T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUAL AXİS DRİVE YÖNTEMİYLE VRG İÇİN SİSTEM HASSASİYETİ ARTIRMA

Cihan EFİL

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2020

Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÖKTAŞ danışmanlığında Cihan EFİL'in hazırladığı "**Dual axis drive yöntemiyle VRG için sistem hassasiyeti artırma**" konulu bu çalışma 17/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÖKTAŞ

Üye : Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ

Üye : Doç. Dr. Fikri Serdar GÖKHAN

Bu Tezin Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 2
3. MATERYAL ve YÖNTEM 6
3.1. MEMS 6
3.1.1. Materyal ve özellikleri 8
3.1.2. Üretim yöntemleri 11
3.2. Gyroscope 18
3.2.1. Coriolis kuvveti 20
3.2.2. VRG 22
3.2.2.1 Rezonans karakteristiği 24
3.2.2.2 Yay sistemi 33
3.2.2.3 Actuation mekanizması 34
3.2.2.4 Algılama 36
3.2.2.5 ASIC tasarımı 38
3.2.2.6 Damping 40
3.2.2.6.1 Viscous damping 40
3.2.2.6.2 Structural damping 41
3.3. Yöntem 42
3.3.1. Proof mass 46
3.3.2. Actuation mekanizması 50
3.3.3. Mikrosuspensiyon sistemi 53
3.3.1. DDA yöntemi 56
3.3.1.1 Pull-in durumu 61
3.3.2. Sense ve readout 63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 66
4.1. Kalite Faktörü 70
4.2. Çıktı Değerlendirme ve Kazanç 71
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 74
KAYNAKLAR 76
ÖZGEÇMİŞ 79
EKLER 80

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DUAL AXİS DRİVE YÖNTEMİYLE VRG İÇİN SİSTEM HASSASİYETİ ARTIRMA

Cihan EFİL

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÖKTAŞ
Yıl: 2020, Sayfa: 81

Bu makalede Vibratory Rate Gyroscope (VRG) için sistem hassasiyetini arttıracak bir yöntem önerilmiştir ve Finite Element Analysis (FEA) yöntemiyle analiz edilmiştir. MEMS teknolojisinde üretilen cihazlar fabrikasyon yöntemlerinin elverdiği ölçüde minimum boyutlarda üretilirler. Küçülen boyutlar, sistem outputundan okunan değerlerinde küçük olmasına ve noiseden kolayca etkilenebilmesine neden olmaktadır. VRG cihazlar için sistem hassasiyetini belirleyen sense outputundan okunan kapasite değeri birkaç femtofarad seviyesinde olmaktadır. Outputtan okunan değerin yükseltilmesi hem mekanik ve elektronik noiseden etkilenmesini azaltmayı sağlamakta hem de sistem hassasiyetinin artmasına neden olmaktadır. Klasik tasarımda comb drive ile tek yönde salınım yapan mass, decoupling frame üzerine eklenen Paralel Plate Actuator (PPA) yardımıyla sense ekseninde de salınım yapması sağlanmıştır. Bu sayede sistem outputundan alınan değerin klasik yönteme göre %30.11 kadar artmasına ve sistem hassasiyetinin yükselmesine neden olmuştur. Bu çalışmada 2-DOF (degree of freedom) drive-modunda, 1-DOF sense-modunda olacak şekilde gyroscope tasarımı yapılmıştır. Bunlardan ikisi drive ve sense modu oluştururken diğer frame ise hem iki modu birbirinden ayırmak hem de eklenen elektrot için drive görevini görecek decoupling frame'den oluşur.

ANAHTAR KELİMELER: Dual Axis Drive, Vibratory Rate Gyroscope, Sistem Hassasyeti artırma, Finite Element Analysis, Paralel Plate Actuator

ABSTRACT

MSc Thesis

INCREASING SYSTEM SENSITIVITY FOR VRG BY APPLYING DUAL AXIS DRIVE

Cihan EFIL

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hasan GÖKTAŞ

Year: 2020, Page: 81

In this article, a method to increase system sensitivity is proposed for Vibratory Rate Gyroscope (VRG) and analyzed by Finite Element Analysis (FEA) method. The devices produced in MEMS technology are produced in minimum dimensions as far as the fabrication methods allow. The diminished dimensions cause it to be small in the values read from the system output and can be easily affected by the noise. For VRG devices, the capacity value read from the sense output, which determines the system sensitivity, is at several femtofarad levels. Increasing the value read from the output not only affects the mechanical and electronic noise, but also increases the system sensitivity. In the classic design, the mass that oscillates in one direction with the comb drive also oscillates on the sense axis with the help of Parallel Plate Actuator (PPA) added on the decoupling frame. In this way, the value obtained from the system output increases by %30.11 compared to the classical method and increases the system sensitivity. Gyroscope was designed to be in 2-DOF (degree of freedom) drive-mode and 1-DOF sense-mode. While two of them create drive and sense modes, the other frame is decoupling frame, which will both act as a drive for separating the two modes and for the added electrode.

KEY WORDS: Dual Axis Drive, Vibratory Rate Gyroscope, Increasing System Sensitivity, Finite Element Analysis, Parallel Plate Actuator

TEŞEKKÜR

Tezin konusunun seçiminde, uygulamasında ve çalışmamda yardımlarını esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÖKTAŞ'a; çalışmamda yardımcı olan laboratuvar arkadaşlarım Duygu SAĞALTICI, Yasin ARSLAN, Enes ARI ve Yusuf EREN'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam boyunca bana maddi ve manevi destek veren aileme teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Greiff (1991) tarafından üretilen VRG 2
Şekil 2.2. a) VRRG tasarımı (Ayazi ve Najafi, 2001), b) Söderkvist (1994)'in ürettiği VRG 3
Şekil 3.1. Transistor boyutlarının gelişimi 7
Şekil 3.2. Silikon ve hava için tasarımda kullanılan metal özellikleri 9
Şekil 3.3. Young's modulus gösterimi 10
Şekil 3.4. Possion's rate gösterimi 10
Şekil 3.5. Photolitography aşamaları (Yilbas ve ark., 2019) 11
Şekil 3.6. Deposition işlemi (Singh ve ark., 2015) 12
Şekil 3.7. LIGA yöntemi (Almuramady, 2018) 13
Şekil 3.8. Sacrificial yüzey aşındırma ile structural yüzey oluşturma 14
Şekil 3.9. Plazma aşındırma gösterimi 15
Şekil 3.10. DRIE yapım aşamaları (Alper ve Akin, 2005) 17
Şekil 3.11. Aynı paket içinde birçok MEMS cihazın bir arada olması (Allen, 2005) 17
Şekil 3.12. CMOS kısmın ilk yapıldığı sistemden bir görüntü (Allen, 2005) 18
Şekil 3.13. a)Eski savaş uçaklarında kullanılan gyroscope, b)Iphone 4'de kullanılan gyroscope 19
Şekil 3.14. Gyroscope türleri 19
Şekil 3.15. Dünyanın döndüğünü Foucault sarkacı tarafından kanıtlandığı ana ait bir resim 20
Şekil 3.16. Corilious efektin görsel olarak gösterimi 21
Şekil 3.17. Sabit ve açısal hıza sahip frame gösterimi 21
Şekil 3.18. SEM altında bir VRG görünümü (Yin ve ark., 2011) 23
Şekil 3.19. VRG genel hatlarıyla gösterimi (Acar ve Andrei, 2008) 24
Şekil 3.20. 1-DOF rezanator modeli 24
Şekil 3.21. Multi-doff gösterim 25
Şekil 3.22. Mekanik gösterim 26
Şekil 3.23. VRG'un iki eksenli basitleştirilmiş çizimi 27
Şekil 3.24. 1-DOF rezanatör için Q faktörü(Acar ve Andrei, 2008) 30
Şekil 3.25. Gyroscope için önemli olan 1-DOF drive ve sense-mode salınım gösterimi 32
Şekil 3.26. Bazı süspansiyon çeşitleri (Acar ve Andrei, 2008) 33
Şekil 3.27. Mass etrafında yaylar bulunması durumunda gösterimi (Wai-Chi ve ark., 2010) 34
Şekil 3.28. Paralel plate actuation mekanizması 35
Şekil 3.29. MEMS üzerinde comb drive gösterimi 35
Şekil 3.30. Sensing kapasitansları (Allen, 2005) 37
Şekil 3.31. Charge integrator 37
Şekil 3.32. Module edildikten sonra demodule için low pass filter 38
Şekil 3.33. Sistemin bütün ASIC çizimi 39
Şekil 3.34. Gyroscope satışa hazır ürün son hali (Allen, 2005) 39
Şekil 3.35. Slide film damping 41
Şekil 3.36. Squaze film damping efekti 41
Şekil 3.37. Kullanılan fiziksel modüller 43
Şekil 3.38. a) Trinh ve ark. (2014) çalışması, b) Cao ve ark. (2018) çalışması 43
Şekil 3.39. Tasarımı yapılan Gyroscope tam gösterimi 44
Şekil 3.40. Antiphase salınım 45
Şekil 3.41. Dereceye göre displacement in grafiksel gösterimi 45
Şekil 3.42. Proff Mass'ın bölümlerinin gösterimi 46
Şekil 3.43. a) Drive mode frekansında salınım, b) Frekanslara göre displacement 47
Şekil 3.44. Elektriksel bağlantı 47
Şekil 3.45. Sense modda salınım 48
Şekil 3.46. Sense mass paralel plate gösterimi 49
Şekil 3.47. Tasarımda yapılan comb drive 50
Şekil 3.48. Drive kapasitans zamanla değişimi 51
Şekil 3.49. Yay tasarımı 54
Şekil 3.50. Yay sisteminin salınım halindeyken yakından görünüşü 54

Şekil 3.51. a) Klasik yöntemde hareket, b) DDA ile hareket 56
Şekil 3.52. a) C-mass görsel gösterimi, b) Grafik üzerinde gösterimi 57
Şekil 3.53. Pull-in grafiği 62
Şekil 3.54. Pull-in durumu 63
Şekil 3.55. Sense elektrot yakından görünüşü 64
Şekil 3.56. Dönme ile platelerin birbirine yaklaşması 64
Şekil 3.57. Gyroscope sensor sonrası AFE devresi 65
Şekil 4.1. Drive ve sense frekansı 66
Şekil 4.2. Sense ve drive frekansı exponansiyel gösterimi 68
Şekil 4.3. Kapasite farkı 72
Şekil 4.4. a) Tam dalga doğrultma çıktısı, b) Kondansatör ile doğrultma 72
Şekil 4.5. Lineerlik durumu 73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. MEMS üretim yöntemlerinin karşılaştırılması(Allen, 2005) 13
Çizelge 3.2. Sacrificial ve yüzey oluşturmanın uygulandığı sistemler (Allen, 2005) 14
Çizelge 3.3. Proff mass özellikleri 46
Çizelge 3.4. Comb drive parametreler..... 52
Çizelge 3.5. Yay sisteminin parametreleri 53
Çizelge 3.6. C-mass özellikleri 60
Çizelge 3.7. Sense elektrot özellikleri 65
Çizelge 4.1. Kalite faktörü parametreleri 71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ADC	Analog Digital Converter
AFE	Analog Front End
AM	Amplitude modulation
ARW	Angle Random Walk
ASE	Advanced Silicon Etching
ASIC	Application Specific Integrated Circuit (Uygulamaya Özel Tümleşik Devre)
CFA	Corilious Force Amplifier
C-mass	Coriolis Mass
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CVG	Coriolis Vibratory Gyroscope
DMD	digital mirror device (Texas Instruments)
DOF	Degree of Freedom
DRIE	Deep Reactive ion etching
EUV	Extreme ultraviolet lithography
FEA	Finite Element Analysis
FinFET	Fin Field-Effect Transistor
GLV	grating light valve (silicon light machines)
HAR	High Aspect Ratio
IMEMS	Integration of electronics and MEMS technology
LIGA	Litagrofi
LIGA	Lithographie, Galvanoformung, Abformung
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems
MUSIC	multi user silicon carbide (FLX micro)
NEMS	Nano-Electro-Mechanical-Systems
PMMA	Polymethyl methacrylate
PPA	Paralel Plate Actuation
RIE	Reactive ion etching
SEM	Scanning electron microscope
SUMMIT	Sandia ultraplanar, multilevel MEMS technology
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
VRG	Vibratory Rate Gyroscope
VRRG	Vibratory Rate Ring Gyroscope
VSG	Vibratory Structure Gyroscope
ZRO	Zero Rate Output

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesinde komponentlerin boyutlarının küçültülmesi önemli bir faktördür. Gittikçe boyutları küçülen ve ucuzlayan cihazların üretilmesiyle, bu cihazların herkes tarafından kolayca ulaşılması sağlanmıştır. MEMS de bu ilerlemenin sonucunda ortaya çıkan bir teknolojidir. Elektroniği ve mekaniği içinde barındıran mikro boyutlardaki sistemler olarak ortaya çıkmıştır. İlk olarak Nathanson ve Wickstrom (1965) tarafından yüksek bant geçiren transistor olarak bu kavramın ortaya çıktığını görmekteyiz. 1965 yılından beri oldukça gelişen üretim yöntemleri ile nano boyutlarda da elektromekanik sistemlerin üretilebilmektedir.

MEMS ile üretilen ürünler endüstride, biyomedikalde, savunma sanayi gibi birçok sektörde teknolojik altyapıda kullanılmaktadır. Biyomedikalde mikrofluidic sistemler ile tanı ve teşhis için hassas cihazlar üretilebilmekteyken, savunma sanayisinde ise silahlar, roketler ve savunma sistemleri için hassas dayanıklı sensörler üretilebilmektedir. Bu sektörlerin yanı sıra gündelik hayatımızı kolaylaştıran birçok cihazda (telefon, tv, oyun konsolları, akıllı ev vb.) acceloremeter, gyroscope, magnetometer, termometre olarak bulunmaktadır.

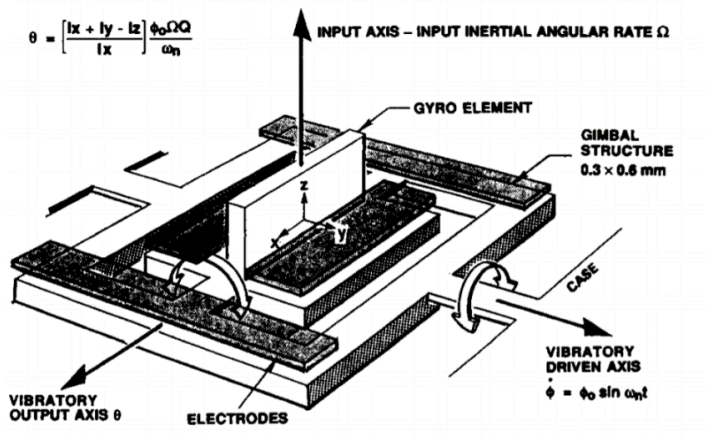
Gyroscope kullanıldığı alanın çokluğu ve üstesinden gelinen problemlerin çokluğu, geliştirilmeye açık bir alan olmasından dolayı üzerinde en çok çalışılan alanlardan biridir (Kreith ve Kreider, 2002). Bu çalışma alanlarına örnek olarak mevcut sistemlerin hassasiyet değerlerinin yükseltilmesi, hata değerlerinin düşürülmesi, çevresel koşullardan etkilenmemesi verilebilir

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

MEMS gyroscope ilk olarak Boxenhorn (1988) tarafından Vibratory Rate Gyroscope (VRG) adını ve yöntemini veren sistem ile semiconductor üretim teknolojisiyle üretilmiştir. Daha sonra (1991) yılında ürettikleri yeni gyroscope ile diğeri gibi el ile birleştirilmiş değil bunun yerine monolitik olarak tek parçadan üretim teknolojileri aracılığıyla tek parça silikondan üretilmişti (Şekil 2.1.). Boyutları $300\mu m \times 600\mu m$ olan 4 deg/s ve 1-Hz bant aralığında çalışıyordu. Daha sonra tunning fork yapısı Bernstein (1993) tarafından sisteme eklenerek yeni bir tür gyroscope üretilmiştir. Bu tasarımda farklı olarak 2 farklı gimbal kullanılmıştır. Bu gimballardan biri drive için diğeri sense olarak kullanılmaktaydı. Tasarım sayesinde performans artırılmış, üretim maliyeti düşürülmüş sistem 0.1°/s çözünürlüğe ve 60 Hz aralığına sahip bir cihaz üretilmiştir.

Zaman ve ark. (2008) tarafından closed-loop mode-matched sistemiyle otomatik olarak matched-mode yapan sistem geliştirildi. Tasarımda mekanik yapı yerine ASIC üzerine odaklanılmıştır. Kapasite çözünürlüğü 15 kHz de 0.02 aF/hz'dir.

Tsai ve ark. (2012) tarafından 240Hz gibi yüksek bant aralığına sahip gyroscope tasarımı doubly double decoupled yöntemiye sunulmuştur, sistem hassasiyeti 4.28 mV/rad/s'dir.

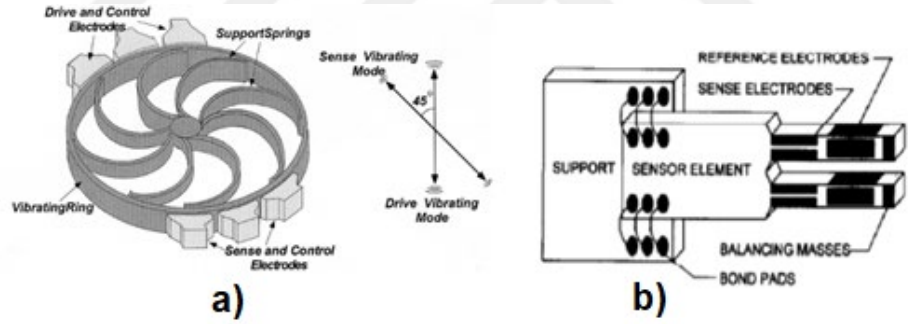


Şekil 2.1. Greiff (1991) tarafından üretilen VRG

Geleneksel yöntemlerin dışında farklı gyroscope tasarım yöntemleri de bulunmaktadır. Piezoeletrik vibrating gyroscope yaylar ile sabit yüzeye bağlı olmak zorunda değildir. Quartz malzemenin yapısından dolayı elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek titreşim sağlanmaktadır. Söderkvist (1990) ilk piezoelektrik gyroscope'u bu mantığa göre üretti.

Işık hızını dönü ölçmek için kullanan fiber optik gyroscope Vali ve Shorthill (1976) tarafından tasarlanmıştır. Bu tasarım üretim imkânlarının yeterli olmaması nedeniyle, üretimi ilerleyen zamanlarda gerçekleşmiştir.

Vibrating ring gyroscopeları bir halka ve bunu destekleyen 8 tane yay ile oluşmaktadır (Şekil 2.2.). Drive elektrotuyla salınım yapan halka coriolis kuvvet nedeniyle oluşturduğu yer değişimi sense elektrotlarıyla algılanmaktadır(Ayazi ve Najafi, 2001).



Şekil 2.2. a) VRRG tasarımı (Ayazi ve Najafi, 2001), b) Söderkvist (1994)'in ürettiği VRG

Acar ve Shkel (2005) sense ve drive modelarının birbirine olan etkisini engellemek için bir yenilik gerçekleştirdi. Bunun yanında bu yenilik hem detection hem de actuation kapasitesini arttırıyordu. Fabrikasyon sonucunda geleneksel modele göre kapasitans değerinin arttığı ve geleneksel modele göre 7.22 kat actuation kuvvet farkı gözlenmiştir. Bunun yanında atmosfer basıncı altında 0.91mV/s/° sensitivity ve 0.25°/h/√Hz noise sağlanmıştır.

Zaman ve ark. (2008) tarafından closed-loop mode-matched sistemiyle otomatik olarak matched-mode yapan sistem geliştirildi. Quadrature hatalarını engellemek için

proof massın köselerine quadrature hatası düşürme elektrotları koymuşlardır. Bu elektrotlar quadrature hatası olduğu zaman sistemi eski konumuna getirerek hatayı engellemektedir. Tasarladıkları yöntemle sense ve drive modelar arasında frekans ayrımı ortadan kaldırılabilmektedir. Sistem hassasiyeti 83 mV/deg/s olarak ölçülmüştür.

Wang ve ark. (2011) yaptıkları cihazla kalite faktörü üzerine odaklandılar. Burada iki operasyon modu için kalite faktörü olarak 15.7kHz de 255.000 ve 103.000 olan bir cihaz ürettiler. Sistem genel çözünürlük oranı 0.37°/h/√Hz'dir

Tsai ve ark. (2012) tarafından 240Hz gibi yüksek bant aralığına sahip gyroscope tasarımı doubly double decoupled yöntemiyle sunulmuştur, Sistem toplamda 3 mass drive için 3 mass da sense için olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir mass ın ayrı drive veya sense elektrodu bulunmaktadır. Masslar coupling yaylarıyla birbirine tutturulmuştur. Burada her drive massının oluşturduğu frekans peakiyle sense massının oluşturduğu peakı toplayarak bant aralığı arttırılmıştır. Sistem hassasiyeti 4.28 mV/rad/s.

Acar ve ark. (2001) tarafından üretilen yöntem geleneksel yönteme göre 15 kat bant aralığının artmasını bunun yanında yapısal ve termal parametrelerdeki dalgalanmaları büyük oranda azalmasını sağlamaktadır. Tasarımda tek mass yerine drive olarak bir mass sense olarak diğer mass kullanılmıştır

Bunlardan ısı sorununa çözüm için Chang ve ark. (2015) yaptığı arch-shaped termistör ile ısıl-indüklenmiş ısı dağılımını sağlayan sistemler üretilmiştir. Sistem termal indüklenmiş stresi 88.7% oranında düşürürken, geleneksel yönteme göre %47.32 kazanç sağlamaktadır.

Thermal nedenlerden dolayı oluşan natural frekanstaki kaymaları engellemek için suspension tasarımında bir yenilik yapmışlardır. Yapılan yöntemde sıcaklıkla frekans değişimini 5.5 den 0.038 Hz/ °C düşmesine neden olmaktadır (Wang ve ark. 2014).

Sürüş modu (drive mode) ve algılama modu (sense mode) için otomatik bant eşleşmesi sistemini Soner Sonmezoglu ve ark. (2014) tarafından çalışılmıştır. Ürettikleri gyroscope ile <10-ppm/Hz ile mod eşleşmesi (mode-matched) sağlamaktadır. Kalite faktörünü maksimize, frekansı ve sönümleme (damping) uyumsuzluğunu minimize eden mekanik bir tasarım yapmışlardır. Yaptıkları sistemde kalite faktörü 2kHz frekansta 0,64 ve 0,86 milyondur (Trusov ve ark., 2011). Saqib ve ark. (2018) tarafından yüksek kazançlı, elektro-termal yöntemli harekete-geçirme (actuation) sistemle tasarlanılan MEMS jiroskopta 0.2V harekete-geçirme gerilimi kullanmıştır. Bununla birlikte sürüş modunda 18.6um genlik kazanırken algılama modunda hava basıncı ortamında 0.15um, vakum ortamında 4.5um genliğe ulaşmıştır

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Üretilecek sensör 1mm boyutlarındadır. Bu boyutlarda bir cihazı üretmek hem çok maliyetlidir(seri üretim olmadığı durumda) hem de üretim konusunda ulaşılabilirlik, laboratuvar imkânları ve malzeme temini konularında sorunlar yaşanabilmektedir. Bu yüzden üretimden önce her türlü etkenin değerlendirilmesi gerekmektedir ve üretim yapılmadan önce hazırlıklı olunmalıdır. Birçok üretim aşaması vardır ve değerlendirilmesi gereken konular bulunmaktadır. Bu konular ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

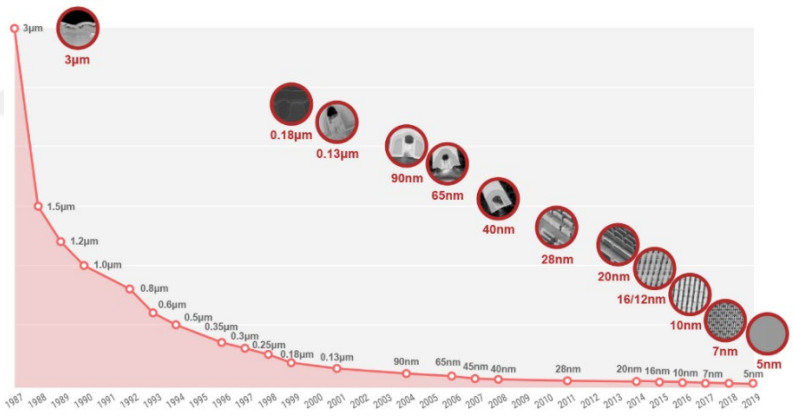
Üretilmek istenen bir cihazın çalışıp çalışmayacağını ve çeşitli çevresel koşularda nasıl tepki göstereceğini görmek için FEA (Finite Element Analysis) programları kullanılmaktadır. Bu programlar aracılığıyla ısı transferi, elektrostatik kuvvet, sıvı akışı, mekanik etkiler, doğal frekans bulma vb. gibi alanlarda analiz yapılabilmektedir.

3.1. MEMS

Mikro mekanik sistemler (MEMS) 1 mm den küçük ve 1µm den büyük, içinde elektronik ve mekanik sistemler bulunan cihazları adlandırmak için kullanılır. Genel olarak tarif edilecek olursa bir merkezi kütlenin etrafında bunu hareket ettiren actuation mekanizması ve sistemdeki değişimi algılayan sense bölümünden oluşur. MEMS cihaz üretilirken birçok materyal kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları silikon polisilikon, kristal, polymer, nikel, altındır. Kullanılan üretim yöntemine ve istenilen cihaz özelliklerine göre materyal kullanımı çeşitlenebilir.

Araç-gereç yapımı insanı diğer türlerden ayıran önemli bir özelliktir. Araç kullanarak diğer canlılara karşı avantaj sağlamıştır ve diğer canlılara göre daha güçlü olmuşlardır. Araçlar zaman geçtikçe hayatta kalma için ve diğer canlılara karşı üstünlük sağlamak için değil yaşam standartlarını artırmak için kullanılmıştır. Bu da teknolojinin gelişmesiyle olmuştur. Teknolojinin ilerlemesi aynı zamanda boyutlarının

küçülmesini sağlamıştır. Tarihsel olarak bakacak olursak eğer insanın hayatta kalabilmesini sağlayan en ilkel mızrak yaklaşık 400bin yıl önce kullanılmıştır. Daha sonra mekaniğin gelişmesiyle üretilen cihazların boyutları iyice küçülmüştür ve birkaç santim boyutlarındaki saat parçaları yapımına ve daha sonrada mikroskopun icat edilmesiyle insan gözüyle ayırt edilemeyecek boyutlardaki parçaların üretimi yapılmaya başlamıştır. Bugün teknolojinin gelişmesiyle 5nm boyutlarına inmiştir (Şekil 3.1.). TSMC 2020 yılında 5nm EUV fabrikasyon teknolojisiyle FinFET transistorları ticari satışına başlayacaklarını duyurdu. MEMS için ise bu boyutlar minimum boşluk seviyesi 1um olacak şekilde üretim sağlanabilmektedir. Bu boyutlardaki cihazlar için üretim tekniklerinin geliştirilmesi cihaz hassasiyetlerinin arttırılması ve üretim nedenli sorunları geliştirme konusunda çalışmalar devam etmektedir. Despont ve ark, (2000) tarafından nano boyutlarda mekanik cihaz olan depolama ayıtı sayesinde NEMS sistemi ortaya çıkmıştır ve 2022 yılında $109M bir piyasaya ulaşacağı öngörülmektedir(Tao ve Degen, 2013).



