

**Akustik Dalga Karışımları Azaltılmış 2-D Elmas Membranlı
Mikroüretilmiş Kapasitif Ultrason Çevirgeç Dizileri**

Proje No: 110E072

Doç. Dr. Barış BAYRAM

EYLÜL 2013

ANKARA

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında literatürdeki ilk 2-D elmas membranlı kapasitif mikroüretilmiş ultrason çevirgeç (CMUT) dizilerinin tasarımı ve mikroüretimin önemli bir kısmı ile çevirgeç dizilerinin sürülmesine yönelik entegre devrelerin tasarım ve üretimi tamamlanmıştır. Proje, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM) başta olmak üzere Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM) temizalanlarında gerçekleştirilen çalışmalarla gerçekleştirilmiştir. Proje önerisinde belirtilen Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) temizalan altyapı ve imkanlarının proje kapsamında kullanılması mümkün olamamıştır. 1 Eylül 2010 ile 1 Eylül 2013 tarihleri arasında Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) ana desteğiyle yürütülen projenin tamamlanması ODTÜ BAP Koordinatörlüğü ve Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA)'nin sağladığı finansal destek ile TÜBİTAK-UEKAE Yarıiletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (YİTAL), ETİ-MADEN İşletmeleri ve EVGroup (St.Florian am Inn, Avusturya) firmalarının sağladığı hizmetlerle sağlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
İÇİNDEKİLER.....	2
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	3
TABLolar LİSTESİ.....	5
ÖZET.....	6
ABSTRACT.....	7
1. GİRİŞ.....	8
2. GENEL BİLGİLER.....	9
3. GEREÇ VE YÖNTEMLER.....	12
3.1 CMUT: Tasarım.....	12
3.2 CMUT: Mikroüretim.....	16
3.3 Entegre Devre Tasarımı.....	18
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	31
5. SONUÇLAR.....	38
REFERANSLAR.....	59
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 2-D CMUT dizisi mikroüretimi için tasarlanan 4-inç pul boyutunda maske tasarımı.....	12
Şekil 2. 4x4 CMUT dizisi için MASK #1-6 maskelerinin görüntüsü.....	13
Şekil 3. CMUT dizisi için ön yüzü şekillendiren MASK #1-4 maskelerinin görüntüsü.....	14
Şekil 4. CMUT dizisi için arka yüzü şekillendiren MASK #5-6 maskelerinin görüntüsü.....	15
Şekil 5. 2-D CMUT dizisi mikroüretimi için geliştirilen özgün proses adımları.....	17
Şekil 6. 4x4 CMUT dizisi ve entegre devrenin toplu gösterimi.....	18
Şekil 7. Tüm ASIC tasarımı için blok diyagram.....	19
Şekil 8. Her CMUT elemanı için hüzme oluşturucu blok diyagramı.....	20
Şekil 9. Bir bit dinamik shift registeri.....	20
Şekil 10. 8-bit komparator tasarımı.....	21
Şekil 11. CMUT seçme topolojisi.....	22
Şekil 12. One-shot devresi.....	23
Şekil 13. Dijital kontrollü geciktirme elemanları için ENABLE devresi.....	24
Şekil 14. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi.....	25
Şekil 15. Tasarımın son planı.....	27
Şekil 16. Düşük gerilim bölümünün çizimi.....	27
Şekil 17. Yüksek gerilim bölümünün ilgili kısımları.....	28
Şekil 18. 4x4 CMUT dizisine yönelik tasarlanan ve XFAB'da üretilen entegre devre....	29
Şekil 19. FPGA için gerekli geciktirme kodlarını hesaplayan MATLAB GUI programının kullanıcı arayüzü.....	30
Şekil 20. Maskelerin toplu görüntüsü.....	31

Şekil 21. Maskelerin açık görüntüsü.....	31
Şekil 22. Hizalama imgesi 1'in mikroskop görüntüsü.....	33
Şekil 23. Hücrelerin mikroskop altındaki fotoğrafı.....	33
Şekil 24. Birleştirilen pulların taramalı akustik mikroskop görüntüsü.....	33
Şekil 25. Soldan sağa Ti/Cu/Au kaplanmış pul ve Ti/Cu/Au üzerine SiO ₂ kaplanmış pul.....	34
Şekil 26. TMAH aşındırma düzeneği.....	34
Şekil 27. TMAH aşındırması yapılmış pulun arka yüzeyi.....	35
Şekil 28. Geliştirilen ölçüm sistemi arayüzü.....	36
Şekil 29. Ölçüm sistemi donanımı.....	36
Şekil 30. Ölçüm sonuçları.....	37
Şekil 31. Vaksis PECVD cihazı gaz akış delikleri.....	40
Şekil 32. ψ ve Δ açıları.....	41
Şekil 33. Kırılma sabiti 'n'.....	42
Şekil 34. n ve k değerleri.....	43
Şekil 35. Yeşil kısmın verileri.....	44
Şekil 36. Sarı kısmın verileri.....	45
Şekil 37. Sırasıyla yeşil kısmın ve mor kısmın kalınlık verileri.....	46
Şekil 38. Yeşil kısım için n ve k değerleri.....	47
Şekil 39. Mor kısım için n ve k değerleri.....	47
Şekil 40. RTA işleminden sonra sırasıyla yeşil kısmın ve mor kısmın kalınlık verileri.....	49
Şekil 41. RTA işleminden sonra yeşil kısım için n ve k değerleri.....	49
Şekil 42. RTA işleminden sonra mor kısım için n ve k değerleri.....	50

Şekil 43. 0.226um PECVD oksitli pul için AFM ölçüm sonucu.....	51
Şekil 44. 0.226um PECVD oksitli pul için AFM analiz paneli.....	52
Şekil 45. 1um termal oksitli pul için AFM ölçüm sonucu.....	53
Şekil 46. 1um termal oksitli pul için AFM analiz paneli.....	54

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi.....	26
Tablo 2. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi.....	26

ÖZET

Elmas, rakipsiz sertliği ve dayanıklılığı, sürtünmeyle ilgili mükemmelen performansı, ayarlanabilen ve dengeli yüzey kimyası, yüksek termal iletkenliği ve düşük termal genleşmesi, içinde yayılan akustik dalgaların hızının yüksekliliği, ve biyouyumluluğu ile mikroeletromekanik ve nanoteknoloji alanlarında çığır açabilecek potansiyele sahiptir. Bu potansiyel mikroeletromekanik sistemler (MEMS) alanında mikroüretilmiş kapasitif ultrason evirgeler (CMUT) zerinde yürüttüğümüz araştırmalarla açığa çıkartılmıştır. Proje kapsamında 2-D mikroüretilmiş kapasitif ultrason çevirgeç dizilerinin tasarımı ve mikroretimden önemli bir kısmı gerekleştiretilmiştir. Ayrıca üretilen çevirgeç dizilerine uygun özgün bir tümdevre tasarlanmış ve hizmet alımı yoluyla üretimi tamamlanmıştır. Tıpta tedavide kullanılmaya uygun yüksek performanslı ve elmasa dayalı özgün bir 2-D ultrason çevirgeç dizisi gelecekte endüstriyel ürüne dönüştürülmek üzere geliştiretilmiştir. Bu evirge dizisinin performans ve dayanıklılık yönüyle uluslararası dzeyde rekabet edebilecek zgn bir ürün olması literatüre katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: ultrason, CMUT, MEMS, elmas, çevirgeç, mikroretim

ABSTRACT

Diamond has potential to create a new era in the areas of microelectromechanics and nanotechnology due to unrivalled stiffness and hardness, excellent tribological performance, highly tailorable and stable surface chemistry, high thermal conductivity and low thermal expansion, high acoustic velocity of propagating waves, and biocompatibility. This potential in the area of microelectromechanical systems (MEMS) has been revealed through our research on capacitive micromachined ultrasound transducers (CMUTs). In this project, the design and significant part of microfabrication of 2-D capacitive micromachined ultrasound transducer arrays have been completed. Additionally, a novel integrated circuit suitable for the microfabricated CMUT array is designed and this design is built via a foundry service. An original, high performance, diamond-based 2-D capacitive micromachined ultrasound transducer array suitable for therapeutic medical applications is developed with the intention of future industrial product development. This transducer array being a novel product having a competitive edge at an international scale in terms of performance and durability presents potential to contribute to international literature.

Keywords: ultrasound, CMUT, MEMS, diamond, transducer, microfabrication

1. GİRİŞ

Ultrason dalgaları oluşturan ya da algılayan aygıtlar, kısaca ultrason çevirgeçler, çok geniş kullanım alanlarına sahip olmalarına rağmen özellikle tıp alanındaki uygulamalarıyla ilgi çekmektedirler. Son yıllarda mikroeletromekanik sistemler (MEMS) teknolojisi kullanılarak üretilen kapasitif mikroüretilmiş ultrason çevirgeçler (CMUT) de araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin ötesinde endüstriyel bir ürün olarak ortaya çıkma aşamasındadır. 2010 yılında geliştirdiğimiz elmas membranlı çevirgeç mikroüretim tekniği CMUT performansının elmasın üstün malzeme özellikleriyle güçlendirilmesini sağlamıştır.

Bu araştırma projesinin amacı MEMS teknolojisi ve elmas malzeme kullanılarak 2-D CMUT dizisi ve bu diziyeye uygun sürücü entegre devre geliştirilmesi ve her ikisinin birleştirilerek test edilmesidir. 2-D CMUT dizisi ve buna uygun entegre devre geliştirilmesi ve üretimi tamamlanmıştır. Ancak entegre devrenin XFAB'dan hizmet alımı bedeli proje bütçesinde bulunmadığı ve ek ödenek talebi de TÜBİTAK tarafından defalarca reddedildiği için karşılanamamış ve birleştirilme ve test işlemi gerçekleştirilememiştir.

Elmas membranlı 2-D CMUT dizisinin ve entegre devresinin gelecekte, özellikle tıpta, tedaviye yönelik endüstriyel ürün olarak sunulabileceği öngörülmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Ultrason temel olarak insan duyma eşiğinin üzerinde 20 kHz ile 200 MHz frekans aralığındaki ses dalgalarıdır. Dalga frekansları; uygulamalarda genellikle 1 MHz ve 40 MHz arasında yaygındır. Ultrasonik dalga kullanılarak tıbbi teşhis, sonar sistemleri ve malzemelerin tahribatsız değerlendirilmesi gerçekleştirilebilir. Kanser de dahil pek çok hastalığın belirlenmesi ve kontrollü bir şekilde tedavi edilmesinde kan biyoişaretlerinin kullanımı önemli bir potansiyele sahiptir. Ultrason enerjisi kullanılarak biyoişaretlerin hücrelerde buldukları yerler belirlenip, sadece hastalıklı dokuya gerekli müdahale edilebilir. Ultrason kullanımıyla çevredeki sağlam dokulara zarar vermeden tedavinin mümkün olduğu hücre kültürleri ve denek fareler üzerinde elde edilen başarılı sonuçlarla gösterilmiştir (D'SOUZA vd., 2009).

