerinden yararlanır. Bunu en önemli nedeni, hali hazırdaki mikro-elektronik malzeme ve üretim teknolojilerinin kolaylıkla bu yeni alana uyarlanabilmesidir. Bunun dışında, MEMS ile mikro-elektronik teknolojisi arasında belirgin farklılıklar da vardır. Öncelikle, mikro-elektronik cihazlar çoğunlukla iki boyutludur ve sadece işaret/bilgi (elektron akışı) temelli çalışırlar. MEMS ise genelde üç boyutlu bir yapıya sahiptir ve çok değişik fiziksel ortamlarla (akışkanlar, sıcaklık, elektro-manyetik dalgalar vs.) etkileşim halindedir. Ayrıca üç boyutlu yapısı gereği MEMS, mikro-elektronikte kullanılmayan bazı yeni malzeme ve üretim teknolojilerini de beraberinde getirir. Biyolojik sistemlerle MEMS arasında basit bir benzerlik (analoji) kurulursa, MEMS'in bünyesinde yer alan mikro-elektronik sistem bu yapının beynini, elektro-mekanik donanımlarsa onun duyu (ve kas) sistemini oluşturur.

MEMS'in günümüzde en yaygın uygulama alanı; hiç şüphesiz ki, duyucu ("sensor") sistemleriyle bu sistemlerin sağladığı verileri (işaretleri) işleyerek, yararlı sonuçlar üreten tümleşik sistemlerdir. Son zamanlarda otomotiv sektörü için üretilen ve kaza

anında hava yastığını devreye sokan sistem, bunun en güzel örneğidir. Bu kırmık (Analog Devices ADXL50); bir ivme ölçer ve belirli bir yavaşlama (eşik) değeri için hava yastığındaki ateşlemeyi tetikleyecek bir mikro-elektronik devreden oluşur [1]. Böylesi tümleşik sistemlerin yukarıda sözü edilen olumlu yanlarının yanında, güvenilirliği de oldukça fazladır. Şöyle ki titreşim, dinamik kuvvetler ve çeşitli ısı etkiler nedeniyle; duyucu ve onun ölçümlerini değerlendiren (elektriksel) kontrol/denetim sistemlerinde (örneğin elektriksel motor sürücüleri) ortaya çıkan arızaların temel kaynağı, duyucuyu sisteme bağlayan iletim hatlarındaki veya bağlantı elemanlarındaki kopukluklardır [2]. Uygun bir paket altında toplanan böyle MEMS uygulamaları, bu tür sorunları ortadan kaldırır. Günümüzde MEMS aslında birçok değişik araştırma alanına girmiştir. Tablo 1, kısaca MEMS cihazların kullanıldığı bazı uygulama alanlarını göstermektedir.

Tablo 1 Günümüzdeki MEMS uygulama alanları.

Alan	Uygulama
Akışkanlar Mekaniği	Kayma gerilmesi ölçümü, düşük Reynolds sayılı akışkanlar mekaniği uygulamaları
Bilgisayar	Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar
Biyoloji ve Tıp	DNA analizi, mikro-cerrahi aletler, kimyasal duyucular, sinirsel elektrodlar/sondalar
Elektronik	Cihazlar ve röleler
Fizik	Gelişmiş mikroskop uygulamaları, mikro ölçekli sıcaklık ölçüm uygulamaları
Haberleşme	Radyo frekansı devre ve filtre uygulamaları
Havacılık ve Uzay	Sürüklenme direncinin kontrolü, minyatür hava araçları, mikro-uydular, uydular için az yer kaplayan cihaz uygulamaları, radyasyon ölçüm
Optik	Tümleşik optik sistemler, optik anahtarlama, sayısal ışık işleme, düz panel görüntüleme
Taşıt Tekniği	Basınç/sıcaklık/ivme ölçümü, taşıt güdüm teknolojileri

MEMS'in kurucusu olarak çoğunlukla ünlü fizikçi Richard Feynman anılır. 1959 yılında Feynman, malzemeleri buharlaştırarak veya biriktirerek son derece küçük cihazların üretilebileceği fikrini ortaya atmıştır [3]. Feynman önemli konuşmasında; biyolojik sistemleri örnek göstererek, malzemelerin önce kimyasal olarak sentezini yapıp, ardından da onları fiziksel olarak atomik mertebede bir araya getirerek küçük makineler üretilmesi önerisinde bulunmuştur. Bu düşüncenin sınırlı bir çerçevede de olsa hayata geçirilmesi altmışlı yılların ortalarını bulmuştur. Mikro cihazların o zamanki üretim teknikleri, gelişmekte olan tümleşik devre teknolojisinin doğal bir uzantısıdır. Mikro röleler, basınç duyucuları ve debi ölçerler bu yıllarda üretilmeye başlanmış mikro-ölçekli mekanik sistemlere örnektir. Yetmişli yıllarla beraber, tümleşik devre teknolojisinden uyarlanan

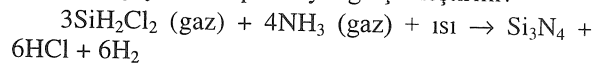
üretim yöntemleri daha da gelişim göstermiştir. Katkılama yardımıyla kazıntı/aşındırma ("etching") durdurma teknikleri sayesinde birçok mikro ölçekli duyucu (basınç, sıcaklık ve görüntü) başarıyla üretilir hale gelmiştir. Seksenli yılların sonlarına doğru yeni yüzey mikro-işleme ("surface micromachining") teknikleri ortaya çıkmış [4] ve sonucunda rezonanslı duyucular ve mikro eyleyiciler (tahrik elemanları, motorlar) gibi sistemler seri olarak üretilme aşamasına gelmiştir. Yüzey mikro-işleme tekniklerinin en önemli özelliği şudur: Bu teknik yardımıyla; bağlama elemanları, yataklar, esnek destekleme parçaları, vs içeren mikro-mekanik sistemler doğrudan doğruya silisyum plaka/pul üzerine inşa edilebilmektedir. Böylece, çok masraf ve zaman gerektiren makina montaj işlemi ortadan kaldırılmaktadır. Doksanlı yılların başıyla beraber, yüksek enerjili X-ışını litografisine bağlı teknikler (LIGA) gelişim göstermeye başlamış [5], nispeten yüksek derinliğe ("aspect ratio") sahip mikro-mekanik sistem ve cihazların üretilmesi mümkün olmuştur. İlerleyen yıllar, yeni LIGA tekniklerini (geçici katmanlı LIGA teknikleri) beraberinde getirmiş [6]; desteklenmemiş mikro-mekanik yapıların ve elemanlarının üretilmesi imkan dahilinde olmuştur. Bir sonraki bölümde burada sözü edilen yöntemler daha detaylı olarak irdelenecektir.

## MİKRO-ÜRETİM TEKNİKLERİ

MEMS teknik kaynaklarında çok sayıda mikro-üretim tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler kullanılarak, boyutları birkaç mikrondan birkaç mm'ye kadar değişen türlü amaçlı mikro-cihazlar üretilmektedir. Bu makalede, bu tekniklerden önemlileri kısaca tanıtılacaktır.

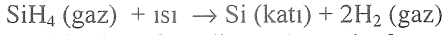
### 1. Yüzey Mikro-işleme

Bu teknikte, nispeten alçak yüksekliğe (birkaç mikron) sahip mekanik sistemler, çeşitli geçici ve esas malzeme katmanları şekillendirilerek, bir silisyum pulun yüzeyinde oluşturulur. Mikro-yüzey işleme foto-litografi tekniğine dayalı bir üretim tekniğidir. Şekil 1 bu teknikte kullanılan önemli işlem adımları göstermektedir. Öncelikle yabancı maddelerden arındırılmış silisyum plakanın yüzeyi ince bir yalıtım katmanıyla (genellikle  $Si_3N_4$ ) kaplanır (Şekil 1.1). Bu işlemde kimyasal buharlama tekniği kullanılıp, nispeten düşük sıcaklık (70-100°C) ve vakumlu (çok düşük basınçlı) özel bir tepkime odasında, şöyle bir tepkimeyle gerçekleştirilir:

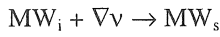


Ardından onun üzerinde ince bir ana malzeme (çoğunlukla çok kristalli silisyum: poli-silisyum) katmanı oluşturma aşamasına geçilir (Şekil 1.2). Yine benzeri bir yöntemle genellikle 580-650°C sıcaklık ve çok düşük bir basınç altında (40-70 Pa), plakanın

yalıtma katmanının üzerinde arzu edilen (çok yönlü) silisyum kristali geliştirilir:



Bir sonraki adım, foto-direnç (örneğin foto-polimer) malzemesiyle en son yüzeyin kaplanmasıdır (Şekil 1.3). Bu amaçlı birçok kaplama tekniği bulunmakla beraber; 10 µm'den ince foto-direnç katmanları için dönele kaplama ("spin coating") yöntemi çoğunlukla kullanılır. Bu teknikte, sıvı fazındaki foto-direnç malzemesi (hızla) döndürülmekte olan plakanın üzerine (merkezden) damlatılarak, sıvının ince bir film halinde yüzeye yayılması sağlanır. Bu adımı genellikle bir ön-pişirme izler. Daha sonra foto-direnç katmanı bir maskeden geçirilen (optik, X-ışını, mor-ötesi vs.) bir ışımaya tabî tutulur (Şekil 1.4). Burada söz konusu olan maske yüzeyde oluşturulmak istenen şekli içerir ve çoğunlukla cam üzerine krom kaplanarak elde edilir. Işıma altında kalmış foto-direnç malzemesi kimyasal olarak değişime uğrar (Şekil 1.5). Bu değişimi foto-polimerler (organik malzeme) için şöyle ifade etmek mümkündür:

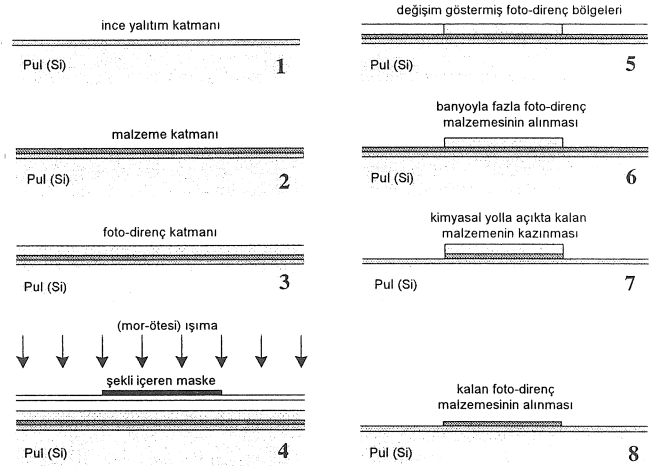


Burada  $\nabla$  Planck sabitini ve  $v$  ışının frekansını ifade etmekte;  $\text{MW}_i$  bozulmaya uğramamış (orijinal) foto-direnç malzemesinin (ortalama) molekül ağırlığını,  $\text{MW}_s$  ise değişmiş olanını belirtmektedir. Bu işlemi takiben, plaka (çoğunlukla alkol temelli) bir kimyasal çözelti içinde banyo edilir. Bu kimyasal banyo sırasında değişime uğramış foto-direnç malzemesi erir ve böylece şekli içeren bir foto-direnç malzemesi geriye kalır (Şekil 1.6).

Aslında foto-direnç malzemesinin banyoda erime hızı  $\text{MW}$  (molekül ağırlığı) ile ters orantılıdır. Foto-direnç malzemelerinde ışımaya ortaya çıkan kimyasal tepkimeler iki türdür. Bir grup foto-polimer ışımaya tabî tutulduğunda, bazı moleküllerinin bağları koparak, yerini daha küçük (hafif) moleküllere bırakır. Dolayısıyla ışımaya bırakılan alanda  $\text{MW}_s \ll \text{MW}_i$  olduğundan; bu bölümdaki malzeme banyoda (diğer bölümlere göre) daha hızlı erir. Bu durumda maskedeki şekil olduğu gibi foto-direnç katmanına aktarıldığı için bu tür malzemelere *pozitif* foto-direnç adı verilir. Bir diğer foto-direnç malzemesindeyse (lastiksi foto-dirençler), ışımaya ilgili tepkime daha önce sözü edilenin tam tersidir. Işıma etkisine bırakılan bölümdeki malzemenin moleküllerinden bir kısmı yeni kimyasal bağlar oluştururlar. Sonuçta  $\text{MW}_s \gg \text{MW}_i$  olduğundan; banyoda sırasında değişim göstermemiş malzeme (diğer bölgelerdekine göre) daha kolaylıkla erir. Böylece maskedeki görüntünün negatifi (tümleyeni) foto-direnç katmanına işlendiğinden; bu türden malzemelere *negatif* foto-direnç adı verilir.

Maskedeki şekil foto-direnç katmanına aktarıldıktan sonra, olası kirlenmeye karşı (çoğunlukla plazma yardımıyla) arındırılır; son bir

fırınlamanın ardından; başka kimyasal banyo (asit temelli) ile açıkta kalan esas malzeme katmanı kazınır (Şekil 1.7). Foto-direnç malzemesi, onun altında yer alan malzeme tabakasını kimyasal banyonun etkilerinden korusa da, özellikle foto-direnç malzemesinin köşelerinde malzeme kazınması (alttan kazınma) görülebilir. Bu işlemin ardından, kalan foto-direnç malzemesi yukarıda sözü edilen tekniklerle alınır (Şekil 1.8). Söz konusu işlem ardışık olarak uygulanarak, birçok gecici ("sacrificial") ve yapısal ("structural") katman oluşturulabilir. İşlem sonunda, gecici katmanlar kazınır ve geriye tamamen montajı yapılmış mekanik sistem ortaya çıkar.



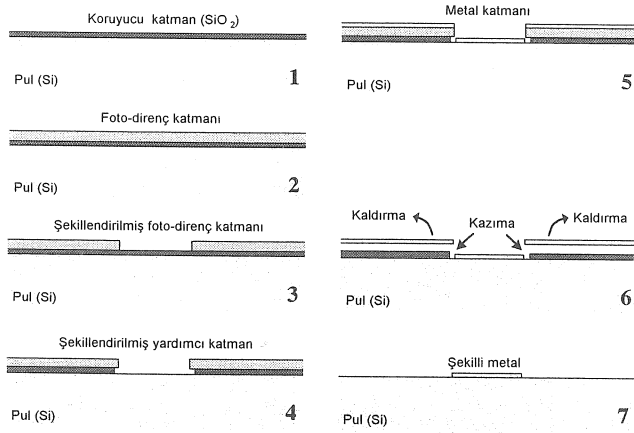
Şekil 1 Yüzey mikro-ışılama tekniği.

Hassas cihaz ve tümleşik devre teknolojisinde sık kullanılan *elektro-kaplama* ("electroplating") tekniği mikro-ışılama teknikleri içinde de yer almaktadır. Bu yöntemde; Au, Ag, Cu, Ni, Pt, Pd gibi değerli metaller, elektrokimyasal olarak silisyum veya cam pulun üzerinde büyütülerek, mikroyapılar oluşturulur. Daha sonraki bölümlerde de açıklanacağı üzere, bu tekniği kullanarak yüksek (birkaç mm) mikro-yapılar da oluşturmak mümkündür. Elektro-kaplamanın en önemli yararlarından biri, standart ekipmanlar kullanması ve kaplama işleminin "temiz oda" dışında gerçekleştirilebilmesidir.

Bir başka önemli mikro işleme tekniği de kaldırma yoluyla mikro-ışılama. Bu teknikte, kimyasal karışımlarla kazınmanın (aşındırmanın) güç olduğu değerli metaller (altın, gümüş, iridyum gibi) silisyum pul üzerinde şekillendirilir. Şablonlama ve tabaka halinde kaldırmaya dayalı bu işlemi, Şekil 2 ayrıntısıyla göstermektedir. Öncelikle, ince bir film halinde bir yardımcı katman (oksit) silisyum taban üzerinde oluşturulur. Ardından, foto-direnç malzemesiyle kaplanan üst yüzey, yukarıda sözü edilen foto-litografik tekniklerle şekillendirilir. Oksit tabakasının açıkta kalan kısımları, asit banyosu yardımıyla alınır. Foto-direnç katmanının

köşelerinde yer alan oksit malzemesinde bir miktar alttan kesme olması arzu edilir. Bu işlemi, metalin yüzeye buharlaştırma tekniğiyle biriktirilmesi izler. Böylece metal, foto-direnç katmanının boşluklarından geçerek pul üzerine "şablonlanmış" olur. Yukarıda kalan (istenmeyen) metal, foto-direnç katmanının (aseton gibi ıslak aşındırıcı sayesinde) kazınmasıyla birlikte kalıp halinde ortadan kalkar. Son olarak yardımcı oksit katmanı alınarak, işlem son bulur.

Silisyum yüzey mikro-işleme tekniklerinin en çekici yanı, mikro-elektronik endüstrisinde hali hazırda kullanılmakta olan donanım ve işlemlerden faydalanmasıdır. Bunun doğal sonucu olarak da, mikro-işleme elde edilen mekanik sistemler kolaylıkla CMOS elektronik donanımla aynı kırmık üzerinde birleştirilebilmektedir. Bu tekniğin en önemli sakıncalarından biri, mikro yapıların kalınlıklarının sadece birkaç mikron sınırlı olmasıdır. İleriki bölümlerde de irdeleneceği üzere; bu özellik mikro eyleyiciler (tahrik elemanları) için önemli bir kısıtlamadır çünkü elemanın oluşturduğu kuvvet (moment) onun yüksekliğine büyük ölçüde bağlıdır. Bu tür sınırlamalara rağmen yüzey mikro-işleme tekniği çok yaygın olarak kullanılmaktadır ve yüzey mikro-işlemenin standart bir süreç olarak yapıldığı mikro-fabrikasyon merkezleri vardır.



Şekil 2 Kaldırma tekniğiyle mikro-işleme.

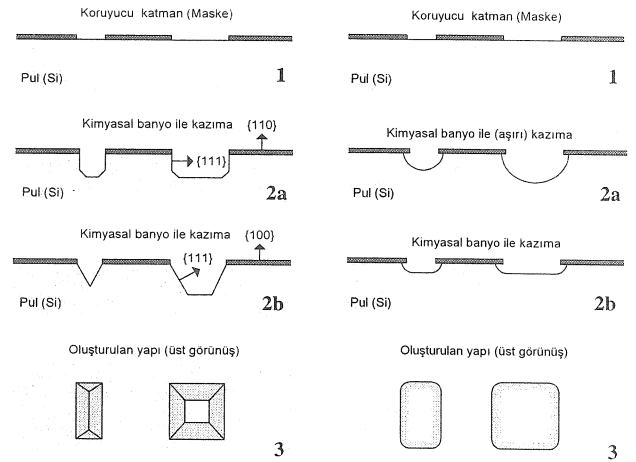
## 2. Gövde Mikro-işleme

Bu işleme tekniğinde, mikro-mekanik cihazlar silisyum kristalin üzerinde nispeten derin bir aşındırma yapılarak, çoğunlukla kanallar, yarıklar, piramitler, çeşitli şekillerdeki çukurlar oluşturulur. Kullanılan aşındırıcı ortamın özelliklerine bağlı olarak, çeşitli gövde mikro-işleme ("bulk machining") yöntemleri geliştirilmiştir [7].