Şekil 3.1. Transistor boyutlarının gelişimi

Mikro boyutlar altında sisteme etki eden temel kuvvetlerin önem sırası değişmektedir. Örneğin yerçekimi kuvveti astronomik düzeylerde dominant bir kuvvettir. Gezegenimizin hareketini, ayın hareketini, güneşin ve galaksilerin hareketlerini belirleyen kuvvettir ama mikro boyutlarda çok etkili olan bir kuvvet değildir. Bunun yanında suyun neden olduğu yapıştırma etkisi insan boyutlarındaki dünyada önemsiz kabul edilirken mikro düzlemde önemli bir etmendir. Bunların dışında elektrostatik kuvvet, manyetik alan kuvveti gibi kuvvetlerde daha önemli kuvvetler olmaktadır.

3.1.1. Materyal ve özellikleri

MEMS cihazlarda birçok materyal kullanılmaktadır. Bunlar tasarlanılan cismin boyutuna esnekliğine ve üretim teknolojisini göre çeşitlenmektedir. Örneğin rezanatör için materyalin ısınma ve esneklik katsayısı önemliyken ivmeölçer için elektriksel iletkenlik önemli olmaktadır. Yapılacak cihaz hangi özelliklerde olması isteniyorsa ona göre temel materyal seçilir ve tasarım bu doğrultuda yapılır. Belli başlı materyallere bakacak olursak bunlar karbon, amorf ve kristal yapılarda bulunmaktadır. Kristal yapıda bulunan formu sertliği, gücü ve yapışmama özellikleri nedeniyle Mems tasarımlarda kullanılmaktadır ve fotolitografi yöntemiyle şekillendirilmektedir. Nikel ve Nikel-Demir alaşımı esneklik gerekmeyen; elektrik, ısı iletimi gereken tasarımlarda kullanılmaktadır. Alaşımdaki metallerin oranları ayarlanırken tasarım için gerekli esneklik, kırılma eşiği ve üretim aşamalarındaki uygulanabilirlik durumlarına göre tercih edilir. Tasarım yapılırken LIGA tekniği uygulanabilmektedir. Bunların yanında en çok kullanılan ve test edilen Mems materyali polisilikondur. Polisilikon için yapılan testler sonucunda Young's modulus değeri 163 ile 166 GPA değerleri arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Tek-kristal silikona göre daha ucuz olmasından dolayı tercih edilir. Tek-kristal silikon da çok kullanılan bir MEMS materyalidir, mekanik özellikleri polisilikona göre değişiklik göstermektedir. Karbid sertliği, güçlü olması, kimyasala ve sıcaklığa karşı kararlı olması nedeniyle çok kullanılan materyallerdendir. İnce-film üretim teknolojisinde kullanılmamaktadır, bunun yerine kütle üretiminde kullanılmaktadır. Bu materyali üretmek oldukça zor ve pahalı bir süreçtir. Bunların yanında Silikon-nitrit ve Silikon-oksit üretim aşamalarında kimyasal etching uygulanırken izolasyon tabakası oluşturmak için kullanılır.

Materyallerin uygulanacak fiziksel etmenlere göre tepkileri çeşitlenmektedir. Gyroscope için solid mechanics ve elektrostatik kuvvet etkisi altında materyalin tepkileri önemlidir. Çalışmada kullanılan polisilikonun ve havanın özellikleri Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.

Silikon

	Property	Variable	Value	Unit	Property group
☑	Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ; a...	2.6e-6[1/K]	1/K	Basic
☑	Relative permittivity	epsilonr_iso...	11.7	1	Basic
☑	Density	rho	2329[kg/m^3]	kg/m³	Basic
☑	Young's modulus	E	170e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
☑	Poisson's ratio	nu	0.28	1	Young's modulus and Poisson's ratio
	Heat capacity at constant pressure	Cp	700[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic
	Thermal conductivity	k_iso ; kii = k...	130[W/(m*K)]	W/(m·K)	Basic

Hava

	Property	Variable	Value	Unit	Property group
☑	Relative permittivity	epsilonr_iso ;...	1	1	Basic
	Relative permeability	mur_iso ; mu...	1	1	Basic
	Dynamic viscosity	mu	eta(T[1/K])[Pa*s]	Pa·s	Basic
	Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma_iso ; si...	0[S/m]	S/m	Basic
	Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T[1/K])[J/(kg...	J/(kg·K)	Basic
	Density	rho	rho(pA[1/Pa],T[...	kg/m³	Basic
	Thermal conductivity	k_iso ; kii = k...	k(T[1/K])[W/(m*...	W/(m·K)	Basic
	Speed of sound	c	cs(T[1/K])[m/s]	m/s	Basic
	Refractive index, real part	n_iso ; nii = n...	1	1	Refractive index
	Refractive index, imaginary part	ki_iso ; kiii =...	0	1	Refractive index

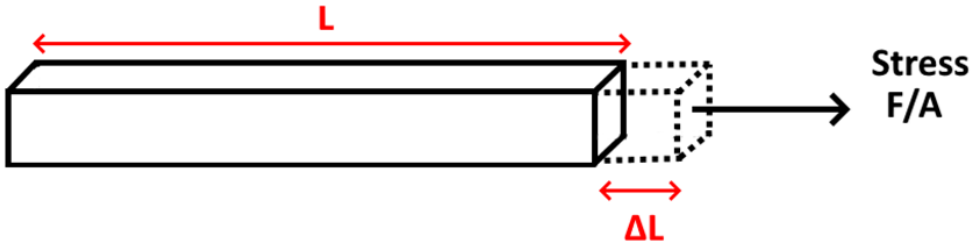
Şekil 3.2. Silikon ve hava için tasarımda kullanılan metal özellikleri

Gyroscope için materyalin esnekliği önemlidir. Doğal frekans bulurken yayların esneme katsayısını bilmek gerekmektedir. Esneklik durumunu belirten faktörler "Young's modulus" ve "Poissons Ratio" terimleridir. Bu değerlerin bilinmesi ve buna göre hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Aslında bu değerler tam olarak bilinememektedir. Bunun nedeni materyal özellikleri belirlenirken akademik olarak yöntemler hala üzerinde çalışılan bir konu olması. Ayrıca üretim aşamalarına göre bu değerler değişebilmektedir. Bundan dolayı ortalama tahmini değerler kullanılmaktadır.

Young's modulus katı bir materyalin katılığını ölçmek için kullanılır ve mekanik mühendislik için anahtar bir terimdir. Bir cisme kuvvet uygulandığında maksimum deforme olabilmesini gösterir, kuvvet bırakıldığında cismin eski haline gelebilmesi gerekmektedir. Young's modulus değerinin artması demek cismi deforme edebilmek için daha fazla kuvvet gerektiği anlamına gelir. Denklem 3.1'de formüle edilmiş şekilde görülmektedir.

$$E = \frac{Stress}{Strain} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \tag{3.1}$$

Burada E Young's modulus değerini paskal cinsinden ifade eder. F/A alan üzerine uygulanan kuvveti gösterirken $\Delta L/L$ ise bibirm uzunluk değişiminin bütün uzunluğa oranını verir (Şekil 3.3.)

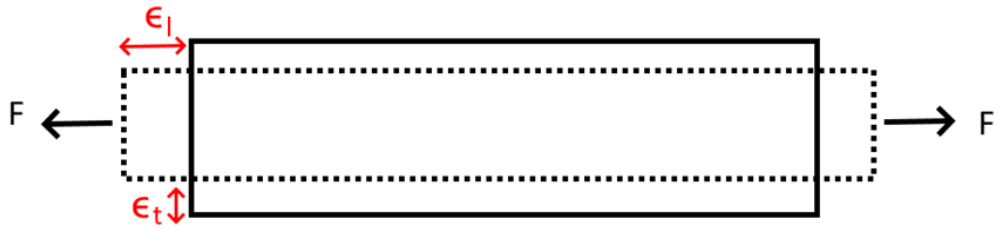


Şekil 3.3. Young's modulus gösterimi

Possion's ratio ise materyale çekildiği zaman incelme özelliği gösterir ya da baskı uygulandığında yanal alanı kalınlaşma eğiliminde olur. Yani Young's modulus ile meydana gelebilen materyaldeki değişim miktarıdır.

$$\mu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \tag{3.2}$$

Denklem 3.2'de μ Possion's rate değerini gösterir. Yanal, radyal ya da enine deformasyon için ϵ_t değeri kullanılırken, uzunlamasına ya da eksenel deformasyon için ϵ_l kullanılmıştır (Şekil 3.4.).



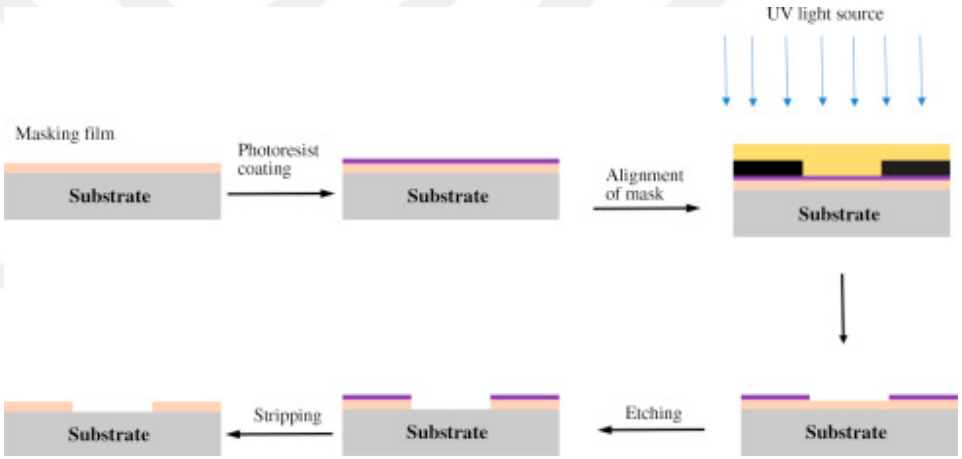
Şekil 3.4. Possion's rate gösterimi

Bu terimlerin dışında "relative permittivity" yüklü plakalar arasındaki elektriksel geçirgenliği ifade etmektedir. "Coefficient of Thermal expansion" maddenin ısıyla birlikte genleşme miktarını göstermektedir. Şekil 3.2.'deki diğer terimler sistemi daha az etkileyen ikinci dereceden etmenlerdir.

3.1.2. Üretim yöntemleri

Çeşitli üretim yöntemleri bulunmakla birlikte bunların ortak kullandığı yöntemler bulunmaktadır. Bunları phtolitography, etching ve deposition olarak sıralayabiliriz.

Photolitography fotoresist bir maske aracılığıyla istenilen dokunun wafer üzerine aktarılmasını sağlar. Bu yöntemde silikon wafer öncelikle $Si0_2$ ile katman oluşurulur. Daha sonra fotoresist yüzey spin coating yöntemiyle $Si0_2$ üzerinde oluşturulur. Ultraviyole ışın yardımıyla negatif veya pozitif olarak istenilen model wafer üzerinde oluşturulur (Şekil 3.5.).

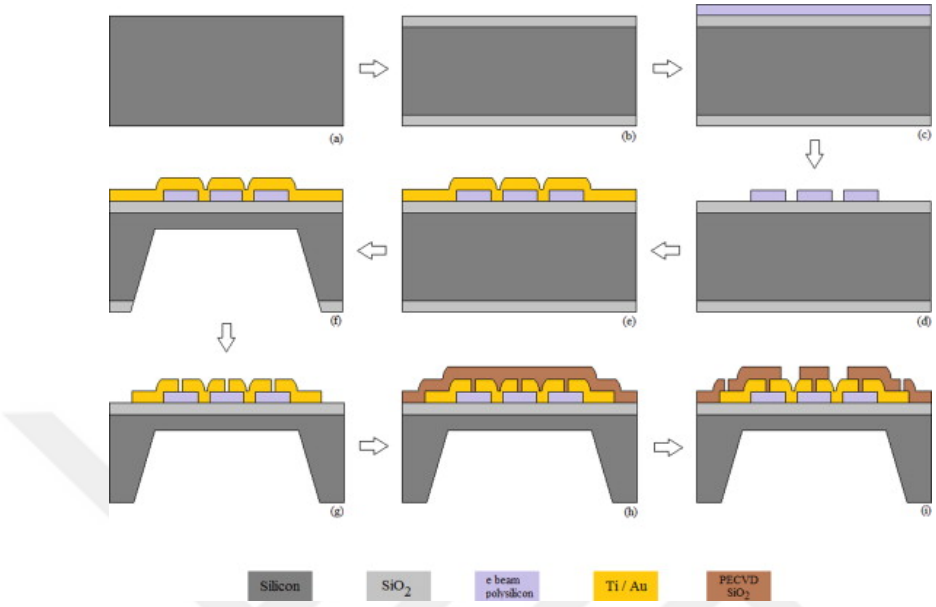


Şekil 3.5. Photolitography aşamaları (Yilbas ve ark., 2019)

Model wafer a aktarıldıktan sonra yapının bazı kısımlarının aşındırılması gerekmektedir. Bu etching yöntemiyle yapılmaktadır(Şekil 3.9.). Kuru veya kimyasal etching olarak ikiye ayrılır. Aşındırmanın fazla olmasının istendiği durumlarda RIE ve DRIE yöntemleri uygulanır. Bu yöntemlerde 1:100 seviyesinde HAR'a ulaşılabilmektedir.

Wafer üzerinde katman oluşturmak da belirli durumlar için gerekmektedir. Örneğin $Si0_2$ katmanı fotoresist yüzey uygulamadan önce kullanılmaktadır. Bunun dışında etching işlemi sırasın da kimyasalın yol alabileceği maksimum noktayı belirlemek için kullanılmaktadır. Sacrificial surface micromachining teknolojisinin

temel yöntemidir. Bu yöntemde 3D yapılar oluşturmak için deposition yöntemi çokça kullanılır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Deposition işlemi (Singh ve ark., 2015)

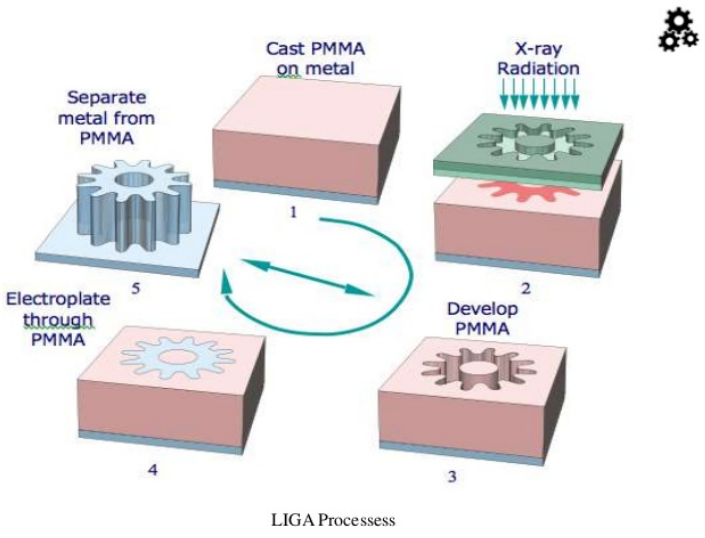
Tasarım üretilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Her yöntemin birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Hangi yöntemin seçileceğinin belirlenmesi için önemli birkaç faktör vardır. Bunları sıralayacak olursak:

- Ürün boyutu: Üretim yapılmak istenen tasarımdaki en küçük boyut
- Cihazın inceliği: incelik cihazın kütlesini ve sertliğini belirtir, bu da kullanılacak teknolojinin aspect ratio (çerçeve oranı) ile bağlantılıdır.
- Yanal boyut: Ne kadar genişlikte bir cihaz tasarlanacağı
- Hassasiyet: Teknolojinin hassasiyeti (boyutsal kesinlik)
- Materyal: Üretimde hangi materyalden faydalanacağı
- Montaj gereksinimleri: Fonksiyonel Mems cihazı üretmek için montaj gereksinimleri bulunmaktadır.
- Ölçeklenebilirlik: Gerektiği zaman çok sayıda cihaz üretilecekse bunun için uygun teknoloji seçimi yapılır.
- Mikro elektronik devrelerle entegre edilebilirlik: Aynı cihazda elektronik devre olması durumunda kullanılan yöntem önemlidir.

Çizelge 3.1. MEMS üretim yöntemlerinin karşılaştırılması(Allen, 2005)

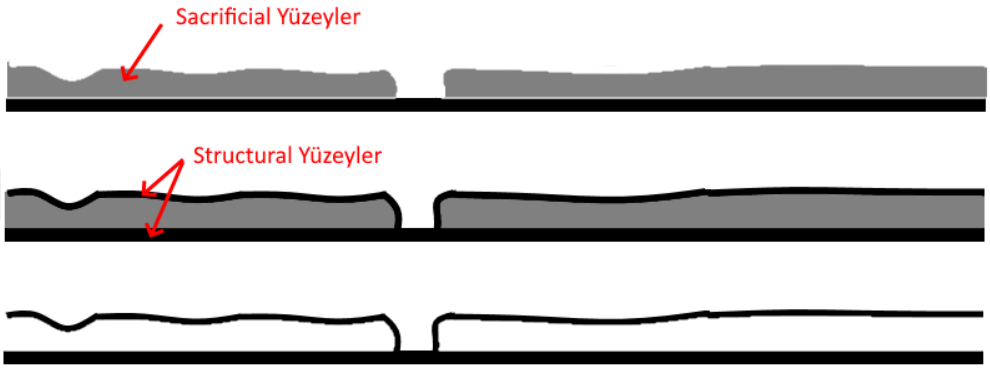
Özellikler	LIGA	Bulk Micromachining	Surface Micromachining	Geleneksel Micromachining
Özellik Boyutları	3-5um	3-5um	1um	10-25um
Cihaz inceliği	>1mm	>1mm	13um	Çok Büyük
Yanal boyutlar	>2mm	>2mm	2mm	>10m
Relative tolerans	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-1}$	$\sim 10^{-3}$
Materyal	Elektroplated metaller veya enjeksiyon eritilmiş plastik	Çok Sınırlı malzeme paketi	Çok Sınırlı malzeme paketi	Çok büyük malzeme yelpazesi
Cihaz geometrisi	2D ve HAR	2D ve HAR	Multilayer ve 2D	3D

LIGA işleminde metal yüzeylere uygulanır, kalınlığı milimetrelere ulaşabilen sistemlere uygulanabilir. Sistem x-ray litografi kullanır ve metal yüzeylere uygulanır. Kullanılan maskeleme yüzeyi altın, tungsten veya tantal gibi x-ray den etkilenmeyen yüzeler olmalıdır. Maskeleme yüzeyi ile aşındırma yüzeyi arasına yapışmayı sağlama için bir yüzey oluşturulur. Bu yüzey istenildiği zaman ortadan kaldırılabilmelidir, bunun için kullanılan materyale polyimide denir. Daha sonra ek bir yüzey oluşturulur, bu yüzeye "seed" adı verilir. Titanyum nikel alaşımı genellikle bu yüzeylerde kullanılır. En son olarak direnç materyali eklenir, bu da genel olarak PMMA dir.



Şekil 3.7. LIGA yöntemi (Almuramady, 2018)

Surface mikromachining bir yüzey üzerinde katman oluşturma, model oluşturma ve aşındırma yöntemleri ile yapılmaktadır. Oluşturulan yüzeylerde sucriface yüzeyler ve structral yüzeyler oluşturulması bu sistemin temelini oluşturmaktadır. Structural yüzeyler serbest salınım hareketi yapabilmektedirler. Sacrificial yüzeyler işlem sonrasında release etching yöntemi ile yüzey yok edilmektedir. Şekil 3.8'de üretim yöntemi gösterilmektedir. Post deposition yöntemi ile şekillendirilmiş yüzey 1100°C'de birkaç saat bekletilerek sertleşmesi sağlanır.



Şekil 3.8. Sacrificial yüzey aşındırma ile structural yüzey oluşturma

Polisilikon ve SiO_2 bu işlemler sırasında kullanılan temel materyallerdir. Release etching olarak hydroflouric acid genellikle kullanılır. Bu yöntem silikon dioksiti tamamen aşındırır buna karşı polisilikona çok az zarar verir. Aşındırma ve sacrificial yüzey olarak birçok materyal kullanılmaktadır bunların birkaçı Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir. Materyal seçiminde Young's modulus, kalıntı stresi, sertlik gibi materyal özellikleri önemli parametrelerdir. Yüzey micromachining genellikle 1µm ile 100µm arasında yapılır.

Çizelge 3.2. Sacrificial ve yüzey oluşturmanın uygulandığı sistemler (Allen, 2005)

Structural	Sacrificial	Release	Application
PolySi	SiO_2	HF	SUMMIT V
SiN	PolySi	XeF_2	GLV
Al	Resist	Plasma etch	TI DMD
SiC	PolySi	XeF_2	MUSIC

Son aşama olan release etching ile aradaki sacrificial yüzeyler temizlenir. Bunun için sistem, içinde hidroflorik asit olan sıvıya daldırılır. Bu kimyasal aşındırma sırasında birçok problem oluşabilir. Bunlardan biri aradaki sacrificial yüzeyin ortadan kalkmasından sonra alt ve üst yüzeyin birbirine yapışmasıdır.

Bulk micromachining teknolojisi kuru aşındırma (dry-etching) ve sıvı aşındırma (wet-etching) yöntemlerini kullanılarak gerçekleştirilir. Sıvı aşındırma silikon dioksit gibi amorf yapıda olan materyal ile maskeleme yapılan silikon yüzeyinin kimyasal ile aşındırılması işlemidir. Aşındırma işlemi izotropik ve anizotropik olabilir. İzotropik aşındırma sırasında kütle bir maske ile kaplandıktan sonra kimyasal sıvıya sokulur ve her taraf eşit olacak şekilde aşındırılır. Kimyasal sıvı karıştırılarak işlem uygulanır. Anizotropik aşındırma yöntemi istenilen alana istenildiği gibi müdahale edilebildiği için daha çok kullanılmaktadır. Aşındırma yapılacak alanlarda kristalografik özellikleri göz önünde bulundurularak daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.

Plazma aşındırma (kuru aşındırma) maskelenmiş yüzeye iyon gönderilerek yüzeyin istenilen boyutta aşındırılması işlemidir. Bu aşındırma işleminde sıvı aşındırmaya göre avantajı olunan nokta aşındırmanın düz bir hat şeklinde yapılabilmesidir (Şekil 3.9.).



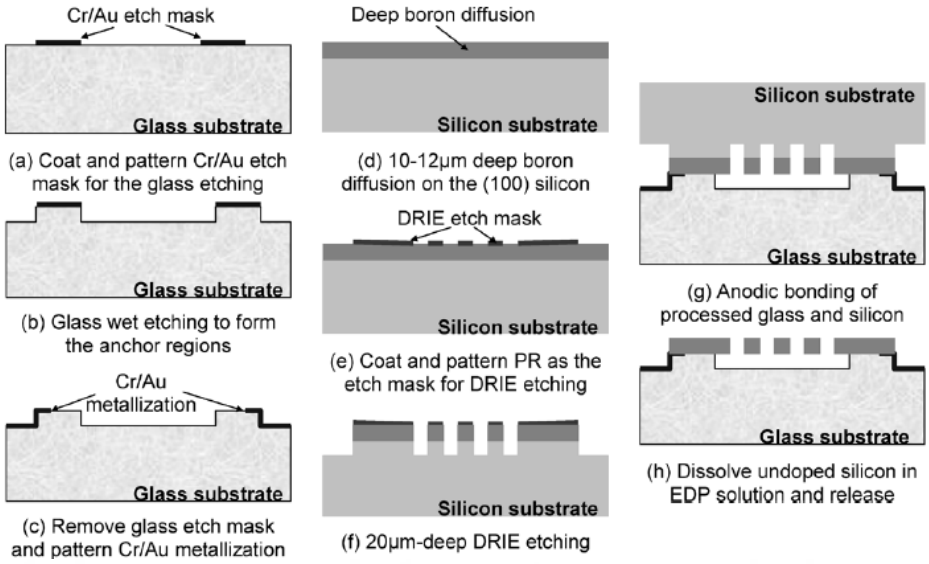
Şekil 3.9. Plazma aşındırma gösterimi

Plazma aşındırma seyreltik bir gaz içindeki iyonların elektrik alan etkisiyle maskelenmemiş yüzeylere doğrudan yönlendirilmesi durumudur. Plazma aşındırmada plazma yanında ek olarak kimyasal sıvı da kullanılabilir bu sisteme RIE denir. RIE

sisteminde aşındırma daha fazla olmaktadır. Bu sistemin dezavantajı kimyasal sıvının bulunması iyonun hareket ederken başka parçalarla çarpışmasına ve aşındırma işleminin doğrusal olmamasına neden olur.

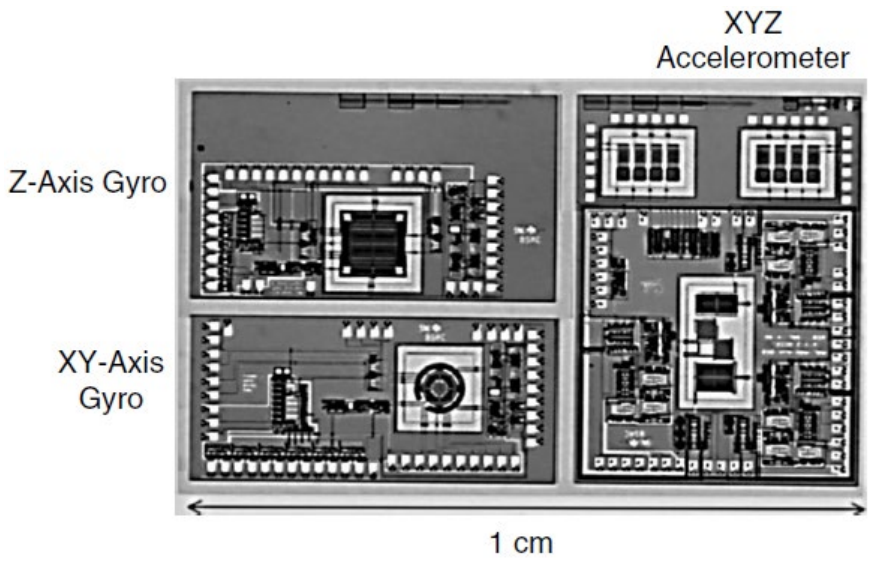
DRIE teknolojisi RIE'nin geliştirilmiş halidir. RIE ye göre yüksek aspect ratio (1:10'dan 1:100'e kadar) elde edebilmektedir. Bunun için fabrikasyon aşamalarında ileri aşındırma yöntemleri (ASE) dinginleştirme döngüleri kullanılmaktadır. PPA gibi yöntemlerde iki plakanın birbirine yakın olması (1um) ve bunun yanında yüzey alanının geniş olması gerekmektedir. Bundan dolayı gyroscope da çokça kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.10.'da gyroscope yapımı için DRIE teknolojisinin kullanımı gösterilmektedir. İlk önce SF_6 ile oyulmuş yüzey C_4F_8 ile ince bir tabakayla kaplama yapılır. Daha sonra hızlandırılmış iyonlar tek bir yönde olacak şekilde yüzeye uygulanır. Bu uygulama kenarlardaki kaplamaya zarar vermezken z ekseninde kaplamanın erimesini sağlar. Daha sonra Şekil 3.10.c deki gibi SF_6 ile tekrar oyma işlemi gerçekleştirilir. Oyma işlemi kaplama sayesinde duvarlara etki etmediği için z ekseninde aşınma sağlar. Bu yöntem istenilen HAR ya ulaşana kadar devam edilir. Aşındırma işlemi son katmanda SiO_2 ulaşana kadar devam edilir. SiO_2 sucrificial yüzey olduğu ve eritilmesi gerektiği için bu üretilen delikler aracılığıyla yapı HF ya da XeF_2 olan gazlar enjekte edilir ve bu katmanın eritilmesi işlemi gerçekleşir.