Ultrason dalgalarını oluşturan ve algılayan ağıta ultrasonik çevirgeç denir. Ultrasonik çevirgeçlerin MEMS teknolojisiyle üretilenlerine kapasitif mikroüretilmiş ultrasonik çevirgeç (CMUT) adı verilmektedir. Kapasitif mikroüretilmiş ultrasonik çevirgeç (CMUT) temel olarak birbirlerine elektriksel olarak bağlı olan paralel çok sayıda hücreden oluşmaktadır. Her hücre bir rezonatör olmakla birlikte hareket eden bir membran bir boşluk üzerine yerleştirilmiştir (HALLER ve KHURI-YAKUB, 1994). Güvenilirlik, frekans tepkisi, akustik empedans ve çıkış basınç değeri parametrelerine bağlı olarak CMUT hücre büyüklüğü ve şekli, membran topolojisi, yalıtım katmanlarının yapıları en iyi şekilde tasarlanmaktadır (FRENCH ve SARRO, 1998, HUANG vd., 2004, ZHOU vd., 2005, HUANG vd., 2005, SENLIK vd., 2005, WONG vd., 2008).

DC gerilim uygulanarak CMUT membranlarının çökmesi sağlanmaktadır. Bu çökme noktası; hassasiyet, frekans tepkisi ve toplam akustik çıkış basıncı parametreleri açısından önemlidir. Verici olarak kullanıldığında, DC gerilim ile çökertilen membranlar üzerine AC gerilim uygulanmakta ve bunun sonucunda membranlar titreşerek basınç dalgası üretmektedir (HALLER ve KHURI-YAKUB, 1994).

Silisyum tabanlı CMUT çevirgeçler mikron mertebesinde üretim hassasiyeti ve malzemenin homojen dağılımı esas alınarak, MEMS teknolojisi metotları kullanılarak üretilmektedir. Membranların iletkenlikleri, dielektrik sabitleri, kalıntı gerilmeleri üretim biçimlerine göre farklılık göstermektedir (JIN vd., 1998). MEMS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, silisyum mikroişlemede meydana gelen gelişmelere bağlı olarak çevirgeç tasarımında şekil, ölçü ve dağılım yönünden esnek çevirgeç üretimleri gerçekleştirilmiştir (KHURI-YAKUB vd., 2000). Silisyum mikroişleme teknolojisi monolitik ya da çipe entegre edilerek elektronik entegrasyonu sağlamıştır. Uygun entegrasyon yöntemlerinin kullanılması sonucunda parazitik direnç azaltılmıştır (ECCARDT ve NIEDERER, 2000, ZHUANG vd., 2007).

MEMS teknolojisi kullanılarak, 1994 yılında silisyum yüzey işleme metoduyla elektrostatik çevirgeç üretilmiştir (HALLER ve KHURI-YAKUB, 1994). Bu çevirgeç 1.9 MHz'de havada çalışan, araya girme kaybı 26 dB olan ve %20 bant genişliğine sahip bir cihazdır. Piezoelektrik malzemeden yapılmış çevirgeçlerle karşılaştırıldığında, kısmen daha kötü bir araya girme kaybı olsa da, 4 kat daha iyi bant genişliğine sahiptir (HALLER ve KHURI-YAKUB, 1994).

İlk CMUT'lar silisyum nitrürden (Si_3N_4) yapılmıştır (LADABAUM vd., 1998). MEMS teknolojisindeki gelişmelerle ilerleyen dönemlerde tek kristal yapılı silisyum membranlar oluşturulmuştur (HUANG vd., 2003). Silisyum nitrür kullanılarak üretilen membranlarda oluşan ve üretim aşamalarında tam olarak kontrol edilemeyen yüksek stres seviyeleri çevirgecin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Tek kristal yapılı silisyum membranlı CMUT yapıları stressiz oluşlarıyla silisyum nitrür membranlardan daha iyi performans sergilemelerine rağmen silisyumun kırılgen yapısı ile dayanıklılık yönünden başka sorunlarla karşılaşmaktadır (HUANG vd., 2003).

Tedavi edici ultrason uygulamalarında çevirgeçler tek bir frekansta çalışmakta ve dar bir bant aralığında uyarılmaktadır. Tedavi edici ultrason manyetik rezonans görüntülemeyle (MRI) birlikte kullanıldığında yaşama şansını arttırmakta, sağlık harcamalarını düşürmekte ve hastalara daha kapsamlı tedavi imkanlarını sağlamaktadır (ARCHER vd., 2000, KHURI-YAKUB, 2009, WONG vd., 2010).

Geleneksel olarak CMUT'lar silisyum üzerine yüzey işleme teknikleriyle üretilmiştir. Bu işlem ince film kaplama, şekillendirme, aşındırma basamaklarını içermektedir (JIN vd., 1999). Bu teknikle üretilen CMUT membranları, üretim aşamalarındaki zorluklar yüzünden boyut ve çalışma frekans aralıklarının belirlenmesinde kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Vakumlu ortamda doğrudan silisyum bağlama metoduyla CMUT'ların üretimlerinde karşılaşılan sorunlar kısmen çözülmüştür. Bu metotta, çevirgecin membranı yalıtkan üstündeki silisyuma ve boşluğu da silisyum pula şekillendirilmiştir. Bu iki pul doğrudan pul bağlama metoduyla birbirlerine bağlanmıştır. Bu metot yüzey işleme metodundan farklı olarak geniş frekans aralığında ve değişik boyutlarda membran üretimine olanak sağlamıştır (HUANG vd., 2003).

Ultrason dalgalarının vücut üzerinde belli bir noktaya odaklanması yöntemiyle tedavi etme uygulamaları literatürde önemli bir yere sahiptir (KENNEDY vd., 2003, D'SOUZA vd., 2009, WONG vd., 2010). Odaklanmış ultrason temelli MRI uygulamalarına örnek olarak kanser hücresi, beyin tümörü tedavisi, fibroid ve kemik tedavisi verilebilir (KOPELMAN vd., 2007, HESLEY vd., 2008, WONG vd., 2010).

CMUT'lar ultrason uygulamalarda üstün özelliklere sahiptir. Membranın mekanik empedansı gözönüne alındığında sıvıların akustik empedansından daha küçüktür. Bu durum sayesinde, CMUT aşırı sönümlü bir sistem olmasının yanında geniş bant genişliği ve sıvı ile verimli etkileşim sağlamaktadır (LADABAUM vd., 1998).









Elmas malzeme olarak biyouyumluluğu, akustik dalga iletiminin yüksekliği, düşük termal genleşme özelliği, üstün sertlik ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı MEMS teknolojisi uygulanabilirliği açısından üstün performans sergilemektedir. Elmas fiziksel özellikleri ve kimyasal bağ yapısı dikkate alındığında nükleer radyasyon dedektörleri, fotosensörler, fotoyayıncılar, aktif ve pasif mikroelektronik parçaların üretiminde kullanılmaktadır (ALTUKHOV vd., 2004). Katı maddeler arasında en yüksek bağ yoğunluğuna sahip olan elmas ($3.5 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$), bu avantaj ile yüksek elektriksel aktiviteye ve mükemmel yüzey emisyonuna sahiptir (ALTUKHOV vd., 2004). Bu özellikleri göz önüne alındığında elmas membranlı çevirgeçlerin literatürdeki önemi anlaşılabilir. MEMS teknolojisindeki gelişmelerle elmasın üstün özellikleri birleştirilerek üretilen çevirgeçler çalışmalarımızla literatüre kazandırılmıştır (BAYRAM, 2010, BAYRAM, 2011, BAYRAM ve ALTINOLUK, 2011, BAYRAM, 2012, CETIN ve BAYRAM, 2013).

Bu projede elmas membranlı çevirgeçler ilk kez 2-D CMUT dizisi şeklinde tasarlanmış ve üretimin önemli bir kısmı tamamlanmıştır. Yüksek gerilimli (45-V) entegre devre sürücüsü de tasarlanmış ve hizmet alımı yoluyla üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların literatüre önemli katkıları olacağı düşünülmektedir.

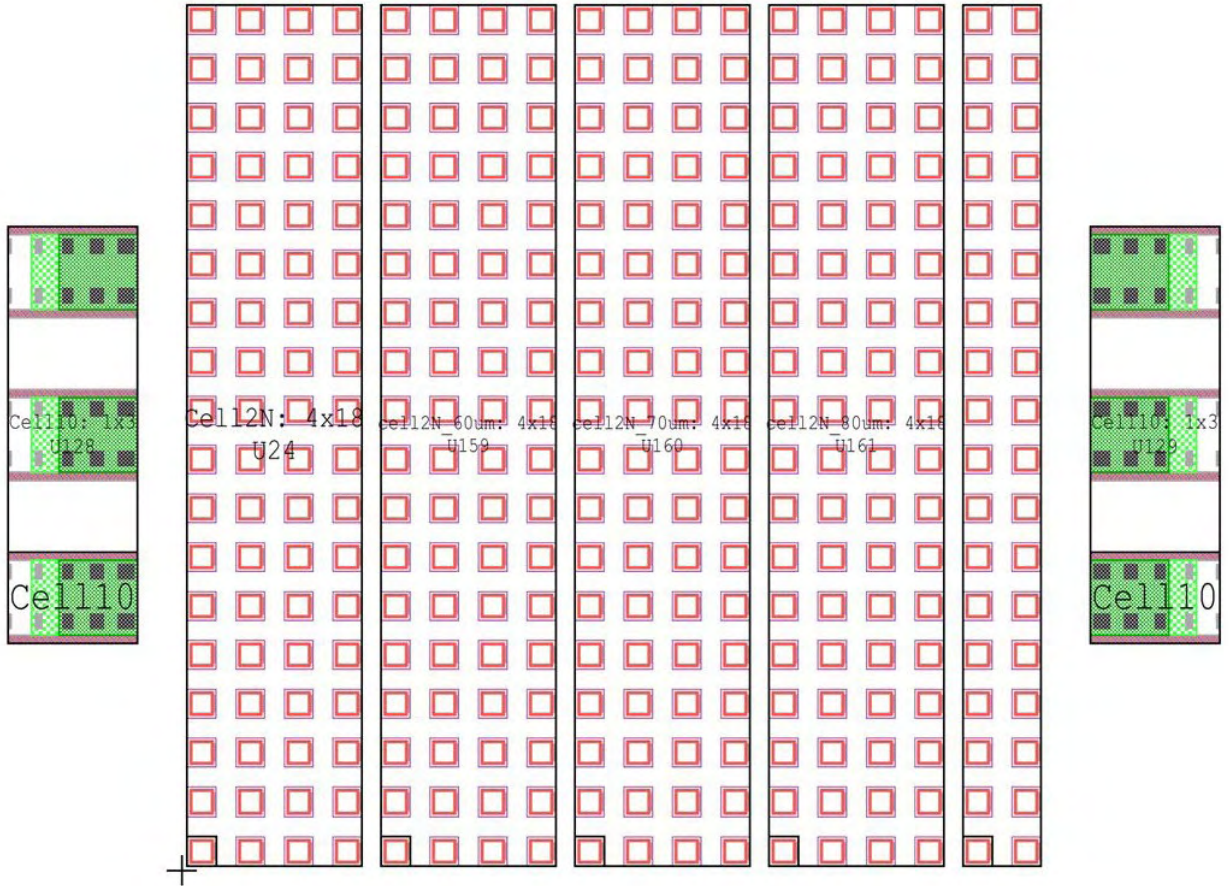
3. GEREÇ VE YÖNTEM

Kapasitif mikroüretilmiş ultrason çevirgeçler (CMUT) ile ilgili olarak yapılan çalışmalar CMUT:Tasarım, CMUT: Mikroüretim ve Entegre Devre Tasarımı olmak üzere 3 grup halinde sunulabilir:

3.1 CMUT: Tasarım

	4 ISOLATION		MARK2		2SEPARATE
	5FRAME		MARK345		3ELECTRODE
	6METAL		1CAVITY		

Major tick=10000 Minor tick=1000 (UM)

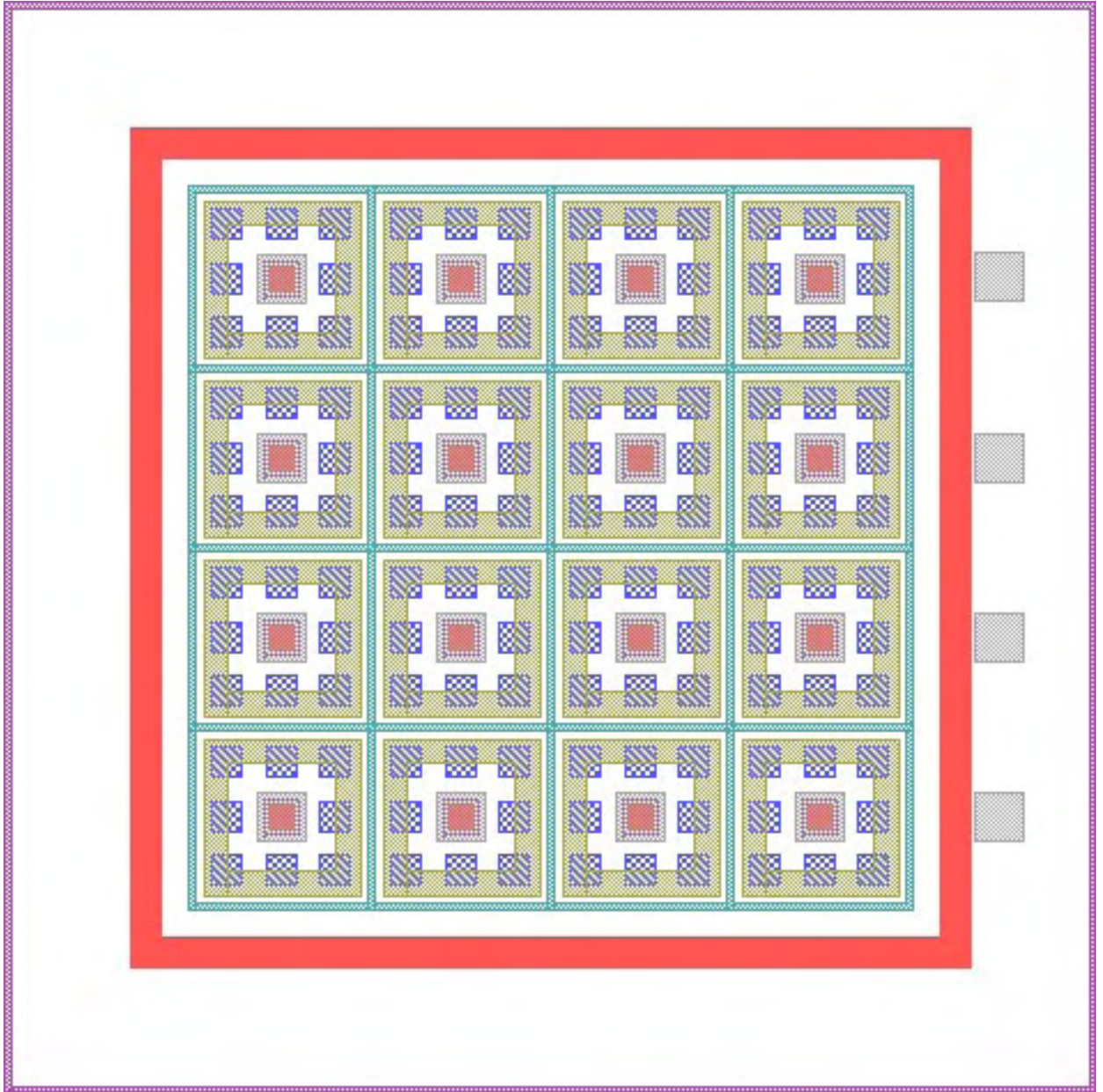


Şekil 1. 2-D CMUT dizisi mikroüretimi için tasarlanan 4-inç pul boyutunda maske tasarımı.

2-D CMUT dizilerinin ve hizalama işaretlerinin bulunduğu maskelerin tümü Şekil 1'de verilmiştir. Toplam $18 \times 18 = 324$ adet CMUT dizi tasarımı bulunmaktadır. Bu tasarımların içerisinde aslında 4 farklı tasarım ($4 \times 18 = 72$ adet aynı tasarım) bulunmaktadır. En sondaki kolon

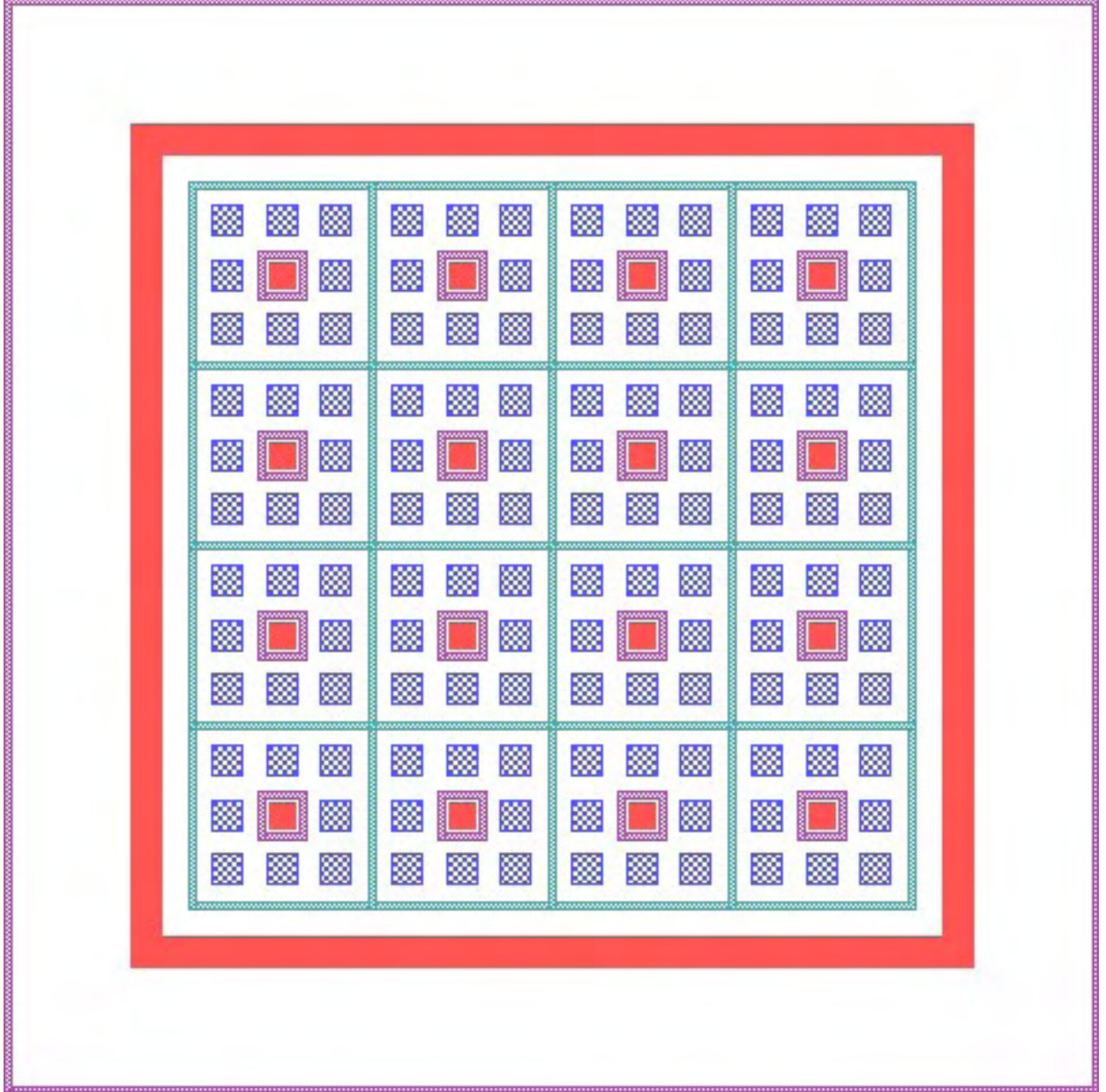
(2x18=36) x ve y ekseninde simetrik dağılım için eklenmiştir. Böylece her iki yönde de 18 tasarım bulunmaktadır.

Farklı tasarımlarda değişken olan tek maske MASK#1 CAVITY maskesidir (Şekil 2). Bu maske membran boyutlarını belirlemekte ve titreşim frekansını etkilemektedir. Mavi renkli karelerin kenar uzunluğu 50 µm, 60 µm, 70 µm ve 80 µm olarak değişmektedir. Şekil 2'de 50 µm kenar uzunluklu tasarım maskesi gösterilmektedir.

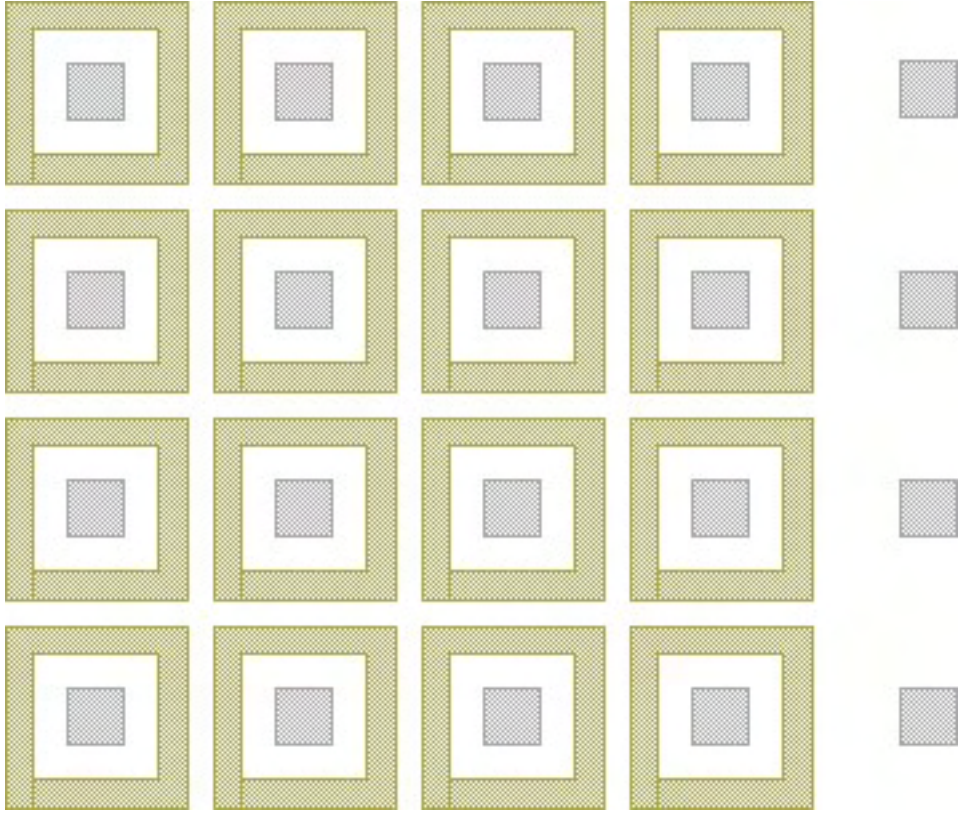


Şekil 2. 4x4 CMUT dizisi için MASK #1-6 maskelerinin görüntüsü.