Bunlardan bir tanesi olan ıslak kazıma, çoğunlukla asit temelli (sıvı) kimyasal maddeler kullanılır. Şekil 3'de de gösterildiği gibi, foto-

litografik yöntemlerle yüzeyi maskelenmiş silisyum plaka, asit temelli kimyasalları içeren banyoya daldırılarak bekletilir. Kullanılan kazıyıcı maddenin özelliklerine bağlı olarak açıkta kalan malzeme farklı biçimlerde kazınır.

Anizotropik kazıma, potasyum hidroksit (KOH), EDP (çeşitli oranlarda  $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$  içeren bir kimyasal), hidrozin gibi maddeler kullanılır ve bunlar değişik kristal doğrultularında farklı hızlarda kazıma yapar. Şekil 4 silisyum kristalinin yapısını ve farklı düzlemlerdeki atomik yoğunluğu göstermektedir. Söz konusu kimyasal maddeler, atomik yoğunluğunun fazla olduğu düzlemlerde (örneğin (111) düzlemi) çok yavaş kazıma yaparlar öyle ki bu tip kristal düzlemlere *durdurma düzlemleri* adı da verilir. Banyo zamanı, kazıyıcı içindeki katkı maddeleri, silisyumun içinde yer alan yabancı atomlar, kristal kafesinin doğrultusu ve maskenin yönü gibi birçok etmen anizotropik kazıma sonucu elde edilecek şekli etkiler. Sonuçta anizotropik kazıma, Şekil 3-a gösterildiği gibi, daha çok V şekilli yarıklar, piramidler ve silisyum plaka üzerinde kanallar elde etmek için kullanılır. Buna benzer olarak, *izotropik kazımadaysa*, HF, HCl gibi kimyasal maddelerden yararlanır. Şekil 3-b'den de anlaşılacağı gibi, kazıma hemen bütün yönlerde aynı hızda ilerler ve silisyum üzerinde yuvarlak şekilli yapılar elde edilir. Anizotropik kazımının aksine, bu tür kazıma; üretilecek yapının geometrisi üzerinde çok hassas bir denetim sağlamak göreceli olarak zordur.



a. Anizotropik kazıma

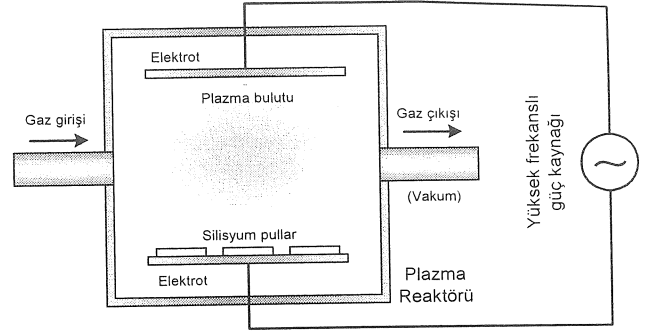
b. İzotropik kazıma

Şekil 3 Islak kazımayla gövde mikro-işleme.

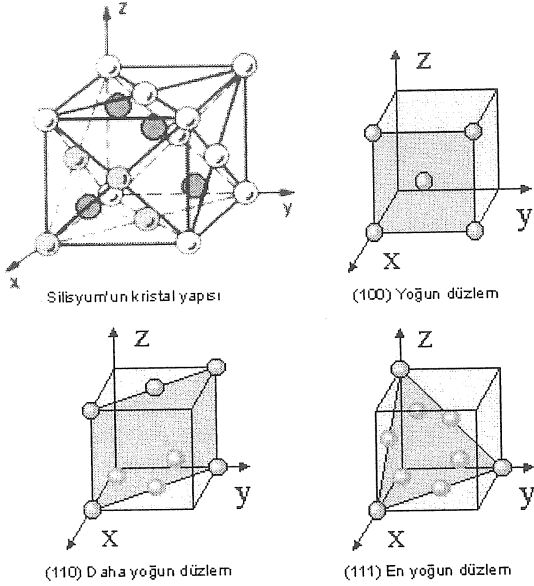
Bir başka gövde mikro-üretim tekniği de *kuru kazıma*dır. Bu tür üretimin en çok uygulanan tekniklerinden biri *derin tepkili ion kazımadır* ("deep reactive ion etching"). Bu üretim tekniğinde Şekil 5'deki gibi bir paralel elektrodlu tepkime odasından yararlanır. Üzerleri şekilli bir koruyucu katmanla



kaplanmış pullar, tepkime odasının (güç) elektroduna yerleştirilir. Odaya çok düşük basınç altında kazıyıcı bir gaz (örneğin Freon 14) gönderilir. Elektrodlar arasına uygulanan yüksek potansiyel nedeniyle gaz ionlaşır. Ortaya çıkan iyonlar kazınacak malzemeye doğru ivmelendirilerek, hareket yönündeki kazıma tepkimesi önemli ölçüde hızlandırılmış olur. Her istenen şekilde olan ve nispeten yüksek derinliğe (10 mikron civarı) sahip yapıları bu teknikte kolaylıkla üretmek mümkündür.



Şekil 5 Paralel elektrodlu tepkime odasında plazmayla kazıma.



Şekil 4 Silisyum'un kristal yapısı ve çeşitli Düzlemlerdeki atomik yoğunluk ([8]'den uyarlanmıştır).

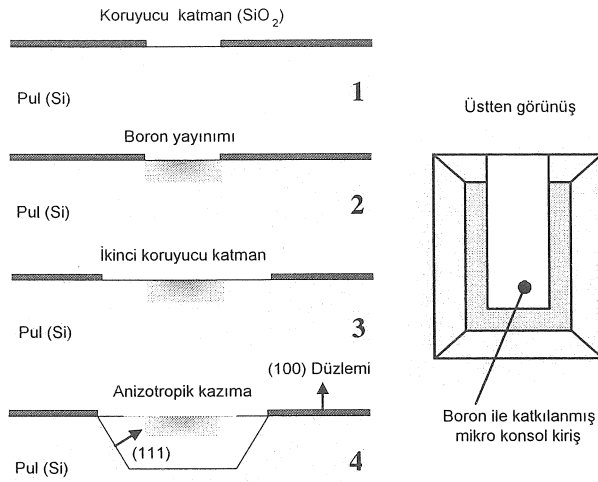
Bu yöntem büyük ölçüde anizotropik kazıma özelliği sergiler. Ancak benzeri olan ıslak kazıma tekniklerinin aksine, bu teknik silisyumun kristal düzlemlerine bağımlı değildir ve Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al gibi birçok değişik malzeme bu teknikte işlenebilmektedir. Teknik kaynaklarda plazmaya dayalı birçok kuru kazıma yöntemi vardır. Bu teknikler de Şekil 5'tekine benzer tepkime odalarından faydalanır. Ancak derin tepkili ion kazımasından farklı olarak, pullar topraklanmış elektroda yerleştirilir. Dolayısıyla, oluşturulan plazma, sadece kimyasal yollarla kazıma yapar. Tablo 2 sözü edilen kuru kazıma tekniklerini karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Bu tabloda geçen "seçicilik" kazıyıcı ortamın sadece arzu edilen malzemeyi kazıması ve pul üzerinde bulunabilecek diğer malzeme türlerine zarar vermemesi anlamına gelmektedir.

Bu grupta yer alan bir başka üretim tekniğiye *konsantrasyona bağlı kazımadır*. Silisyum içinde yer alan yabancı atomlar, KOH gibi kimyasallarla yapılacak (ıslak) kazımanın hızını önemli ölçüde düşürür. Örneğin, yüksek oranda Boron ile katılanmış silisyumun kazınması neredeyse durmuş sayılabilir. Bu ilkeye dayandırılmış üretim tekniği Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu yöntemde, nispeten kalın bir oksit tabakası silisyum pul üzerinde oluşturulduktan sonra, foto-litografik tekniklerle şekillendirilir. Ardından pul, özel bir ocağa konarak; açıkta kalan silisyumun Boron (kaynağı) ile temasa geçmesi sağlanır. Bir süre boyunca, Boron atomları difüzyon (yayınım) yoluyla silisyum kristali içine yayılır. Daha sonra pul üzerindeki oksit katmanı (difüzyon maskesi) alınır ve bir başka oksit katmanı yüzey üzerinde oluşturulup, şekillendirilir. Pul KOH banyosuna daldırılarak, açıkta kalan ve Boronla katılanmamış olan silisyum anizotropik olarak kazınır. Oksit katmanı kaldırılmasıyla işlem sona erer. Bu teknikte, çoğunlukla basınç ve sıcaklık duyucularının ihtiyaç duyduğu konsol (ankastre) mikro kirişler ve çeşitli geometrilerdeki zar (ince kabuk) tipi yapılar üretilebilir. Ayrıca, sonradan bir araya getirilmek üzere bağımsız mikro-mekanik yapı elemanları da oluşturmak mümkündür.