Mekanik hareket için quality faktörün yüksek olması gerekmektedir. Bunun için hava basıncının düşük olması gerekmektedir. Üretim sırasında bu sorunu çözmek için mekanik kısmı kapatacak şekilde wafer konulur sistemin üst kısmına alt waferla üst waferı birbirine bağlayabilmek için bonding yapılır. Bu cam pudrasından ya da Al-Si –Al-Ge alaşımlarından yapılabilmektedir.



Şekil 3.10. DRIE yapım aşamaları (Alper ve Akin, 2005)

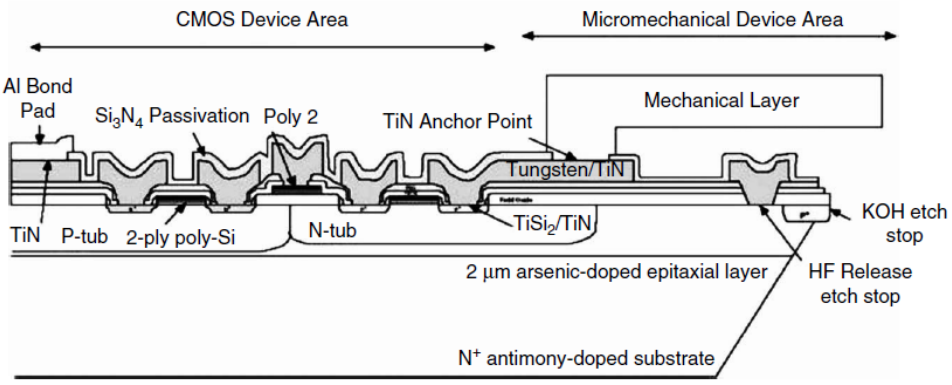
MEMS cihazıyla kontrol elektronik elemanlarının entegre edilmesi hassasiyetin artırılması açısından önemli bir konudur. Özellikle actuation mekanizmalarında birçok MEMS cihazın bir arada olması önemlidir. Bu sistemlerin ayrı paketleme ile birleştirilmesi parazitik kapasitans, bağlantıdan dolayı oluşan direnci nedeniyle kabul edilemez bir durumdur (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Aynı paket içinde birçok MEMS cihazın bir arada olması (Allen, 2005)

IMEMS teknolojisinde surface micromachining sistem kullanılır. Mikroelektronik cihaz tasarımı için düz bir yüzey gereklidir ve fotolitografi ile gerekli

kompenentler oluşturulur. MEMS tasarımında oluşturulan yüzey girintili çıkıntılıdır ve son aşamada yüksek ısılara maruz bırakmak yüzeyin güçlenmesi için gereklidir. Bundan dolayı mikroelektronik kısmın ilk olarak yapılması önemlidir. CMOS teknolojisi yüksek ısılar için uygun değildir buna uygun materyal seçimi de gerekmektedir (Şekil 3.12.).

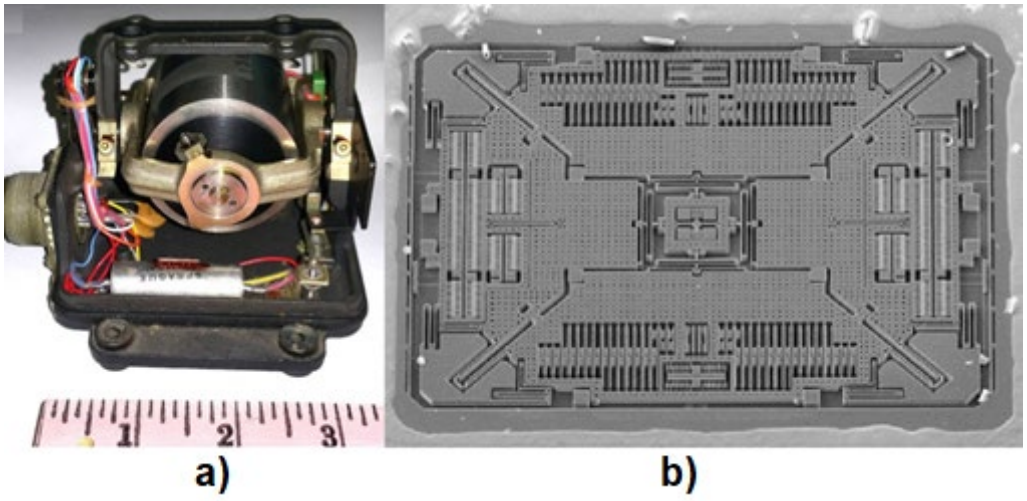


Şekil 3.12. CMOS kısmın ilk yapıldığı sistemden bir görüntü (Allen, 2005)

3.2. Gyroscope

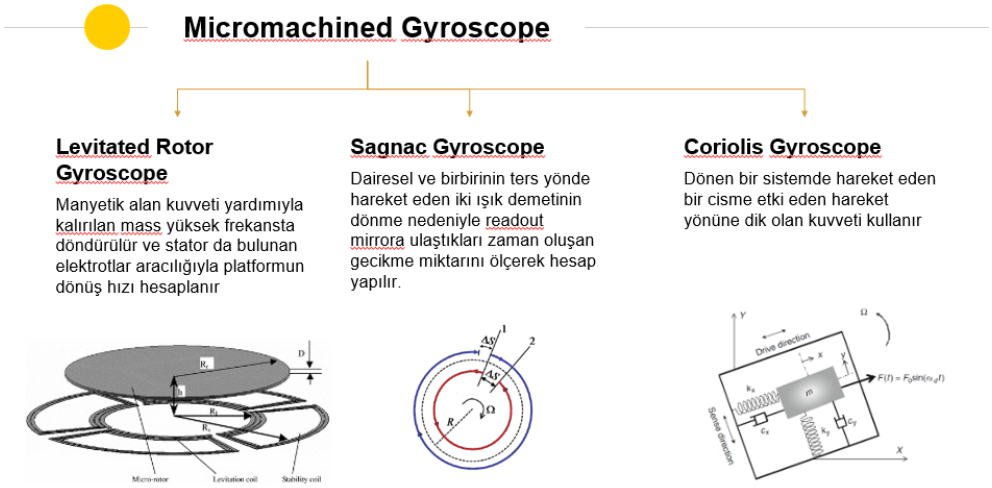
Gyroscope'u bir cismin dönüşü yönü ve dönüş hızı hakkında bilgi veren sistemler olarak tanımlayabiliriz. Mems gyroscope potansiyometre ya da takometre gibi diğer dönü ölçebilen aletlerin aksine herhangi bir referans noktası olmasına gerek duymadan boşlukta bile dönüş hızını ve yönünü belirleyebilmektedir. Dönü hızını belirlemek için coriolis kuvvetini kullanmaktadır.

Semiconductor teknolojisinin gelişimiyle birlikte mikro boyutlarda gyroscope tasarımı yapılmaktadır ve gittikçe daha hassas cihazlar üretilmektedir. Akıllı telefonlarda, uçaklarda, savunma sistemlerinde kullanılmaktadır. İlerleyen teknolojiyle birlikte gyroscope boyutları oldukça küçülmüştür. 1940'lı yıllarda 30 cm^3 olan boyutların günümüzde milimetre seviyelerine inmiştir (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. a)Eski savaş uçaklarında kullanılan gyroscope, b)Iphone 4'de kullanılan gyroscope

Mikrogyroscopelar Coriolis gyroscope, levitated rotor gyroscope ve sagnac gyroscope şeklinde 3 e ayrılabilir. Bunlar dönü ölçmek için kullandıkları kuvvete göre sınıflandırılmaktadır. Levitated rotor gyroscope manyetik levitation ve elektrostatik levitation kuvvetini kullanırlar, Sagnac effect gyroscope mikro-optik mekanik elektronik (MOEMS) sistemler ve atom gyroscopeunu içinde barındıran ışığın sagnak etkisine göre çalışır (Liu ve ark., 2009). Coriolis Kuvveti gyroscopeler da bu çalışmada da kullanılacak micromechanical gyroscopelar için kullanılır(Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Gyroscope türleri

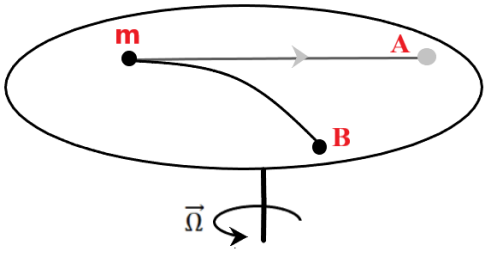
3.2.1. Coriolis kuvveti

Coriolis Kuvveti Euler tarafından 1749 yılında formüle edilmiştir. Daha önce top atışlarındaki sapmanın nedeni olarak dünyanın dönmesinin neden olduğu bilinmekteydi. Daha sonra Foucault pendulum denilen sistem ile sabit bir yere asılan ağır bir kütlenin dünyanın dönmesi nedeniyle daireler çizmesinden yola çıkarak dünyanın döndüğünü kanıtlamıştır ve yaptığı dönü ölçen cihaz ile gyroscope a ismini vermiştir (Şekil 3.15.)



Şekil 3.15. Dünyanın döndüğünü Foucault sarkacı tarafından kanıtlandığı ana ait bir resim

Coriolis kuvveti, dönen bir platformun merkezinden karşı tarafına yürümeye çalışan biri tarafından anlaşılabilir. Yürümek istediği tarafa doğru dik açıyla itildiğini görür. Benzer şekilde, dönen yer kürenin yüzeyi üzerinde hareket eden hava, kuzey yarım kürede hareket yönünün sağına, güney yarım kürede soluna saptırır. Bu saptırma gücüne coriolis kuvveti denir. Şekil 3.16.'da görsel olarak coriolis etkisi gösterilmektedir. Dönen bir mekanizmada bulunan iki kişi olduğunu düşünelim. Platform sabitken kişilerden biri diğerine kolayca top atabilir. Ama platform dönerken aynı şeyi yapmaya çalıştığında karşı tarafa doğrusal bir şekilde topu yollamaya çalışırsa topun ulaşamayacağını görür. Bunun nedeni coriolis etkisi nedeniyle topun dışarı doğru savrulmasıdır.

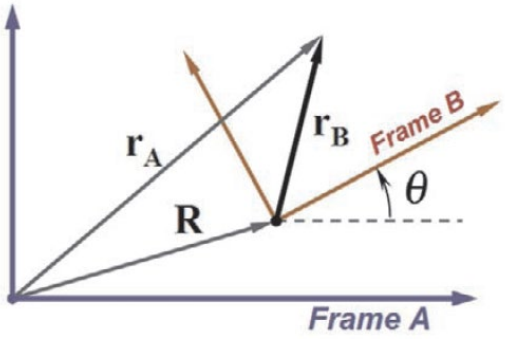


Şekil 3.16. Corilious efektin görsel olarak gösterimi

Denklem 3.3'de görülen F_C corilious kuvvetini göstermektedir, bununla birlikte ϑ noktasal parçacığın hızını belirtirken Ω açısal hızı ve m parçacığın kütlesi göstermektedir.

$$F_C = 2m\vartheta \times \Omega \tag{3.3}$$

Coriolis kuvveti nasıl oluştuğuna bakacak olursak sistemi Şekil 3.17.' de gösterildiği bir sistem üzerinden bakabiliriz. Şekilde iki frame görünmektedir. Bunlardan biri dönen frame diğeride sabit framedir.



Şekil 3.17. Sabit ve açısal hıza sahip frame gösterimi

Sabit frame için hız ve ivme denklem 3.4'deki gibidir.

$$r_g = x\hat{\imath} + y\hat{\jmath} \tag{3.4}$$

Bu denklemden hız elde etmek için denklem 3.6'daki gibi türev almamız gerekir.

$$V_g = \dot{r_g} = \dot{x}\hat{\imath} + \dot{y}\hat{\jmath} \tag{3.6}$$

İvme ise hızın türevinden oluşur(Denklem 3.7).

$$a_g = \dot{V}_g = \ddot{r}_g = \ddot{x}\hat{\imath} + \ddot{y}\hat{\jmath} \tag{3.7}$$

Parçacık Newton yasalarına göre hareket eder. Ama dönen frame e göre bir gözlemci tarafından parçacık hareketi hesaplandığı zaman açısal hızda hesaba katılmalıdır (Denklem 3.8).

$$V_s = \dot{r}_g + \Omega \times r_g \tag{3.8}$$

$r_g$ve $\dot{r}_g$ değerlerini denklem 3.6 ve 3.7'den yerine yerleştirirsek, denklem 3.9'daki gibi bir sonuç elde ederiz.

$$a_s = \dot{V}_s + \Omega \times V_s = \left[\ddot{r}_g + \dot{\Omega} \times r_g + \Omega \times \dot{r}_g\right] + \Omega \times \left[\dot{r}_g + \Omega \times r_g\right] \tag{3.9}$$

Buradan sadeleştirirsek denklem 3.10'daki gibi bir sonuç elde ederiz.

$$a_s = a_g + 2\left(\Omega \times \dot{r}_g\right) + \Omega \times \left(\Omega \times r_g\right) + \dot{\Omega} \times r_g \tag{3.10}$$

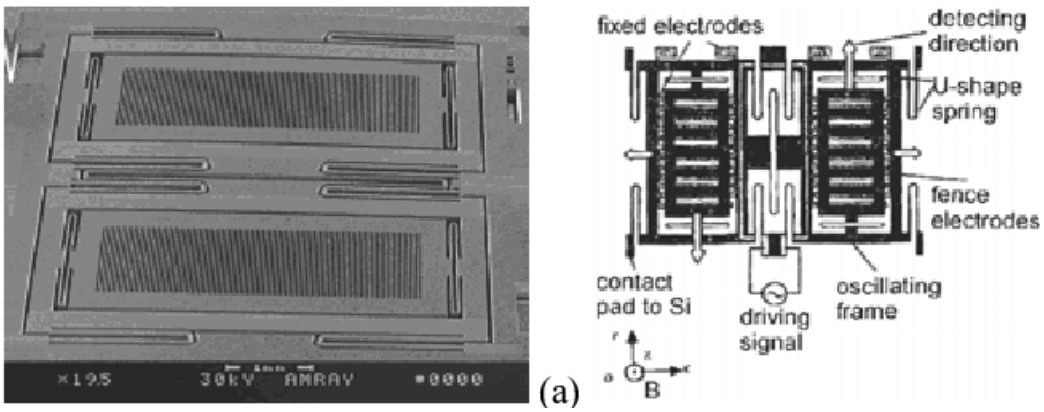
Bu formülde $2\left(\Omega \times \dot{r}_g\right)$ coriolis ivmelenmesi olarak adlandırılmaktadır en baskın ivmedir. Açısal ivmelenme $\Omega \times \left(\Omega \times r_g\right)$, tanjantal ivmelenme ise $\dot{\Omega} \times r_g$ olarak adlandırılır. Bunlardan en baskın olan coriolis ivmelenmesidir, diğer ivmelenmeler ihmal edilebilir.

3.2.2. VRG

Birçok gyroscope teknolojisi bulunmaktadır. Bunları malzeme bakımından ele alırsak silikon ve silikonla olamayanlar olarak ikiye ayırabiliriz. Silikon tabanlı olmayan en çok kullanılan malzeme quartz olarak alabiliriz. Silikon tabanlı gyroscope ile quartz tabanlı karşılaştırıldığı zaman silikon bazlı gyroscopeun daha az güç tüketimi ve çoklu üretimine uygunluğu nedeniyle tercih edilmektedir (Liu ve ark., 2009).

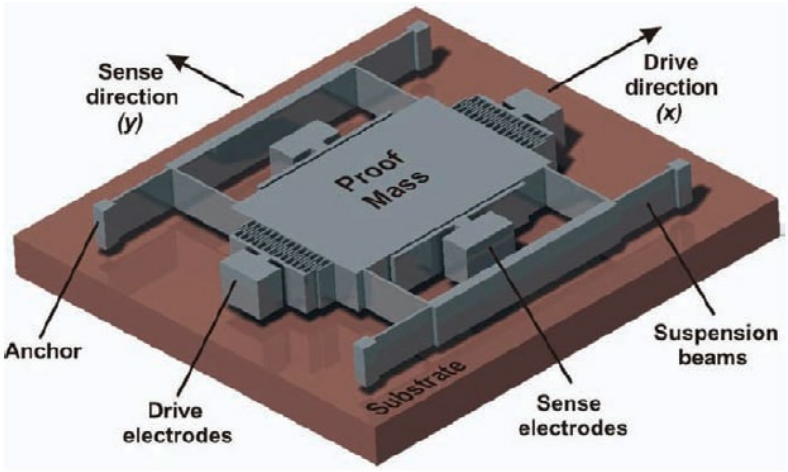
Çok sayıda gyroscope tasarımı olmasına karşın bu çalışmada Vibrotary Rate Gyroscope (VRG) üzerinde bir çalışma olacaktır. Başka isimlerle de (VSG ve CVG)

aynı sistem anlatılmaktadır. VGR titreşen mekanik parçaları aracılığıyla açısal hızı belirlemektedir. Ayrıntılı olarak anlatacak olursak proof mass bir yüzey üzerinde rahat bir şekilde salınabilmektedir. Elektrostatik kuvvet, elektromanyetik kuvvet veya piezoelektrik gibi fiziksel kuvvetler sayesinde proof mass rezonans frekansında sinüzoidal bir hareketle salınmaktadır. Bu salınım coriolis force için gerekli olan hızı oluşturmak için yapılmaktadır. Çünkü coriolis kuvveti hıza dik bir kuvvet oluşturur. Drive ekseninde salınım nedeniyle oluşan hız dönmenin de etkisiyle sense yönünde bir kuvvet oluşturur bu kuvvetin neden olduğu yer değişimi sense elektrotlar aracılığıyla kapasite değişimi olarak okunmaktadır (Şekil 3.18.).



Şekil 3.18. SEM altında bir VRG görünümü (Yin ve ark., 2011)

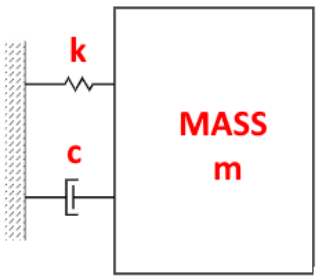
- Proof mass, anchor'lar ile substrate'e esnek bir bağlantı elemanı ile sabitlenmiştir. Bunun dışında proof mass hiçbir yere temas etmez.
- Sistemde drive ve sense mode olarak iki mode bulunmaktadır. Bunlar birbirine ortogonaldir
- Drive mode sisteme hareket verildiği bölümdür burada genellikle Comb drive ya da paralel plate accuator kullanılır.
- Sistemin doğal frekansında comb drive'dan sinüzoidal sinyal verilir. Bu sinyal elektriksel kuvveti mekanik kuvvete çevirir.
- Son olarak da sense mass aracılığıyla corilious kuvvetin oluşturduğu değişim ölçülür.
- Bu elde edilen değerler empedans, gerilim ya da akım değeri olabilir. Bunların dışında interferometre kullanarak da sense de ki değişim ölçülebilir.



Şekil 3.19. VRG genel hatlarıyla gösterimi (Acar ve Andrei, 2008)

3.2.2.1 Rezonans karakteristiği

VRG proof mass ve bükülme mekanizmasını kombine eden 1-dof rezanator mekanizmasını kullanır. Gyroscope anlamak için öncelikle 1-DOF mekanizmasını anlamak lazım.



Şekil 3.20. 1-DOF rezanator modeli

Sistem üzerindeki kuvveti bulmak için denklem 3.11'deki formül kullanılır.

$$F(t) = kx + c\dot{x} + m\ddot{x} \tag{3.11}$$

Burada damping olmadığını düşünürsek eğer denklem 3.12 elde edilir.

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0, \qquad x(t) = ae^{j\omega t} \tag{3.12}$$

Bu denklemde k esneklik katsayısını c damping katsayısını ve m de kütleyi göstermektedir. Damping olmadığını düşünürsek sistemde Laplace dönüşümü yapılırsa eğer denklem 3.13'deki gibi bir eşitliğe sahip oluruz. m proff mass kütlesi, ω doğal frekanstır.

$$\omega^2 a e^{j\omega t} + \frac{k}{m} a e^{j\omega t} = 0 \tag{3.13}$$

Sadeleştirip $ae^{j\omega t}$parentezine alınırsa denklem 3.14 elde edilir.

$$a e^{j\omega t}\left(\omega^2 + \frac{k}{m}\right) = 0 \tag{3.14}$$

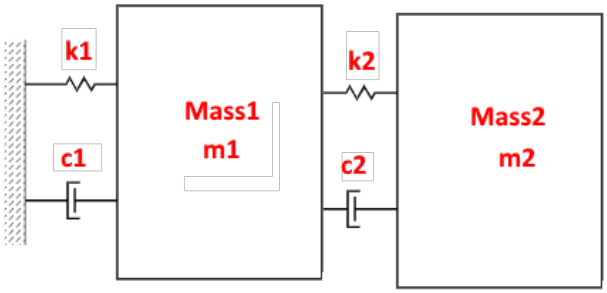
Sıfıra eşitlik nedeniyle parentez içindeki kısım sıfıra eşit olacağından ω değeri denklem 3.15'deki gibi bulunur.

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3.15}$$

Buradan 1–dof sistemin doğal frekansı denklem 3.16'daki gibi olur.

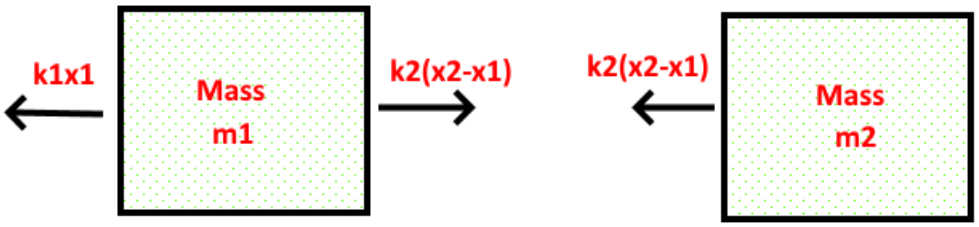
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3.16}$$

Bunun dışında multi-doff sistemlere baktığımız zaman bunun yapısı Şekil 3.21.'daki gibidir.



Şekil 3.21. Multi-doff gösterim

Undamped sistemler için iki mass olan sistemi analiz edersek eğer:



Şekil 3.22. Mekanik gösterim

Denklem 3.17 iki kütlenin yay mekanizmaları aracılığıyla birbirlerine hareket etmesi durumunda oluşacak denklemi göstermektedir. Bu denklem sadeleştirilirse eğer denklem 3.18 elde edilir.

$$m_1\ddot{x}_1(t) = -k_1x_1(t) + k_2(x_2(t) - x_1(t)) \tag{3.17}$$

$$m_2\ddot{x}_2(t) = -k_2(x_2(t) - x_1(t)) \tag{3.18}$$

Matris formatında yazabilmek için eşitlikleri sıfıra eşit olacak şekilde yazmamız gerekmektedir. Denklem 3.19'daki gibi sıfıra eşitleyip sadeleştirirsek eğer denklem 3.20 gibi bir sonuç elde ederiz

$$m_1\ddot{x}_1(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2x_2(t) = 0 \tag{3.19}$$

$$m_2\ddot{x}_2(t) - k_2x_1(t) + k_2x_2(t) = 0 \tag{3.20}$$

Bunu matris formatında yazacak olursak denklem 3.21 gibi bir matris ve bunun gösterimi denklem 3.22 olur.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \qquad K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \tag{3.22}$$

Denklemi düzenlersek ve laplace dönüşümü yaparsak eğer denklem 3.23 elde ederiz ve bunu kolaylık olması için 3.24'deki gibi düzenleyebiliriz

$$-\omega^2 Mae^{j\omega t} + Kae^{j\omega t} = 0 \tag{3.23}$$

$$(-\omega^2 M + K)ae^{j\omega t} = 0 \tag{3.24}$$

Denklem 3.24'e göre ya a=0 ya da $(-\omega^2 M + K) = 0$ olmalıdır. Matrisi denklem 3.25 gibi yazabiliriz.

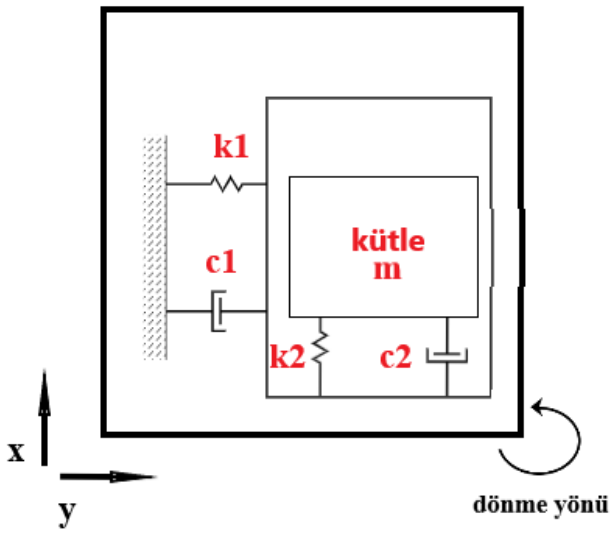
$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_1 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -\omega^2 m_2 + k_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{3.25}$$

$$m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2)\omega^2 + k_2 k_1 = 0 \tag{3.26}$$

Denklem 3.26'dan sistemin 4 tane kökü bulunur. $m_1 = m_2 = m$ ve $k_2 = k_1 = m$ olması durumunda denklem 3.27'deki gibi 2 frekans yanıtı bulunur. Diğer kökler negatif olduğu için hesaplanmamaktadır.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad \omega_2 = \sqrt{\frac{3k}{m}} \tag{3.27}$$

VRG tasarımı genel olarak eşdeğer mekanik tasarımına bakacakak olursak ıkı eksende 1-DOF olduğu Şekil 3.23.'de görülmektedir. Y eksenindeki salınım sabit yüzeye göre gerçekleşmekteyken X eksenindeki salınım (sense salınımı) drive eksenindeki salınım ile birlikte gerçekleşmektedir.



Şekil 3.23. VRG'un iki eksenli basitleştirilmiş çizimi

Quality faktör ve damping faktörü önemli iki terimdir. Bunlar sistemin kazancını belirleyen ve tasarımın ne kadar kazancının yüksek olacağını belirtir. Q quality faktörünü, ξ damping faktörünü belirtecek şekilde isimlendirirsek denklem 3.28 gibi iki formül ile hesaplanabilir

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} \qquad Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{m\omega_n}{c} \tag{3.28}$$

Bu denklemler c damping katsayısı yerine yazılacak olursa eğer denklem 3.29'u elde ederiz.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F(t)}{m} \tag{3.29}$$

Bu denklemden laplace domaininde 1-DOF sistemin transfer fonksiyonu denklem 3.30'daki gibi olur.