2-D CMUT mikroüretimde ön yüzü şekillendiren maskeler MASK #1-4 Şekil 3'te, arka yüzü şekillendiren maskeler MASK #5-6 Şekil 4'de gösterilmiştir. Tüm maskelerin birleşimi Şekil 2'de verilmiştir. Böylece elmas membranlı 2-D CMUT dizisi tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. CMUT dizisi için ön yüzü şekillendiren MASK #1-4 maskelerinin görüntüsü.

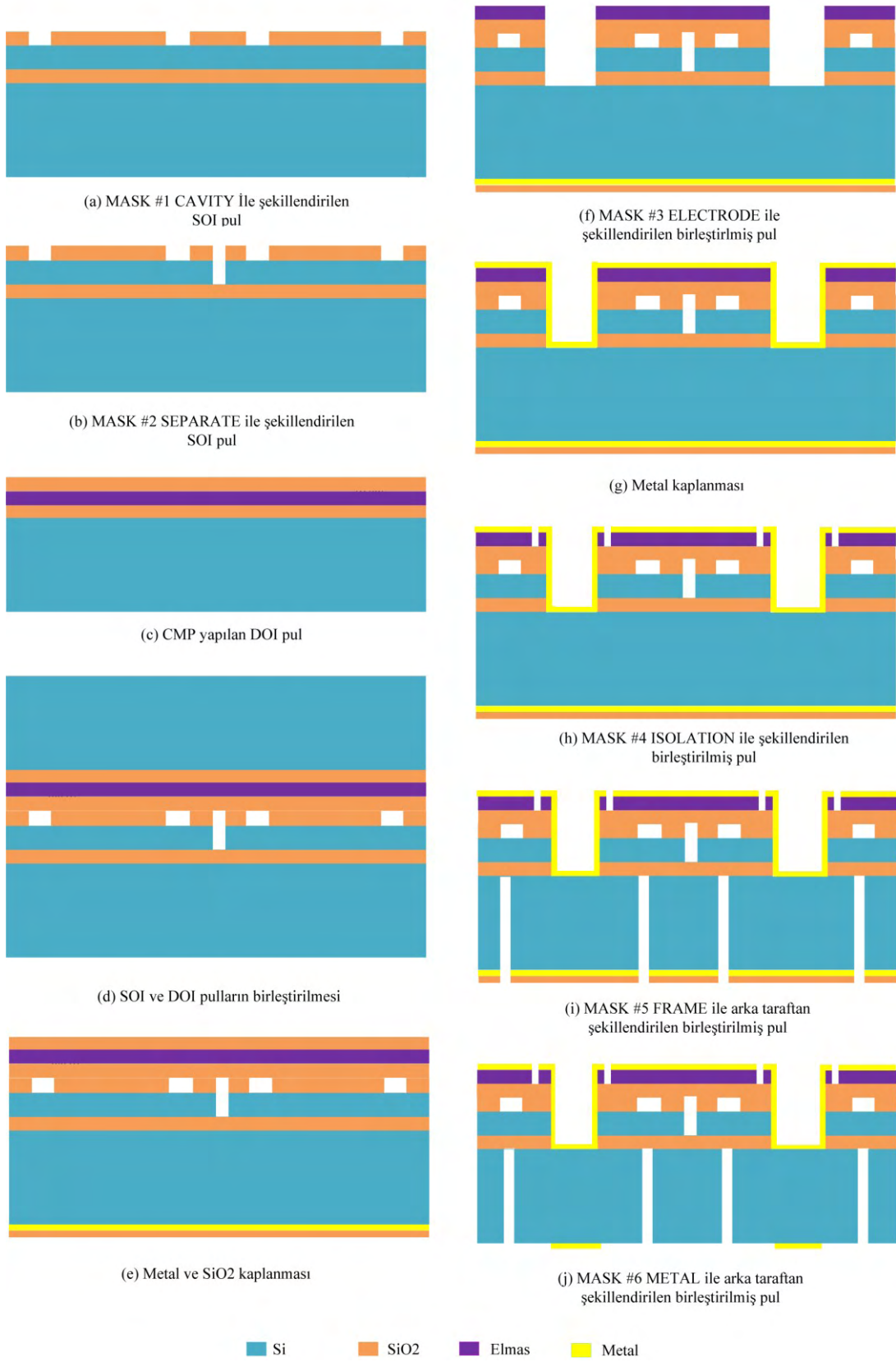


Şekil 4. CMUT dizisi için arka yüzü şekillendiren MASK #5-6 maskelerinin görüntüsü.

3.2 CMUT: Mikroüretim

Literatürdeki ilk 2-D elmas membranlı kapasitif ultrason çevirgeç mikroüretim aşamaları yoğun bir araştırma ve geliştirme çalışması sonrasında Şekil 5'de sunulan şekildedir.

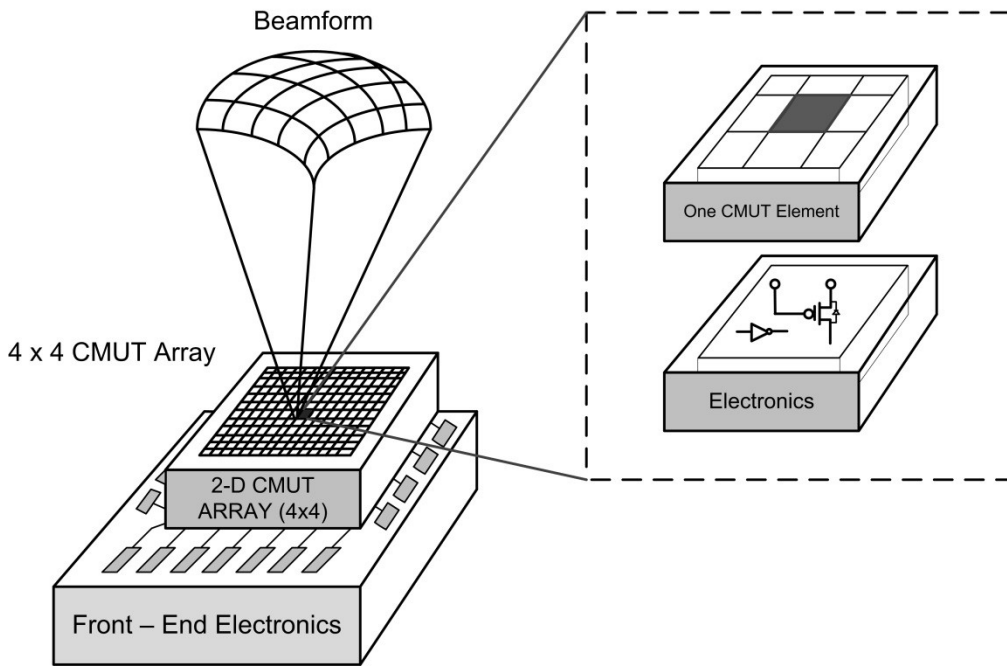
İlk olarak termal oksit kaplı SOI pul MASK#1 CAVITY ile şekillendirilmektedir (Şekil 5(a)). Bu maske ile membran altında boşluk oluşturulmaktadır. MASK#2 SEPARATE ile iletken silisyum tabaka şekillendirilmekte ve dizi elemanları elektriksel olarak birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 5(b)). Pulların birleştirilmesinde kullanılan elmas kaplı pul (DOI) PECVD-SiO₂ ile kaplanıp yüzey pürüzü CMP ile azaltılmaktadır (Şekil 5(c)). Hazırlanan SOI ve DOI pullar plazma aktivasyonlu pulların doğrudan birleştirilmesi metoduyla birleştirilmektedir (Şekil 5(d)). Birleştirilme sonrası alt pul metal ve SiO₂ ile kaplanmaktadır (Şekil 5(e)). Metal olarak Ti/Cu/Au kullanılmaktadır. SiO₂ ise metal yüzeyi korumaktadır ve DOI pulun silisyum kısmı TMAH ile ıslak metotla aşındırılmaktadır. MASK #3 ELECTRODE maskesi kullanılarak iletken elmas tabaka gömülü oksit tabakasını da içerecek şekilde aşındırılarak Şekil 5(f)'de gösterildiği hale getirilmektedir. Sonrasında üst yüzey de metal ile kaplanmaktadır (Şekil 5(g)). Metal iletken elmas yüzeyle ohmik bağlantı oluşturulmaktadır. MASK #4 ISOLATION maskesi ile üst elektrot alt elektrottan izole edilmektedir (Şekil 5(h)). Arka taraftan MASK #5 FRAME maskesi ile derin aşındırılan silisyum pul şekillendirilmektedir (Şekil 5(i)). Böylece alt pulun arka tarafından yapılacak elektrot bağlantıları birbirinden elektriksel olarak ayrılmaktadır. En son olarak MASK #6 METAL maskesi kullanılarak metal tabakası şekillendirilmektedir (Şekil 5(j)).



Şekil 5. 2-D CMUT dizisi mikroüretimi için geliştirilen özgün proses adımları.

3.3 Entegre Devre Tasarımı

CMUT'ları sürmek için entegre devre tasarımı çalışmaları ilk olarak CADENCE yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra TANNER yazılımı kullanılarak devam edilen çalışmalarda XFAB 0.35 μm teknolojisinde yüksek gerilim opsiyonu içeren (45-V) ve MPW (ing. Multi-project-wafer) yollu üretime uygun özellikler seçilmiştir. Entegre devre tasarımı tamamlanarak Mayıs 2013'te üretime gönderilmiştir. Ağustos 2013'te XFAB'da üretimi tamamlanan entegre devreler finansal kaynak sağlanamadığı için teslim alınamamıştır. Entegre devre çalışmalarının detayları Mohammad Maadi'nin Eylül 2013'te başarılı bulunan yüksek lisans tezinde bulunmaktadır (MAADI, 2013).