Gövde-mikroişleme teknolojisinin bir uzantısı da çözülmüş-pul tekniğidir. Bu işlemde, mikro yapılar yine pul üzerinde boron katılama ile belirlenir. Bütün pul bir anizotropik kimyasal maddeye atılır ve katılanmamış silisyum tamamen çözülerek, yapılar serbest bırakılır [9].

Gövde mikroişleme tekniği çoğunlukla silisyum pul *birleştirme* tekniklerine ihtiyaç gösterir. Böylelikle, bu teknikte üretilmiş birçok pul birleştirilerek, değişik ölçülerde ve karmaşıklıkta mikro-mekanik yapılar meydana getirilir. Birleştirme tekniği olarak, *anodik bağlama* ve *silisyum kaynağıyla bağlama* oldukça yaygın olarak kullanılır [10]. Aslında *silisyum plaka* birleştirme teknikleri çok katlı mikro-yapıları üretilmesi yanında, yalıtım/salmastra [11], montaj [12] ve paketleme [13, 14] gibi işlemlere de uyarlanmıştır. Sıradan

kaynaklama işlemine benzeyen plaka birleştirmenin şu gibi temel adımları vardır: **i.** bağlanacak plakaların yüzeyleri tozdan ve yabancı parçacıklardan arındırılır; **ii.** plakaların üzerindeki mikro-yapılar bir hizaya getirilir; **iii.** yüzeyler oda sıcaklığında temas ettirilir; **iv.** hazırlanmış plakalar yüksek sıcaklığa çıkartılırlar. Bazı durumlarda ara katmanlar da (cam türevleri [15], yapıştırıcılar [16]) işlem sırasında kullanılabilir. Birleştirmeye yardımcı olması amacıyla; basınç, elektrostatik alan veya ıslanmış yüzeyler arasındaki (kimyasal) çekim gibi unsurlara bazen başvurulduğu da görülebilir. Sözü edilen birleştirme teknikleri yüksek sıcaklık veya yüksek gerilime dayalı olduklarından; ısıl şok hem mikro-yapıya hem de mikro-elektronik devrelere önemli zarar verebilir. Bu nedenle, düşük sıcaklıkta gerçekleşen birçok pul birleştirme tekniği de geliştirilmiştir [17-18].



Şekil 6 Konsantrasyona bağlı kazıma.

Tablo 2 Kuru kazıma tekniklerinin karşılaştırması.

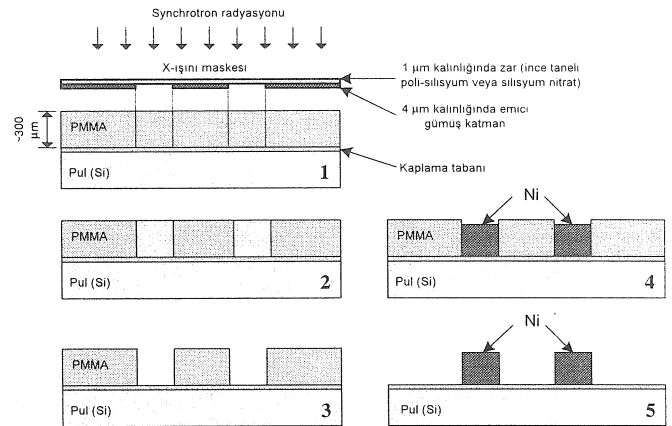
	İon	Tepkili ion	Plazma
<b>Kazıma mekanizması</b>	Fiziksel ion bombardımanı	Fiziksel ve kimyasal	Hızlı kimyasal
<b>Kazıma şekli</b>	anizotropik	anizotropik	izotropik
<b>Seçicilik</b>	kötü	orta	iyi
<b>Basınç [Pa]</b>	0...1	1...10	10...25
<b>Uyarı enerjisi</b>	yüksek	orta	Düşük

### 3. Geliştirilmiş LIGA İşlemi

LIGA tekniği, Karlsruhe Nükleer Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmiş bir üretim işlemi olup, birçok değişik teknolojiyi bünyesinde toplamıştır [5]. Terim bir terim olarak, LIGA Almanca *Lithographie* (Litografi), *Galvanoformung* (Elektro-kaplama), *Abformung* (presle kalıplama) terimlerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Bu işlemde, pleksi-glasa benzeyen PMMA (poli-metilmet-akrilit) malzemesi (foto-polimeri) kullanılır. Şekil 7'de de gösterildiği üzere; PMMA özel bir

maske yardımıyla, nispeten yüksek enerjili bir X-ışını radyasyonuna ("synchrotron radiation") maruz bırakılır. Açıkta kalan PMMA'in moleküllerinden bazılarının bağları kopar ve kimyasal olarak değişime uğramış PMMA çözülebilir hale gelir (Şekil 7-2). Metil-iso-bütül-keton (MIBK) yada iso-propil-alkol (IPA) içeren özel bir kimyasal çözelti banyosu aracılığıyla değişime uğramış PMMA çözülür (Şekil 7-2). Bu yöntemde oldukça yüksek duvarlı yapılar (0.3mm) büyük bir hassasiyet (0.1-0.3µm) ile üretilebilir. Daha sonra açıkta kalan kısımlar metal (Cu, Au, Ni) bir tabakayla (elektro-kaplama tekniğiyle) kaplandıktan sonra (Şekil 7-4), kalan PMMA kimyasal yöntemlerle ayrılır. Metal en son yapı olabileceği gibi (Şekil 7-5), gerekirse, enjeksiyon (press) kalıbı olarak kullanılarak; değişik tipteki plastik parçalar üretilebilir.

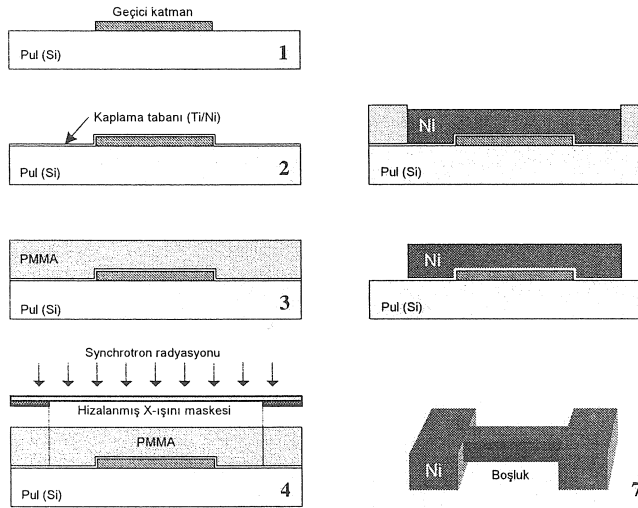
PMMA'nın ışın soğurma ("absorption") davranışı incelendiğinde; bu malzemeyi kullanarak, 300 mikrondan (3 ışın soğurma dalga boyu) daha yüksek mikro-yapıları üretmenin teoride mümkün olduğu görülür. Ancak kalın foto-polimer katmanını çok yüksek foton akısına sahip (3000 eV üstü) bir ışımaya maruz bırakmak gerekir. Ayrıca, malzemenin ışın altında kalma zamanı da önemli ölçüde artar. Bunun ötesinde, kalın PMMA'da polimerizasyon işlemi sırasında önemli ölçüde iç gerilme meydana gelir ve sonuçta oluşturulacak mikro-yapının geometrik toleransları olumsuz olarak etkilenir. Sonuç olarak, LIGA ile üretilecek mikro yapıların yükseklik oranını, büyük ölçüde foto-polimerin kimyasal ve fiziksel (mekanik) yapısı belirler. daha yüksek mikro-yapılar elde etmek için, *derin X-ışını litografisi* adı verilen teknikler geliştirilmektedir.



Şekil 7 Temel LIGA işlemi [19].

Yukarıda sözü edilen LIGA tekniği tek aşamalı bir işlem olup, sabit ve prizmatik mikro-yapıların üretilmesi için uygundur. Ancak geçici ("sacrificial") bir malzeme katmanını yardımıyla, hareketli mikro-ölçekli parçalar da üretilebilir [20]. SLIGA

("Sacrificial LIGA") adı verilen bu teknikte, Titanyum (Ti) en çok kullanılan malzemedir çünkü Ti elektro-kaplama işleminde kullanılan temel metallere (krom, nikel, bakır, altın vs.) iyi yapışmasının yanında; sözü konusu metallere zarar vermeyen hidroflorik asit yardımıyla da kolayca kazınabilir. Şekil 8 bu işlemin temel adımlarını göstermektedir. Silisyum pulun üzerinde (şekillendirilmiş) geçici bir katman oluşturduktan sonra (Şekil 8-1), bunun üstü (elektro-kaplama tabanı işlevini görecek) ince bir Ti katmanıyla kaplanır (Şekil 8-2). Ardından üzerine PMMA dökülüp, fırınladıktan sonra (Şekil 8-3), yeni oluşturulan foto-polimer katmanı uygun olarak şekillendirilir (Şekil 8-4). Elektro-kaplama tekniği kullanılarak, açıkta kalan kaplama tabanının üzeri Nikel (Ni) ile kaplanır (Şekil 8-5). Daha sonra, PMMA ve kaplama tabanı alınır (Şekil 8-6); böylece geçici katmana erişim kolaylaşır. Geçici katman kimyasal olarak kazındıktan sonra, Nikel yapı serbest kalır (Şekil 8-7). Bu yöntem kullanılarak, tek bir kırık üzerinde binlerce karmaşık yapıya mekanik sistem son derece ekonomik olarak üretilebilir. Mikro- türbinler, dişli çarklar, elektrikli motorlar, ivme ve basınç duyucuları bu teknikle üretilebilen mikro-sistemlerin başında gelir.



