



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROKAPLAMA İLE MEMS
YAPILARININ ÜRETİMİ**

Yasemen İNCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

Aralık - 2018

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yasemen İNCE tarafından hazırlanan " *ELEKTROKAPLAMA İLE MEMS YAPILARININ ÜRETİMİ* " adlı tez çalışması 28/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ

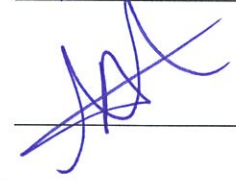
Danışman

Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Y. yasemen

Yasemen İNCE

Tarih: 28/12/2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROKAPLAMA İLE MEMS YAPILARININ ÜRETİMİ

Yasemen İNCE

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2018, 70 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

MEMS elektronik ve mekanik sistemlerin minyatürleştirilmiş halidir. MEMS teknolojisi sağlık, savunma sanayi, otomotiv gibi birçok alanda düşük güç tüketimi, düşük maliyet, artırılmış işlevselliği gibi sebeplerle tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında MEMS yapılarının üretiminde bir çok farklı alanda karşılaşılan nikel elektrokaplama ile ilgili incelemeler yapılmıştır. Nikel elektrokaplama ile üretilecek MEMS yapılarının tasarımları ve simülasyonları yapılmıştır. Nikel elektrokaplamada kaliteli MEMS yapılarının üretimine büyük etkisi olan baskı gerilimi; kaplama sıcaklığı, akım yoğunluğu, zaman gibi parametreler değiştirilerek optimize edilmiştir.

KLayout programı kullanılarak hareketli ve hareketsiz MEMS yapıları tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar simülasyon programı COMSOL Multiphysics kullanılarak hareketli MEMS yapılarının simülasyonları yapılmıştır ve tasarlanan yapıların üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen yapıların SEM görüntüleri alınmıştır. Üretilen yapılar empedans analizörü ve prob istasyonu ile test edilmiştir.

Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında ilk kez hareketli ve hareketsiz MEMS yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma hem Mikro Elektro-Mekanik Sistemlerin Necmettin Erbakan Üniversitesinde yaygınlaşp bilgi birikiminin artmasına zemin hazırlayacak hem de bu konuda çalışma yapan araştırmacılarla ortak çalışmalar yapılarak bu konuda yapılan çalışmaların geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrokaplama, MEMS, MEMS rezonatör yapıları, MEMS test yapıları



ABSTRACT

MS THESIS

FABRICATION OF MEMS STRUCTURES USING ELECTROPLATING

Yasemen İNCE

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2018, 70 Pages

Jury

Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

MEMS is a miniaturized version of electronic and mechanical systems. MEMS technology is preferred for many reasons such as low power consumption, low cost and increased functionality in many areas such as health, defense industry and automotive.

In this thesis, researches have been made about nickel electroplating encountered in many different areas during the production of MEMS structures. The designs and simulations of MEMS structures were performed for nickel electroplating process. Compressive stress which has a strong effect on the production of high quality MEMS structures in nickel electroplating, has been optimized by changing parameters such as plating temperatures, current density and time.

Using the KLayout program, movable and stationary MEMS structures have been designed. Movable MEMS structures were simulated using the COMSOL Multiphysics finite element analysis

program and designed structures were produced. SEM images of produced structures were taken. Produced structures were tested with the impedance analyzer and probe station.

For the first time the production of movable and stationary MEMS structures has been realized in the laboratory of Necmettin Erbakan University. This study will contribute to the development of the studies on MEMS by working jointly with the researchers working on Micro Electro-Mechanical Systems as well as preparing the ground for the increase of knowledge of Micro Electro-Mechanical Systems in Necmettin Erbakan University.

Keywords: Electroplating, MEMS, MEMS resonator structures, MEMS test structures



ÖNSÖZ

Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmamda danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarım süresince değerli yardımlarını esirgemeyen, ve her cümlesinde kendisinden yeni şeyler öğrendiğim saygıdeğer hocam; Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e ve desteklerinden dolayı tüm eğitim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Üretim sürecinde laboratuvarında yardımlarını esirgemeyen ve bilgilerini paylaşan sayın Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımında değerli vaktini bana ayırarak yardımcı olan sayın Ayşe KARATAŞ'a teşekkür etmek isterim. Son olarak üretim sürecinde laboratuvar olanakları ve SEM fotoğrafları için Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Yasemen İNCE
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI	1
1.1. Nikel Elektrokaplamanın Farklı Amaçlarda Kullanıldığı Yerler	2
1.2. Nikel Elektrokaplama Banyoları	8
1.3. Tezin Amacı	10
1.4. Tezin Yapısı	11
2. TASARIM	12
2.1. Z Yönünde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapıları	13
2.2. Yatay Yönde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapıları	17
2.3. Üç Kütleli Z Yönünde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapısı	21
2.4. Üretim Karakterizasyonu Test Yapıları	21
2.5. Maske Tasarımı	23
3. ÜRETİM VE SONUÇLARI	26
3.1. Nikel Elektrokaplama ile İlgili Ayrıntılar	26
3.1.1. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Metalizasyon Katmanının Üretimi	26
3.1.2. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Heba Tabakasının Üretimi	28
3.1.3. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Yapısal Katmanın Üretimi	30
3.2. Üretim Sürecinde Litografi Optimizasyonları	33
3.3. Nikel Elektrokaplama Düzeneginin Oluşturulması	38
4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	49
4.1. Tez Amacının Doğrulanması	50
4.2. Gelecek Çalışmalar için Öneriler	51
KAYNAKLAR	52



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Silisyum sinirsel prob [6]	2
1.2 Nikel elektrokaplama ile üretilmiş jiroskop fotoğrafı [11]	3
1.3 Mikro motor rotor dişli yapısı üretimi [12]	4
1.4 Mikro prob üretimi [13]	5
1.5 Nikel paketler [15]	6
1.6 Mikro prob üretimi [16]	6
1.7 Nikel nanotel SEM görüntüsü [18]	8
1.8 NiW mikroyay SEM görüntüsü [24]	10
2.1 Rezonatör kütle-yay-damper modeli	12
2.2 Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapıları tasarımları	14
2.3 Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapılarının simülasyon sonuçları	15
2.4 Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapısının farklı açılardan görüntüleri	16
2.5 Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapılarının istenmeyen mod frekansları	18
2.6 Yatay yönde salınan MEMS rezonatör yapıları tasarımları	19
2.7 Yatay yönde salınan MEMS rezonatör yapılarının simülasyon sonuçları	19
2.8 Elektrotların tasarımı ve kütleli hareket durumuna göre üç boyutlu çizimi	20
2.9 Z yönünde salınan üç kütleli MEMS rezonatör yapısı tasarımı	21
2.10 Z yönünde salınan üç kütleli MEMS rezonatör yapısı simülasyonu	22
2.11 Üretim karakterizasyonu test yapıları	23
2.12 Maske tasarım ve üretimi	24
2.13 Al ve Ni desenlendirme için kalıplar	25
2.14 Al ve Ni maske kalıplarındaki hizalama işaretleri	25
3.1 Silisyum pul üzerine yalıtkan tabakanın ve alüminyum malzemesinin kaplanması	27
3.2 Fotorezistin kaplanması ve metalizasyon tabakasının oluşturulması	29
3.3 Yapıştırıcı alüminyum tabakasının ve bakır heba tabakasının oluşturulması	30
3.4 Kalın fotorezist katmanının oluşturulması ve kalıp haline getirilmesi	32
3.5 Nikel elektrokaplama ile kalıp içerisinde nikelin büyütülmesi	33
3.6 Fotorezistin ortamdaki uzaklaştırılması ve askıda kalan nikel katmanlarının oluşturulması	34

3.7	Farklı pozlama sürelerinde alüminyum yolların desenlendirilmesinde kullanılan litografi test yapıları mikroskop görüntüleri	36
3.8	7.5 sn pozlama süresinde desenlendirilmiş logolar, hizalama işaretleri ve üç kütleli rezonatör yapısı altındaki alüminyum yolların mikroskop görüntüleri	37
3.9	Farklı pozlama sürelerinde nikel yapıların desenlendirilmesinde kullanılan litografi test yapıları mikroskop görüntüleri	38
3.10	14 sn pozlama süresinde hizalama sonrası desenlendirilmiş hizalama işaretleri ve üç kütleli rezonatör yapısının fotorezist kalıbı mikroskop görüntüleri	39
3.11	Laboratuvarda kullanılan maske hizalayıcı cihazı	39
3.12	Nikel elektrokaplama banyosu düzeneği	40
3.13	Laboratuvarda kullanılan nikel elektrokaplama banyosu düzeneği	42
3.14	Askıda kalan MEMS yapılarını oluşturmada laboratuvarda kullanılan kimyasallar	42
3.15	45 °C’ de farklı akım ve sürelerde nikel elektrokaplama esnasında meydana gelen baskı gerilimlerinin SEM görüntüleri	44
3.16	70 °C, 2.5 dk, 40 mA’de elde edilen askıda kalan MEMS yapıları	45
3.17	Optimum değerlerde elde edilen z yönünde salınan MEMS rezonatörlerinin SEM görüntüleri	46
3.18	70 °C, 2.5 dk, 40 mA’de elde edilen yatay yönde salınan MEMS rezonatörü SEM görüntüsü	47
3.19	Üniversitelerin logolarının SEM görüntüleri	47
3.20	Üretim esnasında fazla aşındırma ve gerilimin MEMS yapıları üzerindeki etkilerinin hissedildiği SEM görüntüleri	48
3.21	Laboratuvarda kullanılan prob istasyonu ve empedans analizörü fotoğrafları	48

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Örnek nikel sülfamat banyosu [19]	9
1.2 Sakarin bileşenli nikel sülfamat banyosu [22]	9
3.1 Çalışmada kullanılan nikel sülfamat banyosu [33]	40



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al: Alüminyum

CH₃COOH: Asetik Asit

Cr/Cu: Krom/ Bakır

DIW: Deiyonize Su

H₃BO₃: Borik Asit

H₂O₂: Hidrojen Peroksit

H₂SO₄: Sülfirik Asit

IPA: İzo Propil Alkol

NaOH: Sodyum Hidroksit

Ni: Nikel

Ni⁺²: Nikel İyonu

NiCl: Nikel Klorür

OH⁻: Hidroksit İyonu

Si: Silisyum

SO₄⁻²: Sülfat İyonu

Kısaltmalar

DC: Doğru Akım

LIGA: Litografi-Elektrokaplama-Şekillendirme

MEMS: Mikro Elektro-Mekanik Sistemler

ODTÜ: Orta Doğu Teknik Üniversitesi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

UV: Ultraviyole

VLS: Buhar-Sıvı-Katı

1. GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI

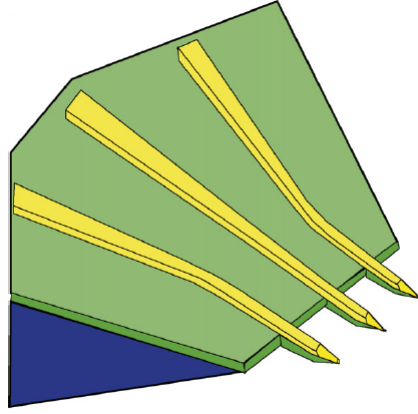
Geçmişten bugüne teknolojinin gelişimi insan hayatını büyük derecede etkilemiştir. Nano ve mikro çağında kabul edilen başlangıç, Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman'ın, 29 Aralık 1959'da yapmış olduğu ünlü konuşmasıdır. Bu önemli konuşmasında Feynman "There's plenty of room at the bottom" yani "Altlarda kullanılacak daha çok oda var" sözü ile nano ve mikro teknolojinin gelişmesinde bir çığır açmıştır [1]. Yakın geçmişte mikro ve nano teknolojiye zemin hazırlayan şeylerin başında bilimkurgu yazarları gelmektedir. Bilimkurgu yazarlarının en bilinenlerinden biri Isaac Asimov'dur. Yazarın yazmış olduğu "Fantastik Yolculuk" isimli romanı 1966'da sinema filmine aktarılmıştır. Romanda dört insanın bir denizaltı ile tedavi amaçlı hastanın damarından enjekte edilmesiyle başlayan bir yolculuktan bahsedilmektedir. Bu yolculuk bugün nanomedikal ilaçların üretiminde ilham kaynağı olmuştur [2].

Elektronik ve mekanik sistemlerin minyatürleştirilmiş hali olan MEMS, gelişen teknolojiyle beraber son 50 yıl boyunca müthiş bir ilerleme göstermiştir. Düşük güç tüketimi, artırılmış işlevsellik ve düşük maliyet gibi özellikleri sayesinde çok cazip bir teknoloji haline gelmiştir. Savunma sanayi, otomotiv ve sağlık gibi hemen hemen her alanda MEMS teknolojisi kullanılmaktadır [3].

1947'de William Shockley, John Bardeen, ve Walter Brattain isimli 3 bilim insanı akımı kontrol eden ilk transistörü keşfettiler [4]. Ve bu transistör hayatımızı değiştirerek dijital dünyada da kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra silisyum ve germanyumun piezorezistif özelliğinin keşfedilmesiyle bu malzemelerin hava ve sudaki basıncı metallere daha iyi algılayabileceği ortaya çıkmıştır. Ve 1958'de germanyum üzerinde ilk entegre devre üretimi gerçekleştirilmiştir [5]. Boyutu küçülen milyonlarca transistör bugün silisyum pul üzerine inşa edilmiş bir çipin içine sığabilmektedir ve eskiden bir odada oluşturulmuş bir bilgisayar bugün insanların cebine girebilmektedir.

1960'lı yıllarda anizotropik olarak aşındırılan silisyumun inceltilmesi gövde mikro işleminin temeli olmuştur. Alt katmanın aşındırılarak istenen geometrik şekillerin oluşturulmasında kullanılan gövde mikro işleme tekniği ile kanallar, delikler, piramit yapılar, dirsek-

ler, diyafram ve valf gibi yapılar üretilmiştir. Şekil 1.1' de 1969'da gövde mikro işleme ile üretilmiş elektroensefalografi (EEG) yöntemiyle beynin elektriksel aktivitesini ölçmek için üretilen silisyum sinirsel prob görülmektedir. 1980'li yıllarda gövde mikro işlemeyi tamamlayan hareketli MEMS yapılarının üretiminde kullanılan yüzey mikro işleme ortaya çıkmıştır [6].



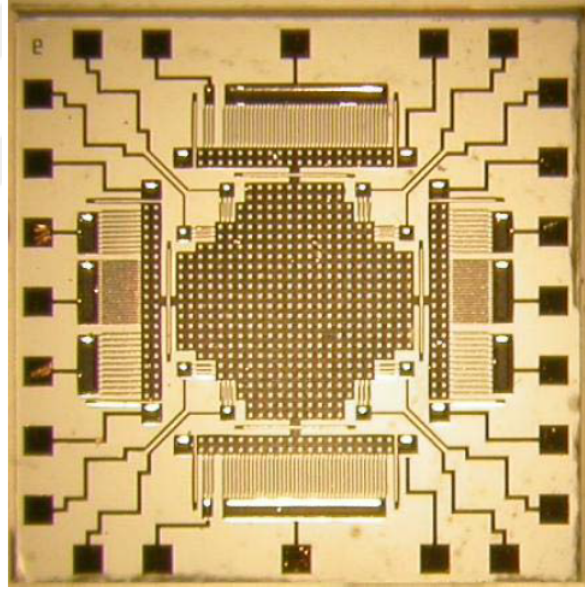
Şekil 1.1. Silisyum sinirsel prob [6]

Mikro elektro-mekanik sistemlerin çalışması kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine önemli derecede bağlıdır. Dolayısıyla yüksek saflık, kristal yapısı, izotropik ve anizotropik aşındırma gibi mükemmel mekanik özelliklere sahip olan silisyum malzemesi kaliteli MEMS mekanik yapıların üretiminde güzel bir çözüm olmuştur [7]. MEMS teknolojileri kullanılarak silisyum mekanik yapıların üretilmeye başlaması ile hareketli MEMS yapıları olan ivmeölçerler ve jiroskoplar gibi çeşitli sensörler hayatımıza girmiştir [8, 9].

Silisyum üretim aşamasında yüksek maliyet isteyen ve her ortamda kolay bir şekilde bulunmayan bir malzemedir. Dolayısıyla MEMS yapılarının üretiminde nikel gibi silisyum malzemesine göre çeşitli avantajları olan malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Nikel üretim teknolojileri kullanılarak nikel mekanik yapıların üretilmesi silisyum mekanik yapıların üretilmesine alternatif olmuştur. Nikel üretim teknolojilerinden birisi olan nikel elektrokaplama, silisyum üretim teknolojilerine göre ucuz ve üretim aşaması kolay olan bir üretim teknolojisidir. Ayrıca bu teknoloji daha yüksek korozyon dayanımı ve üretimde çeşitlilik sağladığı için sıklıkla tercih edilmektedir [10]. Bu tez çalışmasında MEMS yapılarının üretiminde çeşitli avantajlara sahip olan nikel elektrokaplama teknolojisine ve kaliteli yapıların üretiminde büyük öneme sahip olan nikel elektrokaplama banyolarına yoğunlaşılmıştır.

1.1. Nikel Elektrokaplamanın Farklı Amaçlarda Kullanıldığı Yerler

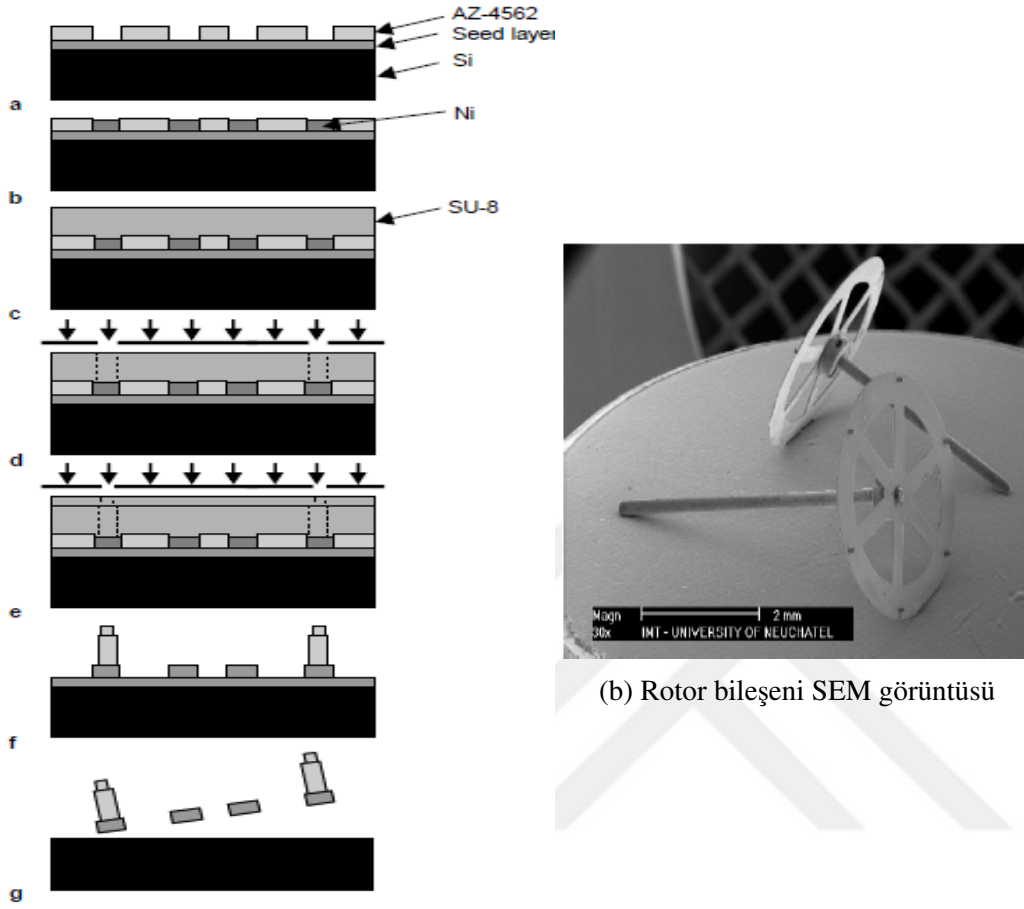
Nikel elektrokaplamanın kullanıldığı en önemli yerlerden birisi hareketli MEMS yapılarıdır. Hareketli MEMS yapılar yüzey mikro işleme tekniği kullanılarak yapısal ve heba tabakalarının oluşturulup daha sonra ise heba tabakasının ortamdaki uzaklaştırılarak askıda kalan yapısal tabakanın kalmasıyla oluşturulur. Ve bu yapısal katmanlar nikel elektrokaplama ile oluşturulabilmektedir. Şekil 1.2’de nikel elektrokaplamanın kullanıldığı yüksek performanslı hareketli MEMS yapılarının elde edildiği bir çalışmadan jiroskop fotoğrafı verilmiştir [11]. Bu çalışmada parazit kapasitans oluşturmaması için cam alt katman seçilerek bu alt katman üzerinde metalizasyon aşamaları tamamlandıktan sonra, kalın fotorezist kullanılarak kalın nikel yapılar elde edilmiştir. Üretim sürecinde oluşturulan heba tabakasının daha sonra uygun aşındırıcılar ile aşındırılmasıyla cam üzerinde hareketli ivmeölçer ve jiroskop yapıları elde edilmiştir.



Şekil 1.2. Nikel elektrokaplama ile üretilmiş jiroskop fotoğrafı [11]

Hareketli MEMS yapıları olan mikro motorların bileşenlerinin üretiminde de nikel elektrokaplama karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1.3’te dik bacakları olan mikro motor rotor dişli yapısının üretim aşaması ve paslanmaz çelik bir mil üzerine monte edilmiş üretimi gerçekleştirilmiş yapının SEM görüntüsü verilmiştir [12]. Yapılan çalışmada alt katman olarak silisyum alt katman seçilerek ve daha sonra silisyum üzeri çekirdek katman ile kaplanmıştır. Kalın nikel yapılar oluşturmak için kalın fotorezist kullanılarak kalıp oluşturulmuştur. Nikel elektrokaplama gerçekleştirildikten sonra ise mikro motor bacakları fotorezist kullanılarak

oluşturulmuştur. Daha sonra uygun aşındırıcılar kullanılarak oluşturulmuş heba tabakasının ortadan kaldırılması ile havada kalan hareketli yapılar oluşturulmuştur.