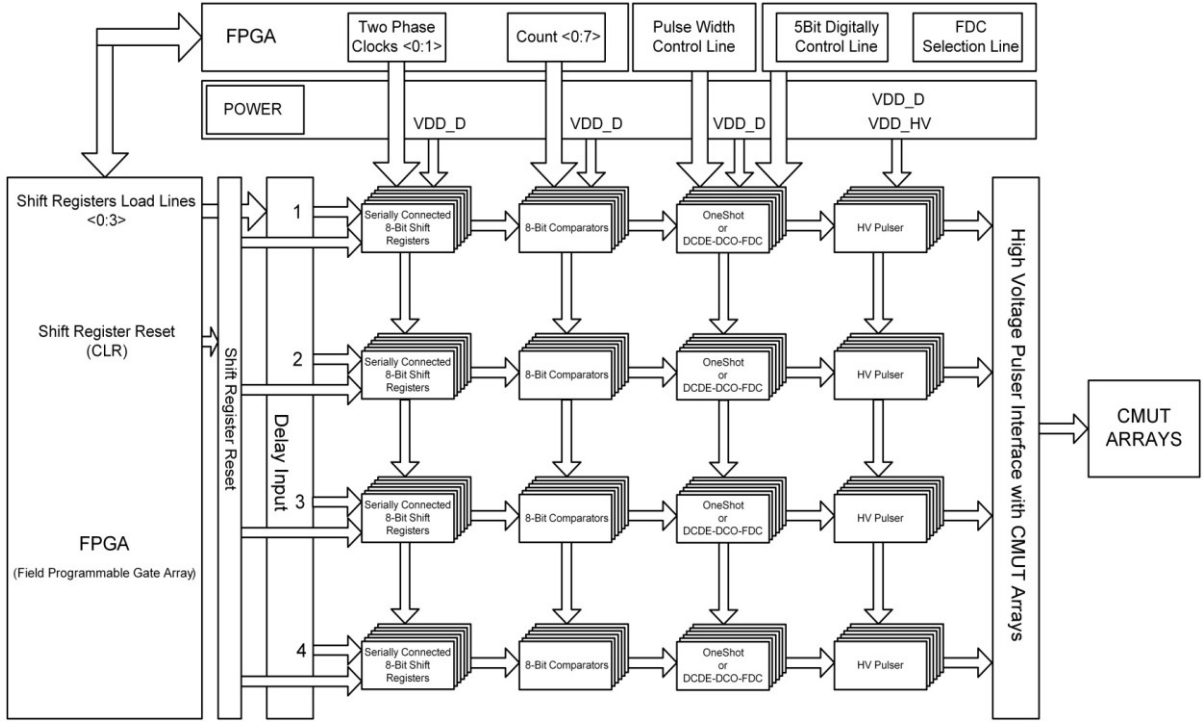


Şekil 6. 4x4 CMUT dizisi ve entegre devrenin toplu gösterimi.

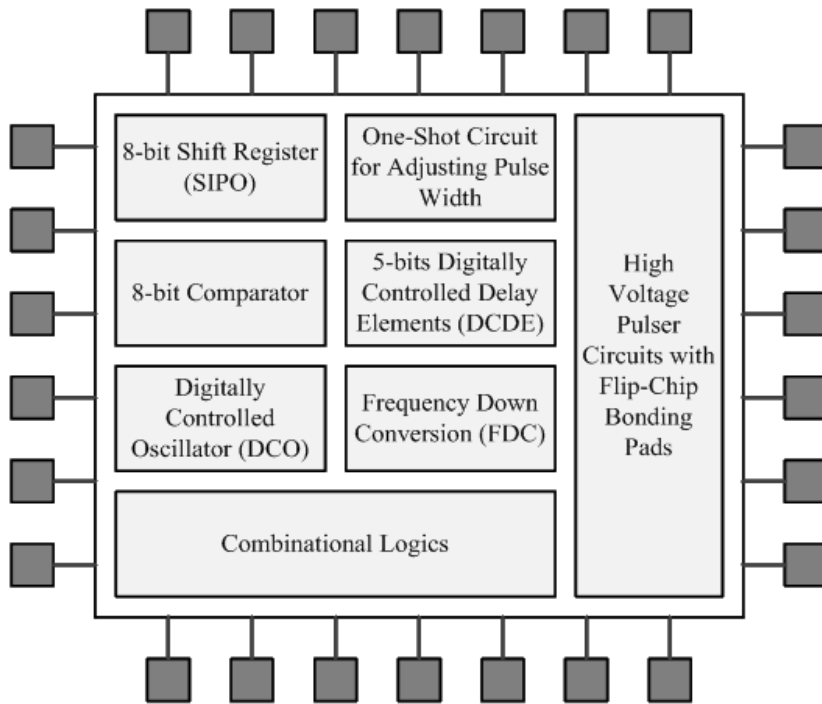
Proje kapsamında entegre devre ve CMUT'ların ayrı ayrı üretimi ve Şekil 6'da gösterildiği şekilde flip-çip metoduyla birleştirilmesi planlanmıştır. Bu üretim tekniği hem entegre devre hem de CMUT yapısının bağımsız ve ekonomik bir şekilde geliştirilmesine imkan sağlamıştır. Entegre devre üretim maliyetinin MPW'ya uyarlanarak düşürülmesi için 4x4 CMUT dizisi mikroüretimi ve buna uygun entegre devre üretimi amaçlanmıştır.

Entegre devre üretimi için uygulanan blok diyagram Şekil 7'de gösterilmiştir. Entegre devrenin FPGA yollu kontrolü ve değişik odak mesafelerine odaklanması mümkün olmaktadır. Her CMUT elemanı için hüzme oluşturucu blok diyagramı Şekil 8 (a,b)'de sunulmuştur. Şekil 8(a)'da verilen yapıda shift register, komparatör ve dijital kontrollü osilatör vasıtasıyla istenilen sinyallerin oluşturulması mümkün olmaktadır. FPGA ile belirlenen güncel değerlere göre pals

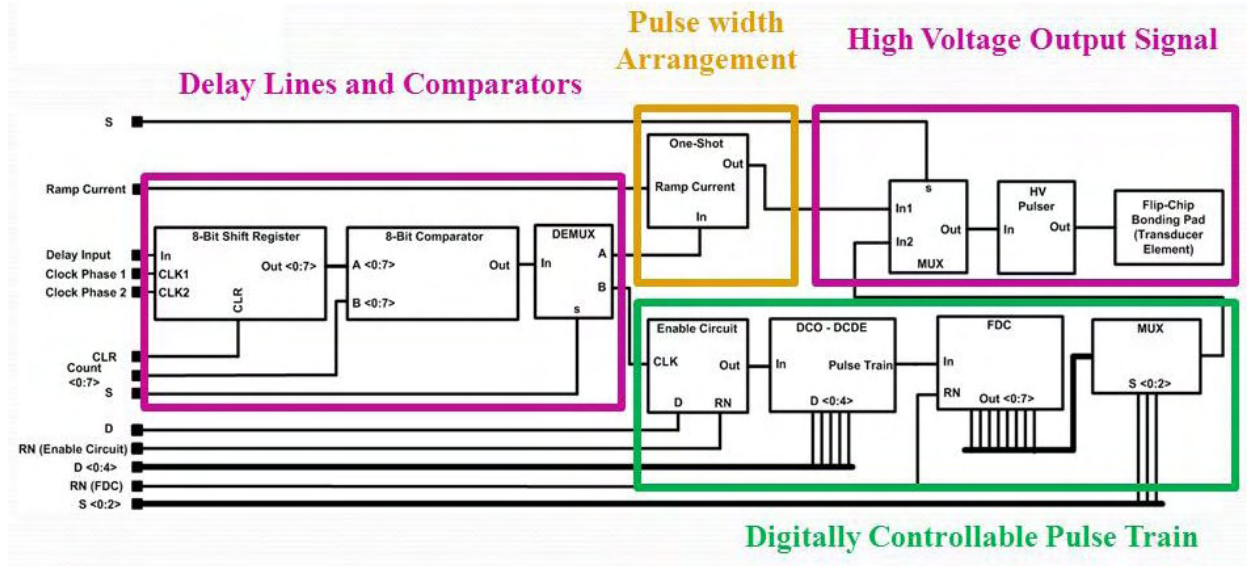
boyutları ve faz farkları oluşturulabilmektedir. En son aşamada ise yüksek gerilim pırsını kullanarak 45-V genlikli sinyaller oluşturulmakta ve CMUT'a sürücü sinyali gönderilmektedir.



Şekil 7. Tüm ASIC tasarımı için blok diyagram



(a)

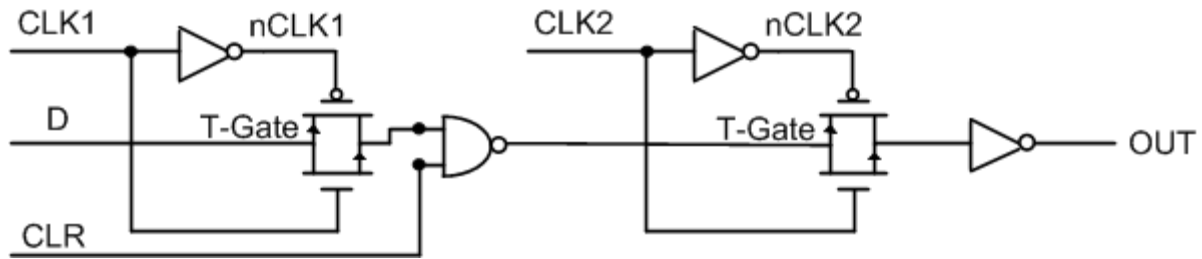


(b)

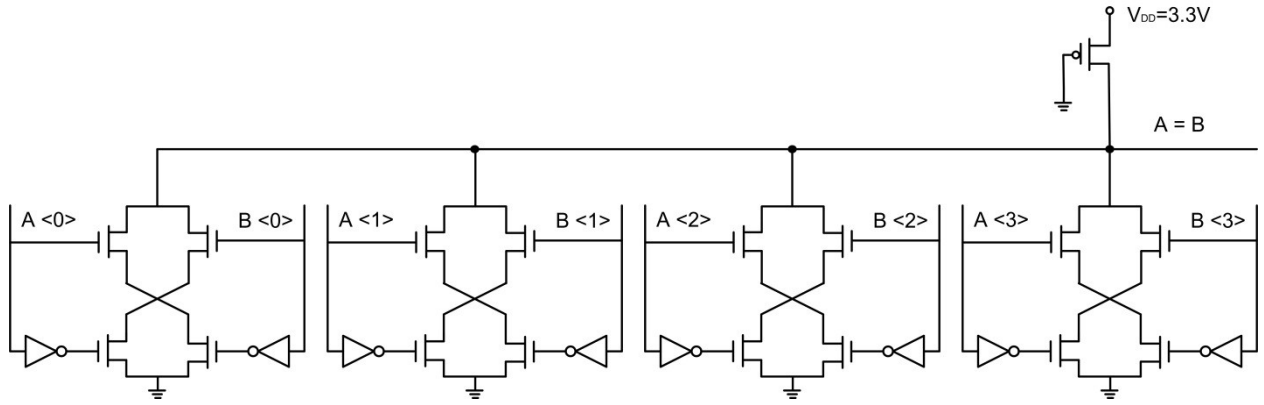
Şekil 8. Her CMUT elemanı için hüzme oluşturuvcu blok diyagramı

Bir bit dinamik sift regiterı Şekil 9'da verilmiştir. 8-bit komparator tasarımı ve simulyon sonuçları sırasıyla Şekil 10 (a) ve (b)'de verilmektedir.