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3.30}$$

S yerine $j\omega$ dönüşümü yapılırsa eğer denklem daha sade bir şekilde görülebilmektedir (Denklem 3.31)

$$|H(s)| = \left| \frac{\frac{1}{m}}{{\omega_n}^2 - \omega^2 + j\frac{\omega\omega_n}{Q}} \right| \tag{3.31}$$

Burada 3 durum için yani çalışma frekansı rezonans frekansından çok küçük eşit ve çok büyük olduğu durumların değerlendirmesini yaparsak eğer; çok küçük olduğu durum için denklem 3.32'yi elde ederiz. Bu da sistemin doğal frekansından çok daha küçük frekanslarda salınım genliğine etki eden tek etmen stiffness olduğu görülmektedir.

$\omega \ll \omega_n \; için;$ (3.32)

$$|H(s)|_{\omega \ll \omega_n} = \frac{1}{m{\omega_n}^2} = 1/k$$

Eğer çalışma frekansı rezonans frekansına eşit alınırsa, denklem 3.33 elde edilir. Bu durumda sistemin doğal frekansından çok daha küçük frekanslarda salınım genliğine etki eden tek etmen stiffness olduğu görülmektedir.

$\omega = \omega_n \; için;$ (3.33)

$$|H(s)|_{\omega=\omega_n} = \frac{1/m}{\sqrt{\left(\frac{{\omega_n}^2}{Q}\right)^2}} = \frac{Q}{m{\omega_n}^2} = \frac{Q}{k}$$

Rezonans frekansından çok büyük olması durumunda ise denklem 3.34'de görüldüğü gibi frekansın karesiyle orantılı olarak azalacaktır.

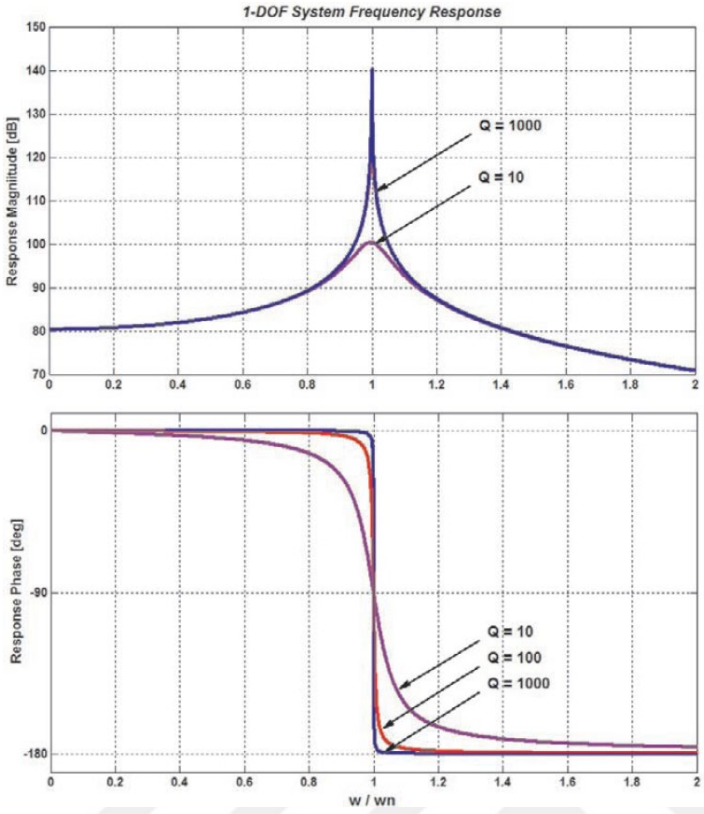
$\omega \gg \omega_n \; için;$ (3.34)

$$|H(s)|_{\omega \gg \omega_n} = \frac{1/m}{\omega^2}$$

Damping oranının artması Quality faktörün düşmesine neden olur (Şekil 3.24.). Rezonans frekansında faz -90° faz kayması olur. Rezonans frekansından daha düşük frekanslarda faz 0° olur. Bu da kuvvet fonksiyonunu yakından takip eder. Rezonans frekansından daha yüksek frekanslar için ise faz -180° olur. 0° den 180° ye ani geçiş Quality faktörün büyük olmasını sağlar (Şekil 3.24.).

$$\varphi\big(H(s)\big) = \tan^{-1}\left(\frac{Im(H(s))}{Re(H(s))}\right) \quad (3.35)$$

Denklem 3.35'de transfer fonksiyonunun fazının imaginer kısmının reel kısma oranının ters tanjantı olarak elde edilebilir.



Şekil 3.24. 1-DOF rezanatör için Q faktörü(Acar ve Andrei, 2008)

Coriolis kuvvetini bu elde ettiğimiz drive eksenindeki transfer fonksiyonuna göre tekrar düzenlersek eğer elde ettiğimiz konum değişimi denklem 3.36'daki gibi olur

$$x = F_{elec}\frac{Q}{k} = \omega\frac{Q}{k}\frac{\varepsilon tn}{g}2V_dV_a \tag{3.36}$$

Drive ekseninde meydana gelen noktasal yer değişiminin Sense ekseninde yarattığı coriolis kuvveti denklem 3.37 gibi olur.

$$F_{coriolis} = 2m\omega\frac{Q}{k}\frac{\varepsilon tn}{g}2V_dV_a\Omega = 2m\omega x\Omega \tag{3.37}$$

Buradan meydana getirdiği displacement değerine denklem 3.38'den elde edilir.

$$y = \frac{F_{coriolis}}{k}Q = 2m\omega x\frac{Q}{k}\Omega \tag{3.38}$$

Birçok durum etki etmektedir gyroscopa. Bunlar içinde fabrication imperfectionları da eklersek şöyle bir formül elde ederiz. Bu da bütün mekanik durumu anlatmaktadır (Kempe, 2011). X ve y ekseninde etki eden bütün durumlar denklem 3.39 ve 3.40'da görülmektedir.

$$\ddot{x} + \omega_o^2 x - 2\Omega\dot{y} = f_x - D_x\dot{x} - D_{x,y}\dot{y} - \Delta x - \gamma_{y,x}\omega_x^2 y + n_{B,x} \quad (3.39)$$

$$\ddot{y} + \omega_o^2 x - 2\Omega\dot{x} = f_y - D_y\dot{y} - D_{x,y}\dot{y} + \Delta y - \gamma_{x,y}\omega_y^2 x + n_{B,y} \quad (3.40)$$

Bu durum $k_{x,y} = k_{y,x}$ ve $c_{y,x} = c_{x,y}$ olması durumunda gerçekleşmektedir. Denklem 3.41, 3.42, 3.43, 3.44 sadeleştirmede kullanılan değerler gösterilmiştir.

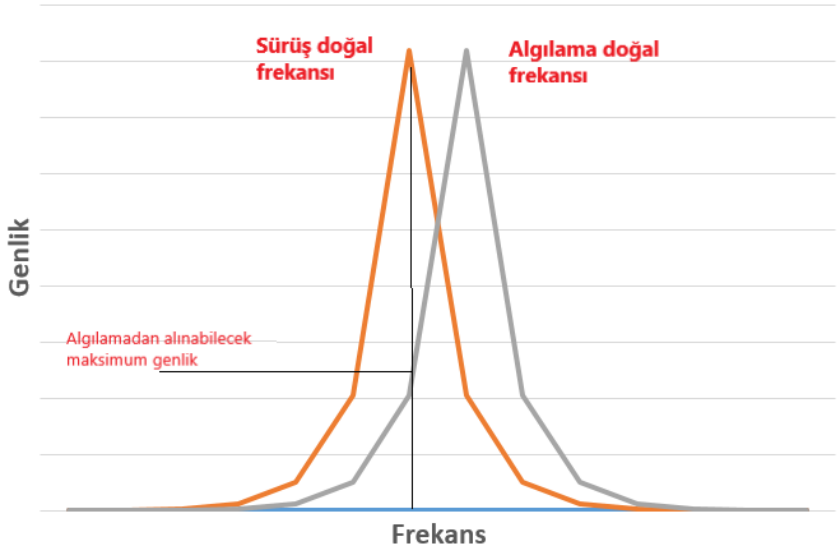
$$f_x = \frac{F_x(t)}{m} \quad f_y = \frac{F_y(t)}{m} \quad \omega_o^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2 \quad \Delta = \frac{\omega_x^2 - \omega_y^2}{2} \quad (3.41)$$

$$\frac{k_{x,y}}{m} = \frac{k_{y,x}}{m} = \gamma_{x,y}\omega_y^2 x = \gamma_{y,x}\omega_x^2 y \frac{k_{y,x}}{k_y} = \gamma_{x,y} \quad \frac{k_{x,y}}{k_x} = \gamma_{y,x} \quad (3.42)$$

$$D_x = \frac{c_x}{m} \quad D_y = \frac{c_y}{m} \quad D_{x,y} = \frac{c_{x,y}}{m} \quad D_{y,x} = \frac{c_{y,x}}{m} \quad (3.43)$$

$$n_{B,x} = \frac{N_{B,x}}{m} \, n_{B,y} = \frac{N_{B,y}}{m} \quad (3.44)$$

Gyroscope drive ve sense olarak 2-DOF şeklinde olur genellikle. Bu iki modun rezonans frekanslarının birbirine olabildiğince yakın olması gerekmektedir, buna "mode matching" denir. Sistem tasarımında önemli bir parametredir bu. İki eksenin rezonans frekanslarının birbirinden farkının 5Hz olması durumunda sense ekseninde elde edilen genlikte %90 düşüş yaşanabilmektedir (Acar ve ark., 2009).



Şekil 3.25. Gyroscope için önemli olan 1-DOF drive ve sense-mode salınım gösterimi

Mode matched sistemde coriolis kuvvet nedeniyle oluşan yer değişimi denklem 3.45'deki gibidir.

$$y_{0_{res}} = \Omega_z \frac{2Q_s x_0 m_c}{m_s \omega_s} \tag{3.45}$$

Bu formüle göre coriliolis kuvvetinden oluşan rezonans genliğini artırmak için;

- Drive mode salınım genliğini artırmak x_0,
- m_c kütlesini artırmak ve sense kütlesi olan m_s'i azaltmak.,
- Q_s i artırmak yani damping etkisini azaltmak, bu da vakumlama ile yapılabilmektedir.

Pozitif feedback yapılarak sistemin rezonans frekansında kalması sağlanır. Bu kapalı çevrimde referans genlik değerine göre sistem feedback elektrotları ile rezonans durumunda kalması sağlanır.

3.2.2.2 Yay sistemi

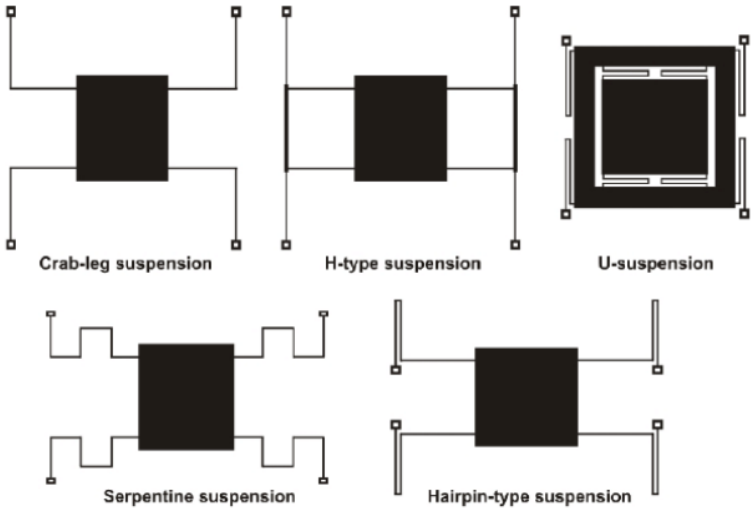
Mekanik hareketi sağlayan sistemlerdir. Comb drive ile oluşan elektrostatik kuvvet suspensiyonlar sayesinde mekanik harekete dönüşür. MEMS sistemleri için birçok yay mekanizması kullanılmaktadır bunların başlıcaları: crab-leg springs, H-type suspensiyon, U-type suspensiyon olarak gösterilebilir.

Mekanik hareket için gerekli olan esneklik ve istenilen salınım yönelimi gibi nedenlerden dolayı Şekil 3.26'daki süspansiyonlar seçilmektedir. U-shaped süspansiyon en çok kullanılan tasarımdır. Tek beam olan sistem için eğer alan atalet momentini denklem 3.45 gibi alırsak yay sabit değeri denklem 3.46'daki gibi olur

$$I = \frac{tw^3}{12} \tag{3.45}$$

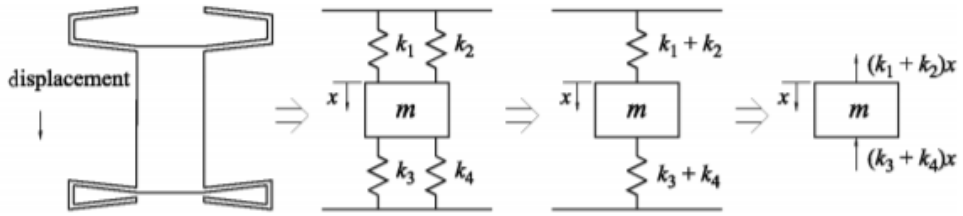
$$K = \frac{1}{2}\frac{3EI}{(L/2)^3} = \frac{Etw^3}{L^3} \tag{3.46}$$

Denklem 3.45 ve 3.46'daki K yay esneklik katsayısını I moment of inertia katsayısını L,t,w değerleri ise yayın boyutlarını göstermektedir.



Şekil 3.26. Bazı süspansiyon çeşitleri (Acar ve Andrei, 2008)

Mems sistemlerinde proof massın salınabilmesi için genelde 4 yay ile askıda durur. Bu 4 yayın toplamı alınarak stiffness değeri bulunur(Şekil 3.27.).



Şekil 3.27. Mass etrafında yaylar bulunması durumunda gösterimi (Wai-Chi ve ark., 2010)

Yay ile hareketin gerçekleştiği sistem için toplam sisteme etki eden yay sabitinin Şekil 3.27'de görüldüğü gibi iki yay üstte diğer iki yay da altta bulunmaktadır. Denklem 3.47'de gibi toplam kuvvet ivmeli harekete eşit dersek, Şekil 3.27'de gösterildiği gibi formüle edersek denklem 3.48'i elde etmiş oluruz. Buradan denklem 3.49'da olduğu gibi bütün yay sabiti değerlerinin toplamanın sistemin toplam yay sabitini bulmak için gerektiğini görebiliriz.

$$\sum F = ma \tag{3.47}$$

$$-(k_1 + k_2)x - (k_3 + k_4)x = ma \tag{3.48}$$

$$ma + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)x = 0 \tag{3.49}$$

Bu durum tasarımda kullandığımız sistemle özdeş olduğu için her kütleye etki eden yay sabiti özdeş yaylardan birinin değeri bulunup 4 ile çarpılmasıyla bulunabilmesini sağlar.

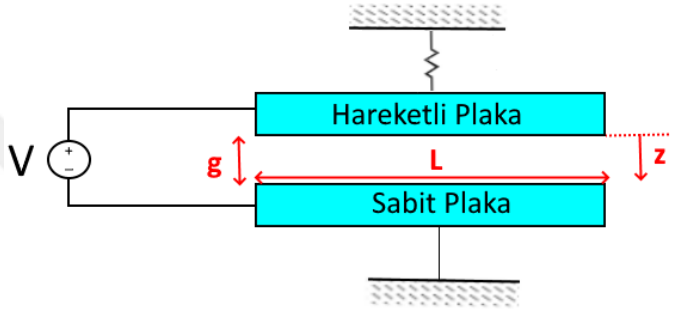
3.2.2.3 Actuation mekanizması

Mekanik hareketi elde edebilmek için termal, elektromanyetik, elektrostatik actuation mekanizmaları kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan teknik elektrostatik actuation sistemidir. Bu sistemlerde birbirine paralel iki plakanın elektrostatik kuvvet ile birbirini çekmesi sistemi kullanılır. Plakalara verilen gerilim

ile iki plaka arası boşluk değiştirilir ve belirli bir frekansta verilen gerilim ile istenilen mekanik salınım elde edilir.

PPA da paralel iki plaka bulunur, oluşturulan elektrostatik kuvvet elektrotlara dik olacak şekildedir. Haraketli plaka y yönünde olacaktır .Şekil 3.28'deki sistem göz önüne alınırsa elde edilen kuvvet denklem 3.50'de olduğu gibi gösterilebilir.

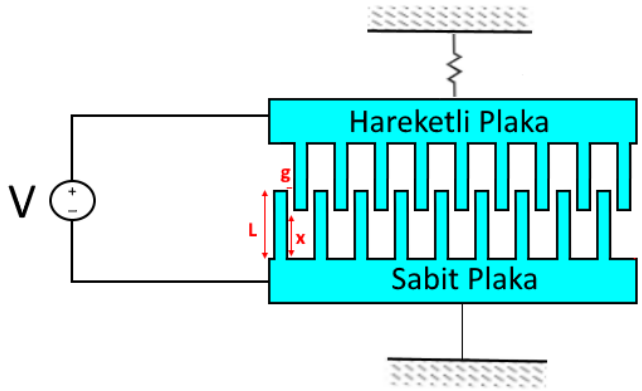
$$F_y = \frac{1}{2}\frac{\partial C}{\partial y}V^2 = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon A}{(g-z)^2} \tag{3.50}$$



Şekil 3.28. Paralel plate actuation mekanizması

Comb drive birçok paralel tabakanın birbirini çekmesiyle oluşacak kuvvetten faydalanır. Paralel plate e göre daha fazla kuvvet oluşturulabilir. Ve daha fazla displacement elde edilebilir bundan dolayı en çok kullanılan actuation mekanizmasıdır (Şekil 3.29.). Sistemin oluşturduğu kuvvet denklem 3.51'de görülmektedir.

$$F_x = \frac{1}{2}\frac{\partial C}{\partial x}V^2 = \frac{1}{2}\frac{\partial (x_0 - x)}{\partial y}\frac{\varepsilon_0 z_0}{g}V^2 = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 z_0}{g}V^2 \tag{3.51}$$



Şekil 3.29. MEMS üzerinde comb drive gösterimi

- Comb drive ile oluşan sistemde prof mass a bir DC gerilim uygulanır, Bunun yerine comb drive'lara Vdc+Vac de uygulanabilir.
- Daha sonra karşılıklı iki comb drive yerleştirilir sisteme,
- Sistemin rezonans frekansında bir AC sinyal uygulanarak proof mass en yüksek genlikte salınıma başlar

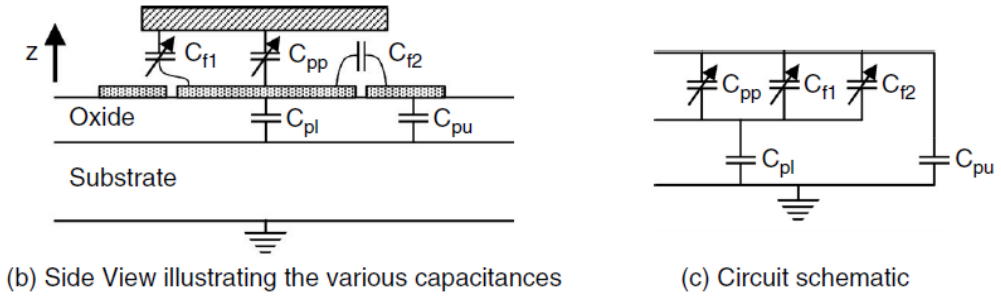
3.2.2.4 Algılama

Actuation mekanizmaları yardımıyla salınım yapan proof mass ile sabit şekilde duran Sense elektrodu arasında kapasite farkı oluşur. Coriolis kuvveti ile bu kapasitans değeri dönme açısına ve yönüne göre değişim göstermektedir. Bu değişim paralel plate ya da comb şeklindeki algılama elektrotlarıyla okunmaktadır (Acar ve ark., 2001).

Actuation mekanizmasında olduğu gibi bu sistemde de iki algılama yöntemi vardır, paralel plate detection ile comb detection. Paralel plate, comb a göre daha hassas bir şekilde ölçüm alabilir. Çünkü dönme etkisiyle oluşan kuvvet çok küçüktür. Bu kuvvetin neden olduğu yer değiştirmeyi hesaplamak için paralel plakaların birbirine yakın olması daha iyi sonuç elde etmek açısından önemlidir. Plakalar arasındaki kapasite değeri denklem 3.52'deki gibidir.

$$\Delta C = \varepsilon_0 \frac{t(L+x)}{d} - \varepsilon_0 \frac{tL}{d} = \varepsilon_0 \frac{t}{d} x \tag{3.52}$$

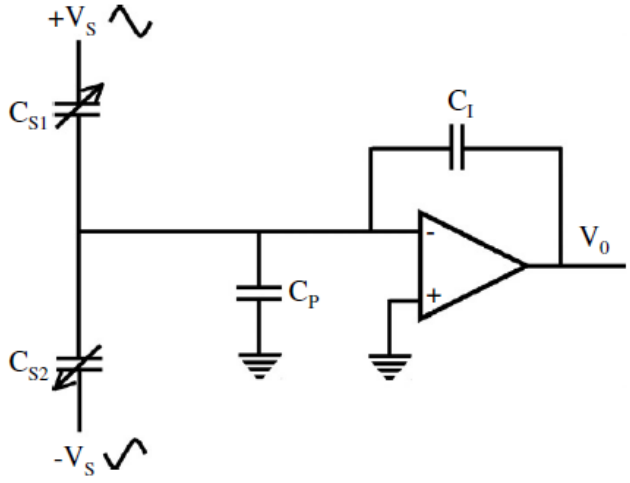
Formülde de görüldüğü gibi platelerin boyunun arttırılması hasasiyeti arttırmaktadır. Paralal plate ile algılanılan kapasitans değeri çok küçük boyutlarda olmaktadır (pikofarad boyutlarında). Bu nedenle kapasite değerini etkileyecek ve bozulmasına neden olacak birçok etmen olabilmektedir. Torsional bir gyroscope için Şekil 3.30'deki gibi olmaktadır. Burada Cpp paralel plate kapasitansı, Cf1, Cf2 fringe field Cpl ve Cpu ise platin alt katmanla ve üst katmanla oluşturduğu kapasite değerlerni göstermektedir. Şekil 3.30.c sistemin devresini göstermektedir.



(b) Side View illustrating the various capacitances (c) Circuit schematic

Şekil 3.30. Sensing kapasitansları (Allen, 2005)

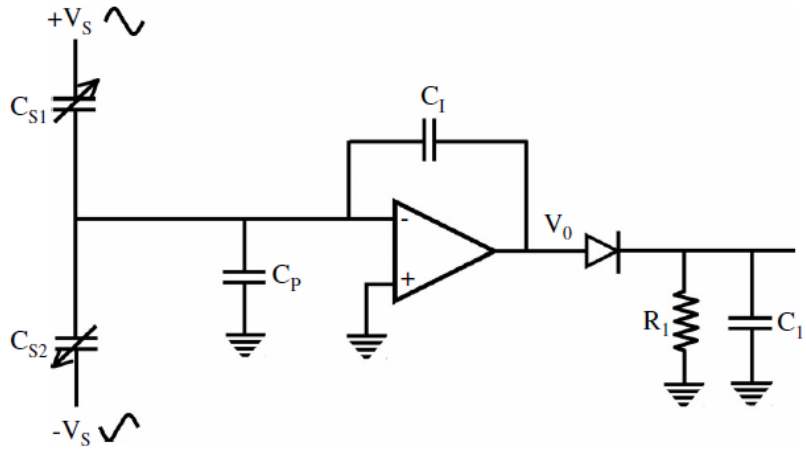
Paralel plate ile algılanılan kapasite değerini okumak için birçok yöntem vardır Şekil 3.31.'da charge integrator sistemi görülmektedir. Bu sistem buffer sistemine göre daha lineer ve saptırması daha düşüktür. Formülde görüldüğü gibi parazitik kapasitans sistemi direk etkilememektedir. Outputtan alınan gerilim değeri denklem 3.53 gibi olur.



Şekil 3.31. Charge integrator

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{C_{s1} - C_{s2}}{C_1} \tag{3.53}$$

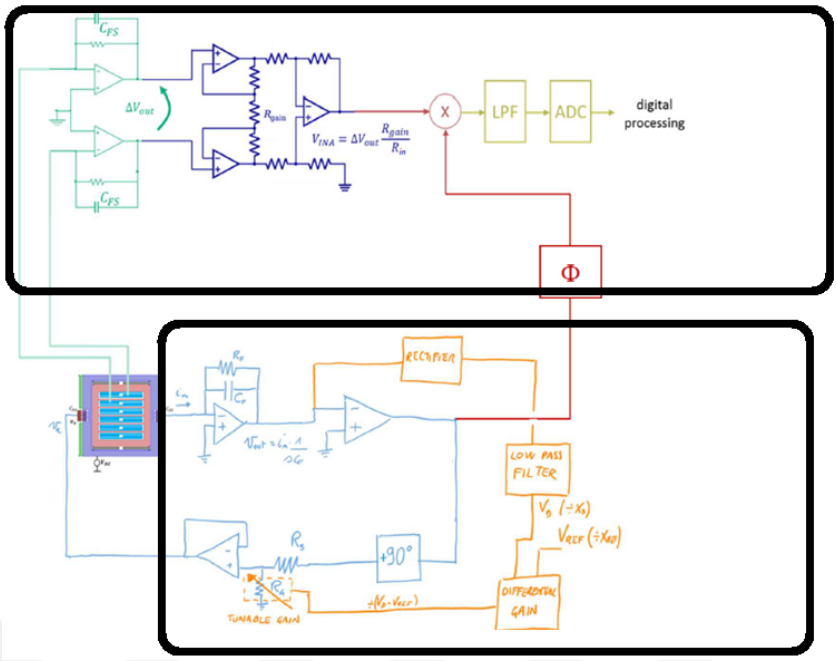
Elde edilen V0 değerleri AM ile modüle edildiği için daha sonra demodule edilmeleri gerekmektedir. Şekil 3.32.'de integrator işleminden sonra low Pass Filter ile demodule işlemi görülmektedir.