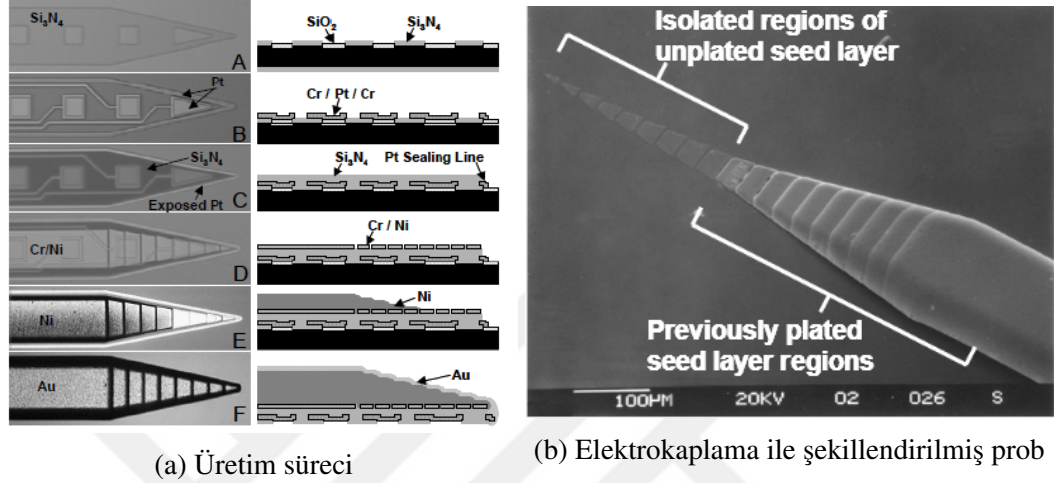
(a) Üretim süreci

Şekil 1.3. Mikro motor rotor dişli yapısı üretimi [12]

Hareketsiz MEMS yapılarının üretiminde nikel elektrokaplama ile karşılaşmak mümkün olmaktadır. Parkinson hastalığının ciddi etkilerinin azaltılması için önerilen derin beyin uyarımında kullanılan problar hareketsiz MEMS yapılarına örnek verilebilir [13]. Tasarlanan probda elektrokaplamanın hareketsiz MEMS yapılarında kullanımı söz konusudur. Önerilen prob geometrisi dokulara nüfuz edebilmesi için sert yapıdadır ve dokuya en az zararı vermesi için uç kısmı keskin olarak tasarlanmıştır. Uyarıcıların mikro problemleri mikro üretilmiş elektrot dizileri olarak düşünülebilir.

Şekil 1.4'te üretim süreci ve elektrokaplama ile şekillendirilmiş hali verilen üç boyutlu prob yapısını üretmek için elektrokaplama ile önce elektrolitik olarak oluşturulacak metal yığının oluşması için bir çekirdek katmana ihtiyaç duyulmuştur. Genellikle çekirdek katman devamlı olarak oluşturulur [13]. Ama araştırmacılar bu çalışmada çekirdek katmanın

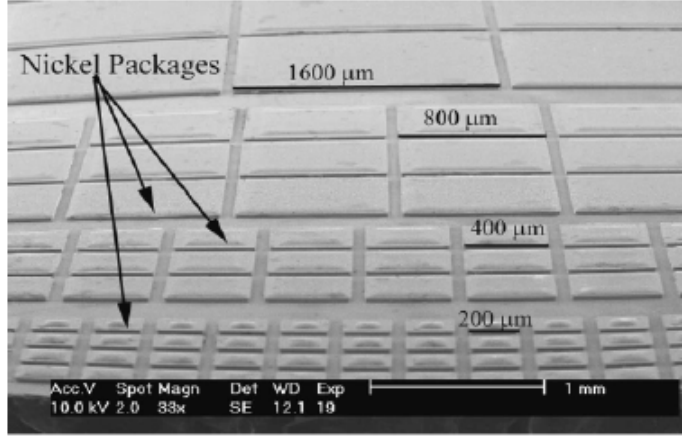
desenlendirilmesi ile bir farklılık oluşturmuşlardır. Elektrokaplama yukarı ve dışarıya doğru çekirdek katmanın güç kaynağına bağlı olduğu bölgede başlamış ve yalıtılmış diğer çekirdek katmanına ulaşıldığında elektrokaplama tekrar başlamıştır. En son olarak biyouyumluluk için altın ile kaplanmıştır. Bu şekilde nikel elektrokaplama ile üç boyutlu ilginç yapıların üretiminden bahsetmek mümkündür.



Şekil 1.4. Mikro prob üretimi [13]

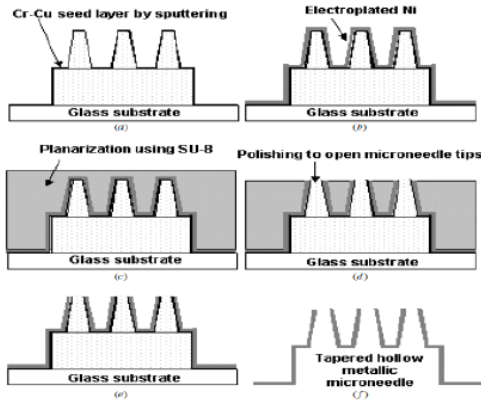
Nikel elektrokaplama hareketsiz yapılar olan MEMS ürünlerinin paketlenmesinde de karşımıza çıkmaktadır. Paketleme, MEMS teknolojisi kullanılarak üretilen dönüölçerler, mikro-rezonatör RF MEMS devre elemanları gibi yapılar için önemli ihtiyaçlardan biridir. Bu yapıların mekanik kalite faktörü, yapılar vakum ortamında paketlenmediği sürece, çalışma esnasında hava sürtünmesinden dolayı çok düşük olabilmektedir. Sözü edilen bu MEMS ürünlerin daha verimli çalışabilmeleri için vakum ortamı içerisinde kullanıcıya getirilmesi için, sensörün gereksinimlerine ve yapısına uygun paketleme teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. İki pulun birbirine yapıştırılması teknolojisinin geliştirilmesi MEMS paketleme için başlangıç noktası kabul edilebilir ve yonga seviyesinde paketleme ve pul seviyesinde paketleme olarak ikiye ayrılır. Yonga seviyesinde ürünlerin standart paket yapıları içerisinde yerleştirilerek, pul seviyesinde ise MEMS ürünlerin yine MEMS ile üretilen bir kabuk katman ile kapatılması ile paketlemeler gerçekleştirilmektedir [14]. Pul seviyesinde paketleme konusunda yapılan bir çalışmada MEMS yapılarının üzerine ince film şeklinde kaplanan kabuk şeklindeki paketleme yapısında MEMS yapının üzerine ara bir katman olarak fotoresist serilip üzerine bir katman daha oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katman elektrokaplama tekniği kullanılarak nikel kaplanarak oluşturulmuştur. Nikel yapının bir kenarında

bırakılan boşluk yardımı ile nikel katmanının havada durmasını sağlayan ara katmanlar aşındırılmıştır. Ardından bu aşındırma boşluğu lehim ile kapatılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Şekil 1.5'te nikel elektrokaplama kullanılarak üretilmiş paketlerin SEM görüntüsü verilmiştir [15].

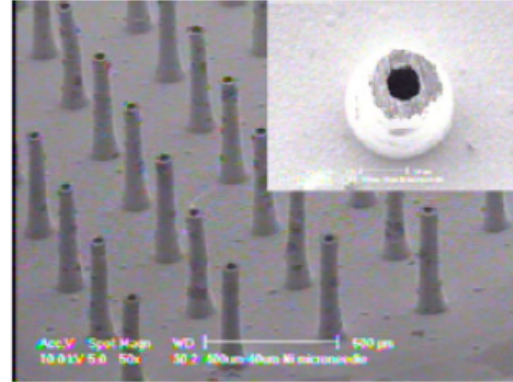


Şekil 1.5. Nikel paketler [15]

Nikel elektrokaplamanın karşımıza çıktığı noktalardan birisi de üretilmiş bir yapının geliştirilmesidir. Şekil 1.6'da var olan bir yapının üretim süreci ve üretimi gerçekleştirilmiş bu yapının SEM görüntüsü verilmiştir [16].



(a) Üretim süreci



(b) Elektrokaplama ile şekillendirilmiş prob

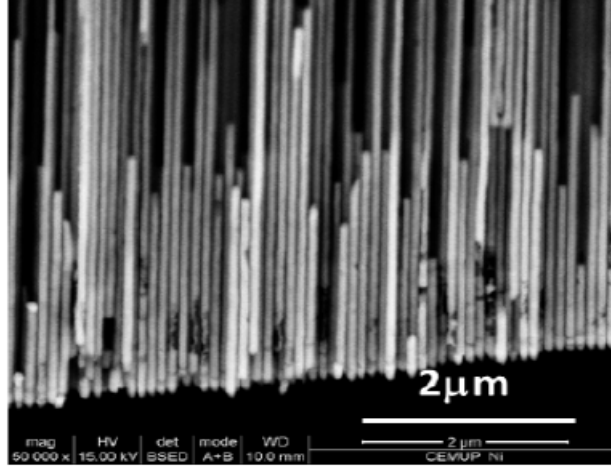
Şekil 1.6. Mikro prob üretimi [16]

Yapılan çalışmada fotorezistin arkasına aşındırma yapılarak geliştirilmesinden bahsedilmektedir. Çift katmanlı fotorezistin cam üzerine kaplanması ile üretime başlanan süreçte farklı maskeler kullanılarak ve farklı dozlarda UV ışınması yapılarak fotorezistlerin desenlendirilmesi sağlanmıştır. Desenlendirilmiş fotorezistin üstü Cr/Cu çekirdek katmanı ile

kaplanmıştır. Daha sonra ise oluşturulmuş yapının üstü elektrokaplamayla nikel ile kaplanmıştır. Ve böylece elektrokaplamanın var olan yapıların üretiminde kullanıldığı görülmektedir. Daha sonra ise oyukları oluşturmak için yapımızın istenen kısımlarında oyuklar oluşturmak için kalan kısımların fotorezist ile kaplanması sağlanmıştır. Delikler açılana kadar cilalama yapılmıştır. Sonra fotorezist ortamdan uzaklaştırılmıştır. Daha sonra ise çekirdek katman ve kullanılan çift fotorezist katmanda aşındırılarak ortamdan uzaklaştırılması sağlanarak içi oyuk konik mikro iğnelerin üretim aşaması tamamlanmıştır [16].

Nikel elektrokaplama nanotellerin üretiminde de karşımıza çıkmaktadır. Birçok alanda kullanım yeri bulan nano malzemeler arasında, nanoteller sahip oldukları elektriksel, manyetik, optik, termoelektrik ve kimyasal özellikleri bakımından diğer nano malzemeler arasında oldukça dikkat çekmektedir. Nanotellerin üretim teknikleri arasında VLS Sentez Yöntemi, Lazer Destekli Büyütme Yöntemi ve Gözenekli Alüminyum Oksit Şablonu ile Üretim Yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Şekil 1.7'de SEM görüntüsü verilen aşağıdan yukarıya nanotellerin üretimi gerçekleştirilen bir çalışmada Gözenekli Alüminyum Oksit Şablonu ile Üretim Yöntemi kullanılmıştır ve doldurma yöntemi olarak ise Vakum Tekniği, Sol-Jel Tekniği ve Elektrolitik Doldurma Yöntemleri arasından Elektrolitik Doldurma Yöntemi tercih edilmiştir [17]. Elektrokaplamanın kullanıldığı bu yöntem gözeneklerin en dipten en üst seviyeye kadar dolmasını sağladığından kullanılan yaygın tekniklerden biridir. Gözenekli Alüminyum Oksit Şablonu yönteminde gözenekli alüminyum oksit tabakasının oluşumunda elektrokimyasal anodizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem metal yüzeyi üzerinde oksit filminin oluşturulması için gerçekleştirilen kontrollü bir oksidasyondur. Düzenek içerisinde bulunan saf alüminyum yüzeyinde, anodizasyon sırasında gerçekleşen olay kısaca özetlenirse, anotta yani saf alüminyum yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyon sonucu oksijen açığa çıkmakta, salınan oksijen temiz Al yüzey ile elektrokimyasal tepkimeye girerek alüminyum oksit tabakasını oluşturmaktadır [18].

Bu süreçte ilk olarak, anodizasyon sistemine gerilim uygulandığında sistemden geçen yüksek akım ile birlikte saf alüminyum yüzeyinde düz oksit tabakası oluşmuştur. Daha sonra elektrik alan dalgalanmalarıyla birlikte oksit tabakası ve elektrolit ara yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ile birlikte gözenek oluşumları başlamıştır. Anodizasyonun ilerleyen zamanlarında ise düzenli ve sıralı gözenek oluşumları gerçekleşmiştir. Anodizasyon sürecinde oluşan gözeneklerin alt kısmında bir bariyer katmanı meydana gelmiştir ve bu katman gerekli aşamalardan geçerek kaldırıldıktan sonra gözeneklerin doldurulması aşamasına geçilmiştir.



Şekil 1.7. Nikel nanotel SEM görüntüsü [18]

Çalışma elektrotu olarak kullanılacak bu alüminyum şablonlar nikel çözeltisi içerisinde DC elektrolitik doldurma işlemi ile doldurulmuş ve nikel nanotel üretme işlemi gerçekleştirilmiştir [18].

1.2. Nikel Elektrokaplama Banyoları

Genellikle elektrokaplama banyoları metal kaynağı olan anot, kaplanması istenen plaka olan katot, elektriksel iletkenliğe sahip olan elektrolitik bir çözelti ve güç kaynağından oluşur. Tablo 1.1’de nikel elektrokaplama banyolarında sıklıkla kullanılan örnek bir nikel sülfamat banyosu görülmektedir [19]. Örnek olarak verilen bu elektrokaplama banyosu Ni^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarını içerir. Eğer güç kaynağı açılırsa Ni^{+2} iyonları katoda doğru ve SO_4^{-2} iyonları anoda doğru çekilir. Gerçekleşen redoks tepkimeleri sonucunda Ni^{+2} iyonları katotta elektronları kaparak istenen yüzeyin kaplanmasını sağlar. Reaksiyon süresince katotta hidrojen gazı salınımı olur. Bu durum kaplama verimi ve kaplamanın kalitesi açısından istenmeyen bir durumdur. Hidrojen gazı kabarcıklarını elektrokaplama banyosu bir manyetik karıştırıcı ile sabit olarak karıştırıldığında minimize etmek mümkündür. Bu sayede kaplamada oyuklaşma azalacaktır [10].

Örnek nikel sülfamat banyosunda verilmiş olan nikel sülfamat nikel iyon kaynağı olarak kullanılan ana bileşendir. İletkenlik ve metal dağılımını artırır. Nikel kaplama banyolarında nikel iyonlarının aktifliği nikel tuzları konsantrasyonu, çözünme dereceleri, diğer bileşenlerin türü ve konsantrasyonu temelinde kontrol edilir. Anot aktifleştirici olarak nikel

Tablo 1.1. Örnek nikel sülfamat banyosu [19]

İçerik	Konsantrasyon
Ni Sülfamat- 4H ₂ O	300 gL ⁻¹
NiCl ₂ -6H ₂ O	10 gL ⁻¹
H ₃ BO ₃	40 gL ⁻¹

klorür kullanılır. Kaplama sürecinde oluşacak iç gerilim kaplamanın sıcaklık derecesine bağlıdır. Dolayısıyla nikel genellikle 50 ° C gibi yüksek sıcaklıklarda kaplanır. Nikel daima az oranda asidik elektrolit, pH değeri yaklaşık olarak 3-4 arasında olan bir çözeltide kaplanır. Banyonun pH değeri tampon olarak kullanılan borik asit ile kontrol edilir [19].

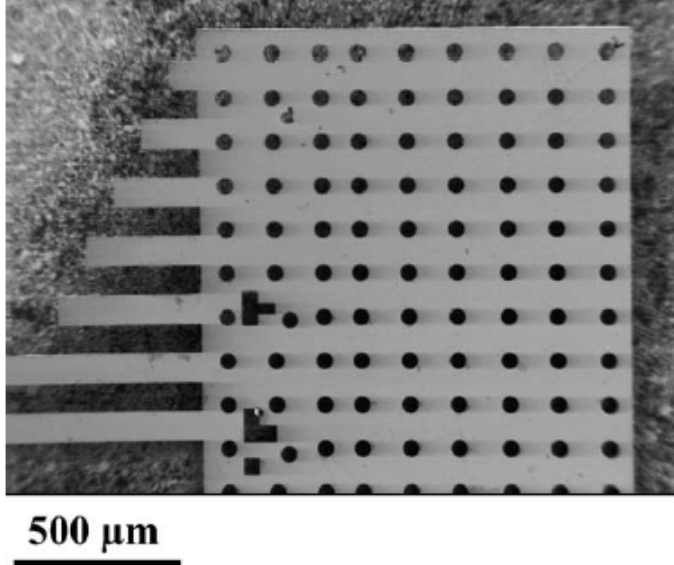
Boyutları birkaç mikrondan birkaç milimetreye değişen LIGA nikel yapılarının üretilmesinde ve MEMS anahtarının üretilmesinde nikel sülfamat banyosunun kullanıldığı güzel çalışmalar yapılmıştır [20, 21]. Mekanik olan MEMS yapılarının üretimi esnasında kaliteli yapıların elde edilmesi için meydana gelecek gerilimlerin minimize edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla Tablo 1.2’de görüldüğü üzere nikel sülfamat banyolarına sakarin gibi ek bileşenler eklenmiştir [22]. Sakarin tanecik sınırının birleşmesini ve nikelin korozyona daha dayanıklı hale gelmesini ve gerilimin azalmasını sağlamıştır. Ayrıca banyo manyetik bir karıştırıcı ile karıştırılmıyorsa sülfamat banyosuna etanol eklenerek kabarcık oluşumu engellenmiş ve yüzey geriliminin azalması sağlanmıştır [23].

Tablo 1.2. Sakarin bileşenli nikel sülfamat banyosu [22]

İçerik	Konsantrasyon
Ni-Sülfamat	600 gL ⁻¹
Ni-Klorür	5 gL ⁻¹
Borik Asit	40 gL ⁻¹
Sakarin	0-3 gL ⁻¹

Nikel elektrokaplama banyolarında genellikle sülfamat banyosu tercih edilmektedir. Fakat üretilen yapılarda istenilen sağlamlık, morfoloji gibi çeşitli özelliklere göre nikel sülfamat banyosundan farklı olarak nikel alaşım banyoları da mevcuttur. Şekil 1.8’de verilen SEM görüntüsünde nikel sülfamat banyosunun içeriğine tungsten bileşeni eklenerek oluşturulmuş nikel alaşım banyosunda saf nikel göre daha sağlam, daha düşük gerilime sahip ve daha esnek olan mikroyayların elde edildiği görülmektedir [24]. İçerisinde demir kobalt, fosfor gibi bileşenlerin olduğu manyetik MEMS uygulamalarında karşımıza çıkan farklı nikel alaşım banyoları da mevcuttur [25].

Nikel elektrokaplama ile kaliteli yapıların üretiminde en önemli özelliğin gerilim op-



Şekil 1.8. NiW mikroyay SEM görüntüsü [24]

timizasyonu olduğu görülmüştür. Gerilim optimizasyonu için nikel sülfamat banyosuna ek bileşenler eklenerek daha kaliteli yapılar üretilmiştir ve bunun yanı sıra banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu gibi parametrelerin değiştirilmesiyle de gerilim optimizasyonunun gerçekleştiği görülmüştür [26].

1.3. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında ilk kez üretilecek olan hareketli ve hareketsiz MEMS yapıları için, kullanılacak nikel elektrokaplama banyo reçetesinin optimizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Yapılacak bu optimizasyonlarda temiz alan deneyiminin geliştirilmesi ve temiz alan içerisindeki buharlaştırma, maske hizalayıcı gibi cihazlarının iyi derecede öğrenilmesi amaçlanmıştır.

Nikel sülfamat banyosunun ucuz olması, banyonun hazırlanmasının kolay olması, sülfatın yüksek çözünürlüğü ve banyoda yüksek nikel iyon konsantrasyonu sağlanması gibi avantajlarıyla nikel sülfamat banyosu üzerine odaklanılması düşünülmüştür. Nikel sülfamat banyosu kullanılarak nikel elektrokaplama ile kaliteli yapıların elde edilmesi için önemli olan gerilim optimizasyonunun sağlanmasıdır. Banyonun optimizasyonunun laboratuvarımızda sınırlı malzeme bulunuşu ve banyo konsantrasyonunun ayarlanmasının zor oluşu sebebiyle banyoya ek madde eklemek yerine banyonun sıcaklık ve akım yoğunluğunun değiştirilmesi

ile sağlanması amaçlanmıştır.

KLayout programı kullanılarak MEMS Rezonatör ve MEMS Test yapıları tasarlanacak ve COMSOL Multiphysics sonlu elemanlar simülatörü kullanılarak hareketli MEMS yapılarının modal analizleri gerçekleştirilecektir. Daha sonra simülasyon sonuçları ile gerçek sonuçlar incelenecektir.

1.4. Tezin Yapısı

Birinci bölümde genel olarak MEMS, MEMS'in tarihsel gelişimi, Nikel Elektrokaplamanın farklı amaçlarda kullanıldığı yerler ve Nikel elektrokaplama banyoları hakkında bilgi verilerek kaynak taraması sunulmuştur.