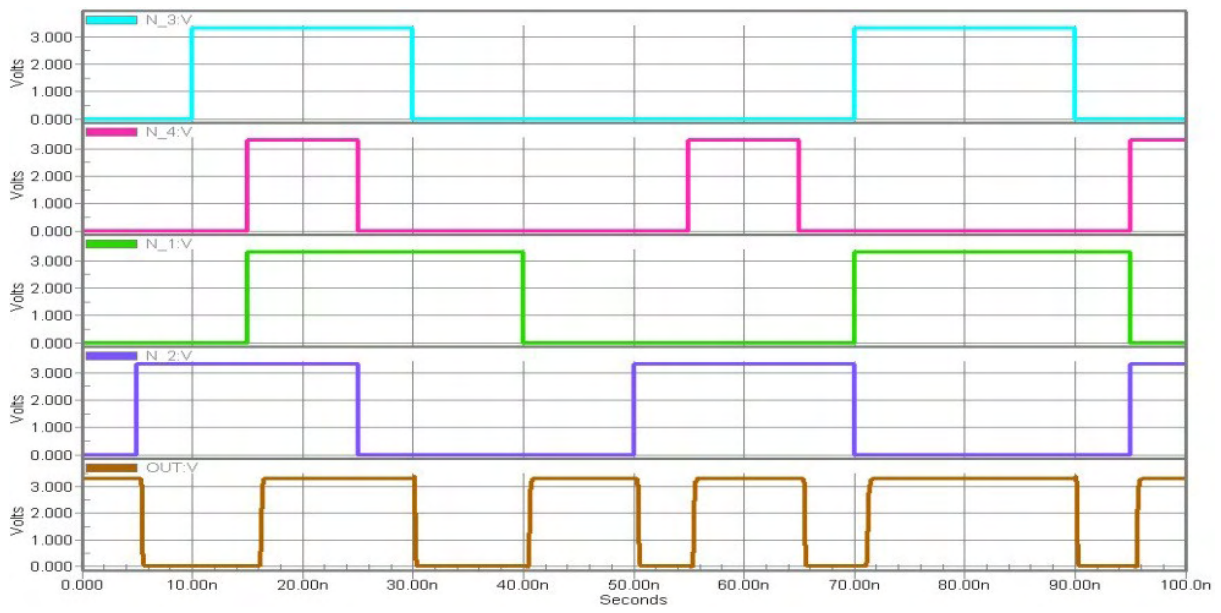
CMUT üzerinde toplam 16 adet birbirinden bağımsız dizi elemanı bulunmaktadır. Odaklanma için bunların herbirinin belli bir fazla sürülmesi gerekmekte ve bu amaca yönelik CMUT dizi elemanlarını seçmeye yönelik Şekil 11(a)'da sunulan CMUT seçme topolojisi kullanılmaktadır. Şekil 11(b)'de simulyon sonuçları verilmektedir. One-shot devresinin yapısı ve simulyon sonuçları Şekil 12 (a) ve (b)'de verilmektedir.



Şekil 9. Bir bit dinamik shift registerı

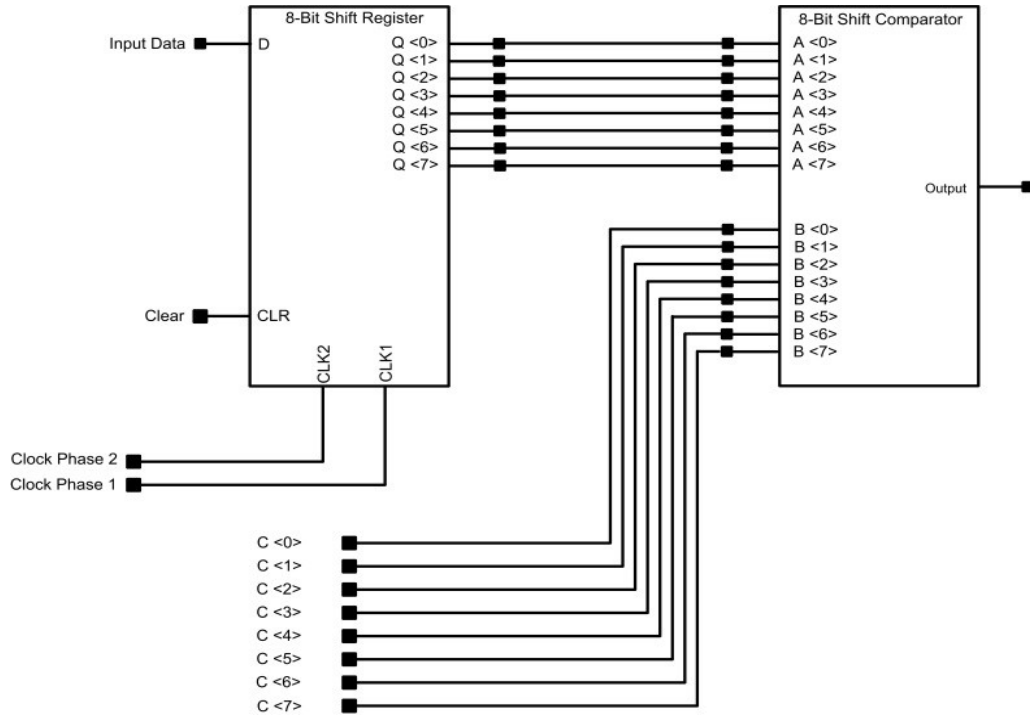


(a)

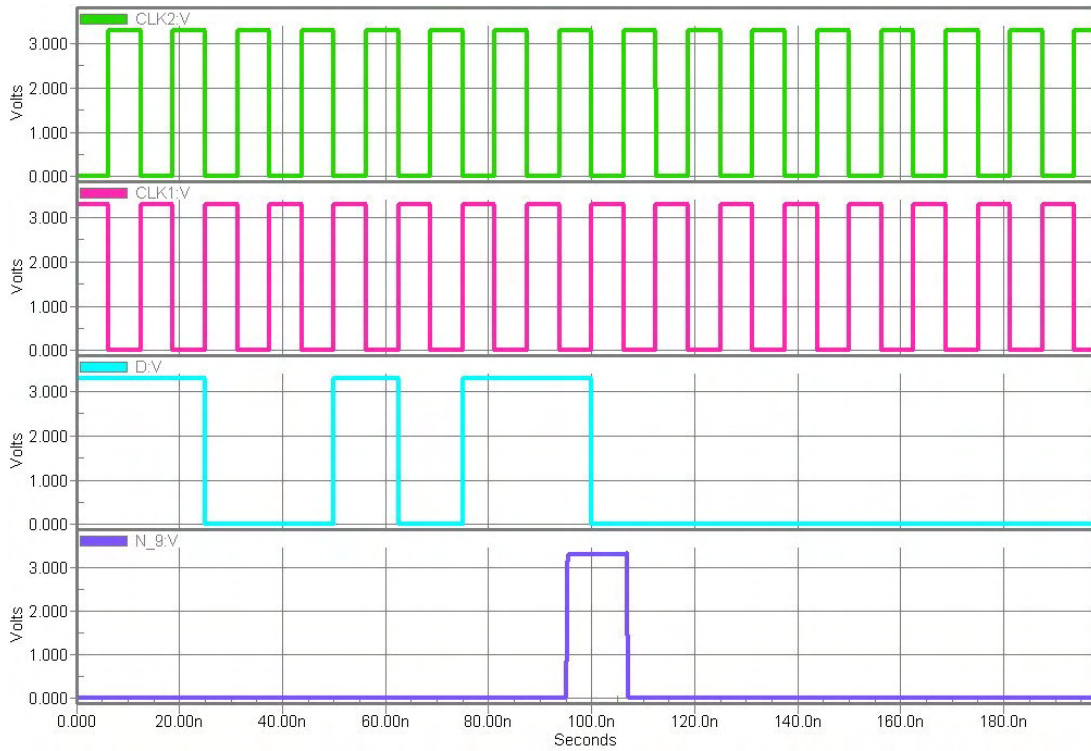


(b)

Şekil 10. 8-bit komparator tasarımı

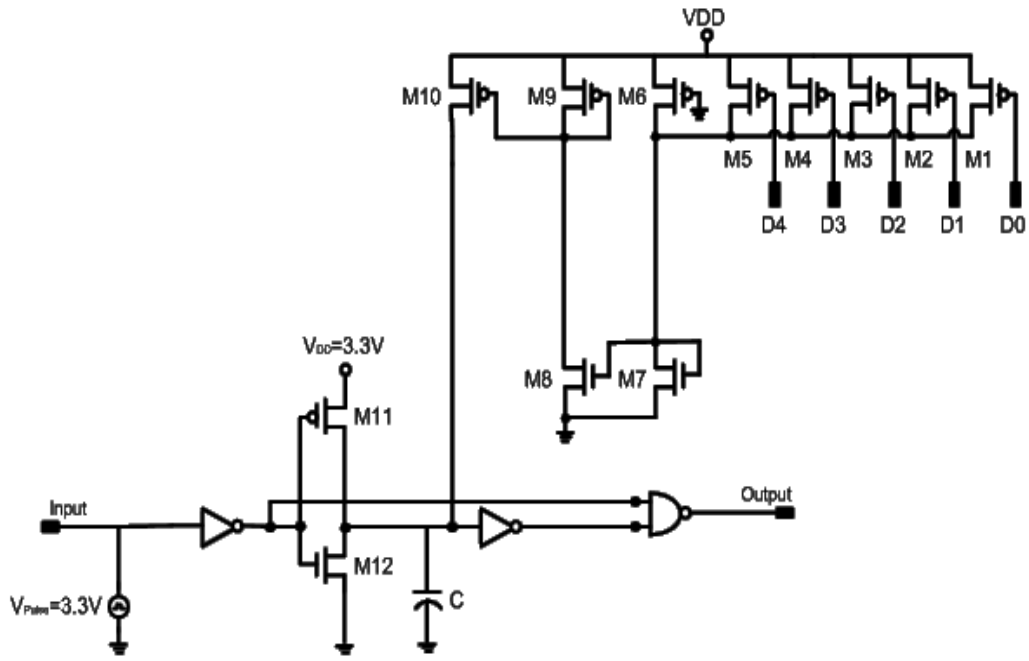


(a)

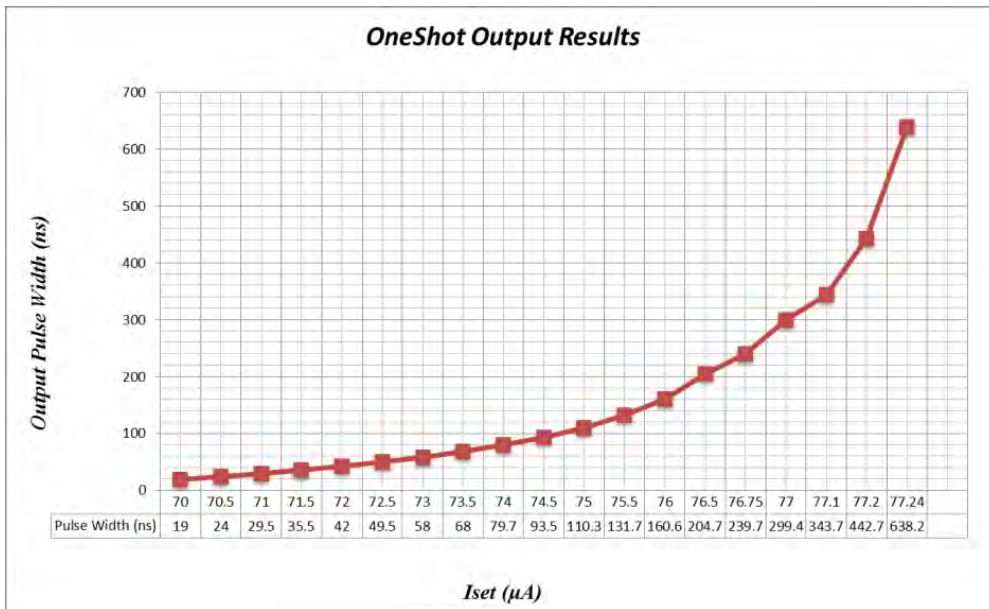


(b)