Şekil 8 Geliştirilmiş LIGA (UW) işleminin [20].

#### 4. Elektro-Erozyonla Mikro-işleme

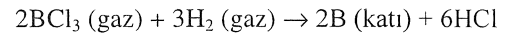
Toshiba Üretim Mühendisliği Araştırma Laboratuvarları'nda geliştirilen bu teknikte, 10 mikron çapındaki bir elektrod teli yardımıyla iletken olan herhangi bir malzeme elektriksel yük boşaltımı (elektro-erozyon) yoluyla çok hassas olarak şekillendirilebilmektedir [21]. Mikro-üretim için

geliştirilen makina, standard takım tezgahı araç ve gerecini (teknolojisi) kullandığı gibi; atelye üretim teknikleriyle de tamamen uyumludur. Ancak, diğer üretim tekniklerinin aksine; bu teknikte her parça tek tek üretildiğinden; yöntem şu an ki konumu itibarıyla paralel (çoklu) üretime elverişli değildir. Paralel elektrodlar yardımıyla seri-üretim konusunda araştırmaların devam ettiği bildirilmektedir.

#### 5. Laserle Mikro-işleme

Bu teknikte, silisyum pul  $Cl_2$  gibi bir buhar ortamına konur. Laser ışını, kazıma tepkimesini hızlandırmak için kullanılır. Laser ışınına maruz bırakılan bölgede ortaya çıkan yerel ısınma, tepkimenin hızını önemli ölçüde artırır. Bunun yanında, eğer laser için doğru bir dalga boyu seçilmişse (örneğin,  $Cl_2$  için 500nm) fotoliz yoluyla laserle temas eden gazda ( $Cl^*$  gibi) serbest radikaller ortaya çıkar ve  $SiCl_4$  gibi kolayca buharlaşan silisyum bileşikler meydana getirir. Bu üretim tekniğiyle, delikler, kanallar, karmaşık yapıya ve genel boyutları 1 mm altındaki mikro-yapılar üretilebilir [22].

Lazer, kazıma tepkimesini arttırmak yerine "biriktirme" tepkimesini başlatmak için de kullanılabilir. Bunun ilginç bir örneği [23] tarafından verilmiştir. Bu çalışmada 514.5nm dalga boyuna sahip  $Ar^+$  (Argon) lazeri kullanarak, karmaşık 3-boyutlu Boron yapıları üretilmiştir. Kullanılan tepkime şu şekildedir:



Mekanik ve optik yöntemler kullanılarak yönlendirilen lazer ışını, taradığı yüzeydeki bir nokta üzerinde biriktirme tepkimesini başlatır. Ardından, arzu edilen bir başka noktada Boron gelişimini sağlamak amacıyla, ışın başka noktalara yönlendirilir. Bu teknikte, lazerin gücüne bağlı olarak amorf ya da kristal yapısında Boron mikro-yapılar üretmek mümkündür. Elektro-erozyon yönteminde gibi, laser mikro-işleme teknikleri paralel üretime elverişli değildir.

#### MEMS ÜRETİM TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

Bir önceki bölümde teknik kaynaklarda yer alan başlıca MEMS üretim teknikleri kısaca tanıtılmıştır. Foong ve diğerleri [6] bu mikro-işleme yöntemlerinin teknik sınırlarını ve yeteneklerini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve Tablo 3 gösterildiği gibi özetlemiştir. Benzer olarak, Tablo 4'de MEMS üretim teknolojisinde kullanılan belli başlı malzemelerle, bu malzemeler için uygulanan önemli üretim adımlarını göstermektedir.

**Tablo 3** Mikro-işleme yöntemlerinin teknik özellikleri.

	Geniş çaplı mikro-işleme	Yüzey mikro-işleme	Geliştirilmiş LIGA
Malzeme	Tek (yönlü) Si kristali	Poli-silisyum	PMMA, Ni, Cu, Au, Seramik
Geometri	Piramid ve kutu şekilli giriş/diafram	Sabit kesitli dizi geometrisi	Sabit kesitli dizi geometrisi
Hareketli Parça	Yok	Var	Var
Boyut [m]	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-8} - 10^{-3}$
Yükseklik Oranı	$10^2 - 1$	<1	$10^2 - 10^2$

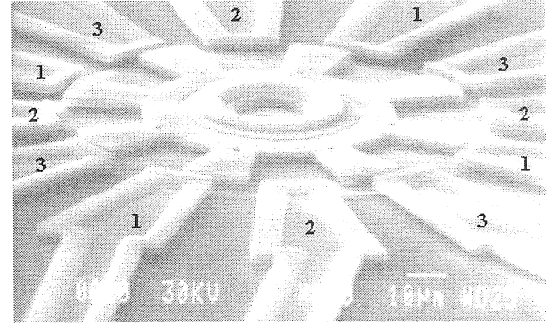
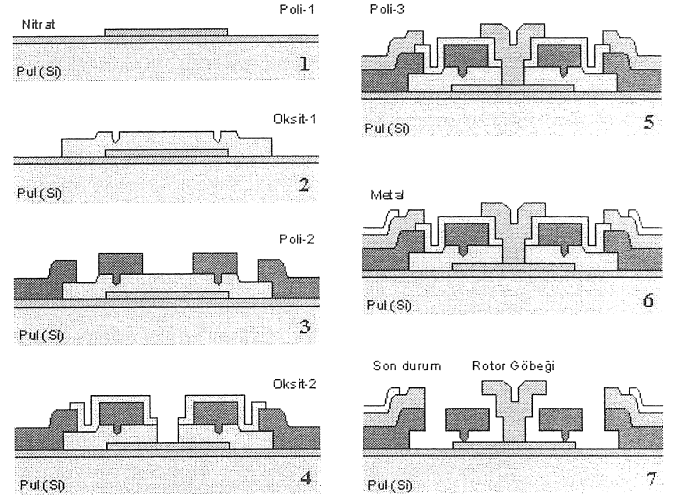
### MİKRO-SİSTEM UYGULAMALARI

Bir önceki bölümde, mikro duyu ve eyleyicilerin ("actuator") üretimi için geliştirilmiş mikroüretim teknolojileri kısaca ele alınmıştır. Bu bölümde bu sözü edilen teknikleri kullanarak, üretilmiş ve ticari uygulama alanı bulmaya mikro-sistemler kısaca incelenecektir.

**Tablo 4** MEMS'de kullanılan çeşitli malzemelerin özellikleri [6].

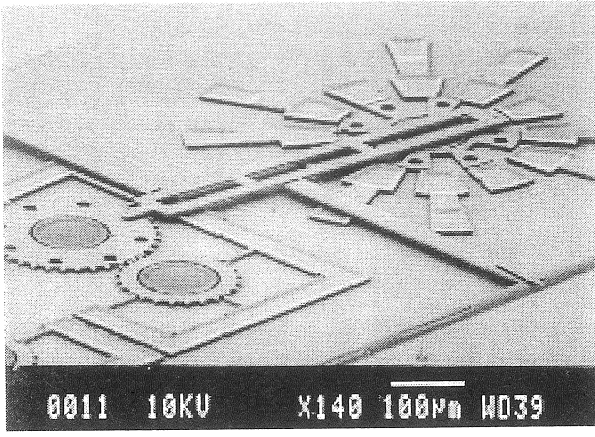
Malzeme(ler)	Fonksiyon(lar)	İşlem Adımları
Tek Kristalli Silisyum	Temel yapı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tek yönlü kristal büyüme</li> <li>Kimyasal buhar biriktirme</li> </ul>
	Mikro-mekanik yapı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gövde mikro-işleme</li> </ul>
	Yarı-iletken	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tümleşik devre üretim işlemleri</li> </ul>
Çok Kristalli Silisyum (Poli-silisyum)	Mikro-mekanik yapı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüzey mikro-işleme</li> </ul>
Silisyum Dioksit (SiO <sub>2</sub> )	Gecici katman	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oksitleme</li> <li>Kimyasal buhar biriktirme</li> </ul>
	Kazıma maskesi	
	Anodik birleştirme ortamı	
	Dielektrik	
Silisyum Nitrat (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	Yalıtıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kimyasal buhar biriktirme</li> </ul>
	Korozyon koruma katmanı	
	Yağlama katmanı	
	Kazıma maskesi	
	Yüzey edilgenleştirme	
Boron Katkılı Silisyum	Elektriksel yalıtım	<ul style="list-style-type: none"> <li>İon etkili difüzyon</li> </ul>
	Dielektrik	
	Yüzey edilgenleştirme	
Polimid	Kazıma durdurma katmanı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektro-şekillendirme</li> </ul>
	p-tipi kristal	
PMMA, Nikel, Bakır, Seramik	Gecici katman	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıplama</li> </ul>

Mikro yüzey işleme tekniği çokça kullanılan MEMS üretim tekniğidir. Bu teknik kullanılarak üretilmiş bir elektro-statik motor, (MCNC'den uyarlama) Şekil 9'da gösterilmektedir. Ayrıca motor sisteminin üretimi sırasındaki (basite indirgenmiş) ana işlem adımları da görülmektedir [24]. Burada oksit (1 ve 2) gecici katman malzemesi ve poli-silisyum (çok kristalli silisyum) da (1, 2 ve 3) yapı malzemesidir. Oksit tabakaları kaldırıldığında, rotor serbest kalır ve ortaya birleştirilmiş motor sistemi çıkmaktadır.