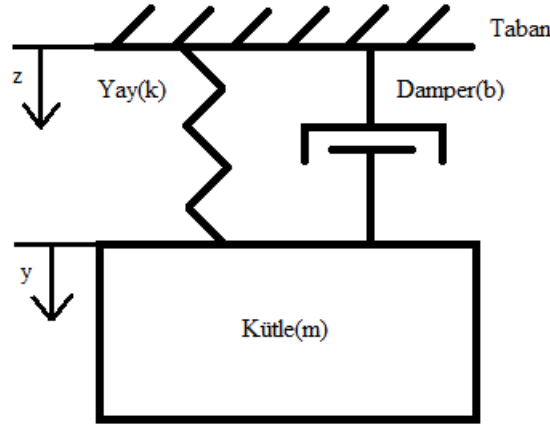
İkinci bölümde KLayout programı ile yatay ekseninde ve z ekseni yönünde salınım yapan MEMS rezonatör yapılarının tasarımı, 3 kütleli z ekseni yönünde salınım yapan MEMS rezonatör yapısının tasarımı, MEMS test yapılarının tasarımı ve hareketli MEMS yapılarının COMSOL Multiphysics sonlu elemanlar simülatörü kullanılarak elde edilmiş simülasyon sonuçlarından bahsedilmiştir. Daha sonrasında litografi için kullanılacak maske tasarımı anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde üretim aşamaları, üretim sürecindeki optimizasyonlar ve sonuçlardan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde üretim sonuçları yorumlanmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. TASARIM

MEMS rezonatör, rezonans davranışına sahip olan bir sistemdir. Rezonatörlerin frekansı hangi frekansta titreşim yapması isteniyorsa ona göre ayarlanır. Rezonatörler bir saat sinyali oluşturmada, alçak geçiren bir filtre olarak ya da ivmeölçer olarak çeşitli uygulamalarda kullanılabilirler [27]. Rezonatörlerin rezonans frekansı hesaplanırken Şekil 2.1’de verilen kütle-yay-damper modeli incelenebilir. Sisteme dışarıdan bir kuvvet uygulandığında kütle Newton’un hareket yasasına göre uygulanan kuvvetin tersi yönünde hareket etme eğilimindedir. Kütlenin hareketi tabana bağlı olan kirişler tarafından ve sistemin sönümlemesi ile belirlenir [11].



Şekil 2.1. Rezonatör kütle-yay-damper modeli

Sistemin dinamik davranışı Denklem 2.1’de verilen hareket denkleminde çıkarılır.

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \\ &= m\ddot{x} + b\dot{x} + kx \end{aligned} \quad (2.1)$$

denkleminde a ivmeyi, x ise kütle için bağıl hareketini belirtmektedir. Denklem 2.1’in Laplace dönüşümü yapılsa rezonans frekansı ve kalite faktörü elde edilir [11]:

$$ma(s) = ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s)$$

$$\frac{X(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

$$w_0 = \frac{k}{m}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{w_0 m}{b} \quad (2.4)$$

denklemden f_0 rezonans frekansı Q ise kalite faktörüdür.

Her bir yöndeki yay sabiti 2.5'te verilen denklemler ile hesaplanır [11].

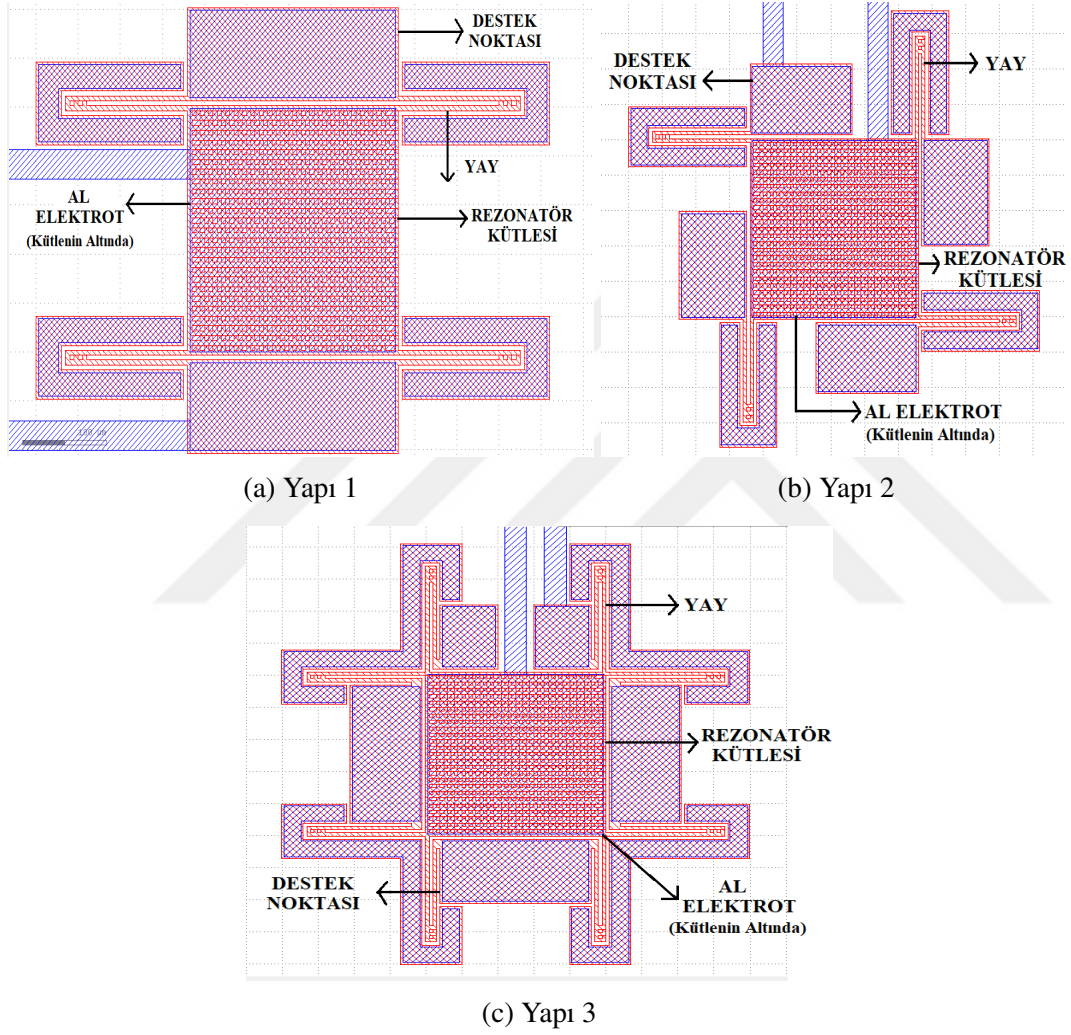
$$k_x = \frac{Ehw}{l}, k_y = \frac{Ehw^3}{l^3}, k_z = \frac{Ewh^3}{l^3} \quad (2.5)$$

X, y ve z uygulanan kuvvetin yönünü, E esneklik katsayısını, h yayın kalınlığını, w yayın genişliğini, l ise yayın uzunluğunu belirtmektedir [11].

2. bölümde üretimi gerçekleştirilecek olan yapıların tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 2.1'de z yönünde salınım yapan MEMS rezonatör yapılarının tasarımları ve simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 2.2'de yatay yönde salınım yapan MEMS rezonatör yapılarının tasarımları ve simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 2.3'te z yönünde salınım yapan üç kütleli MEMS rezonatör yapısı tasarımı ve simülasyon sonucu ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 2.4'te MEMS üretim karakterizasyonu test yapıları tasarımı ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 2.5'te maske tasarımı ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.1. Z Yönünde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapıları

Z yönünde salınım yapan rezonatör yapıları tasarlanırken ilk önce rezonans frekansı belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen rezonans frekansına göre Denklem 2.2 ve Denklem 2.5'ten yararlanarak yay boyutları ve kütlelerin boyutları seçilmiştir. Nikelin esneklik katsayısı üretimle değişmekle beraber tasarım esnasında 219 Gpa olarak alınmıştır. Belirlenen boyutlara göre öncelikle rezonatör yapıları tasarım programında çizilmiş ve daha sonra belirlenen rezonans frekanslarına sahip olup olmadıkları simülasyon programında görülmüştür.

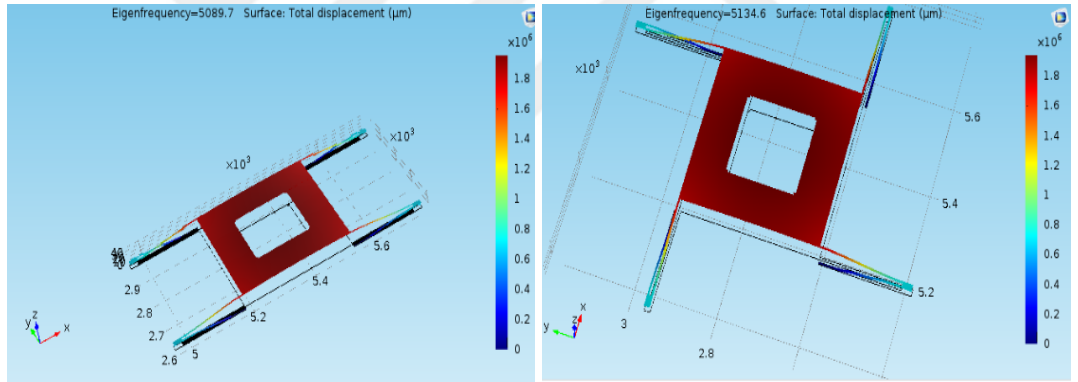


Şekil 2.2. Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapıları tasarımları

5 kHz'den 22 kHz'e değişen farklı rezonans frekanslarında z yönünde salınım yapan rezonatörler tasarlanmıştır. Rezonans frekansının 5 kHz'e yakın olması uygun görülmüştür. Çünkü ivmeölçer, jiroskop gibi yapılarda 10 kHz'den küçük frekans değerlerine sahip tasarımlar daha yaygındır. Fakat üretimde olabilecek bazı kusurlardan dolayı bazı yapıların daha sağlam olması istenmiştir. Bundan dolayı rezonans frekansları yüksek yapılar tasarlanmıştır ve 5 kHz ile 22 kHz arasında salınım yapan farklı tasarımlar bulunmuştur. Rezonans frekansı 5 kHz olan rezonatör tasarımı ile ilgili detaylar bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

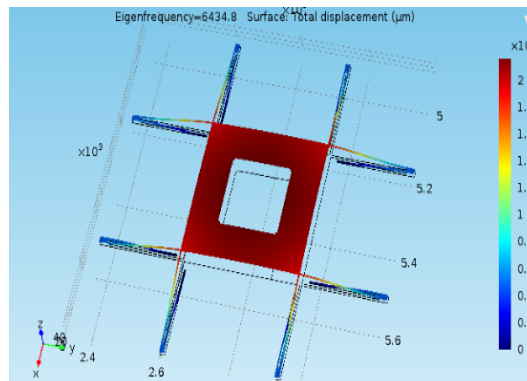
Şekil 2.2'de KLayout programı kullanılarak tasarlanmış rezonans frekansı 5 kHz olarak belirlenmiş üç farklı z yönünde salınım yapan rezonatör yapıları gösterilmiştir.

Şekil 2.3'te gösterilen rezonans frekansları 5 kHz olarak belirlenen ve tasarımları gerçekleştirilen üç farklı z yönünde salınım yapan rezonatör yapılarının rezonans frekansları COMSOL Multiphysics simülasyon programı kullanılarak doğrulanmıştır. COMSOL Multiphysics programı ile tasarlanan bu yapıların rezonans frekansları yaklaşık 5 kHz olarak hesaplanmıştır.



(a) Yapı 1

(b) Yapı 2

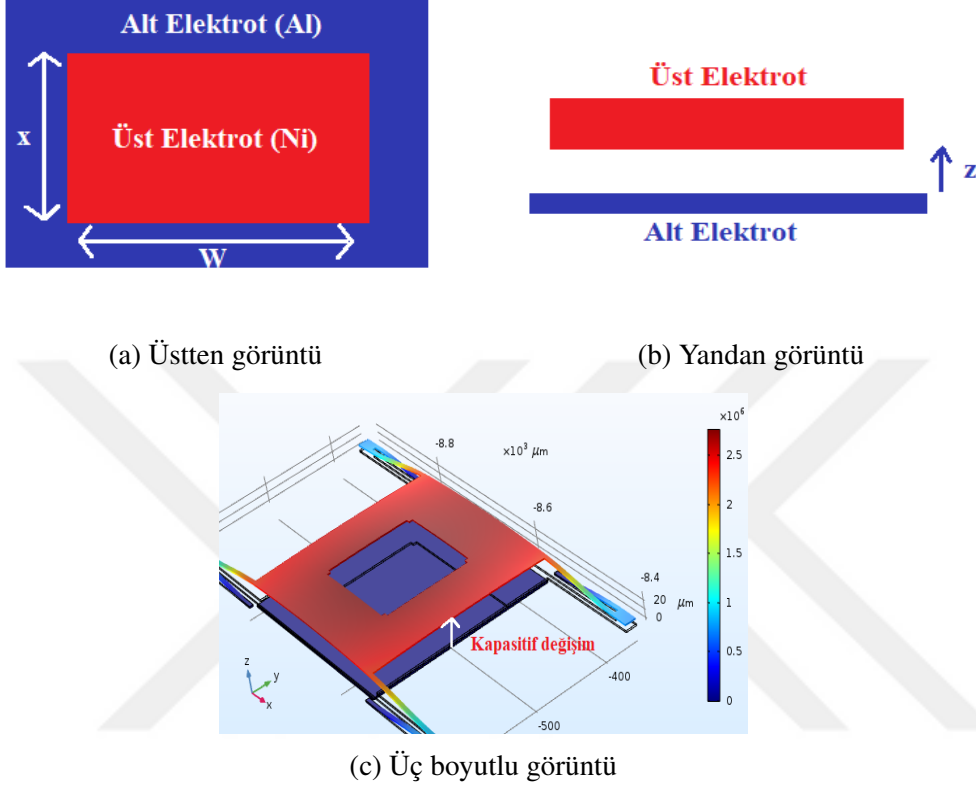


(c) Yapı 3

Şekil 2.3. Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapılarının simülasyon sonuçları

Şekil 2.2'de tasarımları verilen rezonatör yapılarında mavi renkli alüminyum elektrot

sabit elektrottur. Kırmızı renkli destek noktalarına yaylar aracılığı ile bağlanmış rezonatör kütlesi ise hareketli olan üst elektrottur. Şekil 2.4'te alt elektrot ve üst elektrotun üstten ve yandan bakıldığındaki gösterimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapısının farklı açılardan görüntüleri

MEMS rezonatör yapısının salınımı, salınım esnasında iki elektrot arasındaki mesafe değişimi ile oluşan kapasitif değişim ile algılanacaktır. Rezonatörlere dışarıdan bir gerilim uygulandığında hareketli olan rezonatör kütlesi z yönünde salınım yapacaktır ve sabit elektrot ile hareketli elektrot arasında kapasite değişimi meydana gelecektir. Böylece bu kapasite değişimi ile orantılı bir çıkış elde edilecektir. Denklem 2.6 iki paralel elektrot arasındaki kapasite değişimini ifade etmektedir [28].

$$C = \frac{\epsilon_0 W x}{z} \quad (2.6)$$

denklemde ϵ_0 hava geçirgenliği, W üst elektrodun genişliği, x üst elektrodun uzunluğu z ise üst elektrot ve alt elektrot arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

Simülasyon sonuçları rezonatörlerin çapraz duyarlılığının tahmin edilmesinde önemlidir. İdealde bir rezonatörün hassas mod olan bir tane rezonans modu vardır. Fakat re-

zonatör bu modun dışında istenmeyen çapraz mod denilen modlara sahiptir. Rezonatöre istenmeyen rezonans modu boyunca bir kuvvet uygulandığında, çapraz eksenindeki hassasiyetin minimum olması için bu hareket mümkün olduğunca az olmalıdır. Bunu başarmak için hassas modun rezonans frekansı ile istenmeyen mod frekansı arasındaki farkın oldukça yüksek olması gerekmektedir [11].

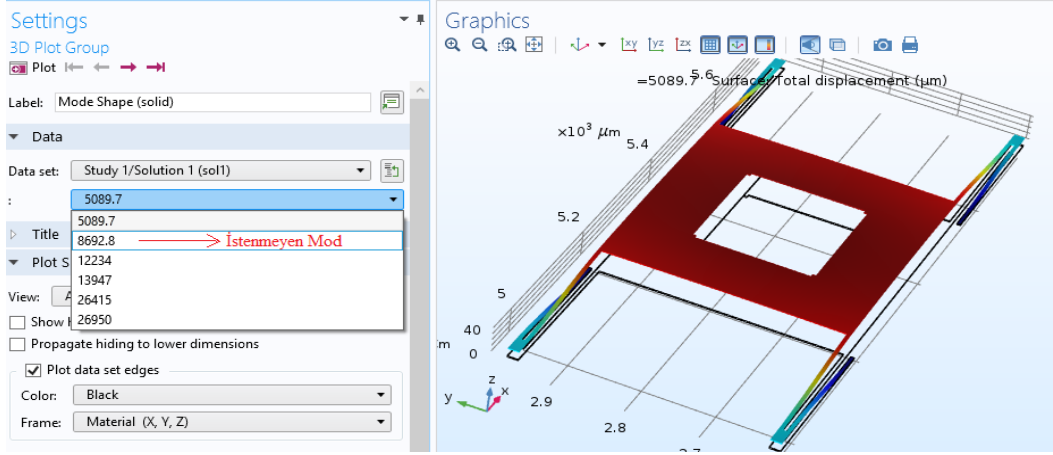
İstenmeyen rezonans modlarını hassas rezonans modundan uzaklaştırmak için rezonatör yapılarının yay tasarımlarında farklılıklar yapılmıştır. Yapılan tasarım değişiklikleri sonucunda Şekil 2.5'te rezonans frekansı ile istenmeyen mod frekansı arasındaki farkın arttığı gösterilmiştir.

2.2. Yatay Yönde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapıları

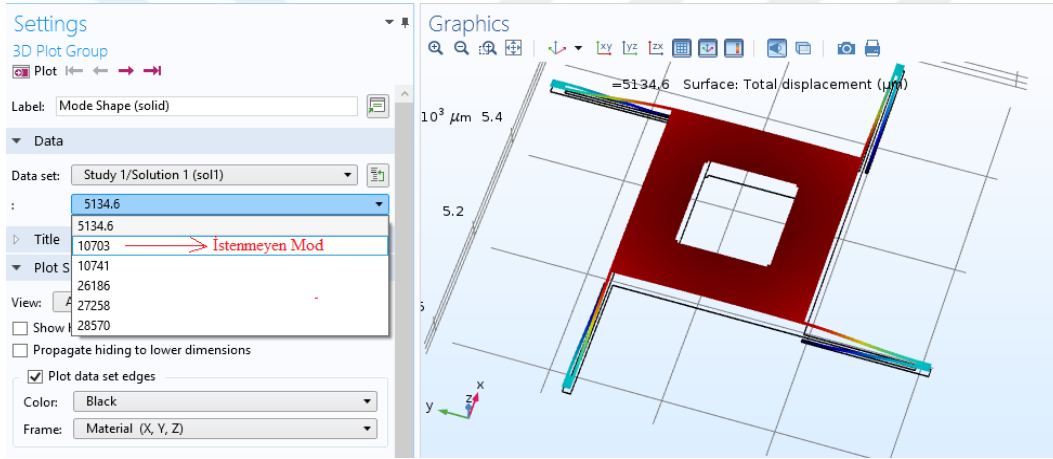
Yay yapıları farklı olan 2 farklı yatay yönde salınım yapan MEMS rezonatör yapıları tasarlanmıştır. MEMS rezonatör yapılarının yatay yönde hareket etmesi, rezonatörlerin x ya da y yönünde salınım yapabildiğidir. Tasarlanan rezonatör 90 derece döndürülerek konumlandığında x ya da y yönü olarak adlandırılabilir.

Yatay yönde salınım yapan rezonatör yapıları tasarlanırken ilk önce rezonans frekansı belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen rezonans frekansına göre Denklem 2.2 ve Denklem 2.5'ten yararlanarak yay boyutları ve kütlelerin boyutları seçilmiştir. Nikelin esneklik katsayısı tasarım esnasında 219 Gpa olarak alınmıştır. Belirlenen boyutlara göre öncelikle rezonatör yapıları tasarım programında çizilmiş ve daha sonra belirlenen rezonans frekanslarına sahip olup olmadıkları simülasyon programında görülmüştür. Şekil 2.6'da KLayout programı kullanılarak tasarlanmış rezonans frekansı 5 kHz olarak belirlenmiş iki farklı yatay yönde salınım yapan rezonatör yapıları gösterilmiştir.