Şekil 11. CMUT seçme topolojisi

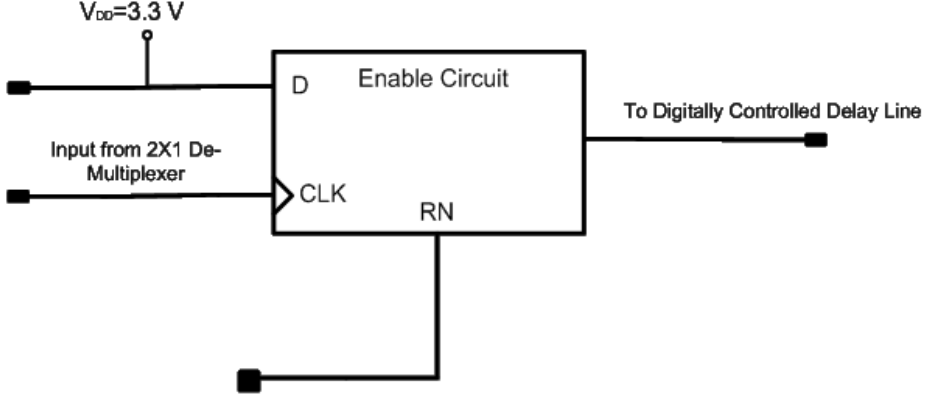


(a)



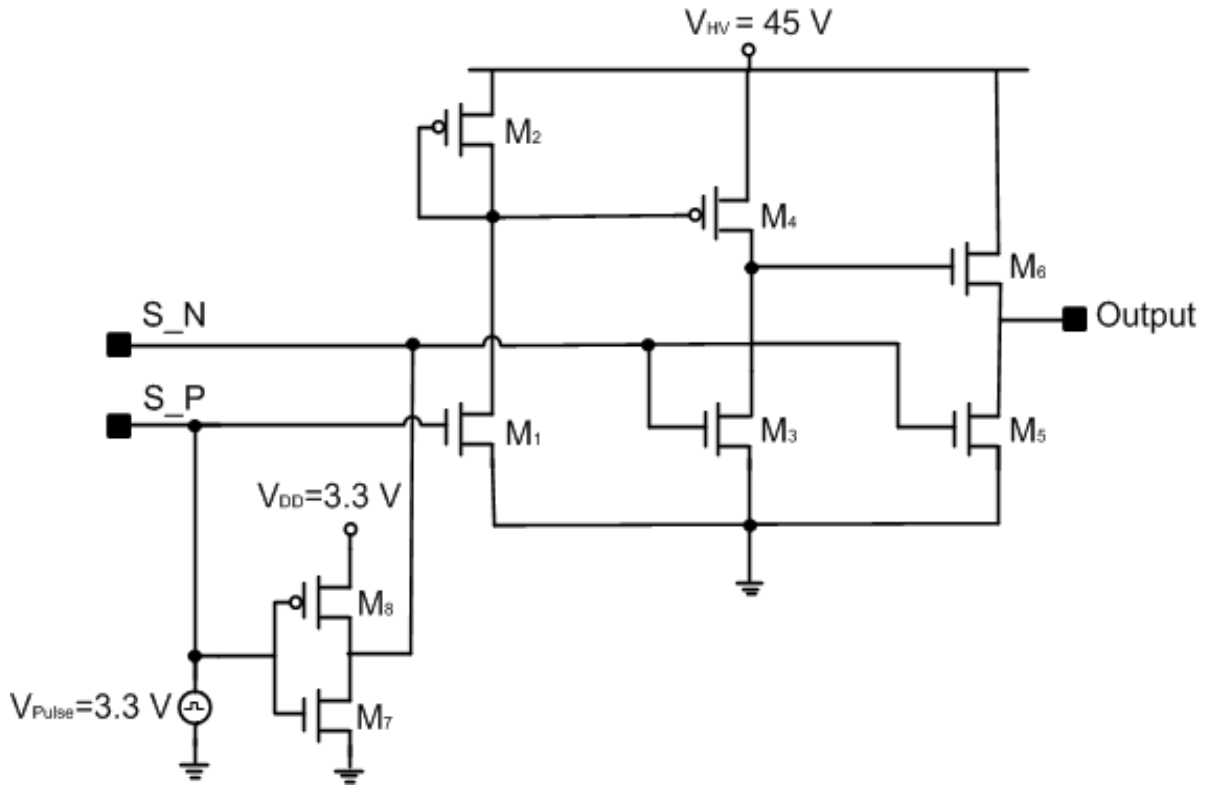
(b)

Şekil 12. One-shot devresi

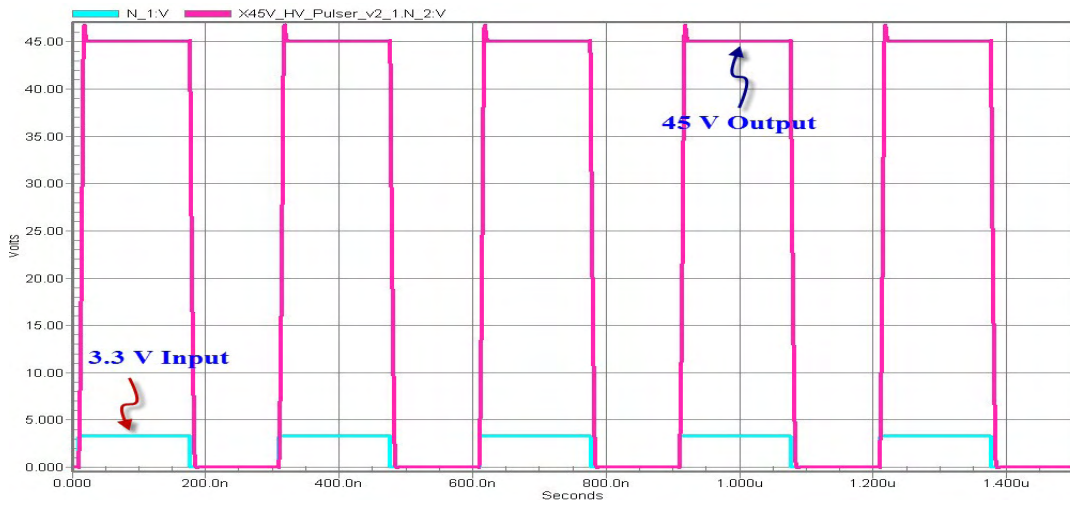


Şekil 13. Dijital kontrollü geciktirme elemanları için ENABLE devresi

Dijital kontrollü geciktirme elemanları için ENABLE devresi Şekil 13'de verilmektedir. Bu aşamaya kadarki entegre devre elemanlarında düşük gerilim (3.3 V) kullanılmaktadır. Seçilen, frekansı ve fazı belirlenen sinyallerin CMUT'a uygulanmadan önce genliklerinin yüksek gerilim değerlerine yükseltilmesi gerekmektedir. Şekil 14 (a)'da verilen devre yoluyla 3.3 V gerilimli giriş sinyali 45 V gerilimli çıkış sinyaline Şekil 14(b)'de gösterilen simulasyon sonuçlarına göre ayarlanabilmektedir. Yüksek gerilimli palsır devresinin önemli simulasyon sonuçları Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 14. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi.

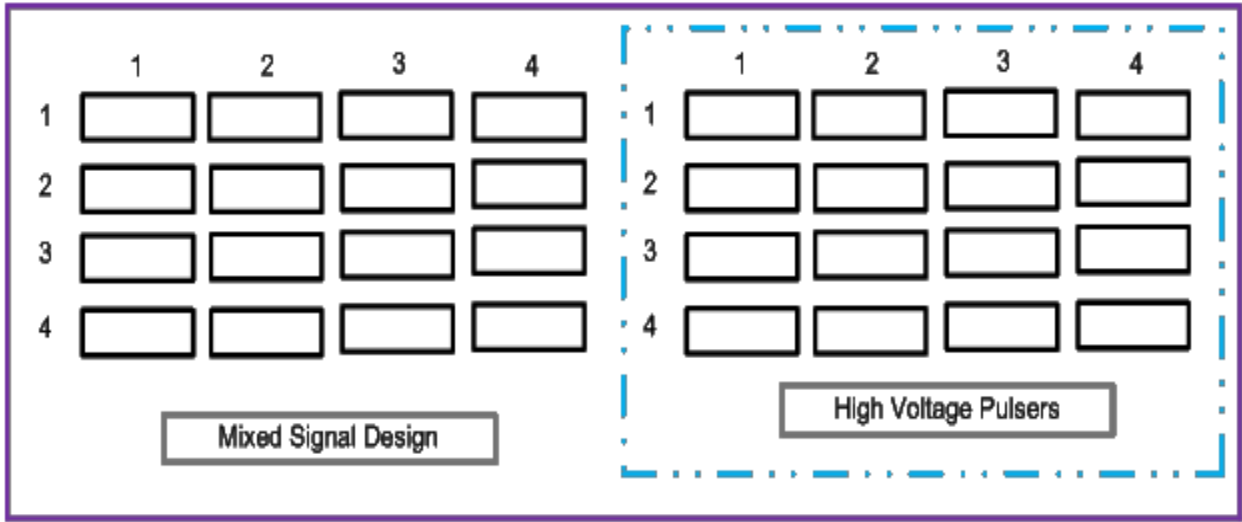
Tablo 1. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi

Parameter	Simulation Results	Units
Rise Time (10%-90%) @ $V_{HV} = 15$ V	3.85	ns
Fall Time (90%-10%) @ $V_{HV} = 15$ V	2.75	ns
Rise Time (10%-90%) @ $V_{HV} = 30$ V	4.45	ns
Fall Time (90%-10%) @ $V_{HV} = 30$ V	5.53	ns
Rise Time (10%-90%) @ $V_{HV} = 45$ V	5.13	ns
Fall Time (90%-10%) @ $V_{HV} = 45$ V	8.7	ns
Slew Rate (rising) @ $V_{HV} = 30$ V	2.33	V/ μ s
Slew Rate (falling) @ $V_{HV} = 30$ V	1.52	V/ μ s
Slew Rate (rising) @ $V_{HV} = 45$ V	3.9	V/ μ s
Slew Rate (falling) @ $V_{HV} = 45$ V	1.89	V/ μ s
P_{av} (dissipation) @ $V_{HV} = 15$ V	13.77	mw
P_{av} (dissipation) @ $V_{HV} = 30$ V	29.04	mw
P_{av} (dissipation) @ $V_{HV} = 45$ V	51.66	mw
Figure of Merit = $D/(LV)$ @ $V_{HV} = 15$ V	1.08	ns/(μ m.V)
Figure of Merit = $D/(LV)$ @ $V_{HV} = 30$ V	0.66	ns/(μ m.V)
Figure of Merit = $D/(LV)$ @ $V_{HV} = 45$ V	0.51	ns/(μ m.V)