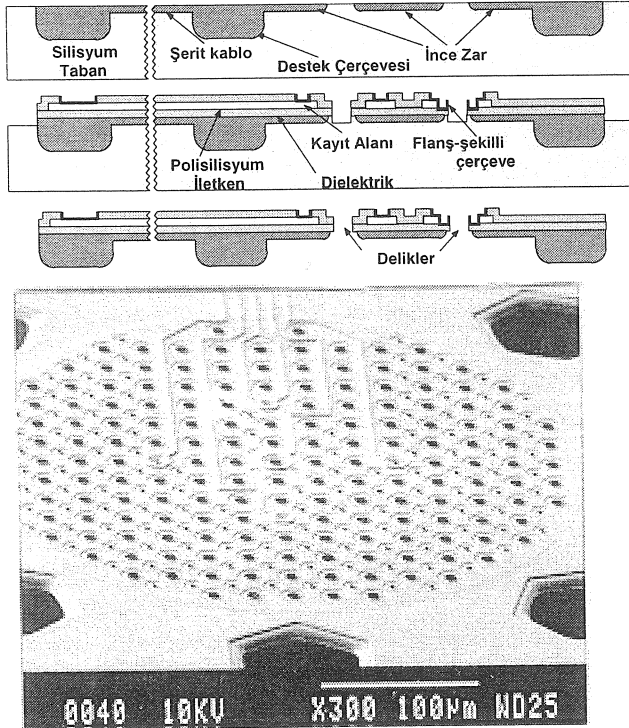
**Şekil 9** Yüzey mikro-işleme tekniğiyle üretim ([24]'den uyarlama).

Daha önce sözü edildiği üzere, pulu-pula-yapıştırma tekniğiyle çok değişik üç boyutlu mikro yapılar kolayca elde edilebilmektedir. Yüzey mikro-işleme, pulu-pula yapıştırma ve çözülmüş pul üretim tekniğinin ortaklaşa kullanılmasıyla üretilmiş bir başka mikro-motor Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada mikro-motorun parçaları Boron katkılı silisyum pul üzerinde belirlenmiş, daha sonra bu silisyum pul bir cam pula anodik olarak bağlanmış ve en son olarak bütün yapı EDP adı verilen bir kimyasalın içine atılarak, şekilde görülen motor elde edilmiştir [25].



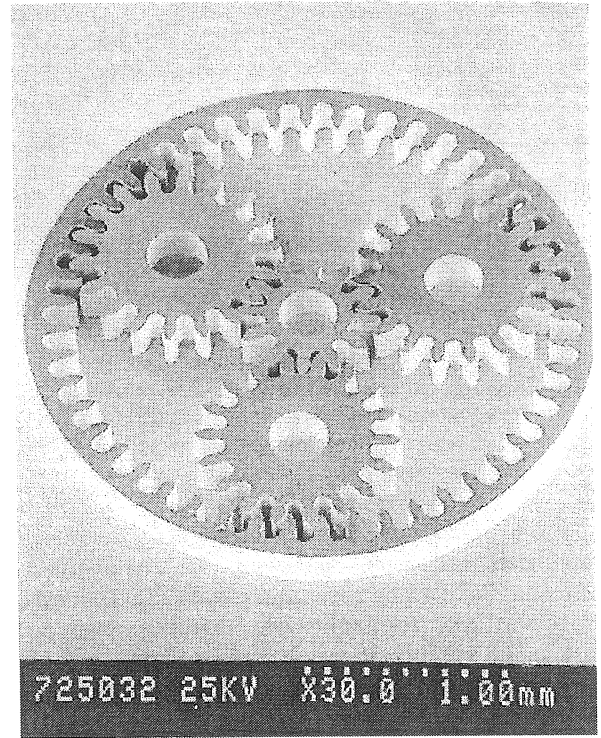
Şekil 10 Silisyum yüzey mikro-işleme tekniğiyle üretilmiş elektro-statik mikro-motor sistemi [25].

Gövde mikro-işleme tekniğine örnek olarak vücut içindeki elektrik akımlarını ölçmek için kullanılan eleksi elektrodu verilebilir. Şekil 11 çözülmuş-pul yöntemiyle üretilmiş böyle bir elektrodun yapısını ve üretim aşamalarını göstermektedir. Burada elektrot 300 µm çaplı bir zar (diyafram) içine delinmiş 1µm kadar küçük çaplı deliklerden oluşmaktadır. Kesilmiş bir çevre siniri bu elektrodun iki tarafına yerleştirildiğinde sinirdeki aksonlar delikten geçerek, büyümekte ve bu sayede deliklerin etrafındaki metal yapılarla sinir hücrelerindeki elektriksel etkinlikler kaydedilebilmektedir [9].



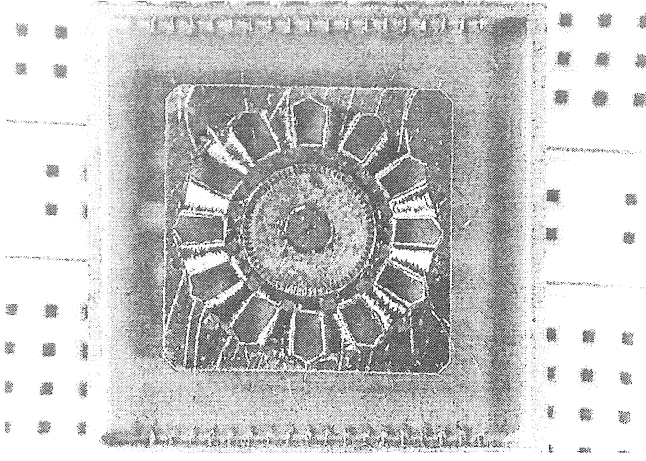
Şekil 11 Çözülmuş-pul tekniğiyle elde edilen elek-tipi elektrodunun yapısı ve üretim işlemi [9].

İleri bölümde iredeleneceği üzere, mikro eyleyicilerin ürettiği kuvvet veya moment (tork) yapının derinliğiyle genellikle doğru orantılıdır. Dolayısıyla, nispeten yüksek derinlik oranına ("aspect ratio") sahip mikro yapıların üretilmesine elveren geliştirilmiş LIGA tekniği MEMS teknolojisinde sıkça kullanılan bir üretim yöntemidir. Teknik kaynaklarda LIGA ile üretilmiş, birçok MEMS uygulaması vardır. Burada sadece birkaç tanesine kısaca yer verilecektir. Şekil 12'de bu teknikle üretilmiş bir minyatür planet dişli mekanizması görülmektedir. Nikel tabanlı bu redüktör (hız azaltıcı dişli) sistemini RMB Şirketi (Biel, İsviçre) için Wisconsin Üniversitesi üretmiştir [20]. Benzer olarak, yine aynı tekniği kullanılarak yapılmış minyatür bir asenkron motor Şekil 13'te gösterilmiştir [26]. Elle montajı ve stator sargısı yapılmış bu sistem, senkron (veya adım) motorların pratik olarak işe yaramayacağı alanlarda kullanmak üzere tasarlanmış olup, halen geliştirme aşamasında olduğu bildirilmektedir [20, 26]. Benzer olarak, Şekil 14, yine LIGA ile üretilmiş kütle spektroskopisinde kullanılan 20 hiperbolik kutuplu bir dizini göstermektedir. İçinde Sandia Ulusal Laboratuvarları'nın da yer aldığı bir konsorsiyum, bu hassas yapıyı üretmiştir [20, 27].

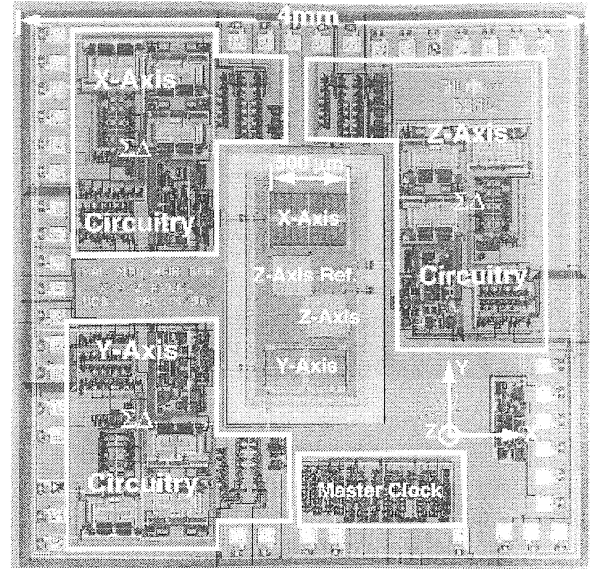


Şekil 12 Geliştirilmiş LIGA (UW-MEM) tekniğiyle üretilmiş planet dişli mekanizması [20].

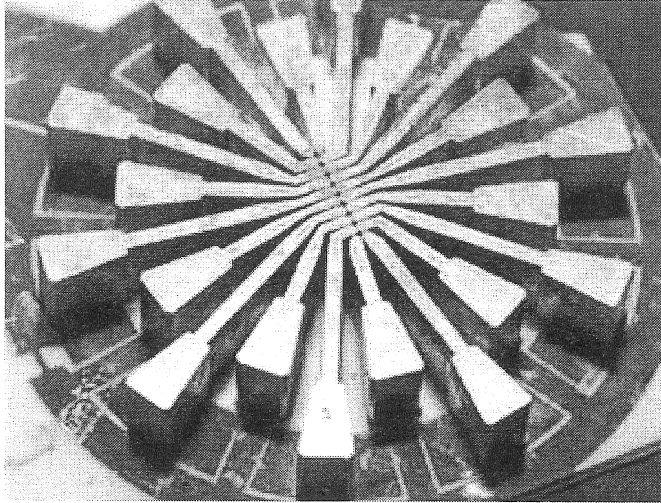




Şekil 13 On iki kutuplu minyatür asenkron motor (motorun rotor çapı ≈ 5mm) [26].