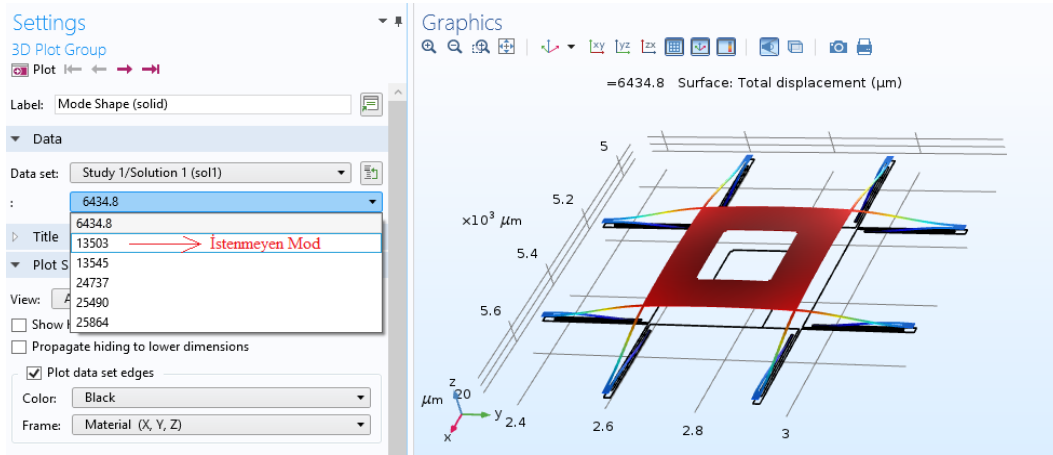
Yatay yönde salınım yapan rezonatör yapılarında da z yönünde salınım yapan yapılarda olduğu gibi 5 kHz'den 22 kHz'e değişen farklı rezonans frekanslarına sahip rezonatörler tasarlanmıştır. 10 kHz'den küçük frekanslarda salınım yapan tasarımların yaygın olması sebebiyle 5 kHz rezonatör tasarımı yatay yönde salınım yapan yapılar içinde uygun görülmüştür. Üretimde meydana gelebilecek bazı kusurlardan dolayı yatay yönde salınım yapan yapıların sağlam olması istenmiş ve yüksek rezonans frekansına sahip yapılar tasarlanmıştır. Ve iki farklı 2 μm , 3 μm gibi farklı elektrot kalınlıklarına ve farklı elektrot mesafelerine sahip 5 kHz ile 22 kHz arasında salınım yapan farklı tasarımlar bulunmuştur. Rezonans



(a) Yapı 1



(b) Yapı 2

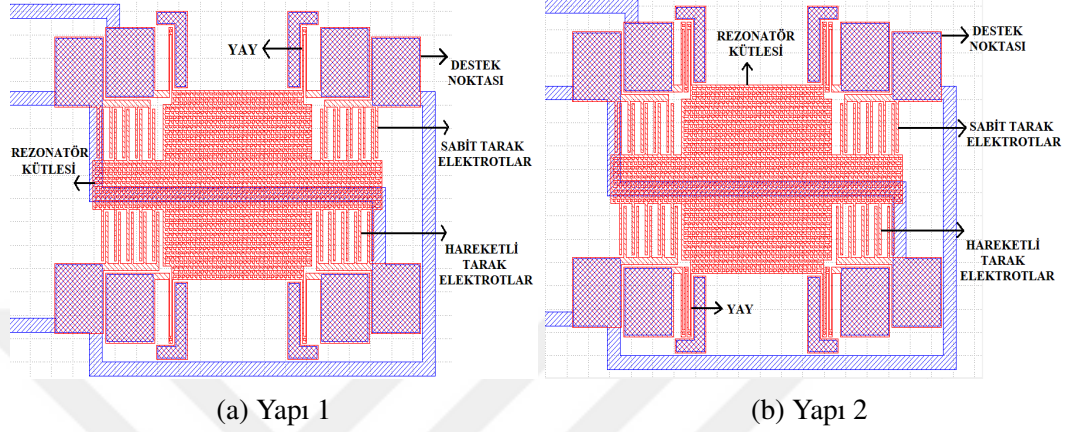


(c) Yapı 3

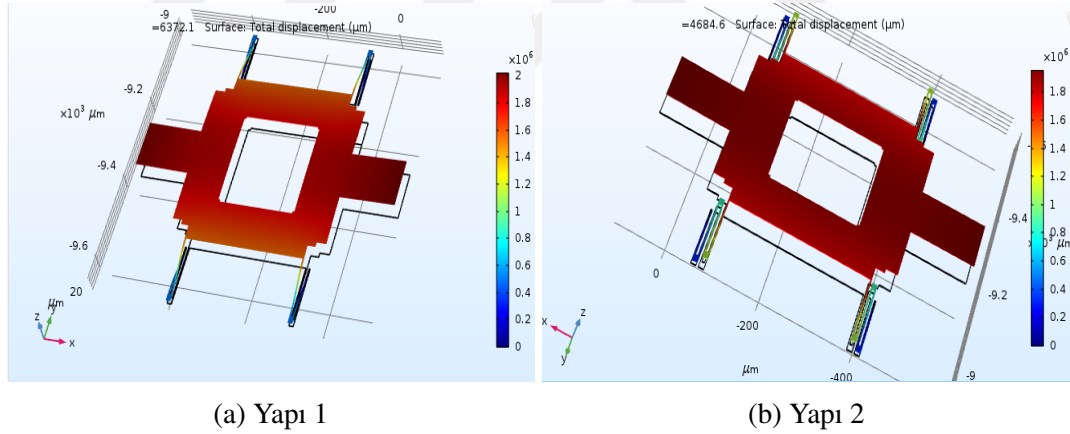
Şekil 2.5. Z yönünde salınan MEMS rezonatör yapılarının istenmeyen mod frekansları

frekansı 5 kHz olan rezonatör tasarımı ile ilgili detaylar bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Şekil 2.7’de gösterilen rezonans frekansları 5 kHz olarak belirlenen ve tasarımları gerçekleştirilen iki farklı yatay yönde salınım yapan rezonatör yapılarının rezonans frekansları COMSOL simülasyon programı kullanılarak yaklaşık 5 kHz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.6. Yatay yönde salınan MEMS rezonatör yapıları tasarımları



Şekil 2.7. Yatay yönde salınan MEMS rezonatör yapılarının simülasyon sonuçları

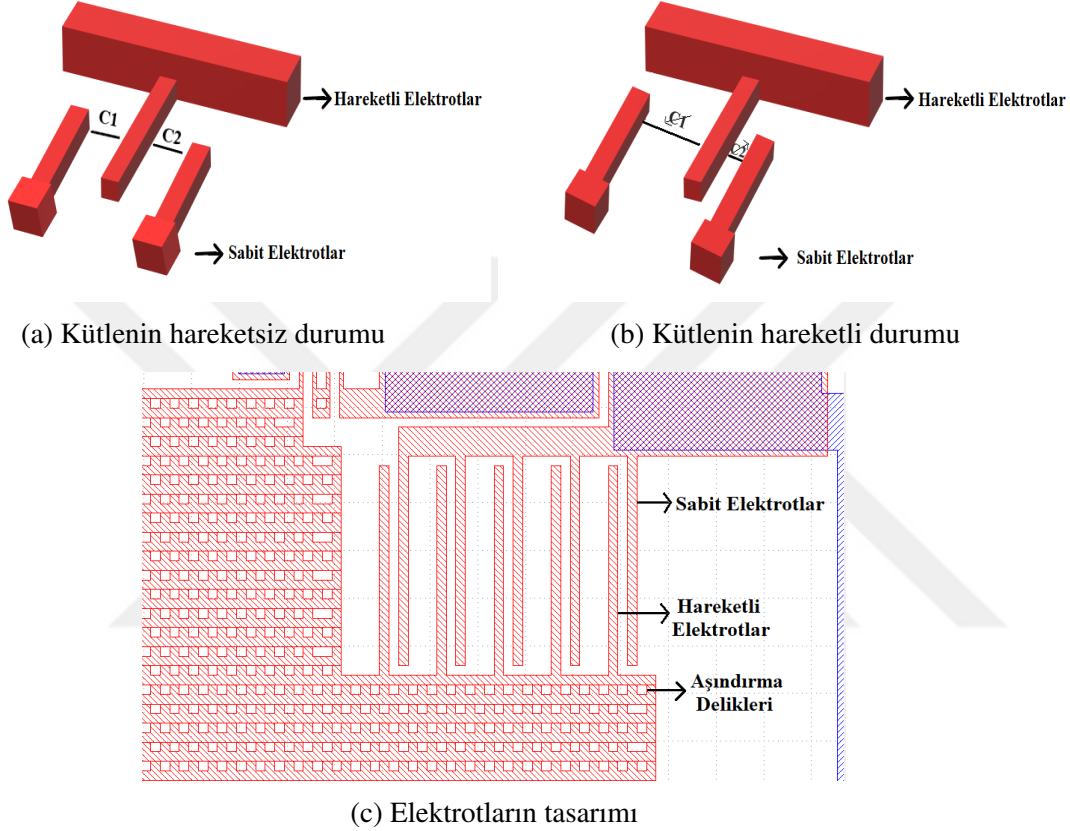
Şekil 2.8’de tasarımları verilen sabit tarak elektrot yapıları sabit elektrotlar, hareketli tarak elektrot yapıları ise hareketli elektrotlardır. Rezonatörlere dışarıdan bir gerilim uygulandığında hareketli olan rezonatör kütlesine göre x ya da y yönünde salınım yapacaktır ve sabit elektrotlar ile hareketli elektrotlar arasında kapasite değişimi meydana gelecektir. Böylece bu kapasite değişimi ile orantılı bir çıkış elde edilecektir. Şekil 2.8’de sabit elektrotlar ve hareketli elektrotların tasarımları ve üç boyutlu çizilmiş halleri verilmiştir.

Şekil 2.8’de hareketli elektrot sol tarafa hareket ettiğinde aradaki mesafe değişimine bağlı olarak Denklem 2.6’dan yararlanılarak C_2 'nin arttığı C_1 'in ise azaldığı görülmektedir.

Hareket halindeki kapasite değişiminin hareketsiz durumundaki kapasite toplamına oranı Denklem 2.7’de verilmiştir [28].

$$\frac{C2 - C1}{C2 + C1} = \frac{\Delta z}{z} \quad (2.7)$$

Δz hareketli elektrotların sapmasını, z ise hareketli ve hareketsiz elektrotlar arasındaki mesafeyi belirtmektedir.



Şekil 2.8. Elektrotların tasarımı ve kütle hareket durumuna göre üç boyutlu çizimi

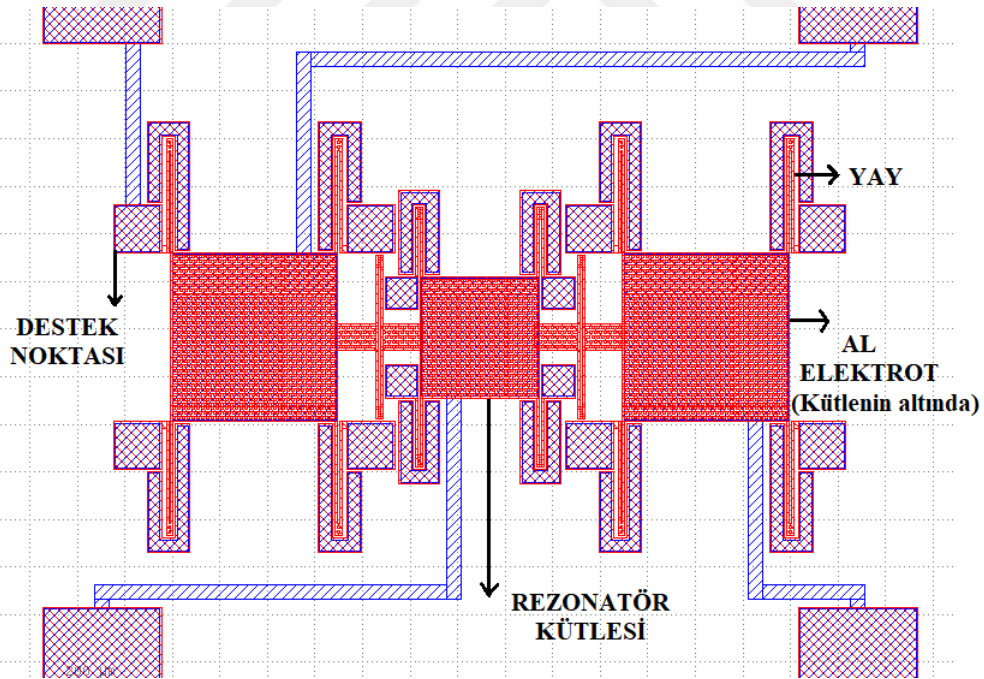
Yatay yönde salınım yapan rezonatörlerin istenmeyen modlarının analizlerinde bu modların rezonans moduna yakın olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise yayların kalınlığının ince olmasıdır. Yay kalınlığını arttırmak için elektrokaplama ile nikelin kalınlığının daha fazla yapılması gerekmektedir. Fakat bir sonraki bölümde daha detaylı anlatılacağı üzere litografi problemlerinden dolayı kalınlık daha fazla yapılamamıştır. Bundan dolayı istenmeyen modlar rezonans modundan çok fazla uzaklaştırılamamıştır. Tasarlanan bu yapıların üretimine bu durumun farkında olunarak devam edilmiştir.

Şekil 2.8’deki elektrotların tasarımında aşındırma delikleri görülmektedir. Hareketli rezonatör yapılarının oluşturulmasında hareketli nikel yapısı elektrokaplama ile ilk aşamada heba tabakasının üzerine kaplanır. Çalışmada bakır olarak seçilen heba tabakası hareketli

yapıların oluşması için uygun aşındırıcı ile ortamdan uzaklaştırılır ve hareketli yapı meydana gelir. Heba tabakasının aşınması için bu aşındırma delikleri kullanılmaktadır. Aşındırma delikleri kullanılmazsa nikel yapının iç bölgelerine aşındırıcının ulaşması zor olacaktır. Ve havada kalan yapıları oluşturmak zorlaşacaktır. Bu yüzden aşındırma delikleri belirli bir sıra ile yapılmıştır ki böylece aşındırıcının homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır.

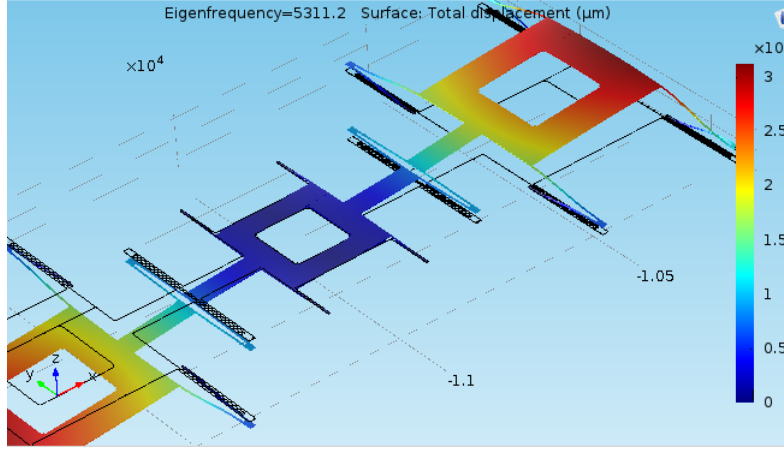
2.3. Üç Kütleli Z Yönünde Salınım Yapan MEMS Rezonatör Yapısı

Üç kütleli z yönünde salınım yapan rezonatörlerin, dış etmenlere daha az bağımlı salınım yapabilmeleri ve ayrıca belli bir frekans aralığında dinamik hareket yükseltmesi sağlayabildikleri için filtreleme ve osilatör uygulamalarında kullanılabilecekleri literatürde belirtilmiştir [29]. Çeşitli avantajlara sahip olduğu için tasarlanan z yönünde salınım yapan üç kütleli 5 kHz rezonans frekansına sahip rezonatör yapısı Şekil 2.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Z yönünde salınım yapan üç kütleli MEMS rezonatör yapısı tasarımı

Şekil 2.10’da gösterilen rezonans frekansı 5 kHz olarak belirlenen ve tasarımları gerçekleştirilen üç kütleli z yönünde salınım yapan rezonatör yapısının rezonans frekansı COMSOL simülasyon programı kullanılarak yaklaşık 5 kHz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.10. Z yönünde salınan üç kütleli MEMS rezonatör yapısı simülasyonu

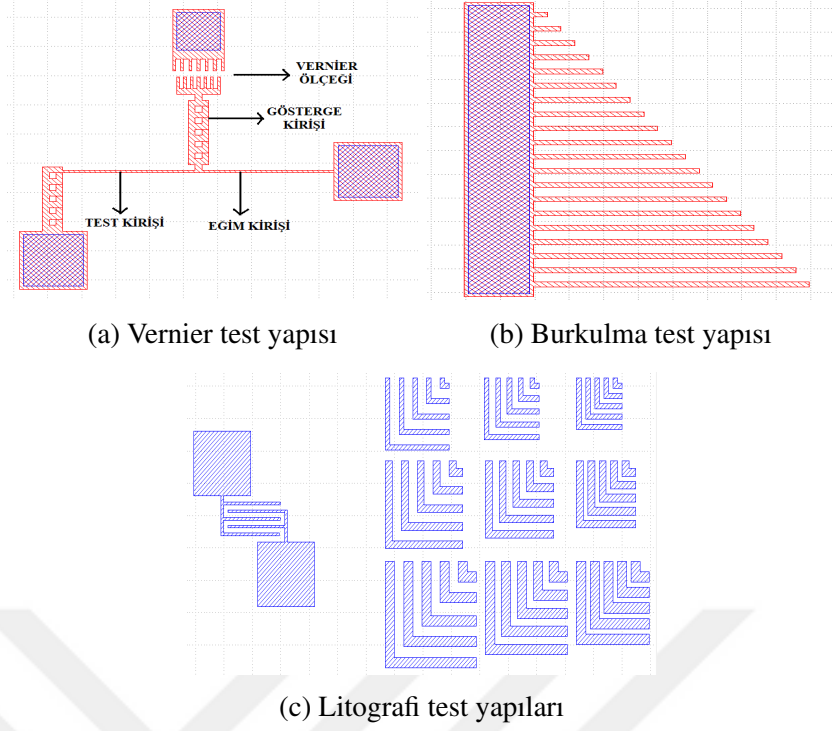
2.4. Üretim Karakterizasyonu Test Yapıları

Nikel elektrokaplama esnasında sıcaklık, akım yoğunluğu, banyo içerisindeki bileşenler gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak çekme ve baskı gerilimleri meydana gelir. Çekme gerilimi üretilen yapının yüzey alanına dik yönde kuvvetin etkisiyle meydana gelerek yapının kuvvet yönünde uzamasına sebep olmaktadır. Baskı gerilimi ise yüzey alanına dik yönde kuvvetin etkisiyle meydana gelerek yapının kuvvet yönünde sıkışmasına sebep olmaktadır [30]. Nikel elektrokaplama banyosundaki meydana gelebilecek bu gerilimlerin minimize edilmesi için oluşan gerilim çeşidi ve gerilim miktarının bilinmesi gerekir. Tasarımları gerçekleştirilen bu test yapıları meydana gelecek bu gerilimleri ölçmeye yardımcı olacaktır. Şekil 2.11(a)'da hem çekme hem de baskı gerilimlerinin tespiti için tasarlanmış vernier test yapısı verilmiştir.

Vernier test yapısında test kirişinin bir ucu sabitken diğer ucu gerilip uzayabilir ya da büzülebilir. Bu hareket eğim kirişine transfer edilir. Eğim kirişinin ortasında olan gösterge kirişi vernier ölçüsünde bir yer değiştirme meydana getirir. Çekme gerilimi meydana geldiğinde vernier ölçüsü sol tarafa kayar. Baskı gerilimi meydana geldiğinde vernier ölçüsü sağ tarafa kayar. Her iki gerilimde referans alınan vernier ölçülerine bakılarak mikroskop altında tespit edilebilir [31].

Şekil 2.11 (b)'de burkulma test yapısının tasarımı verilmiştir. Nikel elektrokaplama esnasında meydana gelecek gerilimlerde bu yapılar aşağı ya da yukarı hareket ederek büküleceklerdir. Bu yapılara bakılarak gerilimin kabul edilebilir olup olmadığı anlaşılacaktır.

MEMS yapılarının üretiminde litografi tekniği kullanılarak fotorezist üzerine desen-



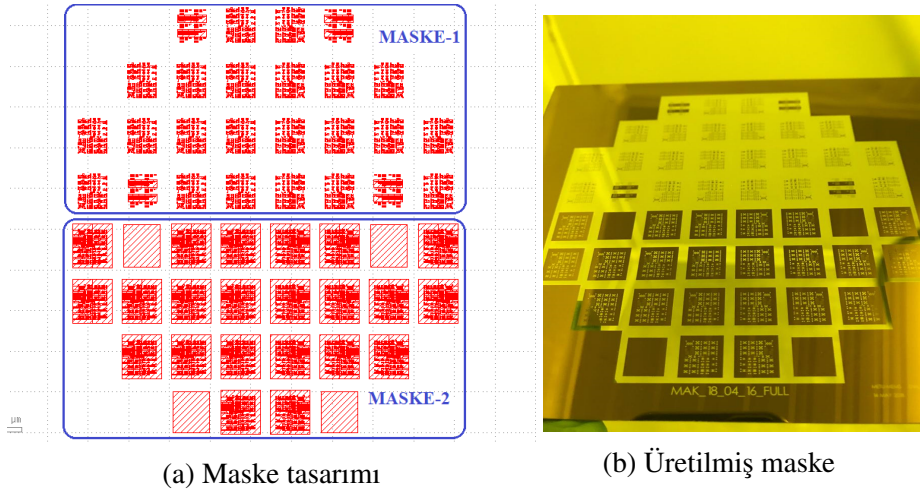
Şekil 2.11. Üretim karakterizasyonu test yapıları

lendirme yapılıır. Desenlendirilmesi istenen yapı belirli süreyle UV ışına maruz kalarak pozlanılır [19]. Fotorezistin kalınlığına göre değışen bu sürenin optimizasyonu için kalınlıkları $2 \mu\text{m}$ - $5 \mu\text{m}$ aralığında olan litografi test yapıları kullanılmaktadır. Pozlama sonrasında bu test yapılarına mikroskoptan bakılarak pozlama süresinin optimizasyonu yapılır. Şekil 2.11 (c)'de tasarımları yapılan litografi test yapıları verilmiştir.

2.5. Maske Tasarımı

Tez çalışmasında alüminyum iletim yollarının oluşturulmasında ve hareketli nikel yapılar için bir kalıp oluşturmada iki maskeye ihtiyaç duyulmuştur. Tasarımı yapılan maskele-
rin maliyeti yüksek olduğu için ve tek maskeyi iki bölüme ayırarakta MEMS yapıları üret-
menin mümkün olması sebebiyle tek maskede iki ayrı maske tasarlanmış ve ODTÜ Araştırma
ve Uygulama Merkezinde hizmet alımı yöntemiyle maskenin üretimi yapılmıştır. Şekil
2.12'de tasarımı yapılmış maske ve üretimi gerçekleştirilmiş maske verilmiştir.