Şekil 3.32. Module edildikten sonra demodule için low pass filter

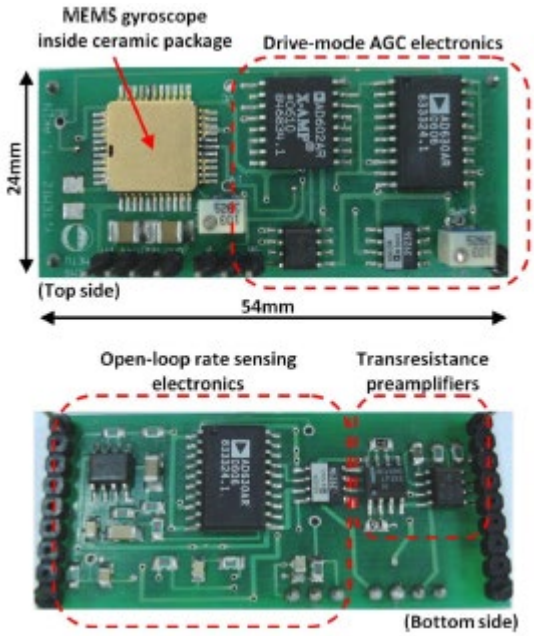
3.2.2.5 ASIC tasarımı

ASIC sense readout ve drive feedback olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Sense readout; sense elektrotundan akımın okunabilir seviyeye getirilmesi işlemidir. Elektrotlardan alınan gerilimi dönüştürülmesinden sonra amplification işlemi gerçekleştirilir. Son adımda bir filtre ile istenilen frekans ölçülür, istenmeyen frekanslar elemine edilir. Şekil 3.33.'de bu sistemin çizimi görülmektedir. Bunun için kullanılan entegre low noise olmalı ve input minimum akımın gyroscopeun ürettiği akımdan düşük olmalıdır. Genellikle bu sorun instrumential amplificator kullanılarak çözülür. Bunun yanında sistemin istenilen frekansta salınım yapması ve drive salınım miktarının sabit kalması gerekmektedir. Bu sorun feedback devresi kurularak çözülür. Drive ve sense mode'da ölçülen frekans değerlerinin değişen koşullara uygun olarak tekrar istenilen seviyeye getirilmesi gerekir. Öncelikle feedback elektrotları ile drive salınım miktarı ölçülür. Daha sonra ölçülen akım değeri gerilime dönüştürülür, karşılaştırma yapılır ve buna göre drive elektrotuna gerilmesi gereken gerilime karar verilir(Şekil 3.33.).



Şekil 3.33. Sistemin bütün ASIC çizimi

Elektronik kısmın birbirinden ayrı entegreler üzerinde olması durumunda tasarım aşağıdaki gibi olmaktadır. Sistem elektronik bağlantılar yapıldıktan sonra üzerinde oluşan parazitik empedansın ölçülmesi ve buna göre optimize edilmesi gerekmektedir (Şekil 3.34.).



Şekil 3.34. Gyroscope satışa hazır ürün son hali (Allen, 2005)

3.2.2.6 Damping

Damping terimi osilasyon yapan mekanik bir sistem içerisinde bulunan titreşim genliğinin düşmesine neden olan etkenler olarak adlandırılır. Mikro düzeydeki sistemler için büyük önemde olan bir durumdur. Gyroscope tasarımı yapılırken en çok sorun teşkil eden damping etmenleri viscous, slide film ve squaze film damping olarak sıralayabiliriz. Sistem mekanik tasarımı yapılırken bu durumlar göz önüne alınmalıdır ve hesaplamalar buna göre yapılmalıdır.

3.2.2.6.1 Viscous damping

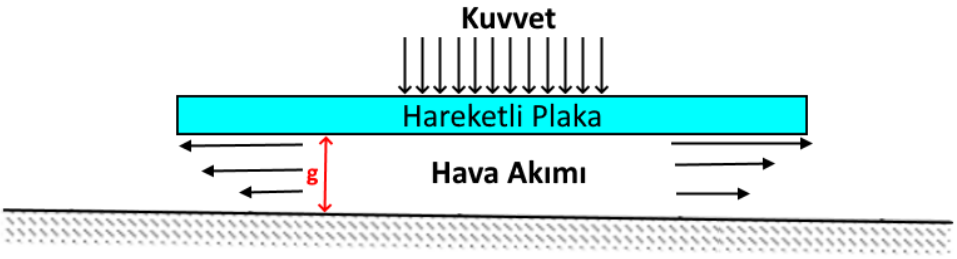
Mekanik sistemin bulunduğu ortamda gaz olması durumunda oluşur. İki parça arasında gaz olması durumunda yapılan hareketin genliğini düşürecek bir rol oynar. En önemli damping faktörüdür (Acar ve Andrei, 2008). Bu durumdan kaçınmak için çoğu gyroscope da ortamın havası alınarak vakum altında paketleme yapılır (Alper ve ark., 2007). Slide film ve squaze film damping olarak ikiye ayrılabilir.

Slide film damping: Yanal damping de denilmektedir. İki paralel tabakanın olması durumunda düşük basınçta bu iki tabaka arasındaki boşluk ortam boşluğuna kıyasla çok düşük ise bu durumda tabakalarda yana doğru kayma etkisi gerçekleşir. Bu sistemde sönümleme etkisine yol açmaktadır (Şekil 3.35.). Couette damping olarak da adlandırılan sistemi denklem 3.54'deki formüle edebiliriz(Tsai ve ark., 2008).

$$C_{couette} = \mu_{eff} \frac{A}{g} \tag{3.54}$$

$$\mu_{eff} = \mu_p p \tag{3.55}$$

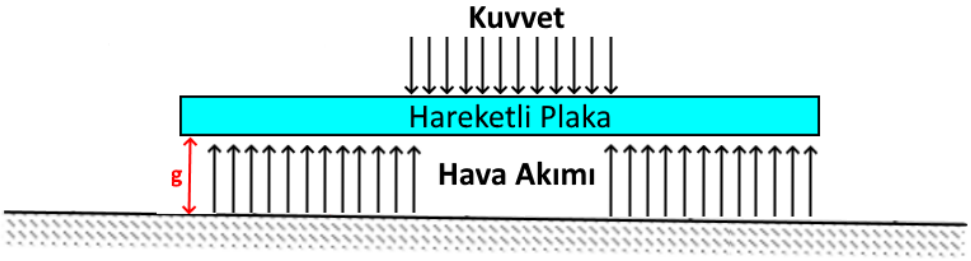
Yukarıdaki denklemde $C_{couette}$ değeri sönümleme miktarını, denklem 3.55'deki μ_{eff} gazın efektif viskozitesini, A plaka yüzey alanı, d plakalar arası mesafeyi μ_p havanın viskozitesini ($3.7\times10^{-7} kg/m^2.s.torr$, 2.78 10 [(kg/m2.s.Pa)), p ise hava basıncını göstermektedir.



Şekil 3.35. Slide film damping

Squaze film damping ise iki paralel tabakanın birbirine doğru hareket etmesi durumunda oluşur (Şekil 3.36.). Hareket doğrultusunda engelleyici bir etkiye neden olur. Hagen-Poiseuille kuralına göre denklem 3.56 gibi formüle edilebilir

$$C_{squeeze} = \mu_{eff} \frac{7Az^2}{g^3} \tag{3.56}$$



Şekil 3.36. Squaze film damping efekti

Toplam damping squeeze ve couette damping etkileri toplanarak bulunur. Bu durum Hem Sense elektrotunda hem de drive elektrotunda gerçekleştiği için ikisinde de hesaplamaların ayrı ayrı yapılıp damping değerlerinin bulunması gerekmektedir.

3.2.2.6.2 Structural damping

Vakum ortamında gözlenebilen viscous damping e oranla çok daha düşük damping etkenleri bulunmaktadır. Bunlar içerisinde en önemlisi thermoelastic damping'dir. Bu elastik deformasyonundan dolayı biriken termal enerjinin dağıtılamaması nedeniyle meydana gelir ve mekanik yapıda deformasyona kadar gidebilecek bir etkiye neden olur. Bunun dışında anchorda oluşan, elektronikte oluşan

damping faktörleri de bulunmaktadır. Toplam quality faktör hesaplanırken denklem 3.28'daki gibi hesaplanır

Bunun yanında bir diğer damping kaynağı mekanik stress nedeniyle olan dampingdir. Bir eksende salınım yapan bir mass oluşan stress dalgaları oluşturur. Bir eksen boyunca salınım yaptığı zaman bu salınımın genliğinin faktörleri boyutunda yüzey üzerinde stress dalgaları yansıması oluşur. Bu da sistemde damping olmasına neden olur.

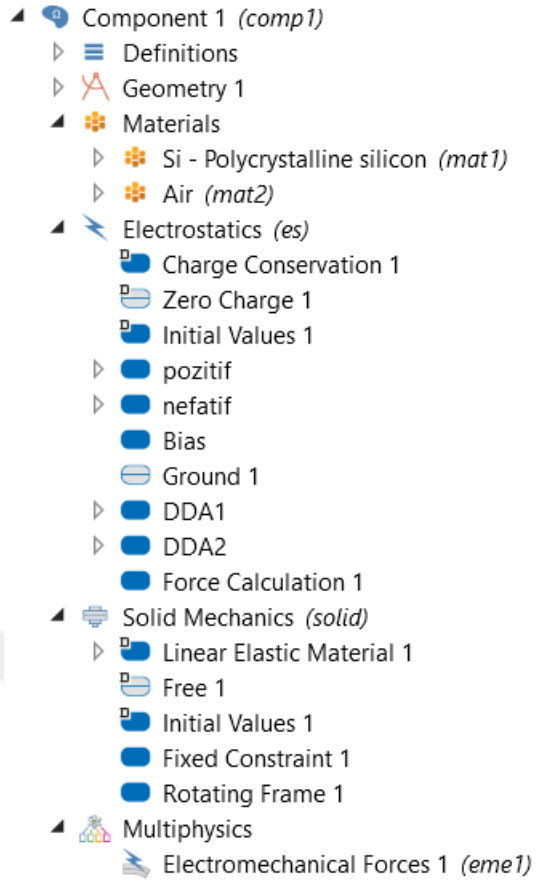
Sistemde anti-phase rezanator bulunması durumunda sistemde simetrik olmayan örneğin yayların dizilimi ya da mass daki bir dengesizlik sistemde damping etkisine neden olmaktadır. Simetrinin bozulma durumuna göre damping etkisi artar.

Kapasitif cihazlarda front-end nedeniyle kayıplar oluşur. Sistemdeki kapasitif değişimin algılaması çıkıştaki akımın hesaplanması ile olmaktadır. Çıkıştaki akımın direk ölçülemez bunun gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu durumda direnç kullanılması sistem kazancının azalmasına neden olur

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{viscous}} + \frac{1}{Q_{anchor}} + \frac{1}{Q_{electronic}} + \frac{1}{Q_{anti-phase}} + \frac{1}{Q_{substrate}} + \frac{1}{Q_{other}} \quad (3.57)$$

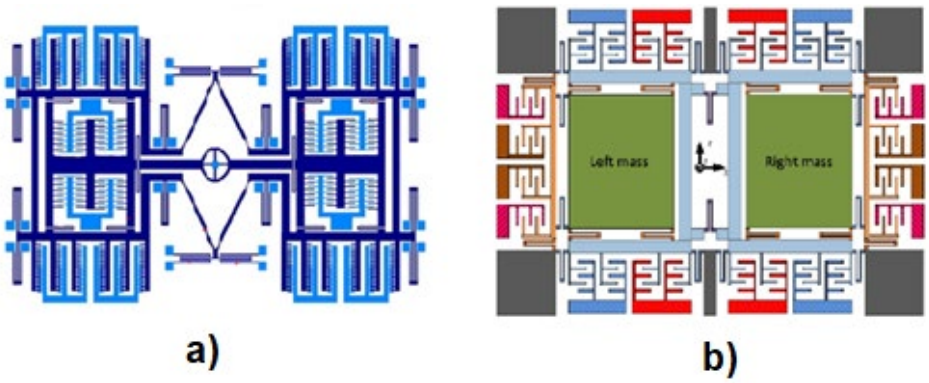
3.3. Yöntem

Tasarım COMSOL Multiphysics yazılım programı aracılığıyla yapılmıştır. COMSOL Multiphysics bilimsel ve mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan FEA programıdır. Programda kullanım alanına göre birçok fizik modülü bulunmaktadır. Sistem analizi için elektrostatik etki, mekanik yapı modülleri kullanılmıştır(Şekil 3.37.).



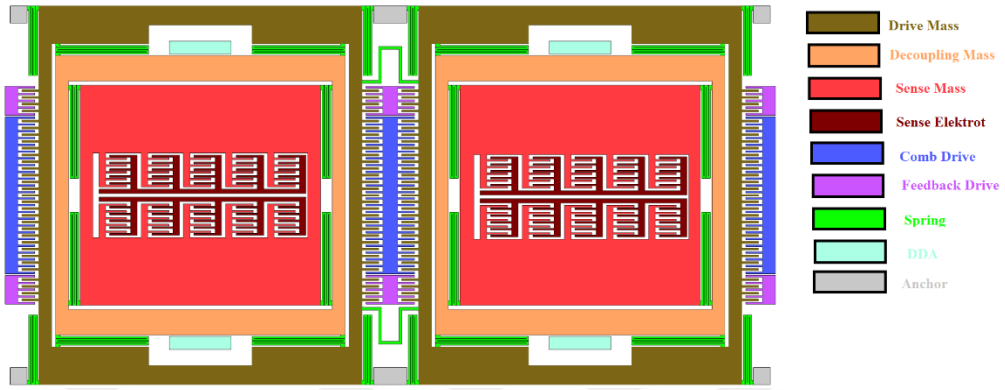
Şekil 3.37. Kullanılan fiziksel modüller

Birçok tasarım şekli bulunmaktadır. Bunlardan ikisin bakacak olursak eğer Şekil 3.38.'de iki farklı örnek görülmektedir. Şekil 3.38.a'da sense mass'ın sistemin en içinde bulunduğu bir tasarım görülmektedir. Şekil 3.38.b'de ise salınım yapan sistemin merkezde, drive ve sense massın bunun yanında bulunduğu görülmektedir. Bu tasarımların birbirlerine göre avantajları dezavantajları bulunmaktadır.



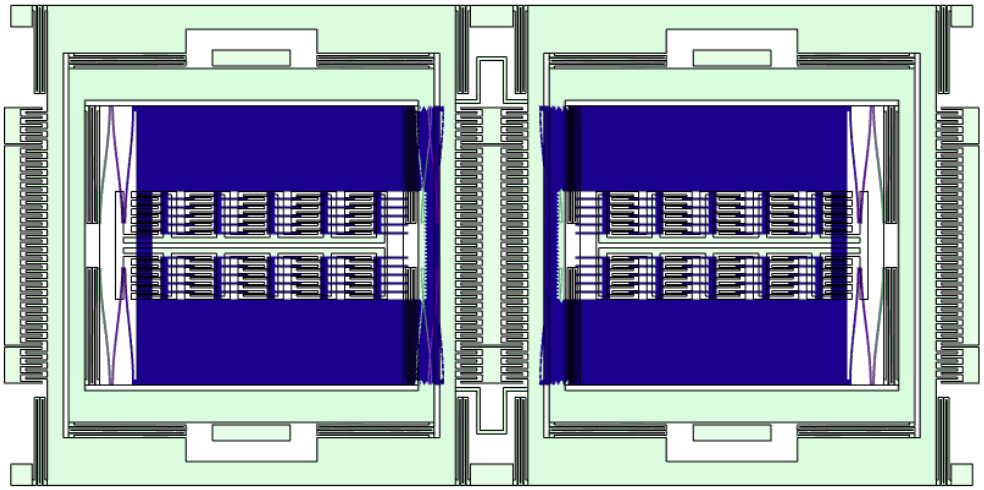
Şekil 3.38. a) Trinh ve ark. (2014) çalışması, b) Cao ve ark. (2018) çalışması

Bu tez aşamasında Şekil 3.39 de görüldüğü gibi bir sistem kurulmuştur. Şekil 41de görüldüğü gibi sağ ve sol mass birbirinin aynısıdır. Bu masslar birbirine coupling spring yardımıyla bağlanmaktadır. Bu yapıya tunning fork yapısı denilmektedir.



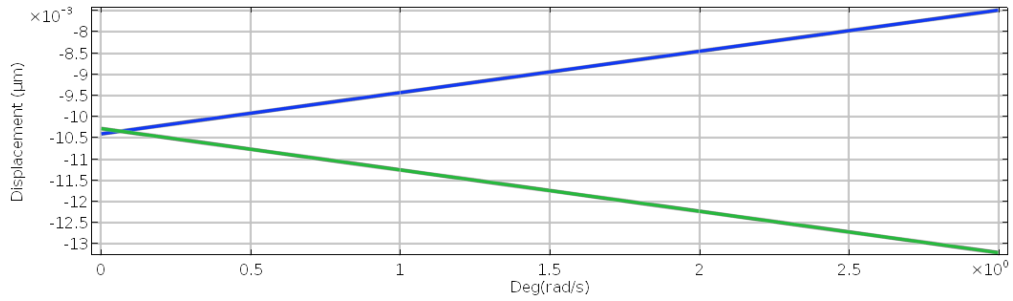
Şekil 3.39. Tasarımı yapılan Gyroscope tam gösterimi

Acceoremeter ile gyroscope aynı mekanizmayı kullanır. Yani titreşim yapan proof mass teknolojisi ile ivmeölçer de algılama yapmaktadır. İvmeölçerde herhangi bir yönde ivmelenme olduğu zaman drive yönündeki salınım miktarı bağlantılı olarak artar ya da azalır. Bu durum aynı mekanizmayı kullanan gyroscope da istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle tunning fork yapısı kullanılmaktadır(Şekil 3.39.). Bu massların biri phase mass diğeri antiphase mass olarak adlandırılır. Drive mekanizmasının uyguladığı frekanslar arasında 180º'lik faz farkındadır(Şekil 3.40.). Bu durumda sistem herhangi bir yönde oluşan ivme iki kütlede de aynı gerilim değişimine neden olur. Ama dönme durumu olduğu zaman iki kütle birbirinin aksi yönde salınım genliğini arttıracak. İki mass ın sense elektrotları readout devresinde birbirinden çıkartılır Bundan dolayı ivmelenme nedeniyle oluşan displacement sistemden çıkartılır.



Şekil 3.40. Antiphase salınım

Şekil 3.40.'da 3 rad/s açısal hızla dönme gerçekleştiği zaman sense mass larda gerçekleşen displacementler gösterilmektedir. Burada iki elektrotta oluşan gerilimler birbirinden çıkartılarak dönme derecesi belirlenir. Şekil 3.41.'de grafik olarak gösterilmiştir. Gyroscope dönmediği durumda displacement 0.001um seviyelerindedir bu miktarı bias olarak kabul ediyoruz ve buna bağlı olarak bir mass bu displacement dan fazla diğeride aynı oranda eksik hareket ediyor



Şekil 3.41. Dereceye göre displacement in grafiksel gösterimi

Tasarım parçaları anlatılırken Şekil 3.42.'deki gibi yarı alan anlatılacaktır. Diğer kısım ilk yarımın mirror halidir. Mekanik sistem toplam 3-dof'tan oluşmaktadır. Bunun 2 tanesi sensede bulunmaktadır. Şekil 3.39.'de gösterilmektedir. Gyroscopeun sürüş ve algılama doğal frekanslarının birbirine yakın olması nedeniyle iki eksende salınabilme imkânına sahiptir. Çalışma frekansının birkaç kHz seviyesinde olması gürültü etkisinin düşük olması (Madni ve ark., 2003) ve ekstra oluşan mekanik hataların önlenmesi için 15kHz den düşük olması gerekmektedir (Walther ve ark.,

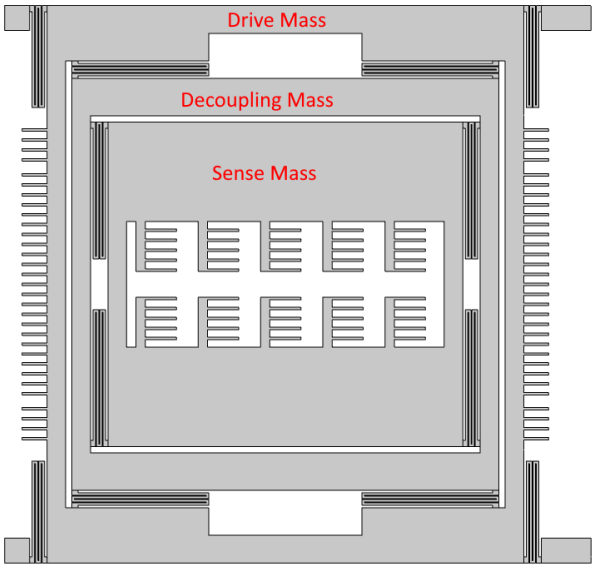
2013). Bunun yanında Coriolis kuvvetin ve scale faktöründe yüksek olması için proof mass kütlesini de maksime etmek gerekmektedir. Sürüş frekansı 11332Hz olarak, algılama frekansı ise 11361Hz olarak belirlenmiştir proof mass parçalarının kütleleri Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir. Frekanslar oldukça yakın olmasına rağmen üst üste binmemiştir. Teorik olarak bu amaçlanırken pratikte bu mümkün olmamaktadır. Bunun yerine mode split modunda çalışmaktadır sistem.

Çizelge 3.3. Proff mass özellikleri

Sense kütle (ms)	$2.707 \times 10^{-9} kg$
Decoupling kütle (mdc)	$1.598 \times 10^{-9} kg$
Drive kütle (md)	$2.192 \times 10^{-9} kg$
Proof mass kütle(mp)	$6.497 \times 10^{-9} kg$
Proff mass boyuları(WdxLd)	$448\mu m \times 383\mu m$
Kalınlık	$24\mu m$

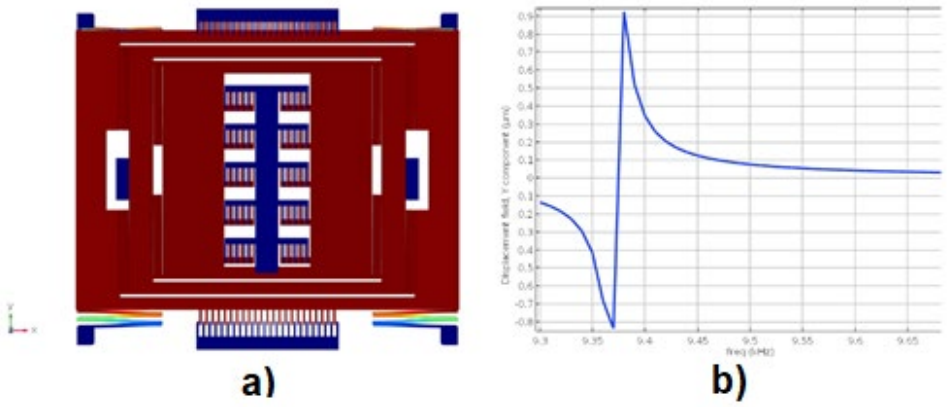
3.3.1. Proof mass

Proof Mass elektriksel etkinin mekanik harekete geçtiği kısımdır. Comb drive ile verilen elektrostatik etki mekanik salınım etkisine dönüşmektedir. Birbirinden yaylar ile ayrılan drive, decoupling ve sense mass olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlardan drive mass actuation için kullanılır. Comb driveden gelen kuvvet bu kütle üzerinde etkiye neden olur.



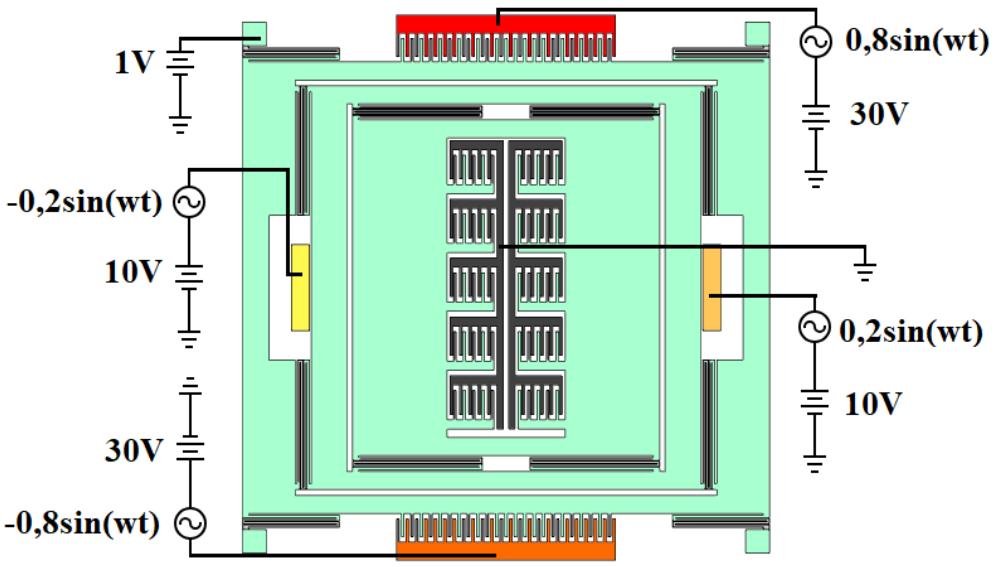
Şekil 3.42. Proff Mass'ın bölümlerinin gösterimi

Drive mass elektrostatik kuvvet ile düz bir hat üzerinde salınım gerçekleştirir. Şekil 3.42.'de görüldüğü gibi en dışta kalan kısımdır ve sistemin y düzleminde hareket etmesini sağlar. Maksimum salınım elde edebilmek için doğal frekansta salınım yapması gerekmektedir (Şekil 3.43.b).



Şekil 3.43. a) Drive mode frekansında salınım, b) Frekanslara göre displacement

Elektriksel bağlantılara bakacak olursak eğer dc gerilimler pull-in durumuna sistemin girmemesi nedeniyle düşük tutulmuştur. Bunun yanında damping efekti DC gerilimin artmasıyla artmaktadır (Şekil 3.44.).

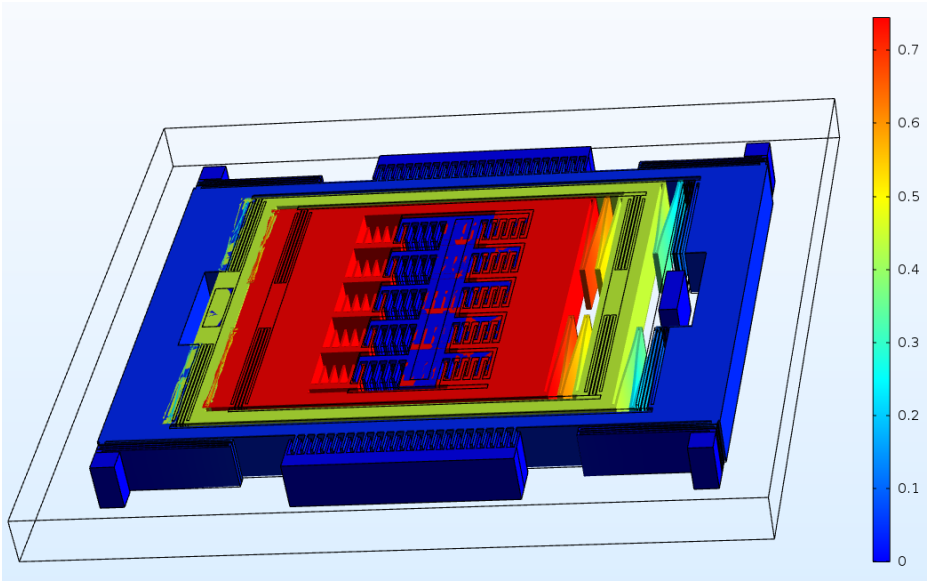


Şekil 3.44. Elektriksel bağlantı

Decoupling mass, drive mass da oluşabilecek hataları algılama-kütleye aktarılmaması için kullanılmaktadır (Palaniapan ve ark., 2002). Bu kütlenin kullanılması için birçok neden vardır. Bunlar:

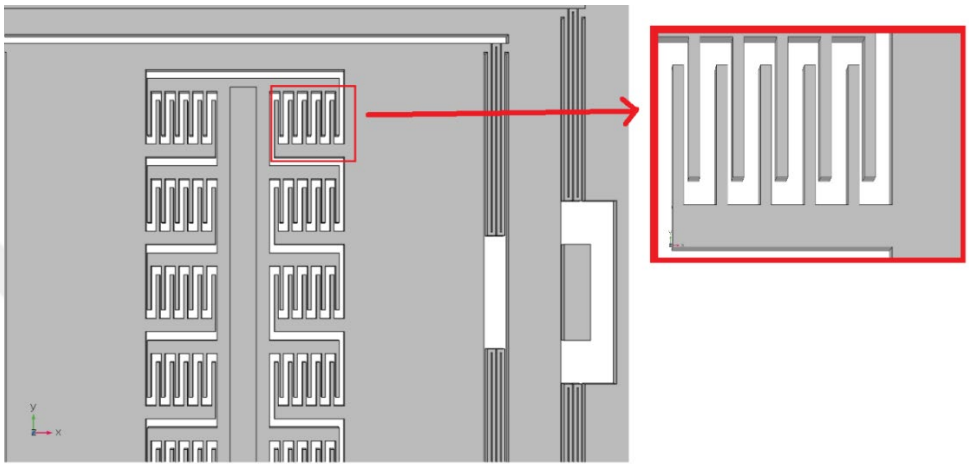
- Drive mass da oluşan gürültünün sense massına aktarılmasını engellemek,
- Sense mode da oluşan salınımın genliğini arttırmak,
- Anchorlardan gelen gürültüyü azaltmaktır

Bunlardın dışında eklediğimiz DDA elektrotu için decoupling mass drive mass olmuştur. Ek eksende elde edilen drive hareketi bu mass üzerinden gerçekleşmektedir. Drive ve Sense modun birbirinden farklı eksenlerde hareket etmesi gerekmektedir. Yani sistemin dönü ölçebilmesi için 1-DOF drive için 1-DOF ise sense için minimum kullanması gerekmektedir. Bu aynı mass üzerinde de olabilir veya ayrı massler üzerinden de olabilir. Bu çalışmada Comb drive ile x yönünde salınım yaparken, decoupling ve sense masslar ise coriolis kuvvet nedeniyle y ekseninde hareket etmektedir. Yani Dual drive sisteminde ilk drive için decoupling mass ve sense mass birlikte sense için kullanılmaktadır. İkinci drive ekseninde ise bu sefer drive işlemi y yönünde gerçekleştirirken drive massı olarak decoupling mass kullanılmaktadır ve sense mass sense için kullanılmaktadır.