Şekil 15 Üç-eksenli (mikro) ivme ölçer [27, 28].



Şekil 14 Geliştirilmiş LIGA tekniğiyle üretilmiş kütle spektroskopisinde kullanılan doğrusal dizin (dış çapı ≈ 2 cm; kalınlık 3.4mm) [20, 27].

Son olarak, California Üniversitesi (Berkeley) tarafından tasarlanan üç-eksenli bir ivme ölçer sistemini Şekil 15'de gösterilmektedir [28]. Tümleşik CMOS/MEMS teknolojileriyle üretilmiş olan bu sistem, üç eksenli (kuvvet-dengeli) ivme ölçerlerin yanı sıra; zamanlama birimi, sayısal bilgi çıkış birimi gibi gerekli bütün üniteleri bünyesinde toplamıştır. Eksenler foto-litografik yolla hizalandıklarından, kırmağın üretimi için elle montaja ve çeşitli ayarlamalara gerek duyulmamaktadır.

### MİKRO-MEKANİK SİSTEM TASARIMI VE ÖLÇEKLENDİRME

Mikro-mekanizmaların tasarımı, yeni felsefeleri ve yaklaşımları da beraberinde getirir. Bu tip sistemlerin genel topolojisi, yapısal bileşenleri, malzemeleri, motor elemanları (eyleyiciler) ve kontrol biçimi; sistemin çalıştığı mikro-ortam ve bu ortamla uyumlu ölçeklendirme kanunlarıyla belirlenir.

Daha önce de irdelendiği gibi; geleneksel makina tasarımında en önemli unsurlar kütle/atalet, sönüm, sistem rijitliği (katılığı), ve sistemin birinci dereceden dinamik yanıtıdır. Ancak, mikro-ölçekte (makina sisteminin) yüzey alanının hacmine oranı oldukça arttığından; bu gibi etmenler önemini yitirmektedir. Bunlar yerine sürtünme, yüzey gerilmesi, adhezyon, ve diğer sınır kuvvetleri gibi ikincil etkiler makina tasarımı üzerindeki baskın unsurlar olmaktadır.

Mikro-mekanik sistemleri tasarlayabilmek için öncelikle mikro ortamda kuvvet, ivme, güç gibi önemli fiziksel büyüklüklerin nasıl ölçeklendirildiğini kavramak gerekir. Ölçeklendirme kurallarını açıklayabilmek için; (x, y, z) boyutlarına sahip bir prizmatik bir parçanın minyatürleştirilerek (x',y',z') boyutlarına getirildiği varsayalım:

$$\frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z} = \sigma \quad (1)$$



Burada  $\sigma$  (izometrik) ölçek katsayısıdır ( $0 < \sigma < 1$ ). Yoğunluğun ( $\rho$ ) sistemin boyutlarına bağlı bir fiziksel özellik olmadığı düşünülürse, kütleler ( $m$ ) için,

$$\frac{m'}{m} = \frac{\rho x' y' z'}{\rho xyz} = \frac{V'}{V} = \sigma^3 \quad (2)$$

yazılabilir. Burada  $V$  hacmi (oylumu) belirtirken ( $'$ ) sembolü küçültülmüş sisteme ait fiziksel büyüklükleri ifade etmektedir. Bu basit mekanik sisteme etkiyen kuvvetin ( $F$ )

$$\frac{F'}{F} = \sigma^N \quad (3)$$

şeklinde ölçeklendirildiği düşünülün. Burada,  $N$  **çoğunlukla**  $\{1, 2, 3, 4\}$  değerlerinden birini alabilen bir katsayıdır. Makro ortamda olduğu gibi; mikro-ölçekli ortamda da kuvvetler üç temel fiziksel yolla oluşturulabilir: **i.** elektrostatik; **ii.** manyetik; **iii.** hidrolik basınç veya hava basıncı. Mekanik sisteminde faydalanılan temel fiziksel mekanizmaya ve doğal olarak bunun sistem içinde kullanma koşullarına bağlı olarak; (3) nolu denklemdeki  $N$  katsayısı seçilir. Örnek olarak, Şekil 16'daki elektromanyetik sistem göz önüne alınsın. Burada hareketli parçaya uygulanan manyetik (relüktans) kuvvet (şiddeti)

$$F = 0.25n^2 \mu_0 (h/\delta) i^2 \quad (4)$$

olarak verilebilir [29]. Bu ifade,  $\mu_0$  serbest boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısıdır ve  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] olarak alınabilir. (4) nolu denklemdeki diğer fiziksel büyüklükler şekil üzerinde gösterilmiştir. Sarımdan geçen akım için

$$i = JA \quad (5)$$

yazılabilir. Burada  $J$  akım yoğunluğunu,  $A$  da akımı geçiren iletkenin kesit alanını belirtmektedir. İzometrik olarak küçültülen bir sistem için,

$$\frac{F'}{F} = \frac{0.25n^2 \mu_0 (h'/\delta') J^2 (A')^2}{0.25n^2 \mu_0 (h/\delta) J^2 (A)^2} = \frac{(A')^2}{(A)^2} = \sigma^4 \quad (6)$$

oranı elde edilir. Bu ölçeklendirme  $J$  akım yoğunluğunun sabit kalacağı gibi gerçekçi bir varsayıma dayanmaktadır. Ancak bu varsayım ile elde edilen oran, oldukça zayıf bir manyetik kuvvetin küçültülmüş sistemde oluşturulabileceğini işaret etmektedir. [30]'da akım yoğunluğunun işletim koşullarına bağlı olarak; farklı seçildiği durumlar incelenmiş, kuvvetin  $\sigma^2$ ,  $\sigma^3$  gibi ölçeklendirilebileceği gösterilmiştir. Aslında, yukarıdaki gibi bir elektromanyetik sistemde sarım sayısını da ( $n'$ ) değiştirerek de MMF'i (magnetomotive kuvvet) arttırmak mümkündür. Böylece daha yüksek mikro-sistem kuvvetlerinin elde edilebileceği düşünülebilir. Ancak bu, çekirdeği manyetik

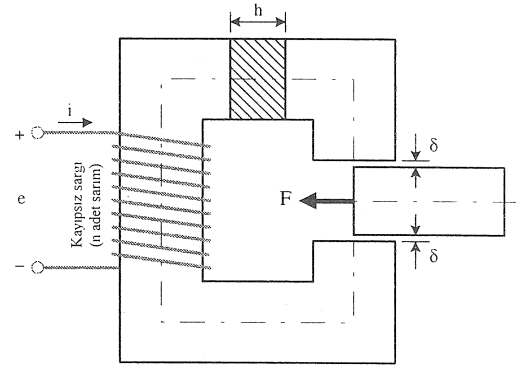
doyunluğa ("saturation") ulaştırabileceği gibi, sarım sayısının doğurduğu önemli üretim ve işletme güçlükleri de ortaya çıkarabilir.

Elektro-statik kuvvetler mikro-ölçekte daha avantajlı olarak gözükmektedir. Elektrostatik kuvvetlerin ölçeklendirilmesi çoğunlukla elektriksel alanın boyuta bağlı olarak değişimine bağlıdır. Elektrik alan şiddetinin ( $E'/E = 1$ ) sabit kaldığı düşünülürse,  $F'/F = \sigma^2$  olduğu gösterilebilir [30]. Benzer olarak, mikro sistemde elektriksel alan ( $E'/E = \sigma^{0.5}$ ) şeklinde arttırılırsa,  $F'/F = \sigma$  gibi çok iyi bir kuvvet ölçeklendirmesi elde edilir. Manyetik alan şiddetinde olduğu gibi, elektriksel alan şiddetini de arttırmanın belirli fiziksel sınırları vardır. Genel olarak, elektriksel alan şiddeti çok arttırıldığında kullanılan yalıtkanların bozulma problemi ortaya çıkar. Ayrıca elektriksel alanın uygulandığı aralık eğer çok kısalsa, elektriksel alanın çökeceği de bilinen bir gerçektir.

Hidrolik (veya pnömatik) kuvvetler, basıncın bir alan üzerine etkisiyle oluştuğundan; ( $F'/F = \sigma^2$ ) gibi iyi bir kuvvet ölçeklendirmesine yol açarlar. Biyolojik sistemlerdeki kas kuvvetleri de, kasın kesit alanıyla orantılıdır. Dolayısıyla, hidrolik kuvvetlere benzer bir kuvvet ölçeklendirmesini beraberinde getirir.

Kuvvet ölçeklendirilmesi tamamlandıktan sonra, ivmelerin oranı Newton'un ikinci hareket yasası ( $F = ma$ ) yardımıyla hesaplanabilir:

$$\frac{a'}{a} = \frac{F'/m}{F/M} = \frac{F' m'}{F m} = \sigma^N \sigma^{-3} = \sigma^{N-3} \quad (7)$$



Şekil 16 Ölçeklendirme örneğindeki elektromanyetik sistem [29].