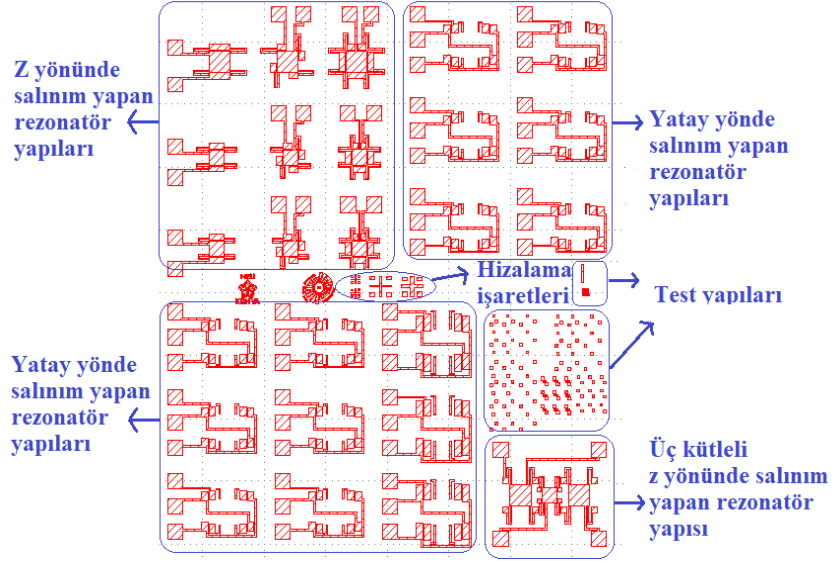
Maskenin üst yarısında alüminyum yollar için tasarlanmış maske bulunmaktadır. Mas-
kenin alt yarısında ise nikel yapıların oluşması için tasarlanmış maske bulunmaktadır. Poz-
lama esnasında ilk aşamada alüminyum yollar oluşturulacağı için, fotorezist kaplı silisyum



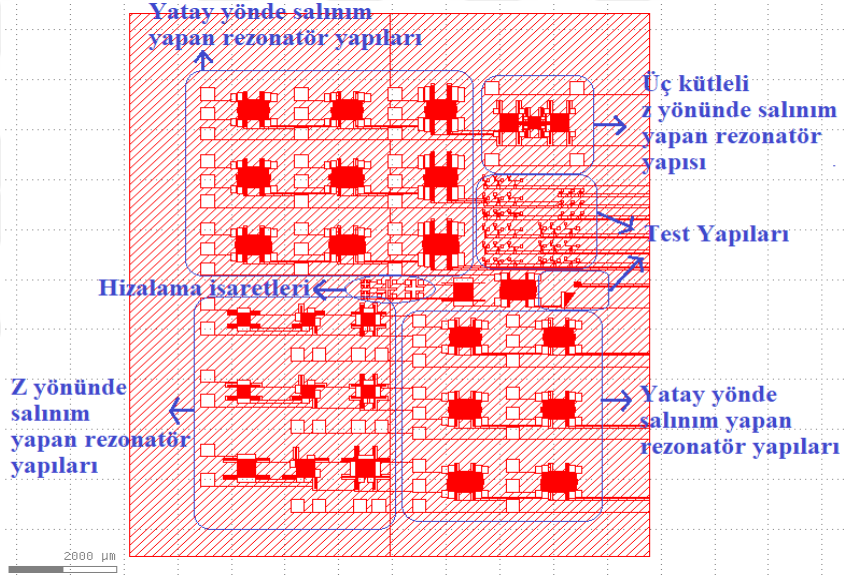
Şekil 2.12. Maske tasarım ve üretimi

pulun ilk önce üst kısmı alüminyum yollar için tasarlanmış maske kullanılarak pozlama gerçekleştirilir. Silisyum pulun üst kısmının pozlanması esnasında, alt kısmının üstü kapatılarak ışına maruz kalması engellenir. Daha sonra silisyum pul 180 derece çevirilerek alt kısmında aynı şekilde pozlanması sağlanır. Ve böylece alüminyum yollar için desenlendirme gerçekleştirilmiş olur. Sonraki aşama nikel yapılar için gerekli olan desenlendirmenin yapılmasıdır. Oluşturulacak hareketli nikel elektrot yapıları desenlendirilmesi yapılmış alüminyum elektrot yapılarının üstünde olmalıdır. Dolayısıyla nikel yapıların oluşturulması için kullanılacak kalıbın alüminyum yollar ile üst üste denk gelmesi için maske iyi hizalanmalı ve pozlama öyle yapılmalıdır. Maskenin hizalanmasında hizalama işaretleri daha önce maskede tasarlanmış ve pozlama esnasında kullanılmıştır. Hem alüminyum yolların oluşturulmasında kullanılacak olan maskenin belli bölgelerine hem de nikel elektrokaplama kullanılacak kalıpların oluşturulmasında kullanılacak olan maskenin diğer maskede yerleştirilen bölgelerle aynı olacak şekilde belli bölgelere hizalama işaretleri koyulmuştur. Hizalama yapıldıktan sonra nikel kalıbında oluşturulması alüminyum yolların oluşturulmasında izlenen adımlar izlenerek tamamlanmıştır.

Maske yaklaşık olarak 1.5 cm'ye 1.5 cm olacak şekilde kalıplara bölünmüştür. Nikel elektrokaplama banyosunun boyutunun küçük olması sebebiyle küçük kalıplara kaplama yapmak daha kolay olmuştur ve optimizasyon çalışmalarında çok fazla kalıp olduğu için birçok deneme yapılabilmektedir. Şekil 2.13'te 1.5 cm'ye 1.5 cm olan alüminyum yolların desenlendirilmesinde kullanılacak maskenin ve nikel yapılar için oluşturulacak kalıbın desenlendirilmesinde kullanılacak maskenin kalıpları verilmiştir. Şekil 2.14'te bu kalıplardaki hizalama işaretlerinin daha ayrıntılı gösterimi verilmiştir.

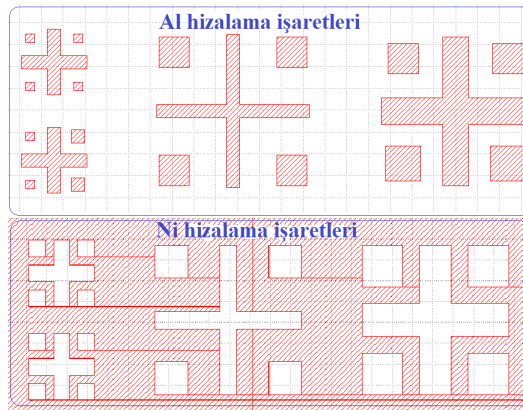


(a) Al maske kalıbı



(b) Ni maske kalıbı

Şekil 2.13. Al ve Ni desenlendirme için kalıplar



Şekil 2.14. Al ve Ni maske kalıplarındaki hizalama işaretleri

3. ÜRETİM VE SONUÇLARI

Bu bölümde çalışmada üretilen hareketli ve hareketsiz MEMS yapılarının üretim süreci ve sonuçlarından bahsedilmektedir. Bölüm 3.1’de nikel elektrokaplama ile ilgili ayrıntılar anlatılmıştır. Bölüm 3.2’de litografi optimizasyonlarından bahsedilmiştir. Bölüm 3.3’te nikel elektrokaplama düzeneğinin oluşturulması anlatılmıştır.

3.1. Nikel Elektrokaplama ile İlgili Ayrıntılar

Bu çalışmada kullanılacak olan nikel elektrokaplama süreci Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde silisyum alt katman ve yapısal katman malzemesi olarak nikel kullanılmıştır. Yapısal nikel katmanı elektrokaplama ile kalın fotorezist kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Üretim sürecinde yapısal katmanın oluşturulmasında elastisite modülü ve akma dayanımı gibi malzeme özellikleri sebebiyle nikel tercih edilmiştir [28]. Bağlantı noktalarının oluşturulmasında genellikle yüksek iletkenliği ve imalat kolaylığı gibi sebeplerle altın tercih edilmektedir [11]. Fakat altının pahalı olması ve deneme sürecinde optimizasyonlar için çok fazla başa dönülmesi sebebiyle daha ucuz olan iletken alüminyum malzemesi tercih edilmiştir.

MEMS rezonatörlerinin ve MEMS hareketsiz yapılarının üretiminde çeşitli avantajlarından dolayı nikel elektrokaplama seçilmiştir. Bölüm 3.3’te nikel elektrokaplama ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.1.1. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Metalizasyon Katmanının Üretimi

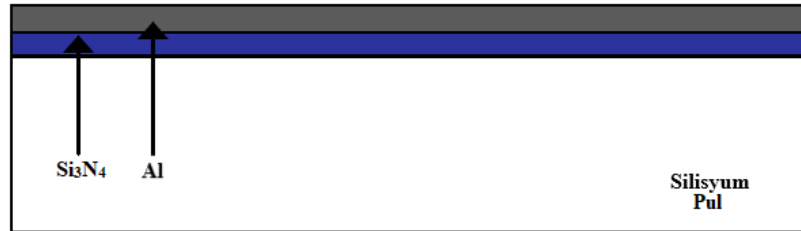
Nikel elektrokaplama sürecinde metalizasyon katmanı hem elektrik bağlantılarında hem de yapısal katmanın silisyum pula yapışmasında kullanılır. Alüminyum malzeme me-

talizasyon katmanı olarak tercih edilmiştir.

Metalizasyon katmanı oluşturulmadan önce silisyum pul organik temizleme amacıyla piranha aşındırıcısının (1:1 $H_2SO_4:H_2O_2$) içerisinde 15 dk bekletilir. Silisyum malzemesi yarıiletken bir malzemedir dolayısıyla devrede kısa devreler meydana gelebilecektir. Bu durumun engellenmesi için metal katmanı kaplanmadan önce silisyum pul üzerine yalıtkan bir malzeme olan silisyum nitrür (Si_3N_4) (300 nm) tabakası manyetik alan saçtırma sistemi kullanılarak kaplanır (Şekil 3.1.(a)). Daha sonra metalizasyon katmanının oluşturulması için silisyum pul termal buharlaştırma cihazının içerisinde koyularak alüminyum (300 nm) ile kaplanır (Şekil 3.1.(b)).



(a) Manyetik alan saçtırma ile Si_3N_4 yalıtkan tabaka kaplanır.



(b) Buharlaştırma ile alüminyum malzemesi kaplanır.

Şekil 3.1. Silisyum pul üzerine yalıtkan tabakanın ve alüminyum malzemesinin kaplanması

Silisyum pul üzerinde alüminyum malzeme kaplandıktan sonra metalizasyon tabakasının desenlendirilmesi için silisyum pul üzeri S1813 fotorezisti ile kaplanır. Fotorezistin kaplanması sürecinde silisyum pul ısıtıcı üzerinde dehidrasyon amacı ile $150^{\circ}C$ 'de yaklaşık 10 dk bekletilir. Dehidrasyon aşamasında silisyum pul üstündeki su ve OH^{-} iyonları giderilmiş olur ve bu aşama ile yapışmanın kalitesi artar. Daha sonra silisyum pul döndürmeli kaplama cihazına bırakılır. Döndürmeli kaplama cihazında iki hız mevcuttur. İlk hız fotorezistin yayılması, ikinci hız ise fotorezist kalınlığının ayarlanmasıdır. Yapılan optimizasyonlar sonucunda 10 sn 500 rpm hızında fotorezistin yayılması gerçekleştirilir, 35 sn

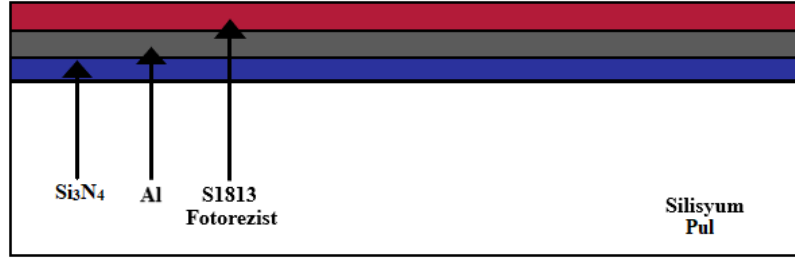
3000 rpm hızında ise fotorezist ($1.5 \mu\text{m}$) silisyum pul üzerine kaplanır.

Fotorezist kaplandıktan sonra tekrar ısıtıcı üzerinde yumuşak fırınlama için bekletilir. Bu süreçte silisyum pul maske hizalayıcısına koyulmadan önce kurutulmuş olur. Kuruyan pul üzerinde fotorezist daha eş dağılımlı bir şekildedir ve düşük mekanik gerilmelere sahip olur. Eğer yumuşak fırınlama süresi yeterli değilse silisyum pul yüzeyinde gaz kabarcıkları meydana gelebilir. Litografi esnasında ışın başlatıcı tarafından nitrojen gazı çıkışı olur, fotorezist ince olduğu zaman bu gaz kolayca yayılabilir fakat fotorezist kalın olursa yayılma zorlaşır ve gaz kabarcıklarının olması bir problem haline gelir [32]. Bu durumda silisyum pul üzerinde noktasal bozukluklar meydana gelir. Yumuşak fırınlama sürecinde sıcaklık değeri de çok önemlidir. Eğer sıcaklık derecesi çok fazla olursa fotorezistin fotoaktifliği azalacaktır. Böylece hassaslığı da azalmış olacaktır. Yapılan optimizasyonlar sonucunda silisyum pul 1 dk boyunca $113 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bekletilir. Ve fotorezist kaplama aşaması tamamlanır (Şekil 3.2.(a)).

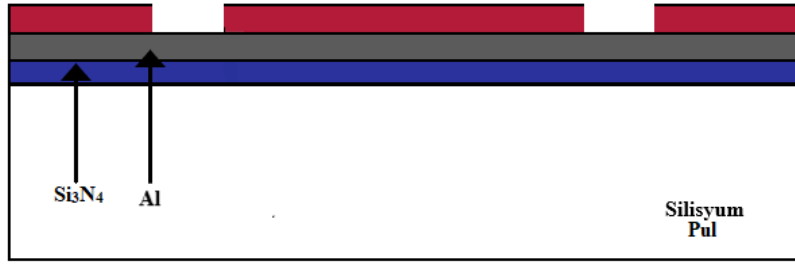
Fotorezist kaplandıktan sonra istenilen desende metalizasyon tabakasının oluşması için pozlama süreci başlatılır. Optimum 7.5 sn olarak belirlenen pozlama sürecinde alüminyum desenlendirme için tasarlanan maske kullanılarak UV ışının alüminyum yolların olması istenen yerlerden geçmesine izin verilmezken, alüminyum yolların olması istenmeyen yerlerden geçmesine izin verilerek pozlama yapılır. Bu şekilde fotorezistin desenlendirilmesi gerçekleştirilmiş olur (Şekil 3.2.(b)). Pozlama sürecinde ışın geçen fotorezist üzerinde fiziksel bir değişim olur. Pozlama sonrası silisyum pul geliştirici (3:1000 NaOH:DIW) içerisine bırakılır. Geliştirici pozlama sürecinde ışın geçen fotorezistte meydana gelen fiziksel değişimden dolayı ışınlanan bölgedeki fotorezisti ve onun altındaki istenmeyen alüminyum yolları aşındırır. Bu işlem yaklaşık 3 dk sürer. Aşındırma işleminden sonra kalan fotorezist katmanı ise aseton ve IPA kullanılarak ortamdan uzaklaştırılır. Dehidrasyon aşamasından, fotorezistin kaldırılmasına kadar gerçekleştirilen tüm aşamalar litografi sürecini oluşturmaktadır. Litografi süreci sonrası metalizasyon tabakasının oluşumu tamamlanır (Şekil 3.2.(c)).

3.1.2. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Heba Tabakasının Üretimi

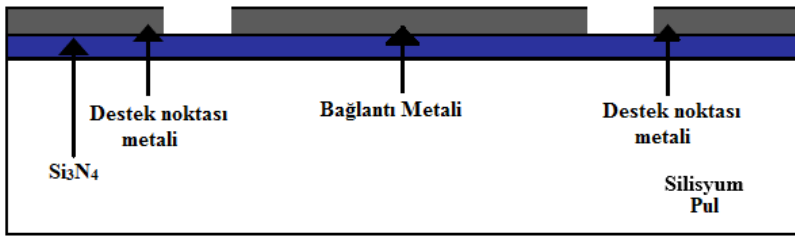
Heba tabakası elektrokaplama sürecinde sensörün askıda kalması istenilen bölgelerinin oluşmasını sağlar. Hava sönümlemesinin düşük olması için heba tabakasının kalın olması tercih edilir [11]. Heba tabakasını oluşturmada heba malzemesini aşındıran aşındırıcının diğer malzemeleri aşındırmaması çok önemlidir. Bu sebeple bakır malzemesi heba tabakasını



(a) Fotorezist döndürmeli kaplama cihazında kaplanır.



(b) Fotorezist litografi ile desenlendirilir.

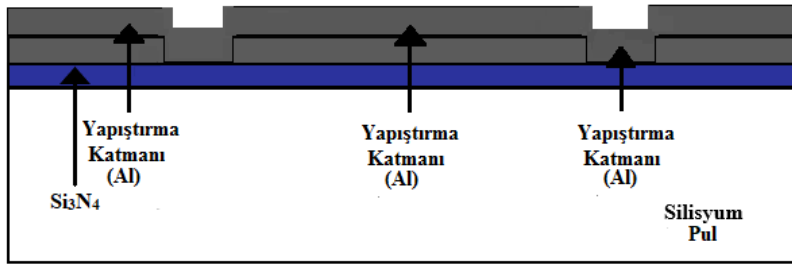


(c) Metalizasyon tabakası geliştirme sonrası oluşturulur.

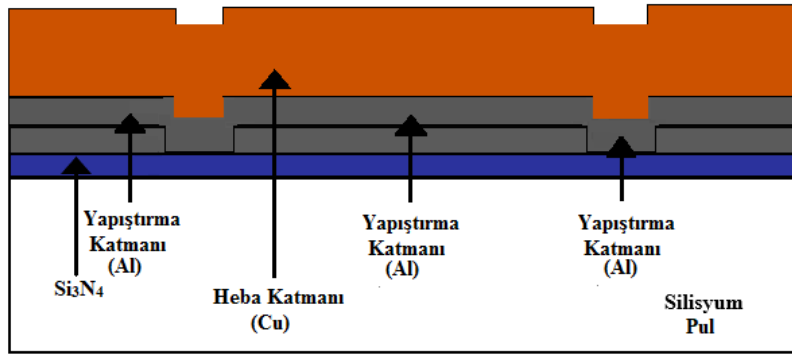
Şekil 3.2. Fotorezistin kaplanması ve metalizasyon tabakasının oluşturulması

oluşturmak için seçilmiştir.

Bakır heba tabakası oluşturulmadan önce silisyum pul üzerine bakır malzemesinin daha iyi tutunması için bir yapıştırıcı katmana ihtiyaç duyulmuştur. Yapıştırıcı özelliğe sahip olan alüminyum silisyum pul ile bakır arasında yapıştırıcı katman olarak seçilmiştir. Dolayısıyla termal buharlaştırma cihazı içerisinde önce yaklaşık 200 nm yapıştırıcı alüminyum katmanı ((Şekil 3.3.(a)) daha sonra ise silisyum pul havayla temas etmeyecek şekilde vakum ortamı içinde olan cihazın içinden çıkarılmadan bakır buharlaştırma ile yaklaşık 2 µm bakır kaplanmıştır. Böylece heba tabakasının oluşumu tamamlanmıştır ((Şekil 3.3.(b)).



(a) Yapıştırıcı alüminyum katman buharlaştırma ile kaplanır.



(b) Bakır heba tabakası buharlaştırma ile kaplanır.

Şekil 3.3. Yapıştırıcı alüminyum tabakasının ve bakır heba tabakasının oluşturulması

3.1.3. Nikel Elektrokaplama Sürecinde Yapısal Katmanın Üretimi

Nikel elektrokaplama sürecinde yapısal katmanın üretiminde öncelikle fotorezist kalıp olarak desenlendirilmiştir. Sonra yapısal katman nikel elektrokaplama ile oluşturulmuş-

tur. Son olarak ise fotorezistin ortamdan uzaklaştırılması ile yapısal katman üretimi tamamlanmıştır.

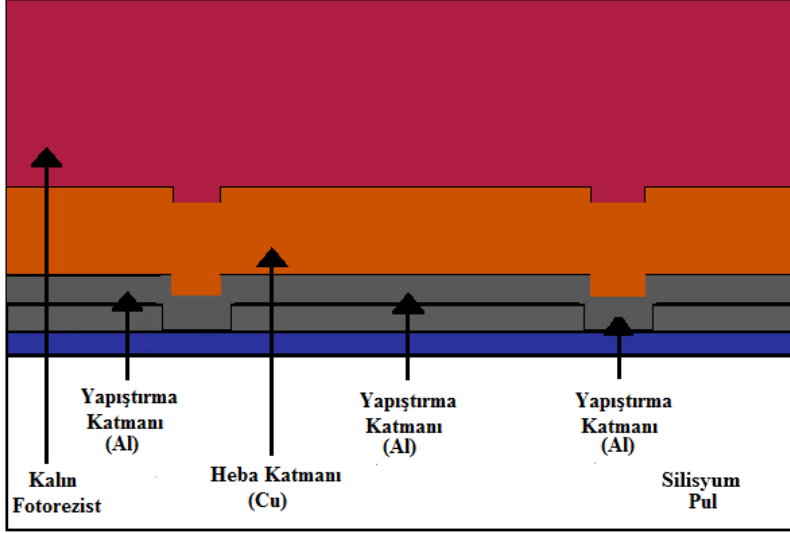
Yapısal katmanın oluşturulmasında kullanılacak olan kalıbın kalınlığının ayarlanması üretim sürecindeki en kritik aşamalardan biridir. Yüksek en boy oranına ve kalın kütle kalınlığına sahip sensör yapılarının üretimi için kalın fotorezist gerekmektedir. Ve bu fotorezisti yüksek en boy oranına sahip olacak şekilde desenlendirme yapmak gerekmektedir. Çalışmada ma-P 1275 kalın fotorezistin kullanılması düşünülmüştür. Fakat bu fotorezistin optimizasyonunda problemler meydana geldiği için S1813 ince fotorezistin kullanılmasına karar verilmiştir. S1813 fotorezisti ince olduğu için iki katlı fotorezist katmanı oluşturularak daha kalın bir kalıp oluşturulup kalın nikel yapılar oluşturulabilmiştir.

Fotorezist kaplamasına başlanmadan önce silisyum pul ısıtıcı üzerinde dehidrasyon amacı ile 150 °C'de yaklaşık 10 dk bekletilerek kalıp oluşturma sürecine başlanmıştır. İlk fotorezist katmanı (1.5 μm) ilk olarak 10 sn 500 rpm hızında, daha sonra 35 sn 3000 rpm hızında döndürmeli kaplama cihazında kaplanır. İlk katman oluşturulduktan sonra 60 °C'de yaklaşık 5 dk beklenir. Daha sonra ise ikinci fotorezist katmanı (1.5 μm) ilk olarak 10 sn 500 rpm hızında, daha sonra 35 sn 3000 rpm hızında döndürmeli kaplama cihazında kaplanır. İkinci katman da oluşturulduktan sonra 95 °C'de yaklaşık 5 dk yumuşak fırınlama yapılır. Böylece silisyum pul üzerine yaklaşık 3 μm kalınlığında fotorezist kaplanmış olur (Şekil 3.4.(a)).