Şekil 3.45. Sense modda salınım

Sense mass Şekil 3.42.'de gösterildiği gibi Proof mass ın en içte kalan kısmını oluşturmaktadır. X ekseni doğrultusunda salınım yapabilmesi için bu doğrultuda yaylar ile bağlanmıştır. Sense elektrotuna en yakın kısmında sense elektrotu ile arasında yüksek kapasitans oluşabilsin diye paralel plate için çıkıntılar bulunmaktadır. Burada elde edilen gerilimin yüksek olması için yüzey alanını ve plate sayısını olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir(Şekil 3.46.).



Şekil 3.46. Sense mass paralel plate gösterimi

Sistemin mekanik hareketini inceleyecek olursak eğer denklem 3.29'a ek olarak denklem coriolis kuvvetinden dolayı ve gürültüden sisteme eklenen ek durumlar denklem 3.58'de görülmektedir.

$$\ddot{x} + 2\xi_x\omega_n\dot{x} + \omega_x^2 x = \frac{F_x(t)}{m} + 2\Omega_z\dot{y} + n_{B,x} \tag{3.58}$$

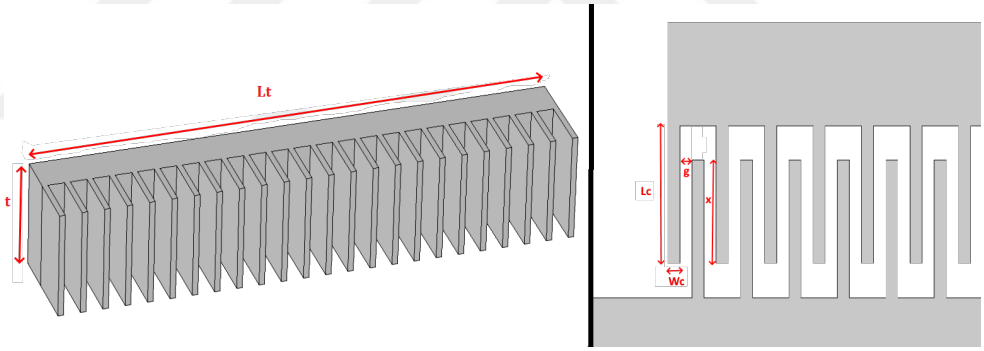
$$\ddot{y} + 2\xi_y\omega_n\dot{y} + \omega_y^2 y = \frac{F_y(t)}{m} - 2\Omega_z\dot{x} + n_{B,y} \tag{3.59}$$

Denklem 3.58 ve 3.59'da $n_{B,x}$ boltzmann noise kuvvetini, Ω_z dönüş oranını göstermektedir. Eklenen son durumlar sistemin hassasiyetini belirlemek için önemlidir.

3.3.2. Actuation mekanizması

Proff Mass kısmının doğal frekansta salınabilmesi için sistemde actuation için elektrostatik kuvveti kullanan comb drive mekanizması kullanılmıştır. PPA sisteminde küçük mesafelerden(~3um) çok yüksek kuvvet uygulanabilmektedir.(~100uN) ama uygulanan kuvvet yüksek bir oranda displacement aralığı içinde kararsız bir nonlineartiye sahiptir. Comb drive da ise PPA ya göre daha düşük kuvvet(~10uN) ile birlikte daha uzun mesafeler için kullanılabilir(~20um)(Allen, 2005).

Proof massın lineer olarak drive yönünde salınım yapabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle comb drive doğrusal olarak kuvveti daha düzgün uygulayabildiği için seçilmiştir(Li ve Liu, 2017). Bunun dışında drive kısmı PPA da olduğu gibi sisteme çok yakın tutulmadığı için slide film damping ve squeze damping film efektinin daha düşük olmaktadır. Şekil 3.47.' de yapılan comb drive görülmektedir.



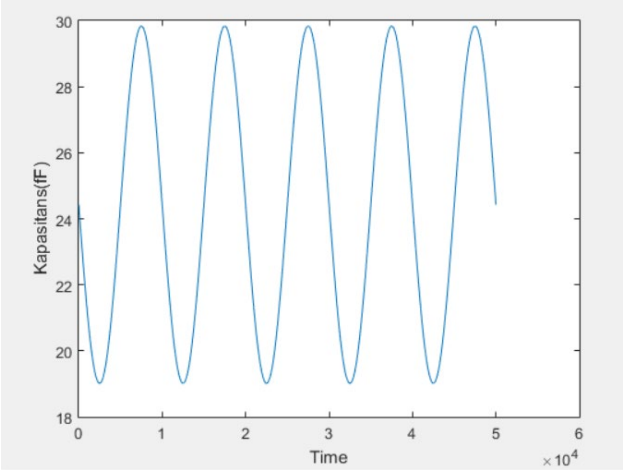
Şekil 3.47. Tasarımda yapılan comb drive

Proof mass'ın salınımının miktarı ve gerekli kuvvete göre çizim gerçekleştirilmiştir. Sistemin durgun haldeki kapasite değeri denklem 3.60'a göre $24.42fF$ olarak bulunmuştur.

$$C = \frac{2n\varepsilon_0 t(Lc - x)}{g} = 24.42fF \tag{3.60}$$

Sistem zamanla değişen bir fonksiyondur. Comb drive ın kapasitans değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu zamanla değişen kapasite değerini denklem 3.61'den bulabiliriz. Zamanla değişen fonksiyon grafiği Şekil 3.48.'de görülmektedir.

$$C = \frac{2n\varepsilon_0 t(Lc - (x + \alpha \sin(\omega t)))}{g} \tag{3.61}$$



Şekil 3.48. Drive kapasitans zamanla değişimi

Comb drive da üretilen kuvvet plakalar arasında oluşan kapasitenin yol değişimine göre türevidir. Denklem 3.62'de olduğu gibi bu da plakanın boyutları ve plakalar arası gerilim farkının karesiyle orantılıdır.

$$F_{el} = \frac{1}{2}\frac{\partial C}{\partial y}\Delta V^2 = \frac{n\varepsilon_0 t}{g}\Delta V^2 \tag{3.62}$$

Burada gerilimi oluşturan comb driva a eklenen AC ve DC gerilimin yanında proof massa verilen bias gerilimini de hesaba katarsa Denklem 3.63'deki gibi bir denkleme sahip oluruz. Bu denklemi denklem 3.64deki gibi açarsak sonuç olarak denklem 3.65'i elde ederiz.

$$V^2 = ((V_{DC} + V_p) + V_{AC}\sin(\omega t))^2 \tag{3.63}$$

$$V^2 = (V_{DC} + V_p)^2 + \frac{1}{2}{V_{AC}}^2 + 2V_{AC}(V_{DC} + V_p)\sin(\omega t) - \frac{1}{2}{V_{AC}}^2\cos(2\omega t) \tag{3.64}$$

$$V^2 = (V_{DC} + V_p)^2 + \frac{1}{2}{V_{AC}}^2 - 2V_{AC}(V_{DC} + V_p)\sin(\omega t) - \frac{1}{2}{V_{AC}}^2\cos(2\omega t) \tag{3.65}$$

Elektrostatik kuvveti bulurken gerilim farkını bilmemiz gerekmektedir. F_{el} DC ve AC bileşenlerden oluşmaktadır. Proff massa etki eden comb drive lar arasında180°

farz farkı vardır. İki driveda oluşan gerilim faz farkı da dikkate alınarak denklem 3.66 ve 3.67'deki gibi olur.

$$V_{0^\circ} = V_{DC} + V_{AC}\sin(\omega t) \tag{3.66}$$

$$V_{180^\circ} = V_{DC} - V_{AC}\sin(\omega t) \tag{3.67}$$

Bu iki gerilim değerini kuvvet bulmak için denklem 3.68'de yerine koyacak olursak denklem 3.69 ve 3.70'deki işlemler sonucunda denklem 3.71deki gibi sinüs fonksiyonu bir denklem elde ederiz. $F_{diff} = 0.226\sin(\omega t)\,\mu N$ olarak bulunur. Burada displacemente göre kuvvet değişmediği için frekans değiştikçe comb driveda oluşan kuvvet değişmez.

$$F_{diff} = F_{180^\circ} - F_{0^\circ} \tag{3.68}$$

$$F_{diff} = \frac{n\varepsilon_0 t}{g}{V_{180^\circ}}^2 - \frac{n\varepsilon_0 t}{g}{V_{0^\circ}}^2 \tag{3.69}$$

$$F_{diff} = \frac{n\varepsilon_0 t}{g}({V_{180^\circ}}^2 - {V_{0^\circ}}^2) \tag{3.70}$$

$$F_{diff} = \frac{4n\varepsilon_0 t}{g}V_{AC}(V_{DC} + V_p)\sin(\omega t) = 0.226\sin(\omega t)\,\mu N \tag{3.71}$$

Çizelge 3.4 'de comb drive tasarlarken belirlenen bütün değerler görülebilmektedir.

Çizelge 3.4. Comb drive parametreler

Comb uzunluğu(Lc)	$20\mu m$
Comb genişliği (Wc)	$2\mu m$
Boşluk (g)	$2\mu m$
Comb drive kalınlığı(t)	$24\mu m$
Comb çıkıntı sayısı(n)	23
Overlap uzunluk (Xc)	$15\mu m$
permittivity (ε_0)	$8.85 \times 10^{-12} F/m$
Uygulanan gerilim (V)	$30 + 0.8\sin(\omega t)$
Bias Gerilim (Vb)	$1V$
Comb drive toplam uzunluk(Lt)	$186\mu m$
Drive kalınlık(t)	$24\mu m$

3.3.3. Mikrosuspensiyon sistemi

Proof massın serbest salınım yapabilmesi için yay mekanizmasının olması gerekmektedir. Mass anchora yay yardımıyla bağlanarak salınım yapar. Proof massın doğal frekansı bulunurken yayın stiffness katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Tasarımda 4 katlı U-shaped süspansiyon seçilmiştir(Şekil 3.26.). Bunun nedeni doğrusal hareketi daha düzgün aktarması ve esneklik değerinin daha fazla olmasıdır. U-shaped yaylar daha küçük quadrature coupling'e neden olmaktadır (Young ve ark., 1989). Bu da x ekseninde meydana gelen istenmeyen hareketlerin y eksenine aktarmasının az olması anlamına gelmektedir (Kim ve ark., 2008). Sistem üzerindeki drive için stiffness değeri denklem 3.72 ve sense için ise denklem 4.73 de bulunmuştur.

$$K_d = \frac{1}{n}\frac{E t {w_s}^3}{{l_d}^3} = 13.92 N/m \tag{3.72}$$

$$K_s = \frac{1}{n}\frac{E t {w_s}^3}{{l_s}^3} = 5.77 \mathrm{N}/m \tag{3.73}$$

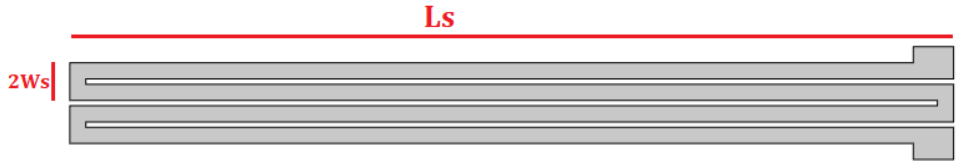
Tasarlanılan yaylar istenilen frekansa göre sistem salınsın diye boyutları belirlenir. Bunun yanında kalınlık z eksenında istenmeyen hareket olması acısından yüksek tutulurken fold sayısı 4 olarak belirlenmiştir. Çünkü fold sayısı arttıkça daha yüksek frekansta salınımı gerçekleştirilebilirken. Sistem dengesizliği artmaktadır. Belirlenen değerler Çizelge 3.5'de görülmektedir.

Çizelge 3.5. Yay sisteminin parametreleri

Yay uzunlu (Ld)	$82\mu m$
Yay uzunlu (Ls)	$110\mu m$
Yay sayısı (n)	4
Yay genişliği(ws)	$2\mu m$
Young's Modulus(E)	160×10^9 Pa
Yay kalınlığı (t)	$24\mu m$
Nspring genişliği(wns)	45
Nspring plaka sayısı(nns)	4
Nspring boşluk(gns)	$2.5\mu m$

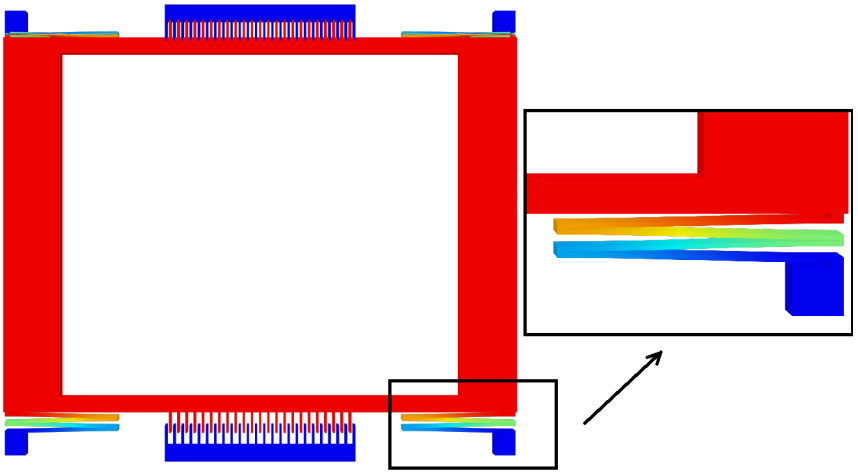
Drive ve Sense Mass'ı birbirine yay tasarımı ile bağlanmaktadır. Yay tasarımı Şekil 3.49.'da gösterilmiştir. Tasarımda her bir foldu birbirinden minimum boşluk

miktarı olarak belirlenmiş 2um ile ayrılmıştır. Bununla birlikte toplamdaki boşluğun örneğin drive ekseninde maksimum salınım miktarından düşük olmaması foldların birbirine çarpmaması için önemlidir.



Şekil 3.49. Yay tasarımı

Her bir mass için 4 tane olmak üzere toplamda 12 tane yay kullanılmıştır. Bunlardan 2 tanesi Drive ekseninde salınım yapabilmesi için diğer 8 tanesi de sense ekseninde salınım yapabilsin diye kullanılmıştır.



Şekil 3.50. Yay sisteminin salınım halindeyken yakından görünüşü

Yaylı bir sisteme gerilim uygulandığında bu gerilim elektrostatik spring efect denilen bir etkiye neden olmaktadır. Gerilim nedeniyle elektrostatik kuvvet oluştuğunda bu ilk hareketin ardından mass eski yerine dönmek isteyecektir. Bu durum ayrıca negatif kuvvet olarak bir etkisi bulunmaktadır. Bunu Taylor serisiyle denklem 3.74'e göre bulunabilir.

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n \tag{3.74}$$

Kuvvet değerini denklem 3.75'deki gibi gösterirsek. Taylor açılımının sonucu denklem 3.76 gibi olur.

$$F = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon t w}{g}V^2 \tag{3.75}$$

$$F = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon t w}{g^2}V^2 + \frac{\varepsilon t w}{g^3}V^2 x - \frac{3}{2}\frac{\varepsilon t w}{g^4}V^2 x^2 + 2\frac{\varepsilon t w}{g^5}V^2 x^3 + \cdots \tag{3.76}$$

Bu oluşan etki springlerde etkili olur. Spring k parametresi üzerinden meydana gelen etki ortalama denklem 3.78 kadar olur. Bunu denklem 3.79 gibi sadeleştirirsek denklem 3.90'daki gibi bir negatif yay sabitine sahip oluruz.

$$F = F_0 - kx \tag{3.77}$$

$$F \approx -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon t w}{g^2}(V_p + V_s)^2 + \frac{\varepsilon t w}{g^3}(V_p + V_s)^2 x \tag{3.78}$$

$$F_0 \approx -\frac{1}{2}\frac{n\varepsilon t w}{g^2}(V_p + V_s)^2 x \tag{3.79}$$

$$k_{ns} \approx -\frac{1}{2}\frac{n\varepsilon t w}{g^3}\left(V_p + V_s\right)^2 = -2.44 \times 10^{-3}\mathrm{N/m} \tag{3.80}$$

Elektrostatik negatif spring efekti buradan $2.44 \times 10^{-3}\mathrm{N/m}$ olarak bulunur. Negatif springe efekti oldukça düşük olacak şekildedir. Bu etkinin yüksek olması sistem frekansını değiştirmektedir. Bu nedenle hesaba katılması gerekmektedir.

Sense elektrotu ile Proff mass arasında gerilim farkı olduğu için sürekli bir elektrostatik çekim kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet elektrostatik softening olarak da geçmektedir. Eğer sistemin stabil koşullarda olduğunu düşünürsek yani hareket olmadığı durumu denklem 3. 81 gibi ifade edecek olursak eğer, denklem 3.82 deki eşitliğe sahip oluruz.

$$F_{elec} = kx + \cancel{c\dot{x}} + \cancel{m\ddot{x}} \tag{3.81}$$

$$Vb^2 n\varepsilon_0 t l_c \left(\frac{1}{(g-x)^2} - \frac{1}{(g+x)^2}\right) = kx \tag{3.82}$$

Burada x<<g olduğu için sistemde onları eleriz ve sonuç olarak denklem 3.83 ortaya çıkar ve denklem 3.84 de görüldüğü gibi bir negatif yay sabiti oluşur.

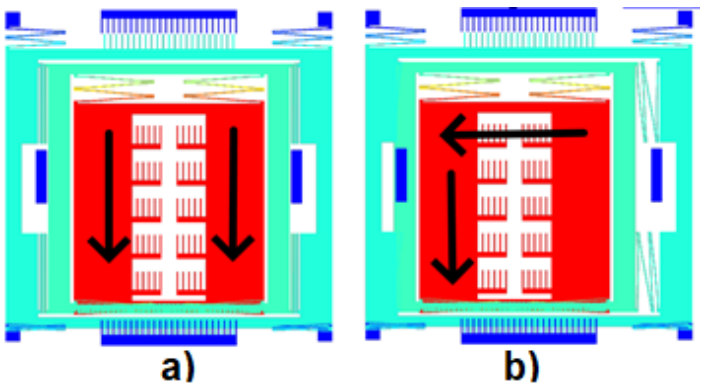
$$\frac{2Vb^2 n\varepsilon_0 t l_c}{g^2}\frac{4x}{g} = kx \tag{3.83}$$

$$k_{es} = \frac{8Vb^2 n\varepsilon_0 t l_c}{g^3} = -0.849N/m \tag{3.84}$$

Elektrostatik stifness ve softening efect birlikte sistemin doğal frekansını etkileyen durumlardır. Sistem frekansını 10kHz civarında tutmaya çalışıldığı için bias gerilimi yüksek tutulması bu durumun imkânsız olmasına neden olabilmektedir.

3.3.1. DDA yöntemi

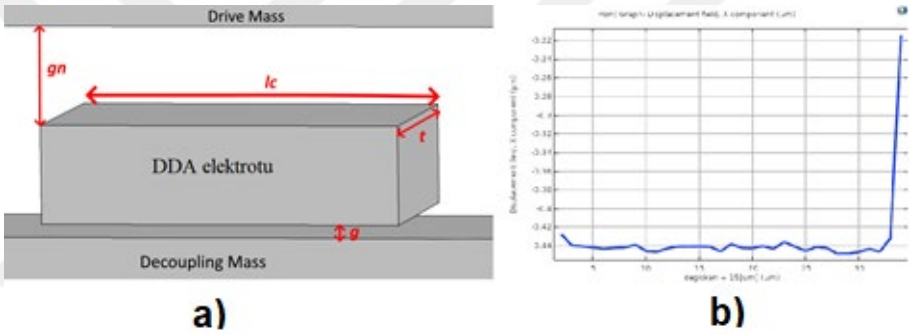
Üzerinde çalışılan ve VRG için ürettiğimiz yöntemde klasik sistemde drive ve sense mod olmak üzere iki eksenden oluşur. Burada Drive ekseninde hareketten oluşan coriolis etkisi sense ekseninde bir değişikliğe neden olur ve bu değere sense ekseninde okunur. Şekil 3.51.'de klasik yöntemde ve DDA ile hareket ve şekli displacement değerleri artırılarak gösterilmektedir. Burada fazladan sense ekseninde hareket etmesi sağlanarak bunun oluşturduğu coriolis etkisi drive ekseninde olmaktadır.



Şekil 3.51. a) Klasik yöntemde hareket, b) DDA ile hareket

Bu sistem actuation sistemi için paralel plate yapısını kullanmaktadır. Drive modundaki 5um civarındaki hareket Comb drive uygulanmasını engellemektedir. Bu nedenle PPA yapısı kullanılmaktadır Bunun yanında eklenen elektrot Proff mass'ın içine konumlandırıldığı için boyutlarının ve plakalara olan uzaklıkları önemlidir. Elektrotun boyunun farklı olması uyguladığı elektrostatik kuvvetin değişmesine neden olmaktadır (Şekil 3.52.).

Plakanın Drive mass a doğru yaklaşması sonucunda Drive mass a uyguladığı kuvvet artmaktadır. Şekil 3.52.b'de görüldüğü gibi DDA elektrotunun Drive mass a mesafesinin Decopling mass a olan mesafeyle aynı olması durumunda elde edilen sense eksenindeki displacement kazancı ortadan kalkar.



Şekil 3.52. a) C-mass görsel gösterimi, b) Grafik üzerinde gösterimi

Formüller üzerinden bakacak olursak eğer klasik yöntemde Sense ekseninde ve Drive ekseninde etkin olan kuvvetler ve sonuçları şu şekilde denklem 3.85 ve 3.86 gibi gösterilebilir:

$$F_{Ex} = k_x x + c_x \dot{x} + m_p \ddot{x} \tag{3.85}$$

$$2m\vartheta_x \times \Omega = k_y y + c_y \dot{y} + m_s \ddot{y} \tag{3.86}$$

DDA'nın sisteme eklenmesiyle birlikte drive ekseninde $2m\vartheta_y \times \Omega$ değerinin eklenmesi ve Sense ekseninde ise F_{Ey} terimi denklem 3.88 ve x ekseninde ise denklem 3.87'de görüldüğü gibi eklenmiştir.

$$F_{Ex} + 2m\dot{y}\Omega = k_x x + c_x \dot{x} + m_p \ddot{x} \tag{3.87}$$

$$F_{Ey} + 2m\dot{x}\Omega = k_y y + c_y \dot{y} + m_s \ddot{y} \tag{3.88}$$

İki sistemin oluşturdukları displacementler laplace dönüşümü yapılırsa ve c ile k değerleri yerine denklem 3.89'daki değerler koyulursa drive ekseninde sistem denklem 3.89 gibi olur.

$$Xs^2 + X\frac{\omega_n}{Q}s + X\omega_n^2 = \frac{F_{Ex}(s)}{m} + 2\Omega Ys \tag{3.89}$$

Transfer fonksiyonu da denklem 3.90 gibi olur.

$$H_x(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m} + 2Ys\Omega}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \tag{3.90}$$

Burada ϑ_y değerini belirleyip yerine koymamız lazım bu nedenle sensede ki oluşan hızı belirlememiz lazım denklemdeki $2m\dot{y}\Omega$ değeri F_{Ey} e göre çok küçük olduğu için denklem 3.91'de görüldüğü gibi önemsenmez ve son durumda transfer fonksiyonumuz 3.92 gibi olur

$$F_{Ey} + \cancel{2m\dot{x}\Omega} = k_y y + c_y \dot{y} + m_s \ddot{y} \tag{3.91}$$

$$H_y(s) = \frac{Y(s)}{F_{Ey}(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \tag{3.92}$$

Burada denklemimiz 3.91'daki denklemle aynı olduğu için displacement değerimiz de aynı şekilde olur

$$Y = \frac{F_{Ey}Q_s}{k_y} \tag{3.93}$$

Burada F_{Ey} değeri DDA elektrotunun oluşturduğu elektrostatik kuvveti ifade etmektedir. Bu değeri de yerine yazarsak eğer F_{Ey} denklem 3.94 olur. Y displacement değeri 3.95 gibi ifade edilebilir.

$$F_{Ey} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2} V^2 \tag{3.94}$$

$$y = \frac{Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2}{k_y g^2} \tag{3.95}$$

Bu denklemdeki Y değerini denklem 3.92 de yerine koyacak olursak denklem 3.96'daki denklemi elde ederiz.

$$H_x(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m} + 2\frac{Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2}{k_y g^2} s\Omega}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} \tag{3.96}$$

Buradan transfer fonksiyonu denklem 3.97 olarak bulunur.

$$|H(s)| = \left| \frac{\frac{1}{m} + 2\frac{Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2}{k_y g^2} s\Omega}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q_d} s + \omega_n^2} \right| = \left| \frac{\frac{1}{m} + 2j\frac{Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2}{k_y g^2} \omega\Omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + j\frac{\omega_n}{Q_d}\omega} \right| \tag{3.97}$$

Çalışma frekansı olarak sistem doğal frekansını seçeriz maksimum salınım elde edebilmek için. Bu durumda denklem 3.98 gibi bir transfer fonksiyonu elde ederiz

$$|H(s)|_{\omega=\omega_n} = \left| \frac{\frac{1}{m} + 2j\frac{Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2}{k_y g^2} \omega_n \Omega}{j\frac{{\omega_n}^2}{Q_d}} \right| = \frac{1 + \left(\frac{2Q_s \varepsilon_0 t l_c V^2 \omega_n \Omega m}{k_y g^2}\right)^2}{\frac{m{\omega_n}^2}{Q_d}} \tag{3.98}$$

Buradan drive eksenindeki displacement değerini denklem 3.99'daki gibi buluruz.

$$x = F_{Ex}\left(\frac{Q_d}{k_x} + \left(\frac{2Q_s Q_d \varepsilon_0 t l_c V^2 \omega_n \Omega m}{k_x k_y g^2}\right)^2\right) \tag{3.99}$$

Elde edilen $\left(\frac{2Q_s Q_d \varepsilon_0 t l_c V^2 \omega_n \Omega m}{k_x k_y g^2}\right)^2$ değeri eklenen DDA elektrot sayesinde kazançtan kaynaklanan değerdir.