Benzer olarak, mekanizmayı (sabit ivmeli olarak) bir noktadan diğerine ulaştırma zamanı,  $L = (1/2)at^2$  ( $L$ : ulaşım mesafesi) bağıntısı kullanılarak bulunabilir:

$$\frac{L'}{L} = \sigma = \frac{(1/2)a'(t')^2}{(1/2)a(t)^2} = \sigma^{N-3} (t'/t)^2 \quad (8)$$

$$\frac{t'}{t} = \sigma^{2-N/2} \quad (9)$$

Son olarak, öz-güç (birim hacim için oluşturulan ortalama güç) bütün bu sözü edilen bağlantılar kullanılarak saptanır:

$$p = \frac{(FL/t)}{V} \quad (10)$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{F' L' V' t'}{FLVt} = \sigma^{3N/2-4} \quad (11)$$

Bu mantığı kullanarak, diğer fiziksel büyüklüklerin de ölçeklendirilmesi yapılabilir [30]. Görüldüğü üzere, fiziksel sistem küçüldükçe, sistemin davranışı köklü biçimde değişmekte ve makro ortam için geliştirilen seziler geçerliliğini büyük ölçüde yitirir.

Mikro-sistemlerin tasarımı sırasında ortaya çıkan bir başka önemli unsur da, beraber çalışması gereken mikro-mekanik sistem parçalarının toleranslarıyla ilgilidir. Her ne kadar MEMS teknolojisinde mikro-sistemlerin karakteristik boyutları mikronlarla ifade edilse de, izometrik olarak küçültülmüş bir sistemde orijinal toleransların aynısının tutturulması günümüz teknolojiyiyle mümkün olmamaktadır. Hatta, günümüzün büyük hassasiyetle üretilmiş mikro-sistemleri, ölçeklendirilmiş tolerans açısından incelendiğinde, 18. yüzyılda kullanılan mekanizmalarla benzer toleranslara sahip olduğu görülür [24]. Bu nedenle, MEMS'leri tasarlarken alışılmadık tasarım uygulamalarının dışına çıkarak, mikro-ölçekli dünyanın gereksinimlerine uygun yenilikçi tasarım ilkelerinin benimsenmesi gerekir.

Kısacası, gelecekteki mikro-sistemlerin günümüzdeki makinalardan çok farklı olacağı ve biyolojik sistemlerle önemli benzerliklerinin olabileceği düşünülmektedir. Yeni tasarım kavramlarının geliştirilmesi, organik dünyayla ilgili gözlem ve araştırmalara bağlı olacağı açıktır. Mikro-sistemlerin işletim kurallarını saptamak amacıyla; uygun boyutsuz fiziksel parametre grupları tanımlayarak, bu sistemlerin makro modelleri üzerinde deneysel çalışmalar yürütmek gerekecektir.

## SONUÇ

Son yıllarda silisyum tabanlı mikro duyucular ve eyleyiciler konusunda yoğun çalışmalar olmuş ve çarpıcı gelişmeler meydana gelmiştir. Bu makalede, MEMS teknolojileri üzerinde durulmuş, bu tip sistemlerin üretiminde kullanılan belli başlı mikro-işleme teknikleri kısaca tanıtılmıştır. Bu mikro-işleme yöntemleriyle üretilmiş ve ticari uygulama alanı bulmaya başlamış mikro-sistemlere çeşitli örnekler verilmiştir. Ayrıca, bu makalede MEMS'lerin tasarımında önemli rol oynayan ölçeklendirme yasaları detaylı olarak ele alınmış, bu tip sistemlerin tasarlanması sırasında dikkat edilmesi gereken noktalar kısaca vurgulanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu makaleye yaptığı teknik katkılardan ötürü Sn. Doç. Dr. Tayfun Akın'a (ODTÜ) teşekkür ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] Analog Devices, "ADXL150/ADXL250 rev.0" *Ürün kataloğu*, Norwood, MA, 1996.
- [2] Lorenz, R. D., "Sensorless Control: High Bandwidth Tracking of Spatial Saliencies using Persistent Excitation," *WEMPEC/CAST Seminar Notes*, University of Wisconsin - Madison, 1999.
- [3] Feynman, R. P., "There's Plenty of Room at the Bottom," presented at the American Physical Society Meeting in Pasadena CA, Dec. 26, 1959; (tekrar basım) *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 1:1, 60-66. Mart 1992
- [4] Howe, R. T., "Surface Micromachining for Microsensors and Microactuators," *Journal of Vac. Sci. Technology*, B., 6, , 1809-1813, Aralık 1988.
- [5] Menz, W., Bacher, W., Harmening, M., and Michel, A., "The LIGA Technique - a Novel Concept for Microstructures and the Combination with Si-Technologies by Injection Molding," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, 69-73, 1991.
- [6] Foong, C. S., Wood, K. L., and Busch-Vishniac, I., "Design Assessment of Micro-Electromechanical Systems with Applications to a Microbiology Cell Injector," *Micromechanical Systems, ASME DSC*, vol. 46, 49-63, 1993.
- [7] Kovacs, G. T. A., Maluf, N. I., and Petersen, K. E., "Bulk Machining of Silicon," *Proc. of the IEEE*, vol. 86:8, 1536-1551, Ağustos 1998.
- [8] Sze, M., *Semiconductor Sensors*, John Wiley & Sons Inc., NY, 1994.
- [9] Akın, T., Najafi, K., Smoke, R., and Bradley, R. M., "A Micromachined Silicon Sieve Electrode for Nerve Regeneration Applications," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. BME-41, No. 4, 305-313, Nisan 1994.
- [10] Shimbo, I. M., Furukawa, K., Fukuda, K., and Tanzawa, K., "Silicon-to-Silicon Direct Bonding Method," *J. Applied Physics*, vol. 60, 2987-2989, 1986.
- [11] Mack, S., Baumann, H., and Gosele, U., "Gas Tightness of Cavities Sealed by Silicon Wafer Bonding," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical System*, Nagoya, Japan, 488-493, Jan. 1997.

- [12] Schomburg, W. K., Maas, D., Bustgens, B., and Fahrenberg, J., Menz, W., and Seidel, D., "Assembly for Micromechanics and LIGA," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol.5, 57-63, 1995.
- [13] Shoji, S., Kikuchi, H., and Torigoe, H., "Anodic Bonding Below 180°C for Packaging and Assembling of MEMS Using Lithium Aluminosilicate- $\alpha$ -Quartz Glass-Ceramic," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Nogoya, Japan, 482-487, Ocak 1997.
- [14] Ando, D., Oishi, K., Nakamura, T., Umeda, S., "Glass Direct Bonding Technology for Hermetic Seal Package," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Nogoya, Japan, 186-190, Ocak 1997.
- [15] Quenzer, H. J., Dell, C., and Wagner, B., "Silicon-Silicon Anodic-Bonding with Intermediate Glass Layers Using Spin-On Glasses," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, San Diego, California, sf. 272, Şubat 1996.
- [16] Maas, D., Bustgens, B., Fahrenberg, J., Keller, W., Ruther, P., Schomburg, W. K., and Seidel, D., "Fabrication of Microcomponents Using Adhesive Bonding Techniques," *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, San Diego, California, 331-336, Şubat 1996.
- [17] Field, L. A., and Muller, R. S., "Fusing Silicon Wafers With Low Melting Temperature Glass," *Sensors and Actuators*, A21-A23, 935-938, 1990.
- [18] Tong, Q. Y., Cha, G., Gafiteanu, R., and Gosele, V., "Low Temperature Wafer Direct Bonding," *J. Microelectromechanical Systems*, vol. 3:1, 29-35, Mart 1994.
- [19] Guckel, H., et al. "Deep X-Ray Lithographies for Micromechanics," *Technical Digest of the 1990 Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, 118-122, Haziran 1990.
- [20] Guckel, H., "Micromechanics for Microactuators and Precision Engineering," *Precision Engineering (Seminer Notları)*, University of Wisconsin - Madison, Haziran 1997.
- [21] Kinoshita, H., Veda, K. Murai, S., and Hayashi, K., "Micro-wire Electrical Discharge Machining," *Proc. of the 1st IFTOMM International Micro mechanism Symposium*, Tokyo Inst. of Tech. 114-119, Haziran 1993.
- [22] Bloomstein, T. M. and Ehrlich, D. J., "Laser Deposition and Etching of Three-dimensional Microstructures," *Proc. of Transducers '91, the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers*. San Francisco, CA, IEEE Press, 507-511, 1991.
- [23] Westberg, H., Boman, M., Johansson S., Schweitz, J. A., "Truly Three Dimensional Structures Microfabricated by Laser Chemical Processing," *Proc. of IEEE Transducers*, 516-519, 1991.
- [24] Michalicek, M. A., "Introduction to Microelectromechanical Systems," *online sunu (<http://mems.colorado.edu/>)*, University of Colorado, Boulder, Mayıs 2000.
- [25] Gianchandani Y and Najafi, K., "A Bulk Silicon Dissolved Wafer Process for Microelectromechanical Systems," *J. Microelectromechanical Systems*, vol. 1:2, Haziran 1992.
- [26] Klein, J. L., "Preliminary Results for Micro Induction Motor," *Ön doktora tezi*, University of Wisconsin - Madison, Ocak 1997.
- [27] Sandia National Laboratories, "Intelligent Micromachine Initiative," <http://mems.sandia.gov/>.
- [28] Lemkin, M., Ortiz, M., Wongkomet, N., Boser, B., and Smith, J., "A 3-axis surface micromachined sigma-delta accelerometer," *Proc. ISSCC '97*, 202-203, 1997.
- [29] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D., *Electrical Machinery*, 5/e, McGraw-Hill Inc., NY, 1990.
- [30] Trimmer, W. S. N., "Microrobots and Micromechanical Systems," *Sensors and Actuators*, vol. 19:3, 267 - 287, 1989.