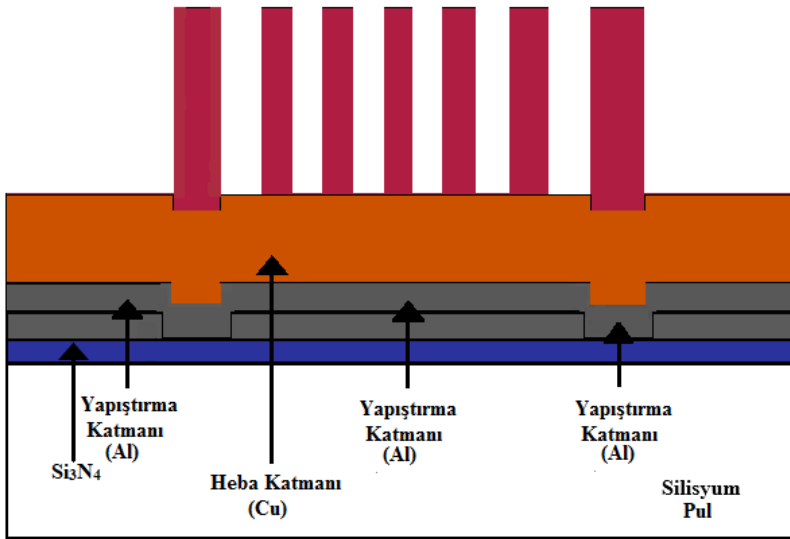
Fotorezist kaplandıktan sonra litografi ile desenlendirme aşamasına geçilir. Nikel yapıların oluşturulması planlanan maske kullanılarak silisyum pul UV ışığa maruz bırakılır. Tasarlanan maskeye göre ışın nikel yapısı oluşturulması istenen yerlerden geçecek, nikel yapısının oluşması istenmeyen yerlerden ise geçmeyecektir. Optimum olarak belirlenen 14 sn pozlama yapıldıktan sonra, silisyum pul geliştirici (3:1000 NaOH:DIW) içerisinde yaklaşık 1 dk kadar bekletilir ve fotorezist kalıbının oluşturulması tamamlanır.

Fotorezist kalıbı da oluşturulduktan sonra 4 inç büyüklüğündeki silisyum pul 1.5 cm'ye 1.5 cm olacak şekilde kırmıklara ayrılmıştır ve nikel elektrokaplama ile fotorezist kalıbı içerisinde nikel büyütülmüştür. Kaliteli nikel yapıların elde edilmesi için denemeler yapılmıştır. Nikel elektrokaplama aşamasında çeşitli parametreler değiştirilerek kaliteli nikel yapılar elde edilmiştir (Şekil 3.5). Nikel elektrokaplama ile ilgili ayrıntılar Bölüm 3.3' te verilecektir.

Nikel elektrokaplama ile nikel katmanı kalıp içerisinde büyütüldükten sonraki aşama

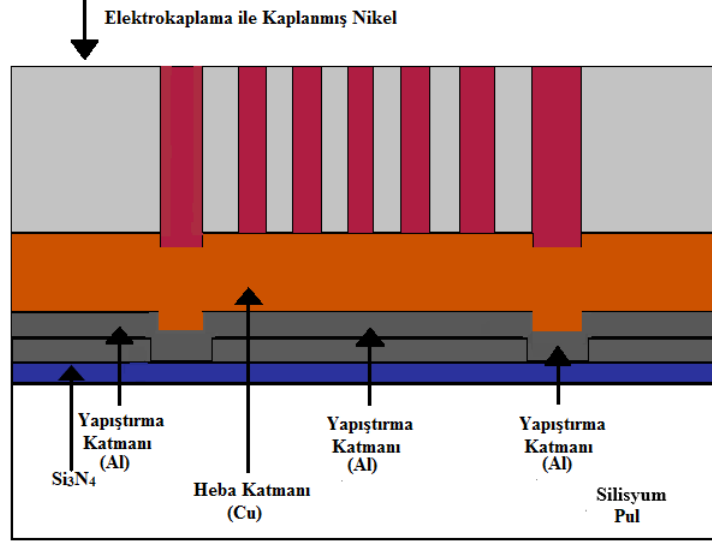


(a) Çift katmanlı kalın fotorezist katmanı oluşturulur.



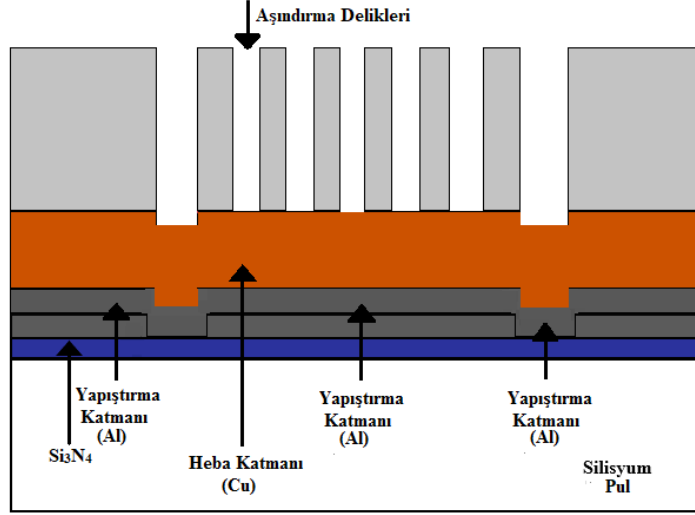
(b) Fotorezist kalıbı litografi ile oluşturulur.

Şekil 3.4. Kalın fotorezist katmanının oluşturulması ve kalıp haline getirilmesi

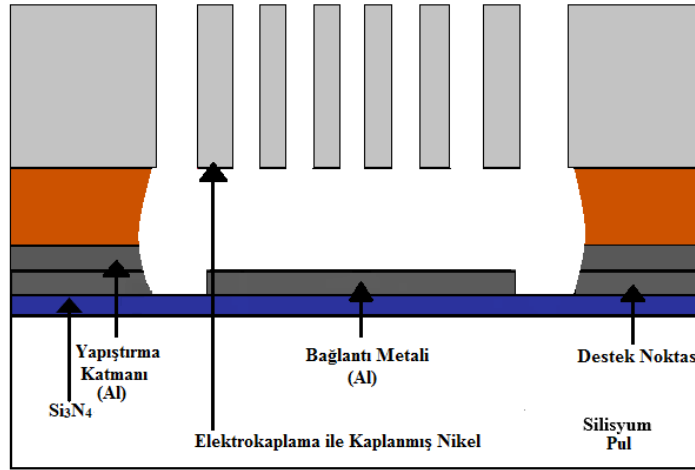


Şekil 3.5. Nikel elektrokaplama ile kalıp içerisinde nikelin büyütülmesi

havada kalan MEMS yapılarının oluşturulmasıdır. Havada kalan MEMS yapılarının oluşturulması için ise heba tabakasının aşındırılması gerekmektedir. Dolayısıyla önce en dış katmandan başlanarak sırasıyla aşındırma yapılır ve havada kalan yapılar oluşturulur. Öncelikle kalıp olarak kullanılan fotorezist katmanı aseton ve IPA kullanılarak ortamdan uzaklaştırılır (Şekil 3.6.(a)). Daha sonra bakır aşındırma aşamasına geçilir. Fakat önce kırk bir süre etanol içerisinde bekletilir. Aşındırılması istenen bölgede hava bulunursa aşındırıcının o bölgeye girmesi zorlaşır. Bu sebeple istenilen şekilde aşındırma gerçekleşmeyebilir. Etanol içerisinde birkaç dakika bekletilerek yüzey gerilimi düşürülür ve aşındırıcı içerisinde koyulduğunda aşındırıcının yapışma ihtimali artar ve ara noktalara girmesi kolaylaşır. Etanol içerisinde bekletildikten sonra kırk bakır aşındırıcı (1:1:18 $\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{DIW}$) içerisine koyulur ve yaklaşık 10.5 dakika içerisinde bakır aşındırılır. Daha sonra ise yapıştırıcı alüminyum katmanı alüminyum aşındırıcı içerisinde bekletilerek aşındırılır. Bir aşındırıcıdan diğer aşındırıcıya geçiş aşamalarında kırk saf su içerisinde bekletilerek temizlenmiş ve çözeltiler birbirine karışmamıştır. Yapıştırıcı alüminyum katmanının aşındırılması yaklaşık 3 dakika sürmüştür. Daha sonra kırk saf suya alındıktan sonra metanol içerisine koyulur ve ısıtıcı üzerinde $125\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bekletilir. Bu teknikte yapılarda yapışma problemlerinin olması minimize edilmiştir [28]. Tüm aşındırma işlemleri tamamlanmış, kırk ısıtıcı üstünde kurutulmuş ve havada asılı kalması istenen yapısal nikel katmanlar oluşturulmuştur (Şekil 3.6.(b)).



(a) Fotorezist katmanı aseton ve IPA yardımıyla ortamdaki uzaklaştırılır.



(b) Havada asılı kalan yapısal nikel katmanlar oluşturulur.

Şekil 3.6. Fotorezistin ortamdaki uzaklaştırılması ve askıda kalan nikel katmanların oluşturulması

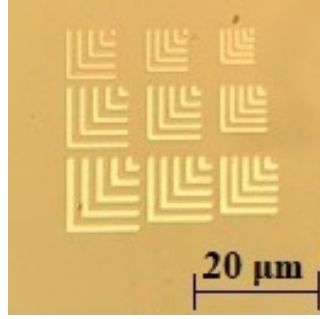
3.2. Üretim Sürecinde Litografi Optimizasyonları

Dehidrasyon ile başlayan litografi sürecinde fotorezist kaplandıktan sonra yumuşak fırınlama yapılmıştır. Yumuşak fırınlamanın süresi için optimizasyonlar yapılmıştır. Yumuşak fırınlama süresinin yeterli olmadığı denemelerde silisyum pul üzerinde kabarcıkların olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum yolların desenlendirilmesinde tek katmanlı fotorezist kaplandıktan sonra yumuşak fırınlama süresinin ve sıcaklığının optimizasyon denemeleri yapılmıştır. 1 dk boyunca 110 °C-112 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde kabarcıkların olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda optimum süre ve sıcaklık değerinin 1 dk ve 113 °C olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra ise alüminyum yolların desenlendirilmesinde pozlama süresi için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

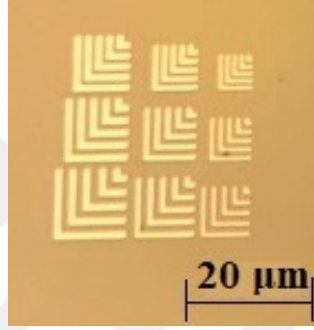
Maskeden ışığa duyarlı malzeme üzerine istenilen desenin aktarılması radyasyon kaynağının dalga boyuna, fotorezistin istenen özellik değişimini elde etmek için gerekli olan doza bağlıdır. Farklı fotorezistler farklı dalga boylarına farklı hassasiyetler gösterirler. İyi desen transferi için fotorezistin birim hacmi başına gerekli olan doz kısmen sabittir. Fakat pozlama işleminin fiziği alınan dozu etkileyebilir. Örneğin fotorezistin altındaki malzeme yüksek derecede yansıtıcı bir tabaka ise fotorezist hem gelen radyasyon hemde yansıyan radyasyon tarafından pozlamaya maruz kalabilir. Bu durumda dozun fazla olmasına sebebiyet verecektir. Doz aynı zamanda fotorezistin kalınlığına göre de değişecektir [32].

Desen aktarma kalitesini ve yan duvar özelliklerini etkileyebilen, yansıtıcı alt tabakalarda girişim modelleri gibi önemli etkilerde vardır. Fotorezist ışığa fazla maruz kalmışsa, desenin kenar bölgelerinde ışık saçılır ve dağılır dolayısıyla fotorezistin ışığa maruz kalması istenen bölgeleri ışığa maruz kalabilir. Ve bu kenar bölgeler tarafından alınan doz önemli bir durumdur. Eğer pozitif fotorezist kullanılıyorsa, fazla ışına maruz kalma durumunda fotorezist üstünde oluşturulan desenin kenar bölgelerinde aşınma meydana gelecektir. Bu da desen boyutunda azalmaya ve köşe bölgelerin keskinliğini kaybetmesine sebebiyet verecektir. Eğer fotorezist düşük pozlanmışsa, model hiç bir şekilde aktarılamayabilir. Köşe bölgelerde netlik olmaz ve istenilen desenin daha büyük bir şekilde olmasına neden olur [32]. Alüminyum yolların desenlendirilmesinde 10 sn, 9 sn, 8 sn ve 7.5 sn sürelerinde pozlamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7'de 7.5 sn ve 8 sn sürelerinde desenlendirilmiş olan litografi test yapılarının mikroskop görüntüleri verilmiştir. Çok bir fark olmamakla beraber 8 sn olan pozlama süresinde 2 µm kalınlıklara sahip litografi test yapılarında köşe bölgelerin keskin-

liğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden alüminyum yolların desenlendirilmesinde optimum pozlama süresi litografi test yapılarında köşe bölgelerin keskinliğinin daha net olduğu 7.5 sn olmuştur.



(a) 8 sn pozlama süresine sahip litografi test yapıları



(b) 7.5 sn pozlama süresine sahip litografi test yapıları

Şekil 3.7. Farklı pozlama sürelerinde alüminyum yolların desenlendirilmesinde kullanılan litografi test yapıları mikroskop görüntüleri

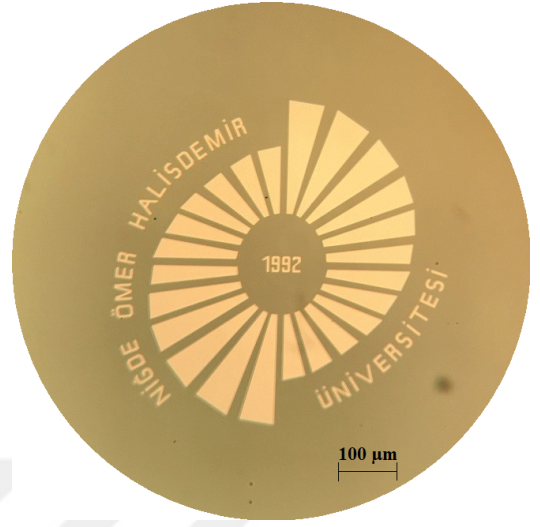
7.5 sn pozlama için desenlendirilmiş önceden tasarımı gerçekleştirilmiş logoların, hizalama işaretlerinin, üç kütleli rezonatör yapısı altındaki alüminyum yolların mikroskop görüntüleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Nikel fotorezist kalıbının oluşturulmasında kalın fotorezist katmanı üzerine pozlama gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden pozlama süresi alüminyum yolların desenlendirilmesinde gerçekleştirilen pozlama süresine göre farklılık göstermiştir. Pozlama süresinin artırılması gereken nikel fotorezist kalıbının desenlendirilmesinde 25 sn, 18 sn, 15 sn ve 14 sn sürelerinde pozlamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’da verilen mikroskop görüntülerinde 15 sn ve 14 sn olan pozlama süreleri ile gerçekleştirilen desenlendirmelerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. 15sn pozlama süresinde 2 μm kalınlıklara sahip litografi test yapılarının köşe bölgelerinin keskinliğinin azalması sebebiyle optimum pozlama süresi 14 sn olmuştur.

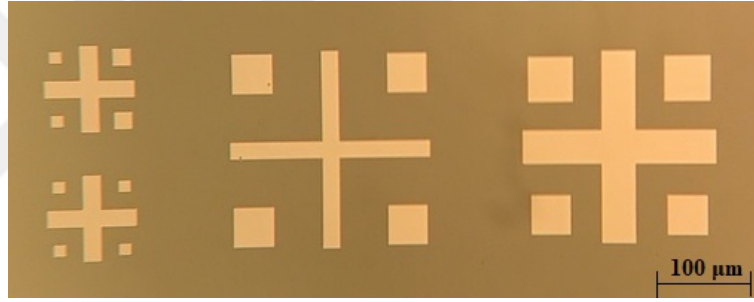
14 sn pozlama için fotorezist üzerinde hizalama sonrası desenlendirilmiş hizalama işaretlerinin ve üç kütleli rezonatör yapısı için desenlendirilmiş fotorezist kalıbının mikroskop



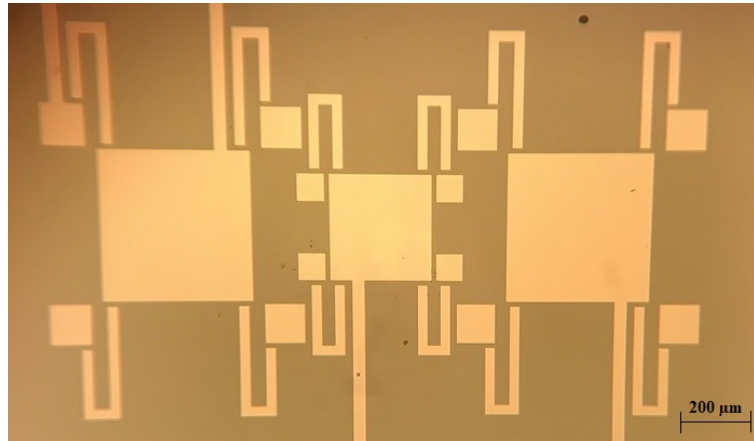
(a) Necmettin Erbakan Üniversitesi logosu



(b) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi logosu

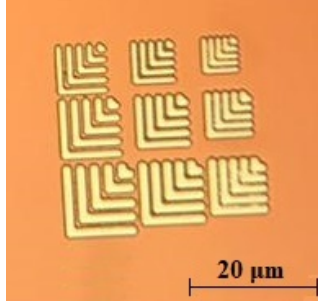


(c) Hizalama işaretleri

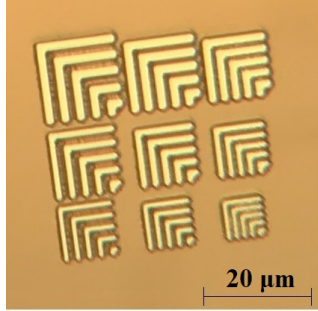


(d) Üç kütleli rezonatör yapısının altındaki alüminyum yollar

Şekil 3.8. 7.5 sn pozlama süresinde desenlendirilmiş logolar, hizalama işaretleri ve üç kütleli rezonatör yapısının altındaki alüminyum yolların mikroskop görüntüleri



(a) 15 sn pozlama süresine sahip litografi test yapıları



(b) 14 sn pozlama süresine sahip litografi test yapıları

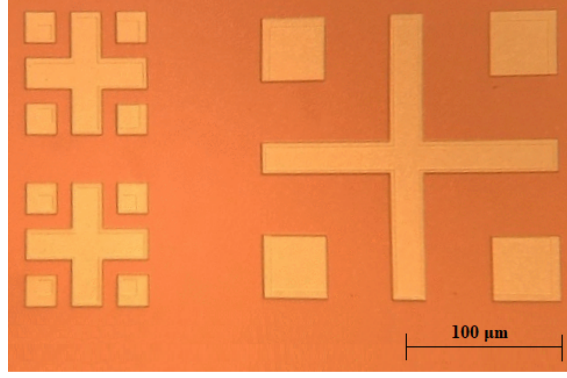
Şekil 3.9. Farklı pozlama sürelerinde nikel yapıların desenlendirilmesinde kullanılan litografi test yapıları mikroskop görüntüleri

görüntüleri Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Şekil 3.11’de laboratuvarında pozlama için kullanılan maske hizalayıcısının fotoğrafı gösterilmiştir.