DDA elektrodunun Decoupling mass a ne kadar kuvvet uyguladığını görmek için denklem 3.10 a göre hesaplama yapmamız gerekmektedir. Denklemdeki Δg_c sistemin gerilim uygulandıktan sonra oluşturduğu displacementi göstermektedir. Bu da Çizelge 3.6.'de verilmektedir.

Çizelge 3.6. C-mass özellikleri

Paralel Plate Uzunluk(lc)	$73\mu m$
Kalınlık(t)	$24\mu m$
Boşluk(g)	$2\mu m$
Negatif boşluk(gn)	$15.25\mu m$
Gerilim(V_{DDA})	$10V + 0.2\sin(\omega t)V$
Bias Gerilim(V_b)	$1V$

Uyguladığı kuvvete bakacak olursak sistemde her bir elektrot için uyguladığı kuvvet ve bunun karşılığında Proff mass üzerinde oluşan negafif kuvvet denklem 3.100'de gösterildiği gibi çıkarılmalıdır. Sonuç denklem 3.101' deki gibi olur.

$$F_{dda1} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2}(V_{DDA})^2 \sin(\omega t) - \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2}(V_b)^2 \sin(\omega t) \tag{3.100}$$

$$F_{dda1} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2}((V_{DDA})^2 - (V_b)^2)\ \sin(\omega t) \tag{3.101}$$

İki tane anti-phase çalışan elektrot bulunmaktadır. Bunlar denklem 3.102'deki gibi farkı alınırsa sonuç denklem 3.103 gibi bulunur.

$$F_{dda2} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2}((V_{DDA})^2 - (V_b)^2)\sin(\omega t) \tag{3.102}$$

$$F_{Tdda} = F_{dda1} - F_{dda2} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{g^2} 4 V_{ac} V_{dc} = 0.031 \sin(\omega t)\,\mu N \tag{3.103}$$

Bunun yanında diğer tarafta oluşan bir kuvvet oluşmaktadır. Displacement miktarı aradaki boşluğu artırıcı bir etki yaptığı için toplanması gerekir. Bu noktada oluşan kuvvete bakacak olursak eğer $0.313\sin(\omega t)\,\mu N$'luk bir kuvvet uyguladığını görürüz. Bu da yaklaşık olarak yüzde birine tekabül ediyor. Oluşan negatif kuvvet ise denklem 3.104 gibi olur.

$$F_{nele} = -\frac{\varepsilon_0 t l_c}{{g_n}^2} 4 V_{ac} V_{dc} \sin(\omega t) = -0.066 \sin(\omega t)\, nN \tag{3.104}$$

C-mass ın oluşturduğu dispacementler Çizelge 3.6'deki Δg_{nc} değerine bakacak olursak Δg_c'ye kıyasla çok düşük olduğunu görmekteyiz (Şekil 3.45). Bu da denklemde görüldüğü gibi binde 2 civarındadır. Bu seviyenin drive mass da etkisinin çok düşük olmasına neden olmaktadır.

DDA elektrotlarının neden olduğu elektrostatik softening değeri bulunması gerekmektedir. İki elektrot bulunduğu için bunları denklem 3.105'de görüldüğü gibi toplanması gerekmektedir. Denklem 3.106, 3.107 ve 3.108 işlem yoluyla denklem 3.108deki negatif yay sabiti elde edilir. Bunun toplam değerden çıkarılması gerekmektedir.

$$F_{dda1} + F_{dda2} = kx + \cancel{c\dot{x}} + \cancel{m\ddot{x}} \tag{3.105}$$

$$2({V_{dda}}^2 - {V_b}^2)\varepsilon_0 t l_c \left(\frac{1}{(g-x)^2} - \frac{1}{(g+x)^2}\right) = kx \tag{3.106}$$

$$\frac{2({V_{dda}}^2 - {V_b}^2)\varepsilon_0 t l_c}{g^2} \frac{4x}{g} = kx \tag{3.107}$$

$$k_{dda} = \frac{8({V_{dda}}^2 - {V_b}^2)\varepsilon_0 t l_c}{g^3} = -1.535 N/m \tag{3.108}$$

Bu değerin proof mass ile sense elektrot arasında oluşan softening değerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle DDA elektrotu eklenmesi sistem frekansını değiştirmiştir.

3.3.1.1 Pull-in durumu

Kapasitif algılama elektrotunun olması burada elektrostatik istenmeyen bir kuvvetin oluşmasına da neden olmaktadır. Bu kapasitans değeri klasik elektrostatik kuvvetiyle hesaplanabilmektedir. Sense elektrotunda iki elektrot bulunmaktadır ve bunlar birbirlerine 180° faz farkında oldukları için plakalar birbirinin negatifi hareket etmektedirler. Bu kuvvetler denklem 3.109 ve denklem 3.110'da verilmektedir. Bu

kuvvetlerin farkı denklem 3.111'de görülmektedir. Farkın sonucunda oluşan kuvvet denklem 3.112'de görülmektedir

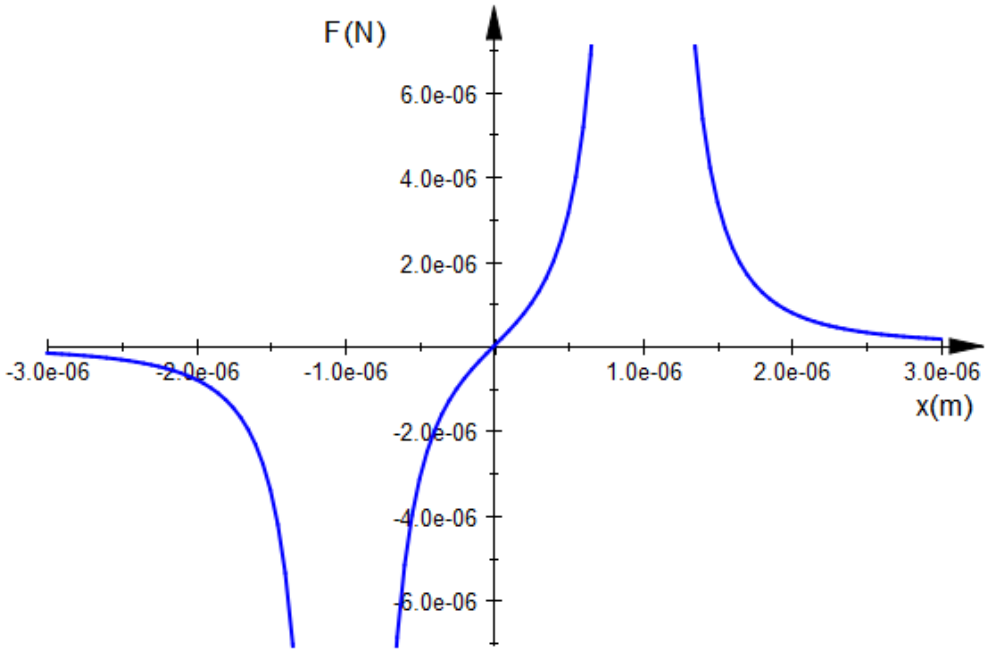
$$F_{el} = \frac{1}{2}\frac{\partial(C_1 - C_2)}{\partial y}V^2 \tag{3.109}$$

$$F_y = \frac{1}{2}\frac{\partial(C_+ - C_-)}{\partial y}V^2 \tag{3.110}$$

$$F_{ele} = \frac{\varepsilon_0 t l_c}{(g - \Delta g_c)^2}Vb^2 - \frac{\varepsilon_0 t l_c}{(g + \Delta g_c)^2}Vb^2 \tag{3.111}$$

$$F_{ele} = Vb^2\varepsilon_0 t l_c\left(\frac{1}{(g-x)^2} - \frac{1}{(g+x)^2}\right) \tag{3.112}$$

Sistemin sense durumunda meydana gelen kuvvet yukarıdaki gibidir. Bunun grafiğini çizdirecek olursak eğer Şekil 3.53.'de gösterilmektedir.

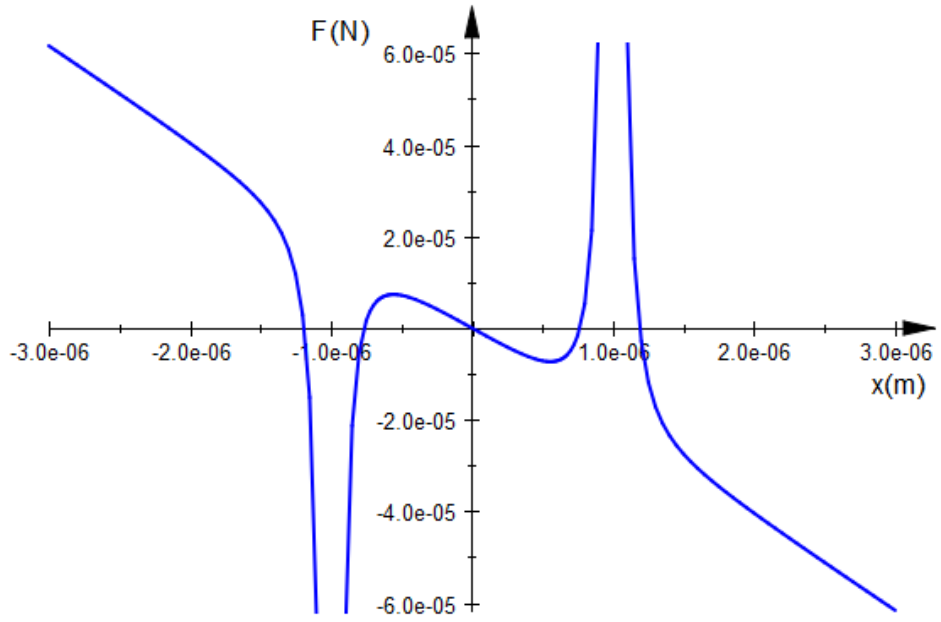


Şekil 3.53. Pull-in grafiği

Stifness durumunu elde edilen F kuvvetinden çıkarırsak sistemin salınım durumunun grafiğini görebiliriz. Eşitlik denklem 3.113'de görülmektedir

$$0 = Vb^2\varepsilon_0 t l_c \left(\frac{1}{(g-x)^2} - \frac{1}{(g+x)^2}\right) - k_s x \tag{3.113}$$

Sistemin pull_in grafiği stifnessa göre grafiği Şekil 3.54'deki gibidir.

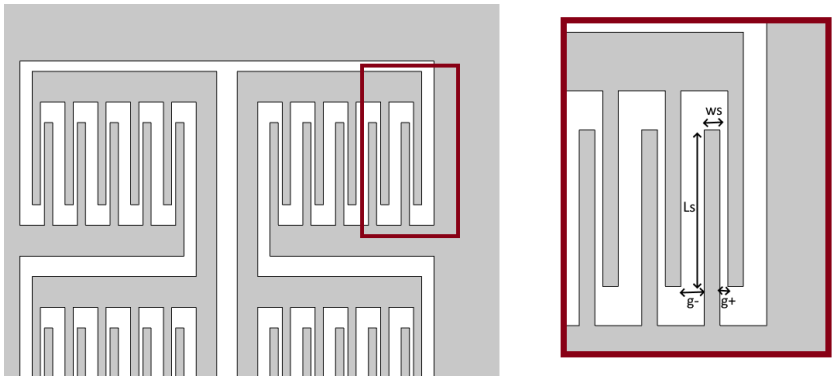


Şekil 3.54. Pull-in durumu

Sistemin stabil olması için doğrunun 3 noktada değerinin 0 olması gerekmektedir. Bunun olmadığı sistemler stabil olmamaktadır. Herhangi bir 0'a eşitlik noktası olmadığında statorun rotor a yapışma ihtimali vardır. Bulunan $12.4V$ değeri işlem için gerekli olan potansiyel farktır.

3.3.2. Sense ve readout

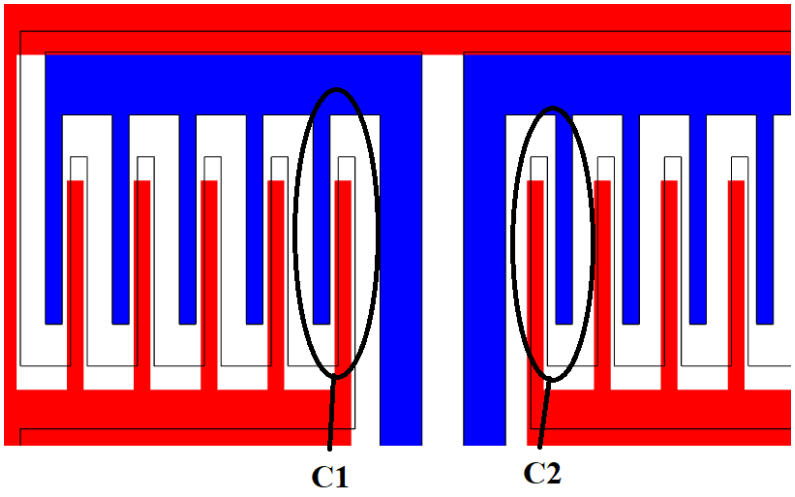
Coriolis kuvvetinden dolayı mekanik bir harekete oluşmaktadır. Bunun ölçülebilmesi için elektrik kuvvetine dönüştürülmesi gerekiyor. Bunun için sistemde PPA yapısı kullanılmıştır. Bu boyutlarda elde edilen kapasite farkı küçük olduğu için olabildiğince yüzey alanı genişletilmeye çalışılmıştır. Bu durumda bile parazitik kapasite değeri oldukça yüksek çıkabilmektedir. Bu sorun ASIC aşamasında kullanılan yöntemle engellenebilir (Bao, 2000).



Şekil 3.55. Sense elektrot yakından görünüşü

Şekil 3.55.'de görülen ortadaki yapı sense elektrotunu oluşturmaktadır. Bu yapı yapının altında bulunan Substrate üzerine sabitlenmiştir. Fabrication aşamasında altın ile iletken bir katman eklenerek Proof mass ile aralarında oluşan kapasite farkı ölçülür.

Sense plakaları konumlandırılırken sol taraf, sağ tarafa göre mirrordur. Bunun nedeni Profff mass hareket ederken, bir tarafta hareket yönüne göre kapasite farkı artarken diğer elektrotta ise azalmaktadır. Bu iki elektrotun elektriksel farkı alınarak yükseltilir. Elde edilen çıktı coriolis displacementi ile doğru orantılı olur (Şekil 3.56.).



Şekil 3.56. Dönme ile platelerin birbirine yaklaşması

İki farklı elektrotta oluşan kapasitelere C1 ve C2 olarak adlandırırsak eğer. Bu kapasite değerleri denklem 3.114 de görülmektedir. İki değerin toplamı denklem 3.116 gibi bir değer oluşmasına neden olur.

$$C_1 = \frac{n(l_s + y)t\varepsilon_0}{g + x} \qquad C_2 = \frac{n(l_s + y)t\varepsilon_0}{g - x} \tag{3.114}$$

$$C_t = C_1 + C_2 \tag{3.115}$$

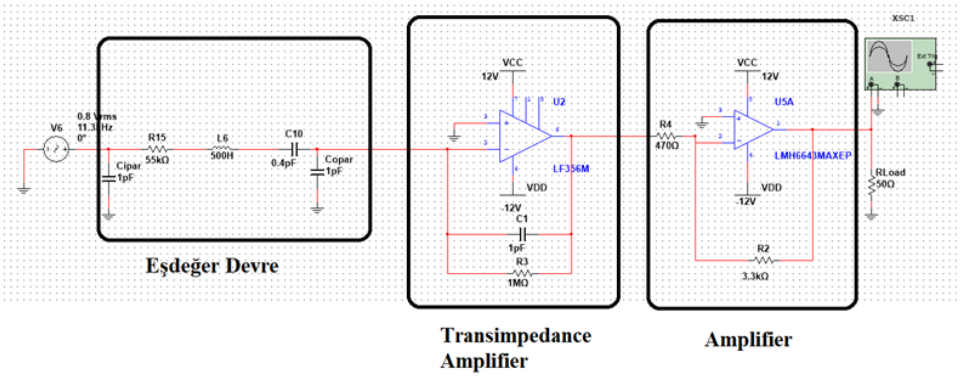
$$C_t = nt\varepsilon_0\left(\frac{l_s + y}{g + x} - \frac{l_s + y}{g - x}\right) = 2nt\varepsilon_0(l_s + y)\frac{x}{g} \tag{3.116}$$

Hangi yöne dönüş olduğu da bu yapı sayesinde belirlenebilmektedir. Daha önce coriolis kuvvetin dönüş yönüne dik olduğu belirtilmişti. Ters yöne dönü gerçekleştiği zaman buna bağlı olarak coriolis kuvvetide diğer tarafa olacaktır. Bu durumda elde edilen kapasite değeri ilk duruma göre negatif olacaktır.

Çizelge 3.7. Sense elektrot özellikleri

Paralel Plate Uzunluk(ls)	$20\mu m$
Kalınlık(t)	$24\mu m$
Boşluk(g+)	$1\mu m$
Boşluk(g-)	$3\mu m$
PP sayısı(n)	50

Sense elektrotuna bağlanan transempedans amplifier ile gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Gerilime dönüşüm gerçekleştikten sonra iki sense elektrotundan alınan değer birbirinden çıkartılarak başka bir Opamp yardımıyla tekrar amplify edilmesi gerekmektedir. Sistemdeki gürültünün ve Quadrature hatasının engellenmesi amacıyla Low pass filter ve Mixer dan geçirilir. Bu kısım sistemin AFE'sini oluşturmaktadır(Şekil 3.57.).

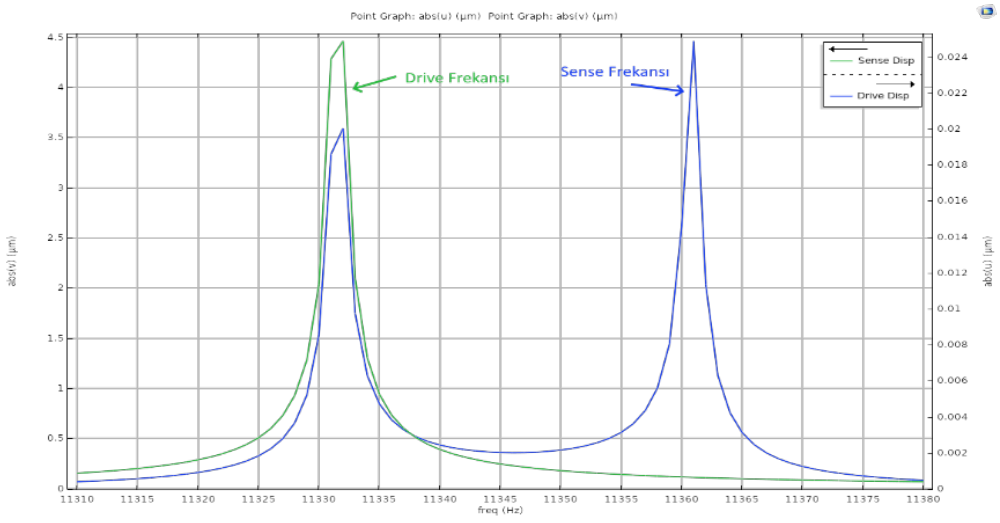


Şekil 3.57. Gyroscope sensor sonrası AFE devresi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada 3.2. bölümde anlatılan yönteme göre tasarım yapılmıştır. Bu bölümde Bu tasarımın sonuçları tartışılmaktadır. Tasarlanılan sistemdeki minimum üretim aşamalarının izin verdiği ölçüde tasarım yapılmıştır. Bu şartlarda cihazın toplam boyutu $904 \times 448 \mu m^2$ olmaktadır. Sense elektrotundan maksimum gerilimi alabilmek için minimum boşluklar 1um olarak ayarlanmıştır. Bu miktarda mesafeler için sistemin pull-in durumuna girmeden maksimum salınım alınabilmesi için hesaplanan DC ve AC gerilimler 3.3.1. bölümde gösterildiği gibi elektrotlara ve mass a verilmiştir.

Doğal frekans cismin kütlesi, yayların esnekliği ve kalite faktörü ile belirlenir. Drive mass ile sense mass'ın doğal frekanslarının yakın olması için bu değerlerin iyi ayarlanması gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi Sense prob dan alınan değerin yüksek olması için Sense ve Drive Mass'ın doğal frekanslarının birbirine yakın olması ve bu değerin 10kHz civarında olması gerekmektedir (Acar ve Andrei, 2008).



Şekil 4.1. Drive ve sense frekansı

Sense ve drive doğal frekansının birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu tasarımda drive frekansı 11332Hz, Sense doğal frekansı 11361Hz olarak bulundu

(Şekil 4.1). Uygun bir sistem için frekans farkının %10'dan düşük olması gerekmektedir. Tasarım sonucunda elde edilen sonuç denklem 4.1'de ve oran 4.2'de görülmektedir.

$$\Delta f = (fd - fs) = 29Hz \tag{4.1}$$

$$\frac{(fd - fs)}{fs} = \frac{29Hz}{11332Hz}100 = \%0.0025 \tag{4.2}$$

İki frekansın birbiriyle üst üste gelmesi durumuna mode-matched sistem oluşmaktadır. Bu tasarım pratikte yapılması zordur. Fabrikasyon problemleri nedeniyle frekansta kaymalar meydana gelmektedir. Ama bu kayma durumunu düzenlemek için alınan yöntemlerde bulunmaktadır(Sonmezoglu ve ark., 2012). Tasarım split mode a uygun olarak yapılmıştır. Bu durumda sistem de kazanç durumu iki frekans arsındaki bant farkına göre değişmektedir. Bu nedenle Quality faktörün etkisi daha az olmaktadır. Sense ekseninde DDA'nın neden olduğu Quality faktöründeki kayıp bu şekilde önemsiz hale gelmektedir

$$|H(s)| = \left| \frac{\frac{1}{m}}{{\omega_n}^2 - \omega^2 + j\frac{\omega\omega_n}{Q}} \right| \tag{4.3}$$

Denklem 4.3 Sistem çalışma frekansı ω_n yerine ω_d gibi bir değer seçilirse eğer: $\omega = \omega_d$ için frekans farkını $\Delta\omega$ olarak alırsak eğer denklem 4.4'de olduğu gibi, işlem sonucunda 4.5 de görülen sadeleştirilmiş haline ulaşırız.

$$\Delta\omega = \omega_n - \omega_d \tag{4.4}$$

$$|H(s)|_{\omega=\omega_d} = \left|\frac{\frac{1}{m}}{{\omega_n}^2 - {\omega_d}^2 + j\frac{\omega_d\omega_n}{Q}}\right| = \frac{\frac{1}{m}}{\sqrt{({\omega_n}^2 - {\omega_d}^2)^2 + \left(j\frac{\omega_d\omega_n}{Q}\right)^2}} \tag{4.5}$$

$$= \frac{\frac{1}{m}}{\sqrt{({\omega_n}^2 - (\omega_n - \Delta\omega)^2)^2 + \left(\frac{(\omega_n - \Delta\omega)\omega_n}{Q}\right)^2}}$$

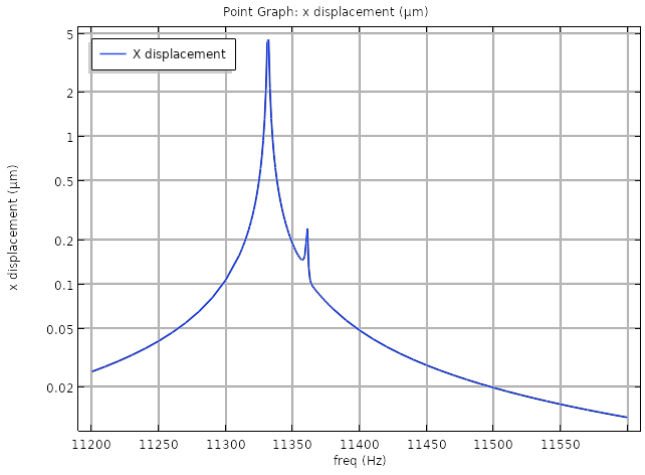
$$= \frac{\frac{1}{m}}{\sqrt{(2\omega_n\Delta\omega - \cancel{\Delta\omega^2})^2 + \left(\frac{{\omega_n}^2 - \cancel{\omega_n\Delta\omega}}{Q}\right)^2}}$$

Bu elde edilen denklemde $\Delta\omega$ değerinin ω_n değerinden çok küçük olamsından yola çıkarak sadeleştirirsek eğer sonuç denklem 4.6'da görülmektedir

$$|H(s)| = \frac{1}{k}\frac{\omega_n}{2\Delta\omega} \tag{4.6}$$

$$|H(s)| = \frac{1}{k}Q_{eff} \tag{4.7}$$

Burada $\frac{\omega_n}{2\Delta\omega} = Q_{eff}$ olarak alırsak eğer denklem Sonuç sadeleştirilmiş bir şekilde denklem 4.7'de olduğu gibi bulunur. Yani sense eksenindeki transfer fonksiyon sense ekseni doğal frekansına ve drive ve sense arasındaki farka bağlı bir fonksiyon halini alır.



Şekil 4.2. Sense ve drive frekansı exponansiyel gösterimi

f_{nd} frekansı drive frekansı olarak seçilmiştir. Çünkü fabrikasyon durumunda oluşan hatalar nedeniyle frekans değişimi gözlemlendiğinde bunun etkisinin minimum olması için genellikle drive frekansı, sense frekansından önce olur. Bunun yanında rezonans frekansından küçük frekanslarda displacement değeri belirli bir seviyede sabit kalırken daha yüksek frekanslarda giderek düşmektedir (Şekil 4.2.).

Daha önceki bölümlerde anlatılan prensipler üzerinden tasarlanılan sistemin doğal frekanslarını hesaplamamız gerekiyor. Drive modunda salınım yapan 4 tane yay bulunmaktadır. Bunlar birbirine paralel bağlanmıştır. Elektrostatik spring efektini de eklediğimiz zaman esneklik katsayısı denklem 4.8 ve 4.9'daki gibi olur.

$$K_{Td} = 4 \times k_d + k_{es} \tag{4.8}$$

$$m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2)\omega^2 + k_2 k_1 = 0 \tag{4.9}$$

Bu hesaplama drive ekseninin 1-DOF olması durumu içindir. Ama sistem 2-DOF çalıştığı için drive modunda meydana gelen başka bir frekans daha oluşmaktadır. Bunu da denklem 4.9daki formülde yerine konulduğu zaman $f_{n1} = 11332Hz$ ve $f_{n2} = 24850Hz$ olarak bulunur. Burada bulunan f_{n2} değeri kullanılmayacak bir frekanstır. Bu yüzden bu fonksiyon drive fonksiyonundan uzak seçilir. Kullanılmayan frekans bazı tasarımlarda Drive modunda sıcaklık değişimi durumunda oluşacak doğal frekans değişiminden sistemin daha az etkilenmesi için bant aralığı oluşturmak için kullanılır. Sistemin drive frekansı f_{n1} vef_{n1} arasında seçilir. Bu durumda sense değerinde büyük bir düşme yaşanırken buna karşın sıcaklık değişiminden daha az etkilenen bir sisteme sahip oluruz (Allen, 2005).

Sense için ise stifness değerine Yaylarda oluşan esneklik katsayısı ve diğer durumları da eklersek eğer denklem 4.10'daki gibi bulunur. Bu denklemin sonucu denklem 4.11'de görülmektedir.

$$K_{Ts} = 4 \times k_s - k_{es} - k_{se} - k_{dda} \tag{4.10}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{Ts}}{m_s + m_{dc}}} = 11361Hz \tag{4.11}$$

4.1. Kalite Faktörü

Her bir ikili etkileşimde bulunan masslar arasında damping olur bunların tek tek hesaplanması gerekmektedir. Comb drive ile proof mass arasında actuation sırasında meydana gelen damping sadece couette damping dir. Bunun yanında çok küçük bir oranda squeeze film damping olur ama bu çok küçük olduğu için önemsenmez. Oluşan damping durumu denklem 4.12'de gösterilmiştir.

$$C_{cd-pm} = \mu_p \frac{2n_c xt}{g_c} = 2.50 \times 10^{-5}\ kg/m.s \tag{4.12}$$

Sense mass ile sense elektrotu arasında sadece Squeeze film damping oluşur. Hesaplama yaparken elektrodun iki tarafında da bulunan plateler hesaba katılmalıdır. Bu durumda oluşan damping denklem 4.13'de görülmektedir.

$$C_{sm-se} = \mu_p \frac{n_s 7 A_{sense} t^2}{{g_{s+}}^3} + \mu_p p \frac{n_s 7 A_{sense} t^2}{{g_{s-}}^3} = 5.05 \times 10^{-3}\ kg/s \tag{4.13}$$

Bunların yanında sonradan sisteme eklediğimiz Cmass ın oluşturduğu etkilerin de hesaplanması gerekmektedir. C-mass decoupling mass ile arasında bir damping durumu oluşur. Burada Cmass üzerinde PPA dan dolayı sense mass da olduğu gibi squeeze damping oluşmaktadır. Bu durum sonucu denklem 4.14'de verilmiştir.

$$C_{cm-dm} = \mu_p \frac{7 A_{dda} z^2}{y^3} = 2.42 \times 10^{-5}\ kg/s \tag{4.14}$$

Bulunan değer toplam dampingin %1.7 si civarındadır. Sonradan eklenen sistemin damping konusunda öneminin düşük olduğunu burada görmekteyiz. Bunların yanında proof mass ile substrate arasında olan dampingi de hesaplamak gerekiyor. Denklem 4.15'deki gibi bir değer bulunur.

$$C_{pm-sbs} = \mu_p \frac{A}{z} = 0.53 \times 10^{-3}\ kg/s \tag{4.15}$$

Toplam dampinge bakacak olursak eğer Drive için denklem 4.16'da hesaplanmıştır.

$$C_{Td} = C_{Cd-pm} + C_{pm-sbs} = 4.92 \times 10^{-5}\ kg/ms \tag{4.16}$$

Buradan kalite faktörünü denklem 4.17'de olduğu gibi bulabiliriz.

$$Q_d = \frac{m_p \omega_n}{C_{Td}} = 5862 \tag{4.17}$$

Sense için bakacak olursak denklem 4.18'de olduğu gibi toplanırsa eğer, denklem 4.19'daki sonuç ortaya çıkar.

$$C_{Ts} = C_{cm-dm} + C_{pm-sbs} + C_{sm-se} = 5.14 \times 10^{-3}\ kg/ms \tag{4.18}$$

$$Q_s = \frac{m_s \omega_n}{C_{Ts}} = 0.25 \tag{4.19}$$

Sense eksenindeki quality faktör oldukça düşük çıkmıştır bunun nedeni drive eksenine göre sense elektrot sayısının fazla olmasıdır. Ama sistemin split mode da çalışması bu sorunun ortadan kalkmasına neden olmaktadır.

Çizelge 4.1. Kalite faktörü parametreleri

Proff mass alan (A)	$134020\mu m^2$
Cmass alan (Acmass)	$73 \times 24\mu m^2$
Drive mass (Ad)	$15 \times 24\mu m^2$
Sense Mass(As)	$20 \times 24\mu m^2$
Havanın viskozitesi(μ_p)	$18.13\times10^{-6} kg/m.s$

4.2. Çıktı Değerlendirme ve Kazanç

DDA yöntemi nedeniyle Sense elektrotlarında oluşan hareket ve kazanç hem drive hemde sense modundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca hareketin sinüsoidal yapısı da hesaba katıldığı zaman yeni kapasite denklemleri 5.1'deki gibi olmaktadır.

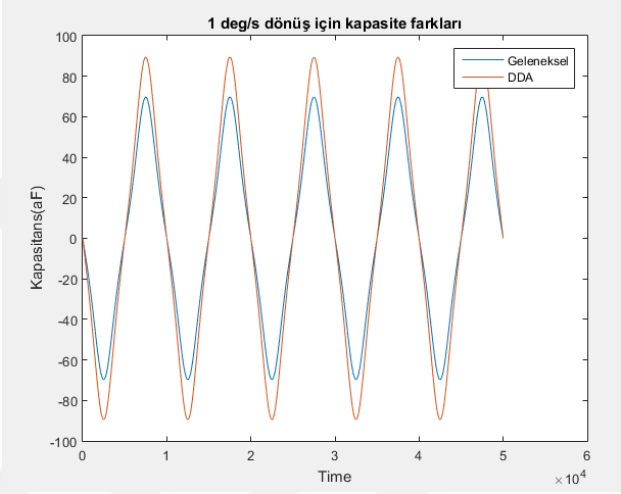
$$C_s = \frac{nt\varepsilon_0(l_s + \beta \sin(\omega t) + \beta_{coriolis} \sin(\omega t))}{g_s + \alpha \sin(\omega t) + \alpha_{coriolis} \sin(\omega t)} \tag{5.1}$$

Burada $\beta_{coriolis} \sin(\omega t)$ DDA nedeniyle drive ekseninde oluşan coriolis displacementi gösterirken $\alpha_{coriolis} \sin(\omega t)$ ise Comb drive nedeniyle meydana gelen displacementi ifade etmektedir. Yapıda iki mirror plaka bulunduğu için outputtan

adlığımız değer bunların farkı olacak şekildedir. Son durumda kapasite değerimiz denklem 5.2'de gösterilmiştir.

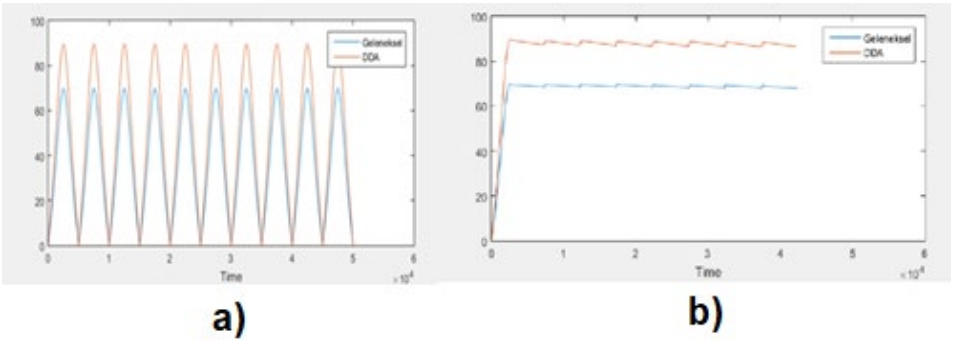
$$C_t = 2nt\varepsilon_0 \frac{g_s(\beta + \beta_{coriolis}) - l_s(\alpha + \alpha_{coriolis})}{g^2 + (\alpha + \alpha_{coriolis})^2 \sin(\omega t)^2} \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

Bu çıktının klasik yönteme göre farkını gösteren grafik Şekil 4.3'de görülmektedir. Grafik MATLAB ile çizilmiştir, Ek 1'de kullanılan kod görülebilir.



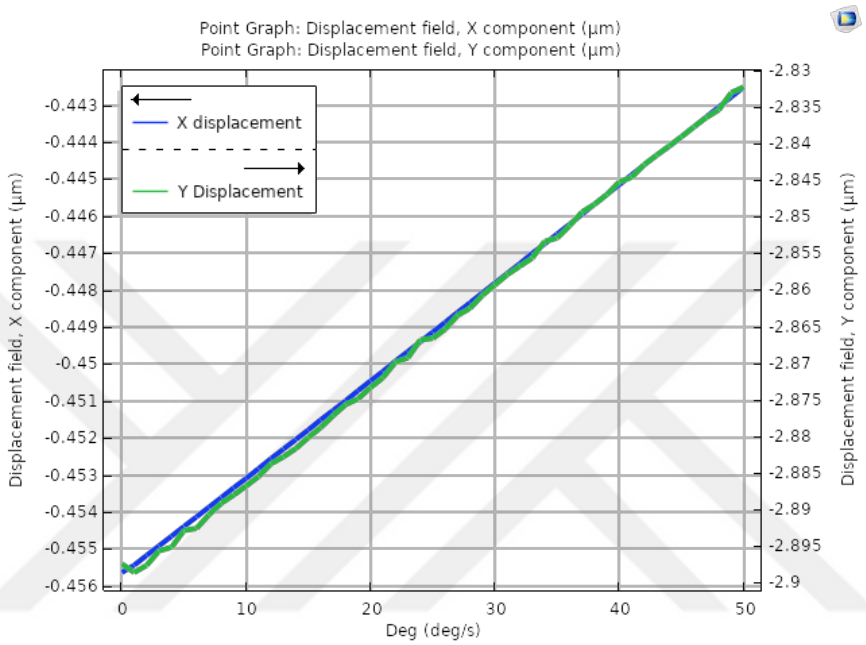
Şekil 4.3. Kapasite farkı

Bu elde edilen sonuç sonraki ASIC devresi aracılığıyla tam dalga doğrultma uygulanacaktır ve elde edilen sonuç kondansatör yardımıyla DC 'ye dönüştürülecektir. Bu durumda elde edilen maksimum genlik değeri doğrultma sonucunda bize kazanç olarak geri döner (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. a) Tam dalga doğrultma çıktısı, b) Kondansatör ile doğrultma

Çıktıların lineerlik durumunun da incelenmesi gerekmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi 1°/s lik dönüş durumunda DDA yöntemi %30.1 kazanç sağlamaktadır. Bu durum 1°/s den başlamak üzere 50 °/s lık duruma göre değerlendirilmesi gerekmektedir. X ve y eksenindeki displacement durumunun dönüş derecesinin yükselmesi durumundaki değişimi Şekil 4.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Lineerlik durumu

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada üretilen tuning-fork yapısını kullanan VRG gyroscope tasarımı yapılmıştır. Bunun yanında DDA yöntemi kullanılarak geleneksel yönteme göre output kapasite değerinde artma gerçekleştiği matematiksel olarak ve simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Geleneksel yönteme eklenen DDA elektrotun sistemin tamamında gerçekleştirdiği negatif durumlarla birlikte değerlendirilerek kazanç durumu belirlenmiştir.

Proof mass 3 farklı mass üzerinden oluşmaktadır. Bunun 2-DOF drive modunda 1-DOF sense modunda çalışmaktadır. Burada 3 mass kullanılmasının nedeni iki drive sistemi için ayrı drive mass kullanılmasıdır. Sistem 11332 Hz drive modunda çalışmaktadır. Bu eksende elde ettiği displacement $2.9\mu m$ olup bunun sense modundaki neden olduğu 1°/s için coriolis displacement değeri $0.19nm$ seviyesindedir. Bunun yanında sense mode olarak 11361Hz belirlenmiştir. Split mode da çalışan sistemin 29Hz gibi küçük bir bant farkına sahip olmasını ve drive da elde edilen hareketin sense moda yüksek oranda aktarılmasını sağlamıştır. DDA elektrotu ile sense ekseninde $0.45\mu m$ displacement değerine erişilirken drive modunda coriolis kuvvet nedeniyle $1.47nm$'lik bir değere ulaşılmaktadır. Bu sonuç outputtan alınan kapasite değerinde yaklaşık olarak %30.11 seviyesinde artışa neden olmaktadır.

Kalite faktörü paralel plakaların yüzey alanlarının fazla ve birbirine yakın olması durumunda düşmektedir. DDA ile ikinci bir eksende massı hareket ettirmek quality faktörün düşmesine neden olmaktadır. Normal basınç altında oda sıcaklığında üretilecek ürün için Drive mode kalite faktörü 5862, Sense modunda ise 0,25 olarak bulunmuştur. Gyroscope split-mode da çalışmaktadır. Bu sense mode için düşük olan kalite faktörünün önemsiz olmasına neden olmaktadır.

Çıkıştan alınan kapasite değerinin anlamlandırılabilmesi için bu değerin gerilim ya da akım cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Önerilen AFE devresinde sense elektrotlarına bağlanacak transempedans amplifier ile kapasite değerinin gerilime

dönüştürülmesi uygun olacaktır. Bu aşamada parazitik kapasite de ortadan kaldırılmaktadır. Daha sonra elde edilen değer amplify devresi ile yükseltilir ve noise değerinin elemine edilmesi için LPF devresine sokulur. LPF çıkışı dijital proses için ADC işlemi gerçekleştirilir.

Yapılan çalışma ile tüm aşamalarıyla VRG gyroscope mekanik aşamalarıyla incelenmiş olup, output kazancını artıracak bir yöntem önerilmiştir. Bunun yanında mekanik tasarıma uygun ASIC tasarım önerisinde bulunulmuştur. ASIC aşaması ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Çünkü bu aşama drive feedback devresi ile birlikte değerlendirilmelidir. Bu konunun simülasyonlar yapılarak sonuçlarının kesin olarak ibelirlenmesi gerekmektedir.

Ticari bir ürün olarak üretilmek isteniyorsa, kazancın artırılması için hem sense elektrot sayısı hem de drive elektrot sayısının artırılması gerekmektedir. Elektrot sayılarının artırılması kalite faktörünü negatif etkileyeceği için üretim koşullarının düşük ortam basıncına göre ayarlanması ve paketlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

ACAR, C., and ANDREI, S. , 2008. MEMS Vibratory Gyroscopes Structural Approaches to Improve Robustness. Springer, New York, 262s.

ACAR, C., ELER, S., and SHKEL, A. M. , 2001. Concept, implementation, and control of wide bandwidth MEMS gyroscopes. Proceedings of the American Control Conference, 25-27 Haziran, Arlington, s.1229–1234.

ACAR, C., SCHOFIELD, A. R., TRUSOV, A. A., COSTLOW, L. E., and SHKEL, A. M. , 2009. Environmentally robust MEMS vibratory gyroscopes for automotive applications. IEEE Sensors Journal, 9(12): 1895–1906.

ACAR, C., and SHKEL, A. M. , 2005. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement. Journal of Micromechanics and Microengineering, 15(5): 1092-1101

ALLEN, J. J. , 2005. Micro Electro Mechanical System Design. CRC Press, Boca Raton, 496s.

ALMURAMADY, N. , 2018. Dry Friction between Rough Surfaces of Silicon and Functionalized Gear Microelectromechanical Systems. Cardiff University, Science institute, Doktora Tezi, Cardiff, 209s.

ALPER, S. E., and AKIN, T. , 2005. A single-crystal silicon symmetrical and decoupled MEMS gyroscope on an insulating substrate. Journal of Microelectromechanical Systems, 14(4): 707–717.

ALPER, S. E., AZGIN, K., and AKIN, T. , 2007. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. Sensors and Actuators, A: Physical, 135(1): 34-42

AYAZI, F., and NAJAFI, K. , 2001. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope. Journal of Microelectromechanical Systems, 10(2): 169-179.

BAO, M.-H. , 2000. Handbook of sensors and actuators. Elsevier, Shangai, 378s.

BERNSTEIN, J., CHO, S., KING, A. T., KOUREPENIS, A., MACIEL, P., and WEINBERG, M. , 1993. Micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 10-10 Şubat, Fort Lauderdale, s.143-148.

BOXENHORN, B., and GREIFF, P. , 1988. A vibratory micromechanical gyroscope. Proceedings of the AIAA guidance and controls conference, 15-17 Ağustos, Minneapolis, s.1033-1034.

CAO, H., LI, H., SHAO, X., LIU, Z., KOU, Z., SHAN, Y., … LIU, J. , 2018. Sensing mode coupling analysis for dual-mass MEMS gyroscope and bandwidth expansion within wide-temperature range. Mechanical Systems and Signal Processing, 98: 448-464.

CHANG, H., GONG, X., WANG, S., ZHOU, P., and YUAN, W. , 2015. On improving the performance of a triaxis vortex convective gyroscope through suspended silicon thermistors. IEEE Sensors Journal, 15(2): 946–955.

DESPONT, M., BRUGGER, J., DRECHSLER, U., DÜRIG, U., HÄBERLE, W., LUTWYCHE, M., … VETTIGER, P. , 2000. VLSI-NEMS chip for parallel AFM data storage. Sensors and Actuators, A: Physical, 80(2): 100-107.

GREIFF, P., BOXENHORN, B., KING, T., and NILES, L. , 1991. Silicon monolithic micromechanical gyroscope. Transducers ’91, 24-27 Haziran, San Francisco, s.966–968.

KEMPE, V. , 2011. Inertial MEMS: Principles and practice. Cambridge University Press, Cambridge, 475s.

KIM, B., HOPCROFT, M. A., CANDLER, R. N., JHA, C. M., AGARWAL, M., MELAMUD, R., … KENNY, T. W. , 2008. Temperature dependence of quality factor in MEMS resonators. Journal of Microelectromechanical Systems, 17(3): 755- 766.

KREITH, F., and KREIDER, J. F. , 2002. The MEMS Handbook. CRC Press, Indiana, 1368s.

LI, T., and LIU, Z. , 2017. Outlook and Challenges of Nano Devices, Sensors, and MEMS. Springer, USA, 521s.

LIU, K., ZHANG, W., CHEN, W., LI, K., DAI, F., CUI, F., … XIAO, Q. , 2009. The development of micro-gyroscope technology. Journal of Micromechanics and Microengineering, 19(11): 113001.

MADNI, A. M., COSTLOW, L. E., and KNOWLES, S. J. , 2003. Common design techniques for BEI gyrochip* quartz rate sensors for both automotive and aerospace/defense markets. IEEE Sensors Journal, 3(5): 569 - 578

NATHANSON, H. C., and WICKSTROM, R. A. , 1965. A resonant-gate silicon surface transistor with high-q band-pass properties. Applied Physics Letters, 7(4): 84-86

PALANIAPAN, M., HOWE, R. T., and YASAITIS, J. , 2002. Integrated surface-micromachined Z-axis frame microgyroscope. Technical Digest - International Electron Devices Meeting, 8-11 Aralık, San Francisco, s.203-206.

SAQIB, M., SALEEM, M. M., MAZHAR, N., AWAN, S. U., and KHAN, U. S. , 2018. Design and analysis of a high-gain and robust multi-DOF electro-thermally actuated MEMS gyroscope. Micromachines, 9(11): 577.

SINGH, K., JOYCE, R., VARGHESE, S., and AKHTAR, J. , 2015. Fabrication of electron beam physical vapor deposited polysilicon piezoresistive MEMS pressure sensor. Sensors and Actuators, A: Physical, 223: 151-158

SÖDERKVIST, J. , 1990. Design of a solid-state gyroscopic sensor made of quartz. Sensors and Actuators: A. Physical, 21(1-3) : 293-296.

SÖDERKVIST, J. , 1994. Micromachined gyroscopes. Sensors and Actuators: A. Physical, 43(1-3): 65-71.

SONMEZOGLU, S., ALPER, S. E., and AKIN, T. , 2012. An automatically mode-matched MEMS gyroscope with 50 Hz bandwidth. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 29 Ocak-2 Şubat, Paris, s.523–526.

SONMEZOGLU, S., ALPER, S. E., and AKIN, T. , 2014. An automatically mode-matched MEMS gyroscope with wide and tunable bandwidth. Journal of Microelectromechanical Systems, 23(2): 284–297.

TAO, Y., and DEGEN, C. , 2013. Facile fabrication of single-crystal-diamond nanostructures with ultrahigh aspect ratio. Advanced Materials, 25(29): 3962-3967

TRINH, T. Q., NGUYEN, L. Q., DAO, D. V., CHU, H. M., and VU, H. N. , 2014. Design and analysis of a z-axis tuning fork gyroscope with guided-mechanical coupling. Microsystem Technologies, 20(2): 281–289.

TRUSOV, A. A., PRIKHODKO, I. P., ZOTOV, S. A., and SHKEL, A. M. , 2011. Low-dissipation silicon tuning fork gyroscopes for rate and whole angle measurements. IEEE Sensors Journal, 11(11): 2763–2770.

TSAI, C. W., CHEN, K. H., SHEN, C. K., and TSAI, J. C. , 2012. A MEMS doubly decoupled gyroscope with wide driving frequency range. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(12): 4921–4929.

TSAI, N. C., SUE, C. Y., and LIN, C. C. , 2008. Design and dynamics of an innovative micro gyroscope against coupling effects. Microsystem Technologies, 14(3): 295-306.

VALI, V., and SHORTHILL, R. W. , 1976. Fiber ring interferometer. Applied Optics, 15(5): 1099.

WAI-CHI, W., AZID, A. A., and MAJLIS, B. Y. , 2010. Formulation of stiffness constant and effective mass for a folded beam. Archives of Mechanics, 62(5): 405-418.

WALTHER, A., LE BLANC, C., DELORME, N., DEIMERLY, Y., ANCIANT, R., and WILLEMIN, J. , 2013. Bias contributions in a MEMS tuning fork gyroscope. Journal of Microelectromechanical Systems, 22(2): 303-308.

WANG, R., CHENG, P., XIE, F., YOUNG, D., and HAO, Z. , 2011. A multiple-beam tuning-fork gyroscope with high quality factors. Sensors and Actuators, A: Physical, 166(1): 22-33.

WANG, W., ZHANG, T., FAN, D., and XING, C. , 2014. Study on frequency stability of a linear-vibration mems gyroscope. Microsystem Technologies, 20(12): 2147-2155

YILBAS, B. S., AL-SHARAFI, A., and ALI, H. , 2019. Self-Cleaning of Surfaces and Water Droplet Mobility. Elsevier, USA, s.454.

YIN, T., WU, H., WU, Q., YANG, H., and JIAO, J. , 2011. A TIA-based readout circuit with temperature compensation for MEMS capacitive gyroscope. NEMS 2011 - 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 20-23 Şubat, Kaohsiung, s.401-405.

YOUNG, W. C., BUDYNAS, R. G., and SADEGH, A. M. , 1989. Roark's formulas for stress & strain. McGraw-Hill, USA, s.852.

ZAMAN, M. F., SHARMA, A., HAO, Z., and AYAZI, F. , 2008. A mode-matched silicon-yaw tuning-fork gyroscope with subdegree-per-hour Allan deviation bias instability. Journal of Microelectromechanical Systems, 17(6): 1526-1536

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cihan Efil
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul, 31.08.1989
e-Mail : cihan.efil@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	75.Yıl Fen Lisesi, MERSİN	2007
Üniversite	:	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, İSTANBUL (Not: 2.57/4.00)	2013
Yüksek Lisans	:	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ŞANLIURFA (Not: 3.7/4.0)	2020

TEKNİK BİLGİLER

Bilgisayar ve Yazılım Bilgileri
Bilgisayar destekli programlar (Autocad, Solidworks, Matlab, Comsol multyphsics,)
C, C++, C#, Python dilleri ile uygulama geliştirme

Elektrik Elektronik Bilgileri
Baskı devre kartı tasarımı (PCB)
Gömülü sistem tasarımı
Analog ve dijital sistemler (Mixed signal)

YABANCI DİLLER

İngilizce

YÖKDİL (2020) :81,25
YDS (2019) :70

YAYINLAR

EFİL, C., ve GÖKTAŞ, H., 2020. Dual Axis Drive Yöntemiyle VRG İçin Sistem Hassasiyeti Artırma. Çukurova 4. Uluslararası Yenilikçi Bilimsel Araştırmalar Kongresi. 21-23 Şubat 2020, Adana, s.147-148. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

EFİL, C., SAĞALTICI, D., ve BEŞLİ, N., 2018. GAP Bölgesi için Güneş Takip Sistemi Yapılarının ve Kontrol Yöntemlerinin İncelenmesi. Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi. 10-12 Mayıs 2018, Şanlıurfa, s.356-357

SAĞALTICI, D., ALAY, F., D., EFİL, C., ve İLHAN, N., 2018. Veri Madenciliği Yöntemleri İle Meteorolojik Verilerden Kayıp Güneş Işınım Değerlerinin Tahmini . Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi. 10-12 Mayıs 2018, Şanlıurfa, s.335-336

EKLER

EK 1 Kapasite değişimini gösteren MATLAB Kodu

```
Ctr0=Variant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.455633906090685e-6);
Ctr1=Variant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.45544225665236e-6);
Cc0=Variant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.455633906090685e-6);
Cc1=Variant_Fonk(-2.8990213947648327e-6,-0.45544225665236e-6);

KCtr0=KVariant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.455633906090685e-6);
KCtr1=KVariant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.45544225665236e-6);
%%%%%%    DDA
KCc0=KVariant_Fonk(-2.8975507874997852e-6,-0.455633906090685e-6);
KCc1=KVariant_Fonk(-2.8990213947648327e-6,-0.45544225665236e-6);

TFark1=Ctr1-KCtr1;
TFark0=Ctr0-KCtr0;
CFark1=Cc1-KCc1;
CFark0=Cc0-KCc0;

TDeg_Fark=TFark1-TFark0;
CDeg_Fark=CFark1-CFark0;

figure('Name','1 deg/s dönüş için kapasite
farkları','NumberTitle','off');

plot(1e18*TDeg_Fark);
xlabel('Time');
ylabel('Kapasitans(aF)');
title('1 deg/s dönüş için kapasite farkları');
hold on

plot(1e18*CDeg_Fark);
legend('Geleneksel','DDA')
 function [ C ] = Variant_Fonk(deltaL, deltag)
    freq=11333;
    t=0/freq:0.0001/freq:5/freq;
    n=25;
    g=1e-6;
```

```
    Ls=20e-6;
    z=24e-6;
    e=8.85e-12;

C=(n*(Ls+deltaL*sin(2*pi*freq*t))*z*e)./(g+deltag*sin(2*pi*freq*t));

function [ C ] = KVariant_Fonk(deltaL, deltag)
    freq=11333;
    t=0/freq:0.0001/freq:5/freq;
    n=25;
    g=1e-6;
    Ls=20e-6;
    z=24e-6;
    e=8.85e-12;
    C=(n*(Ls-deltaL*sin(2*pi*freq*t))*z*e)./(g-
deltag*sin(2*pi*freq*t));
end
```