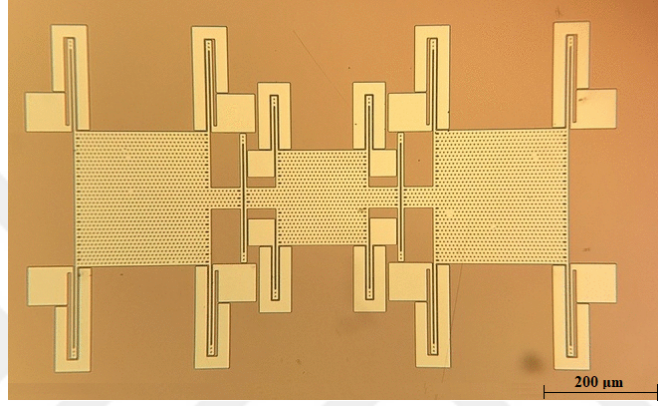
3.3. Nikel Elektrokaplama Düzeneğinin Oluşturulması

Nikel elektrokaplama için öncelikle Tablo 3.1’deki nikel sülfamat banyosu hazırlanmıştır [33]. Oluşturulan elektrolitik nikel sülfamat çözeltisinde elektrokaplamanın başlaması için çözeltinin içerisinde akım geçişi olması gerekmektedir. Bu sebeple, eşdağılımlı ve kaliteli nikel yapıların elde edilmesi için sabit akımın elde edildiği Şekil 3.12’de gösterilen nikel elektrokaplama banyosu düzeneğindeki akım aynası devresi kurulmuştur [34]. Devrede iki tane eş pnp transistörü kullanılmıştır. Eş transistörler kullanıldığı için taban akımları (I_B) ve yayıcı taban gerilimleri (V_{EB}) eşit kabul edilmiştir. Devredeki referans akımı Denklem 3.1’deki gibi yazılabilir (Kirchoff’un akımlar kanunundan yararlanarak). Denklem 3.2’de yeniden düzenlenen I_{ref} , Denklem 3.3’teki gibi elde edilir.

$$I_{ref} = 2I_B + I_C \quad (3.1)$$

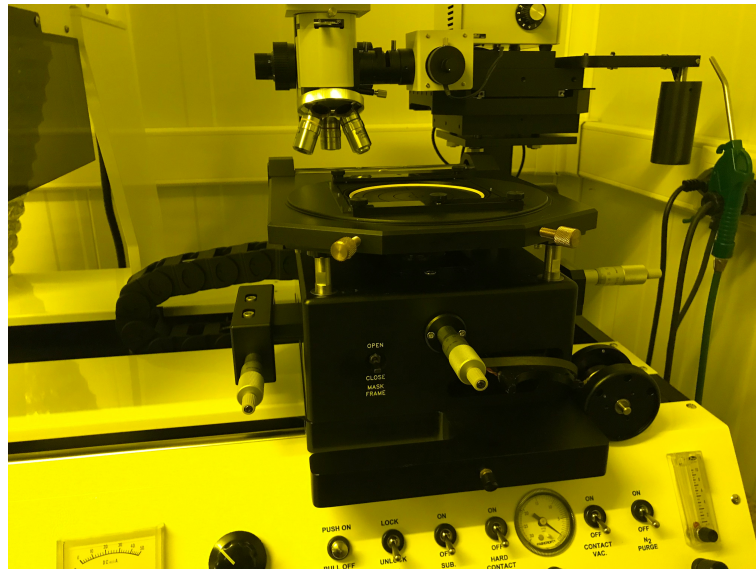


(a) Hizalama sonrasında desenlendirilmiş hizalama işaretleri



(b) Üç kütleli rezonatör yapısı için desenlendirilmiş fotorezist kalıbı

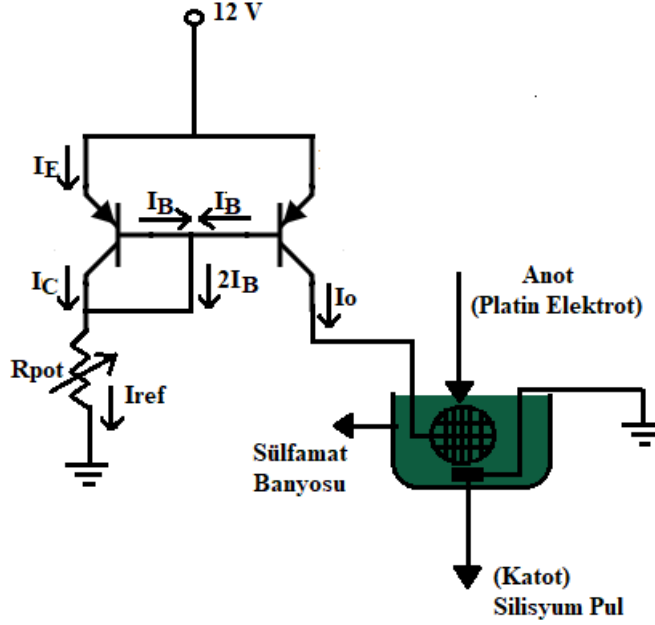
Şekil 3.10. 14 sn pozlama süresinde hizalama sonrası desenlendirilmiş hizalama işaretleri ve üç kütleli rezonatör yapısının fotorezist kalıbı mikroskop görüntüleri



Şekil 3.11. Laboratuvarda kullanılan maske hizalayıcı cihazı

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan nikel sülfamat banyosu [33]

İçerik	Konsantrasyon
Ni Sülfamat- 4H ₂ O	500 gL ⁻¹
NiCl ₂ -6H ₂ O	30 gL ⁻¹
H ₃ BO ₃	2 gL ⁻¹



Şekil 3.12. Nikel elektrokaplama banyosu düzeneği

denklemden I_B taban akımı, I_C ise toplayıcı akımıdır.

$$\begin{aligned} I_{ref} &= 2I_B + I_C \\ &= 2I_B + \beta I_B \end{aligned} \quad (3.2)$$

denklemden β akım kazancıdır.

$$I_{ref} = (2 + \beta)I_B \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'ten taban akımı ile I_{ref} arasındaki ilişki Denklem 3.4'teki gibi yazılabilir.

$$I_B = \frac{I_{ref}}{2 + \beta} \quad (3.4)$$

Denklem 3.5'te çıkış akımı verilmiştir.

$$I_o = \beta I_B \quad (3.5)$$

Denklem 3.4'te elde edilen I_B Denklem 3.5'te yerine yazılırsa Denklem 3.6 elde edilir.

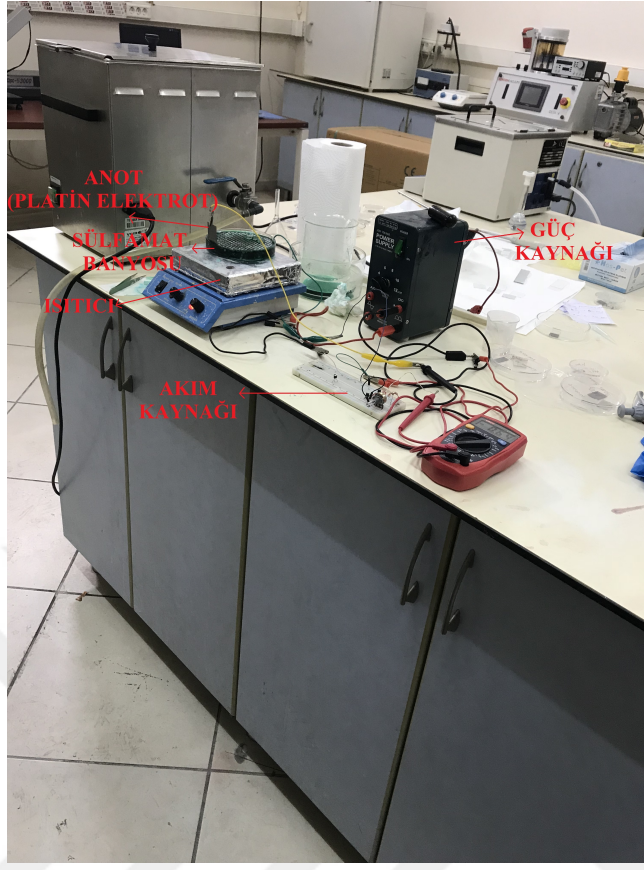
$$\begin{aligned} I_o &= \beta \frac{I_{ref}}{2 + \beta} \\ &= I_{ref} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Akım aynası devresinde girişe uygulanan referans akımı (I_{ref}) devrenin diğer koluna eşit oranda aktarılır. I_{ref} akımı çevre denklemi yazılarak (Kirchoff'un gerilim kanunundan yararlanarak), Denklem 3.7'deki gibi elde edilir [34].

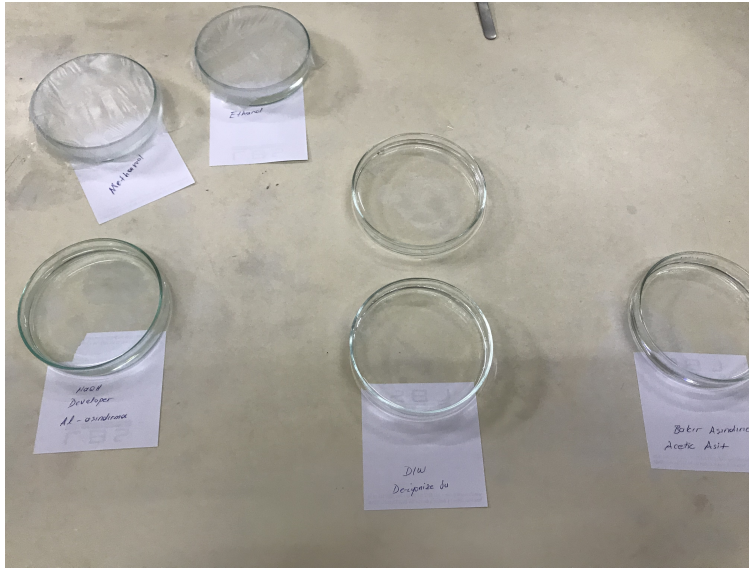
$$I_{ref} = \frac{12 - V_{EB}}{R_{pot}} \quad (3.7)$$

denklemden I_{ref} akımı potansiyometrenin değerine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla çıkış akımı ile referans akımı birbiriyle ilişkili olduğundan potansiyometrenin değeri değiştirilerek çıkış akımı istenilen sabit değerlere ayarlanabilmektedir. Sağ taraftaki transistör akım kaynağı görevini üstlenmiştir ve çıkışı devrede anot olarak kullanılan platin elektroda bağlanmıştır. Katot olan kaplanması istenen kırmık ise toprağa bağlanmıştır. Devreye enerji verildiğinde kapalı bir çevrim oluşur ve platin elektrot olan anottan kırmık olan katoda akım geçişi başlar. Akım akmaya başladığı an sulu nikel sülfamat çözeltisi içerisindeki nikel iyonları serbest hale geçerek kırmığa doğru hareket edecektir ve indirgenerek element halinde kırmık üzerinde birikmeye başlayacaktır. Ve böylece kırmık üzerinde elektrokaplama ile nikel yapılar meydana gelecektir. Şekil 3.13'te laboratuvarında kullanılan nikel elektrokaplama banyosu düzeneği gösterilmiştir. Şekil 3.14'te nikel elektrokaplama sonrası askıda kalan MEMS yapılarının oluşturulmasında heba tabakası ve yapıştırıcı katmanın ortamdaki kaldırılması için laboratuvarında kullanılan kimyasalların fotoğrafı gösterilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarına göre nikel elektrokaplama sürecinde meydana gelen baskı gerilimi kaplama sıcaklığı artırılarak azaltılır ve sabit bir sıcaklık değerinde akım yoğunluğu artırıldığında çekme gerilimine doğru kayar. Nikel elastisitesi kaplama düşük sıcaklıkta ve düşük akım yoğunluğunda gerçekleştiğinde yüksek kalmaktadır. Fakat sıcaklık artırıldığında nikel elastisitesi de düşmektedir. Nikelin elastisitesi kaplanan yapı baskı gerilimi altındayken yüksek olmaktadır, fakat çekme gerilimi altındayken düşük olmaktadır.



Şekil 3.13. Laboratuvarda kullanılan nikel elektrokaplama banyosu düzeniği



Şekil 3.14. Askıda kalan MEMS yapılarını oluşturmada laboratuvarda kullanılan kimyasallar

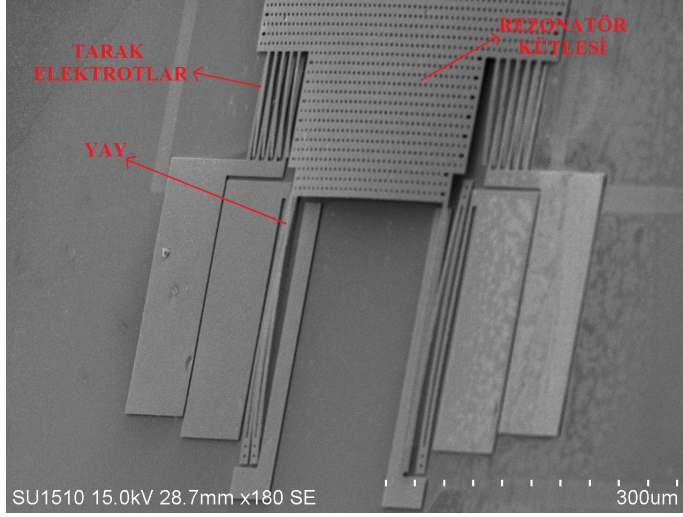
Kaplama esnasında çekme gerilimi altında olan yapılar az yoğun, gözenekli mikro yapıda fakat baskı gerilimi altında olan yapılar daha yoğun, daha güçlü ve daha sert yapıdadır. Kaplama baskı gerilimi altında yapıldığında, havada kalması istenen yapılar silisyum pul üzerinden serbest hale geçerken bükülmeler meydana gelir. Fakat kaplama çekme gerilimi altında yapılırsa bükülmeler engellenebilir [26].

İlk nikel elektrokaplama denemelerinde sıcaklık 45°C’de sabit tutularak sırasıyla 5 dk 20mA, 8 dk 15 mA, ve 10 dk 10 mA farklı süreler ve farklı akım değerlerinde elektrokaplama gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda kaplama esnasında manyetik karıştırıcı kullanılarak kır-mık yüzeyinde kabarcık oluşumu engellenmiştir. Fakat 45°C’de ortamda baskı gerilimi-nin meydana gelmesi sebebiyle MEMS yapılarının havaya kaldırılma esnasında bükülmeler oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.15’te 5 dk 20 mA ve 8 dk 15 mA süre ve akım değerlerinde üretimleri gerçekleşmiş MEMS yapılarının SEM görüntülerinde baskı gerilimi sonucu oluş-muş olan bükülmeler görülmektedir.

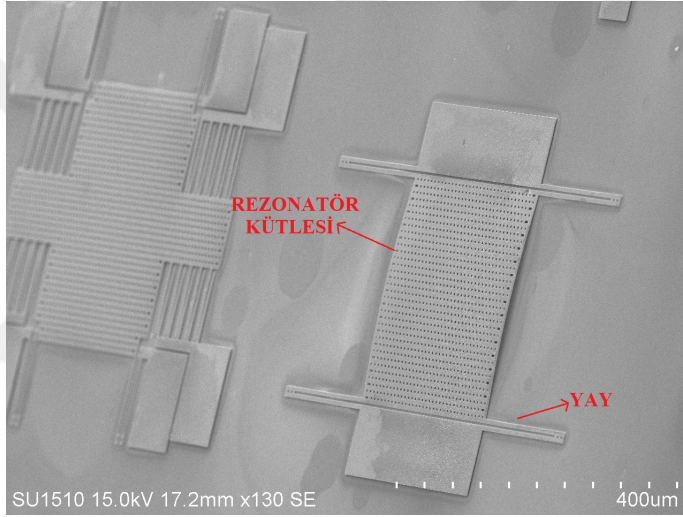
Nikel elektrokaplama sürecinde yapılan optimizasyonlar sonucunda sıcaklık ve akım yoğunluğu arttırıldığında baskı geriliminin azalıp bükülmelerin de buna bağlı olarak azaldığı daha kaliteli MEMS yapılarının üretildiği gözlemlenmiştir. Kaplama sıcaklığı 45 °C’den farklı olarak 60 °C, 70 °C , 80 °C gibi sıcaklık değerlerinde ve 25 mA, 30 mA, 40 mA ve 60 mA akım değerlerinde nikel elektrokaplama optimizasyonları yapılmıştır. Optimum sıcaklık süre ve akım değerlerinin 70 °C, 2.5 dk ve 40 mA olduğu üretim sonuçlarından anlaşılmıştır. Şekil 3.16’daki SEM görüntülerinde 70 °C’de 2.5 dk 40 mA değerinde bükülmelerin mini-mize olduğu askıda kalmış MEMS yapıları verilmiştir. Üretim sonucunda z yönünde ve yatay yönde salınan MEMS rezonatör yapılarının SEM görüntüleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Şekil 3.19’da üniversitelerin logolarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.20’de üretim esnasında fazla aşındırma ve gerilimin MEMS yapıları üzerindeki etkilerinin hissedildiği SEM görüntüleri verilmiştir.

Askıda kalan MEMS yapılarının hareketli olduklarını test etmek için prob istas-yonunun ince iğneleri hareketli yapılar üzerinde konumlandırılmıştır. İnce iğnelerle yapılara dokunulduğunda yapıların hareket ettikleri görülmüştür.

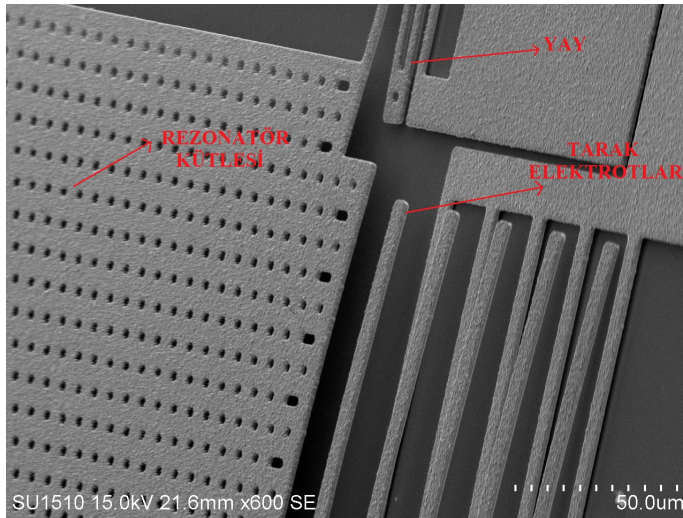
Hareketli yapılar üzerinde C-V (Kapasitans-Gerilim) testlerini yapabilmek için empe-dans analizörü ve prob istasyonu beraber kullanılmıştır. Empedans analizörünün prob is-tasyonu bağlantı kiti kullanılarak, analizörden hareketli yapılara prob iğneleri dokunduru-larak gerilim uygulanabilmektedir. Fakat alüminyum yolların üretim esnasında aşınmasından



(a) Yatay yönde salınan rezonatör yapısında meydana gelen bükülmeler (45 °C, 5dk, 20mA)



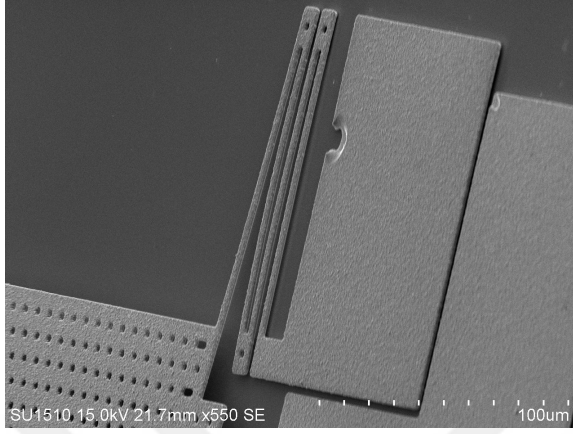
(b) Z yönünde salınan rezonatör yapısında meydana gelen bükülmeler (45 °C, 5dk, 20mA)



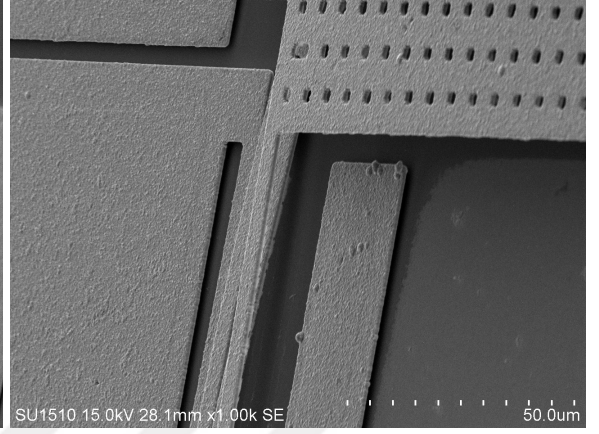
(c) Tarak elektrotlarda hissedilen bükülmeler (45 °C, 8dk, 15mA)

Şekil 3.15. 45 °C' de farklı akım ve sürelerde nikel elektrokaplama esnasında meydana gelen baskı gerilimlerinin SEM görüntüleri

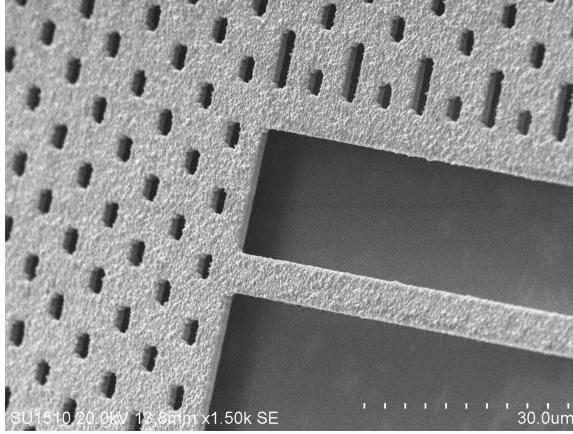
dolayı elektrik iletiminin olmadığı gözlemlenmiştir. Elektrik iletiminin olmaması sebebiyle çalışan prototipe rastlanmamıştır. Şekil 3.21’de laboratuvarında kullanılan prob istasyonu ve empedans analizörünün fotoğrafı gösterilmiştir.



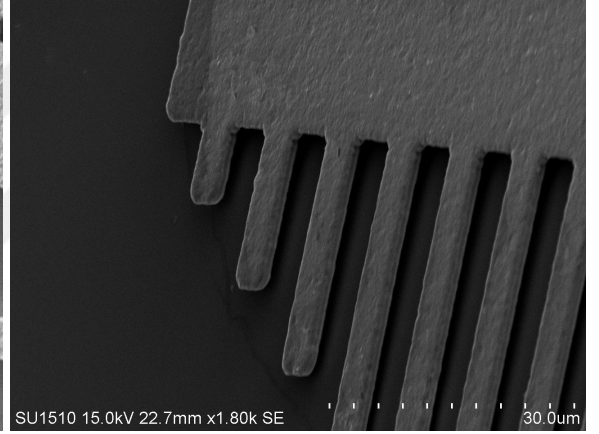
(a) Askıda kalan yay yapısı



(b) Askıda kalan rezonatör kütle yapısı

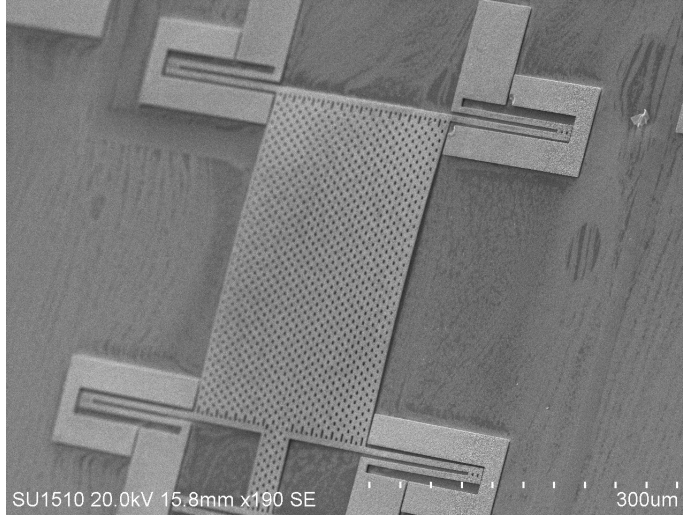


(c) Askıda kalan rezonatör kütle yapısı

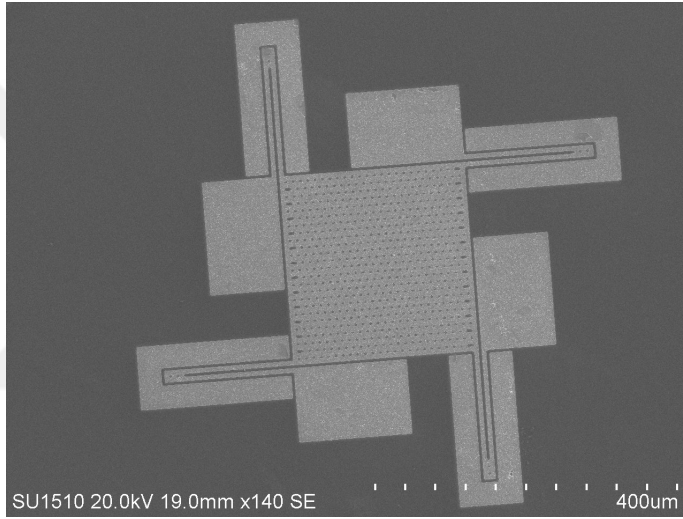


(d) Askıda kalan burkulma test yapısı

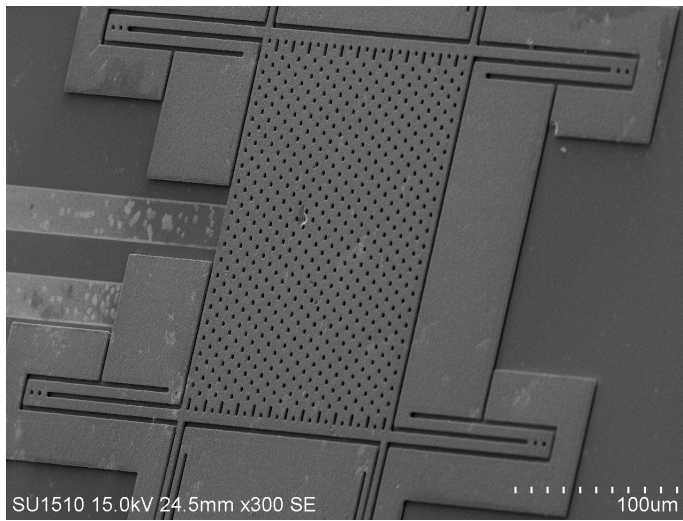
Şekil 3.16. 70 °C, 2.5 dk, 40 mA’de elde edilen askıda kalan MEMS yapıları



(a) Z yönünde salınan rezonatör yapısı-1 (70 °C, 2.5dk, 40 mA)

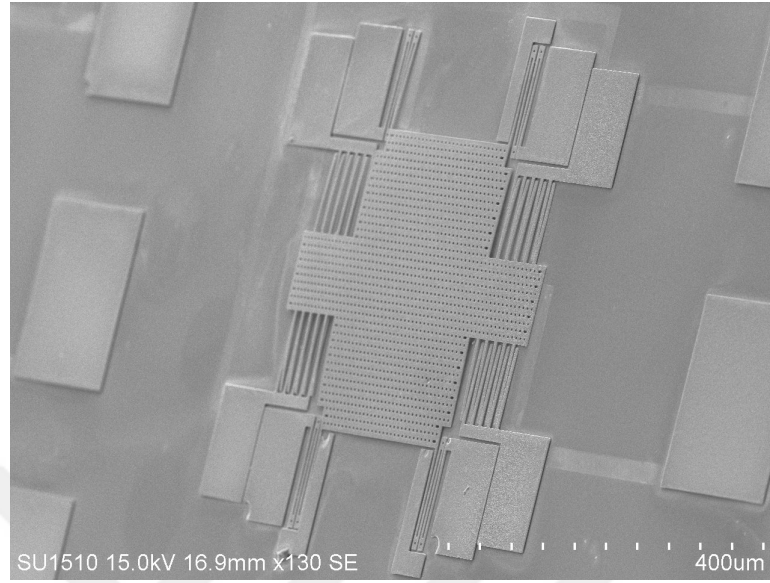


(b) Z yönünde salınan rezonatör yapısı-2 (70 °C, 2.5dk, 40 mA)

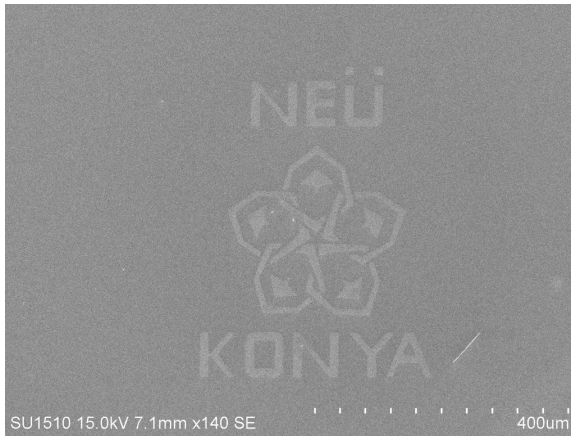


(c) Z yönünde salınan rezonatör yapısı-3 (70 °C, 2.5dk, 40 mA)

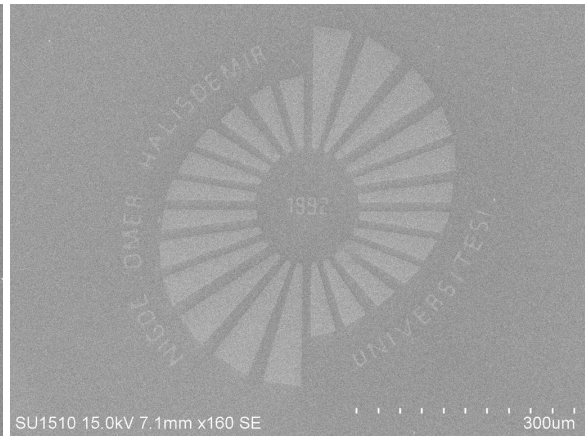
Şekil 3.17. Optimum değerlerde elde edilen z yönünde salınan MEMS rezonatörlerinin SEM görüntüleri



Şekil 3.18. 70 °C, 2.5 dk, 40 mA'de elde edilen yatay yönde salınan MEMS rezonatörü SEM görüntüsü

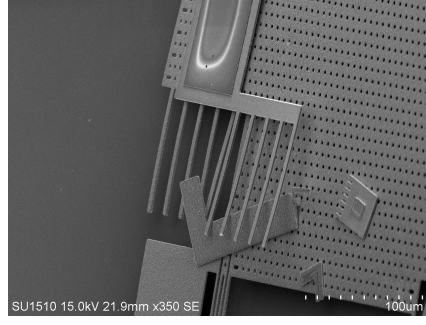


(a) Necmettin Erbakan Üniversitesi logosu

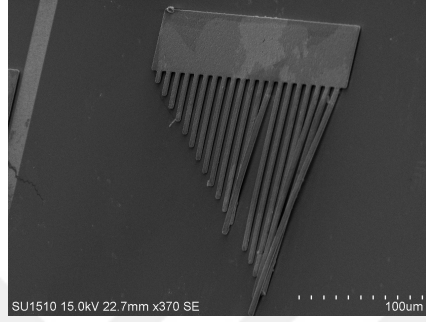


(b) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi logosu

Şekil 3.19. Üniversitelerin logolarının SEM görüntüleri

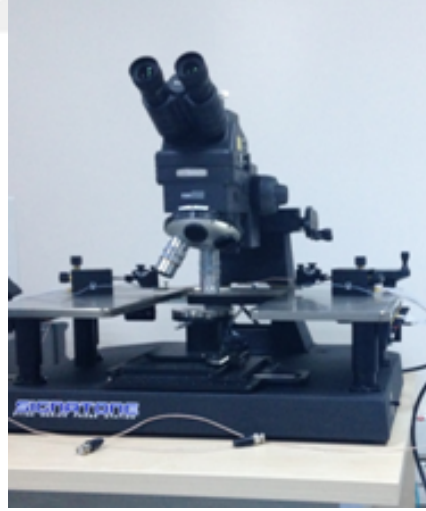


(a) Aşındırma süresinin fazla olması sonucu üst üste gelmiş MEMS yapıları



(b) Kaplama esnasında meydana gelen gerilimin burkulma test yapısı üzerindeki etkisi

Şekil 3.20. Üretim esnasında fazla aşındırma ve gerilimin MEMS yapıları üzerindeki etkilerinin hissedildiği SEM görüntüleri



(a) Prob istasyonu



(b) Empedans analizörü

Şekil 3.21. Laboratuvarda kullanılan prob istasyonu ve empedans analizörü fotoğrafları

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında ilk kez MEMS yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Hareketli olması istenen yapıların serbest olarak hareket ettikleri, askıda kaldıkları gözlemlenmiştir. Hareketsiz olarak üretilmesi planlanan yapılarında üretildiği gözlemlenmiştir. Ve böylece laboratuvarında ilk kez hem hareketli hem hareketsiz MEMS yapılarının üretimi başarılmıştır.

MEMS yapılarının üretiminde kullanılan temiz odada bu yapıların üretiminde gerekli olan birçok cihaz öğrenilmiştir. Ve temiz oda deneyimi artırılmıştır. Edinilen bu deneyimleri MEMS yapıları üretiminde deneyim sahibi olmak isteyen kişilerle paylaşarak daha sonra takım çalışmaları ile Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında daha farklı MEMS yapılarının üretimi ve optimizasyonların gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Nikel elektrokaplama ile üretilen MEMS yapılarının üretiminde sıcaklık, akım yoğunluğu gibi parametreler değiştirilerek gerilim optimizasyonları yapılmıştır. Optimizasyonların sonucunda 70 °C, 2.5 dk, 40 mA sıcaklık, süre ve akım değerinde gerilimin minimize edildiği kaliteli nikel yapıların üretilmesi başarılmıştır. Dolayısıyla çalışmada nikel elektrokaplama esnasında meydana gelebilecek gerilimleri azaltmak için sıcaklık ve akım yoğunluğu gibi parametrelerin değiştirilmesi önerilmektedir .

Yapılan bu çalışma ile üretim sürecinde en baştan en sona tüm adımların dikkatli bir şekilde izlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Hareketli yapıların oluşturulması için bakır heba malzemesi kaplanmadan önce yapıştırıcı katman olarak kullanılacak olan alüminyum malzeme oluşturulan metal yollar üzerine kaplanmıştır. Daha sonra ise bakır heba malzemesi bu yapıştırıcı alüminyum katmanı üzerine kaplanmıştır. Bu bakır heba tabakasının üzerinde nikel yapılar oluşturulduktan sonra bakır heba tabakası uygun aşındırıcılar ile ortamdan uzaklaştırılmıştır. Sonra yapıştırıcı alüminyum katman ortamdan uzaklaştırılmıştır. Yapıştırıcı alüminyum katmanın ortamdan uzaklaştırılması aşamasında, kalınlık farkından dolayı zaman kontrollü aşındırma ile yapıştırıcı alüminyum katmanın altında bulunan alüminyum metal yolların zarar görmeden aşınacağı öngörülmüştü. Fakat alüminyum metal yollarında yapıştırıcı alüminyum katmanın aşınması esnasında aşındığı gözlemlenmiştir. Alüminyum metal

kaplamasının eşdağılımlı bir şekilde olmaması ve alüminyum malzemesinin yeterli saflıkta olmamasından dolayı bu sorunun olduğu anlaşılmıştır. Metalizasyonda oluşturulan alüminyum metal yollar üzerine ekstra bakır kaplandıktan sonra yapıştırıcı alüminyum katmanı oluşturulması ile bu problemin minimize edilebileceği öngörülse de yeterli kazanımın elde edildiği düşünüldüğünden malzeme ve zamandan daha fazla harcamamak adına bu geliştirilmenin yapılmamasına karar verilmiştir.

Kalın nikel yapılar oluşturmak için kalın fotorezist ma-P 1275 kullanımı düşünülmüştür. Fakat bu fotorezistin litografi optimizasyonlarında problemler meydana gelmiştir. Fotorezistin ortamdan uzaklaştırılmasında sıkıntılar yaşanmıştır. Dolayısıyla bu fotorezist yerine çok daha ucuz olan S1813 ince fotorezistin iki kat yapılarak kullanılması ile kalın yapıların elde edilebileceği görülmüştür. Ma-P 1275 dışında kalın fotorezistler denenebilir. Fakat S1813 fotorezistin çok katmanlı yapılar için optimizasyonunun yapılması ile de kalın yapılar meydana gelebilmektedir. Ve bu optimizasyon farklı üç boyutlu yapıların üretiminde güzel bir çözüm olabilir.

4.1. Tez Amacının Doğrulanması

Bu çalışma ile nikel elektrokaplamanın farklı kullanım alanları ile ve kullanılan nikel elektrokaplama banyoları ile ilgili geniş bir birikim elde edilmiştir. Hareketli ve hareketsiz MEMS yapılarının üretiminde kullanılan nikel elektrokaplamanın optimizasyonunun gerçekleştirilmesinde sıcaklık, akım yoğunluğu, zaman gibi parametreler değiştirilmiştir.

Nikel elektrokaplama banyosunun optimizasyonunda kaliteli MEMS yapılarının üretiminde kaplama esnasında meydana gelebilecek baskı geriliminin önemi çok büyüktür. Üretilen MEMS yapılarında baskı gerilimi altındayken bükülmeler meydana gelmektedir. Bu optimizasyondaki temel nokta sıcaklık ve akım yoğunluğu artırılarak baskı geriliminin minimize edilmesidir. Yapılan optimizasyonlar sonucunda amaçlanan kaliteli nikel yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde nikel elektrokaplama banyosuna eklenebilecek farklı bileşenlerle de gerilimin minimize edilmesi durumu düşünülmüş fakat yapılan optimizasyonlar çalışma süresinde yeterli görülmüştür.

Yapılan üretimler sonucunda hareketli ve hareketsiz MEMS yapıları elde edilmiştir fakat hareketli olan yapıların iletim yollarının aşınması sebebiyle çalışmadığı görülmüştür. Üretim aşamasında yapıştırıcı alüminyum katmanının zaman kontrollü aşınması esnasında al-

tında kalan metal yolların aşınmaması öngörülmüştür. Fakat metal yolların da aşındığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı alüminyum katmanı ile iletim yolları arasında farklı bir katmanın oluşturulmasıyla bu problemin çözülebileceği anlaşılmıştır.

Temiz alan içerisindeki cihazların çalışması iyi derecede öğrenilerek temiz alan kazanımları artırılmıştır. Ayrıca Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarında ilk kez hareketli ve hareketsiz MEMS yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir.

4.2. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Nikel elektrokaplama düzeneğinde sıcaklık, akım yoğunluğu, zaman gibi parametreleri değiştirerek gerçekleştirilen optimizasyon dışında nikel elektrokaplama banyosuna farklı kimyasal ekleyerek oluşacak baskı geriliminin optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Ek olarak gerilimin azaltılması için daha kontrollü bir elektrokaplama düzeneği oluşturulabilir.

Daha yüksek en boy oranına sahip nikel yapıların oluşturulmasında ma-P 1275 kalın fotorezistinden daha farklı bir fotorezist tercih edilebilir ya da bu fotorezistin optimizasyonları için daha fazla zaman ayrılabilir.

İletim yollarının zarar görmemesi için yapıştırıcı katman yerine daha farklı bir malzeme ya da yapıştırıcı katman ile iletim yolları arasında bir katman daha olması çalışan bir prototip elde etmek için güzel bir çözüm olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Wen H Ko. Trends and frontiers of mems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1):62–67, 2007.
- [2] Birgöl Benli. Nanoteknoloji ve antik çağlara uzanan killi nanoyapılar. *Journal of Clay Science and Technology*, 3:143–162, 2009.
- [3] Amitabha Ghosh and Burkhard Corves. *Introduction to micromechanisms and microactuators*, volume 28. Springer, 2015.
- [4] Robert R Schaller. Moore’s law: past, present and future. *IEEE spectrum*, 34(6):52–59, 1997.
- [5] Jack St Clair Kilby. Turning potential into realities: The invention of the integrated circuit (nobel lecture). *ChemPhysChem*, 2(8-9):482–489, 2001.
- [6] Kensall D Wise. Integrated sensors, mems, and microsystems: Reflections on a fantastic voyage. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1):39–50, 2007.
- [7] Kurt E Petersen. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5):420–457, 1982.
- [8] Wolfgang Kuehnel and Steven Sherman. A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry. *Sensors and Actuators A: Physical*, 45(1):7–16, 1994.
- [9] F Paoletti, M-A Gretillat, and NF de Rooij. A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation. In *Micro Electro Mechanical Systems, 1996, MEMS’96, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. IEEE, The Ninth Annual International Workshop on*, pages 162–167. IEEE, 1996.
- [10] Joan B Berkowitz and Newton H Emerson. Plating methods, a survey. 1972.
- [11] M. A. Erişmiş. MemS accelerometers and gyroscopes for inertial measurement units. *The*

graduate school of natural and applied sciences of middle east technical University,
2004.

- [12] Laurent Dellmann, S Roth, C Beuret, L Paratte, G-A Racine, Hubert Lorenz, M Despont, Philippe Renaud, Peter Vettiger, and Nicolaas F de Rooij. Two steps micromoulding and photopolymer high-aspect ratio structuring for applications in piezoelectric motor components. *Microsystem technologies*, 4(3):147–150, 1998.
- [13] Paulo S Motta and Jack W Judy. Micromachined probes for deep-brain stimulation. In *Microtechnologies in Medicine & Biology 2nd Annual International IEEE-EMB Special Topic Conference on*, pages 251–254. IEEE, 2002.
- [14] E. Topallı Sağıroğlu. *Mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) için vakum paketleme*. PhD thesis, Ankara Üniversitesi, 2008.
- [15] Brian H Stark and Khalil Najafi. A low-temperature thin-film electroplated metal vacuum package. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2):147–157, 2004.
- [16] Kabseog Kim, Daniel S Park, Hong M Lu, Wooseong Che, Kyunghwan Kim, Jeong-Bong Lee, and Chong H Ahn. A tapered hollow metallic microneedle array using backside exposure of su-8. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(4):597, 2004.
- [17] A Apolinário, P Quitério, CT Sousa, MP Proença, J Azevedo, M Susano, S Moraes, P Lopes, J Ventura, and JP Araújo. Bottom-up nanofabrication using self-organized porous templates. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 534, page 012001. IOP Publishing, 2014.
- [18] Alpkan Yılmaz. *Lokal Sert Dolgu Kaynağı Yöntemiyle Sıcak Çelik Dövme Kalıplarının Ömrünün Uzatılması*. PhD thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Mordechai Schlesinger and Milan Paunovic. *Modern electroplating*, volume 55. John Wiley & Sons, 2011.

- [20] Thomas E Buchheit, Joseph R Michael, Todd R Christenson, David A LaVan, and Steven D Leith. Microstructural and mechanical properties investigation of electrodeposited and annealed liga nickel structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(3):539–554, 2002.
- [21] P Ekkels, X Rottenberg, P Czarnecki, H Philipsen, R Mertens, R Puers, and HAC Tilmans. Air gap-based mems switch technology using nickel surface micromachining. *Sensors and Actuators A: Physical*, 166(2):256–263, 2011.
- [22] J Matovic. Application of ni electroplating techniques towards stress-free microelectromechanical system-based sensors and actuators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(11):1645–1654, 2006.
- [23] IR Chertkow, NA Travitzky, A Moshaiov, and AS Inberg. Microelectroplating of nickel for mems applications. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 1(3):43–48, 1999.
- [24] E Slavcheva, W Mokwa, and U Schnakenberg. Electrodeposition and properties of niw films for mems application. *Electrochimica Acta*, 50(28):5573–5580, 2005.
- [25] Nosang V Myung, D-Y Park, B-Y Yoo, and Paulo TA Sumodjo. Development of electroplated magnetic materials for mems. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 265(2):189–198, 2003.
- [26] JK Luo, M Pritschow, AJ Flewitt, SM Spearing, NA Fleck, and WI Milne. Effects of process conditions on properties of electroplated ni thin films for microsystem applications. *Journal of the Electrochemical Society*, 153(10):D155–D161, 2006.
- [27] Manjula Sutagundar, BG Sheeparamatti, and DS Jangamshetti. Research issues in mems resonators. *Res Inven Int J Eng Sci*, 4(8):29–39, 2014.
- [28] R. F. Yazıcıoğlu. *Surface Micromachined Capacitive Accelerometers Using MEMS Technology*. PhD thesis, Middle East Technical University, 2003.

- [29] MA Erismis. Design and modeling of a new robust multi-mass coupled-resonator family with dynamic motion amplification. *Microsystem technologies*, 19(8):1105–1110, 2013.
- [30] Liwei Lin, Albert P Pisano, and Roger T Howe. A micro strain gauge with mechanical amplifier. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6(4):313–321, 1997.
- [31] VT Srikar and SM Spearing. A critical review of microscale mechanical testing methods used in the design of microelectromechanical systems. *Experimental mechanics*, 43(3):238–247, 2003.
- [32] M. Tilli, M. Paulasto-Krockel, T. Motooka, and V. Lindroos. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. Micro and Nano Technologies. Elsevier Science, 2015.
- [33] Said Emre Alper. Mems gyroscopes for tactical-grade inertial measurement applications. *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Middle East Technical University.*, 331, 2005.
- [34] Paul R Gray, Paul Hurst, Robert G Meyer, and Stephen Lewis. *Analysis and design of analog integrated circuits*. Wiley, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yasemen İNCE
Uyruğu : Türk
Doğum Yeri ve Tarihi : Ereğli-KONYA, 1992
Telefon :
Faks :
e-mail : kardelennc49@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	Ereğli Anadolu Lisesi, Konya	2010
Lisans	KTO Karatay Üniversitesi	2016
Yüksek Lisans		
Doktora		

İŞ DENEYİMLERİ

2017	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
------	------------------------------------	---------------------

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

İnce Y., Erişmiş M.A., Elektrokaplama ile MEMS Rezonatör ve MEMS Test Yapılarının Üretilmesi, 3rd International Congress on Engineering, Architecture and Design, 2018