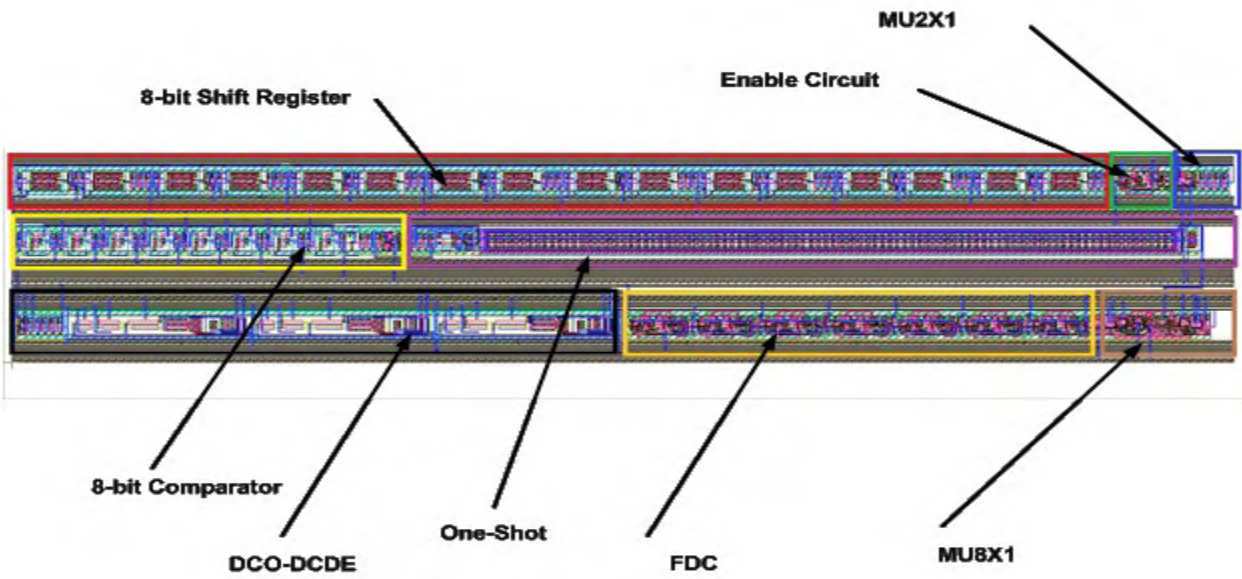
Tablo 2. 45 V yüksek gerilimli pulser devresi

Using 45 V THKOX Transistors @ $V_{HV} =$ 45 V
Rise Time: 5 ns
Fall Time: 8 ns
Slew Rate (rising): 3.9 V/ μ s
Slew Rate (falling): 1.89 V/ μ s
P_{av} (dissipation): 51.66 mw
Figure of Merit = $D/(LV)$: 0.51 ns/(μ m.V)

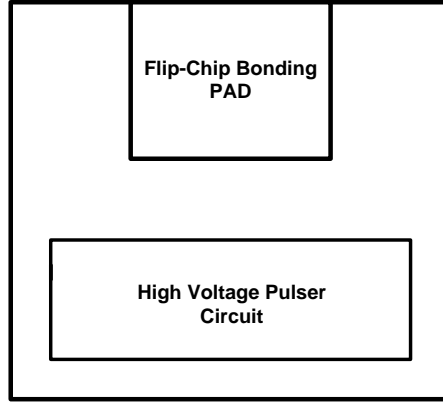
Tasarımın son planı Şekil 15'de verilmektedir. 16 CMUT elemanının her biri için ayrı ayrı düşük ve yüksek gerilimli devre blokları oluşturulmuştur. Düşük gerilim ve yüksek gerilim bloklarının çizimi Şekil 16 ve Şekil 17(c)'de gösterilmiştir.



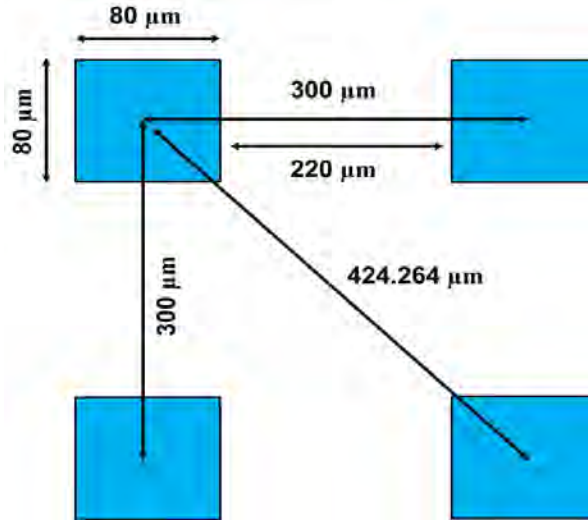
Şekil 15. Tasarımın son planı.



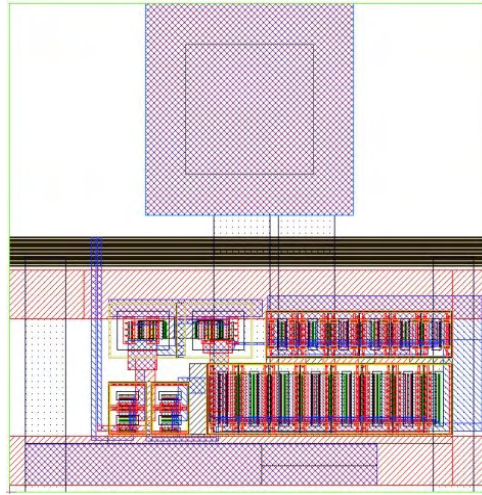
Şekil 16. Düşük gerilim bölümünün çizimi.



(a)



(b)

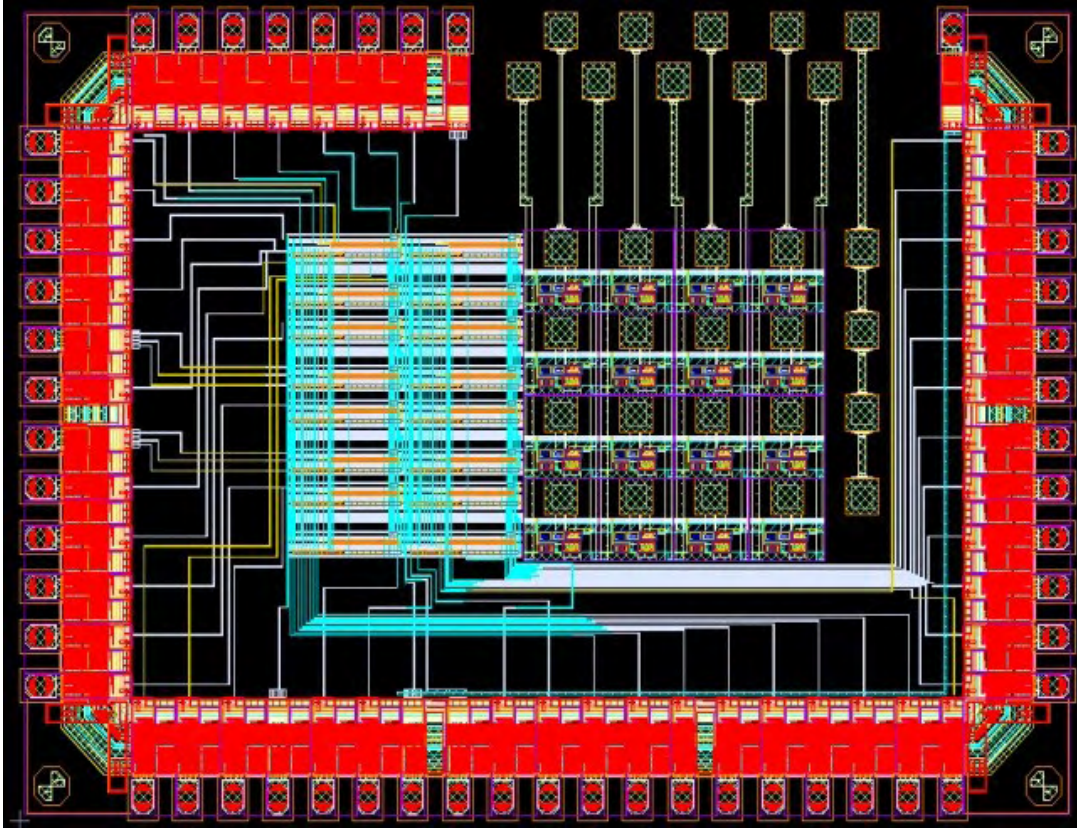


(c)

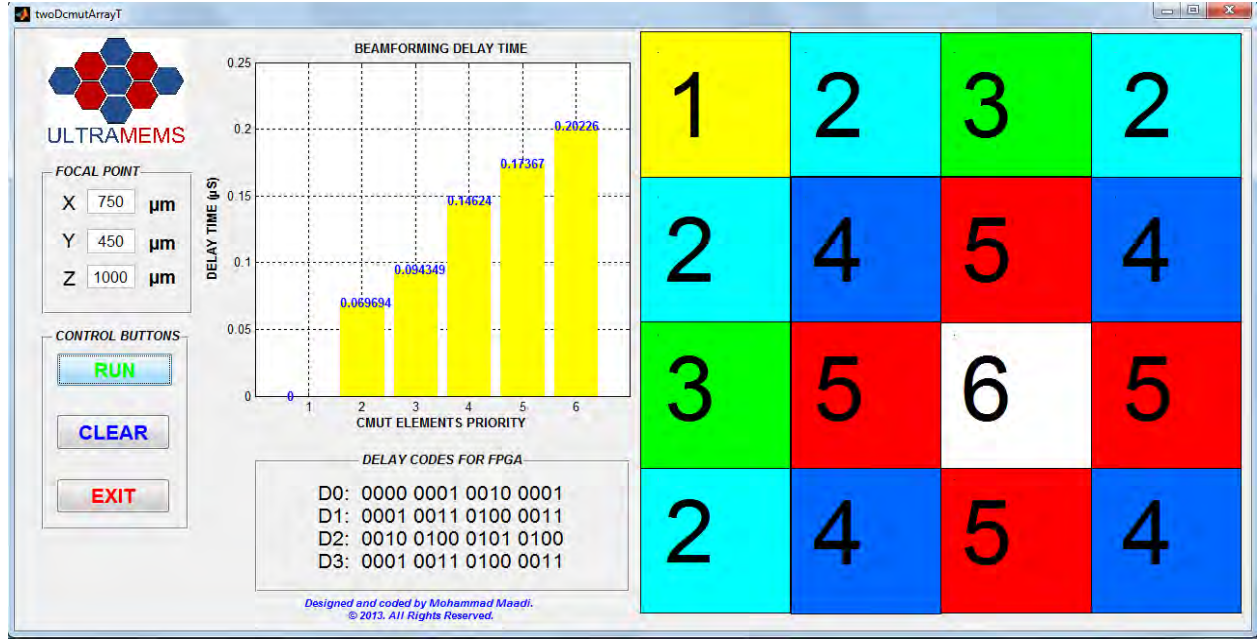
Şekil 17. Yüksek gerilim bölümünün ilgili kısımları.

Yüksek gerilim devresinin hemen yanında CMUT ile flip-çip yapılması için gerekli pedler bulunmaktadır. Pedler Şekil 17(b)'de gösterilmiştir. Pedlerin merkezden merkeze uzaklığı 300 μm olarak ayarlanmış ve bu mesafe CMUT yapısı ile aynıdır. Flip-çip işleminin başarılı olması için pedlerin genişliği 80 μm olarak seçilmiştir.

4x4 CMUT dizisine yönelik tasarlanan ve XFAB'da üretilen entegre devre Şekil 18'de gösterilmiştir. Bu tasarım için FPGA tarafından uygulanması gereken giriş kodları MATLAB'da hazırlanan ve Şekil 19'da gösterilen kullanıcı arayüzü yoluyla belirlenebilmektedir.



Şekil 18. 4x4 CMUT dizisine yönelik tasarlanan ve XFAB'da üretilen entegre devre.



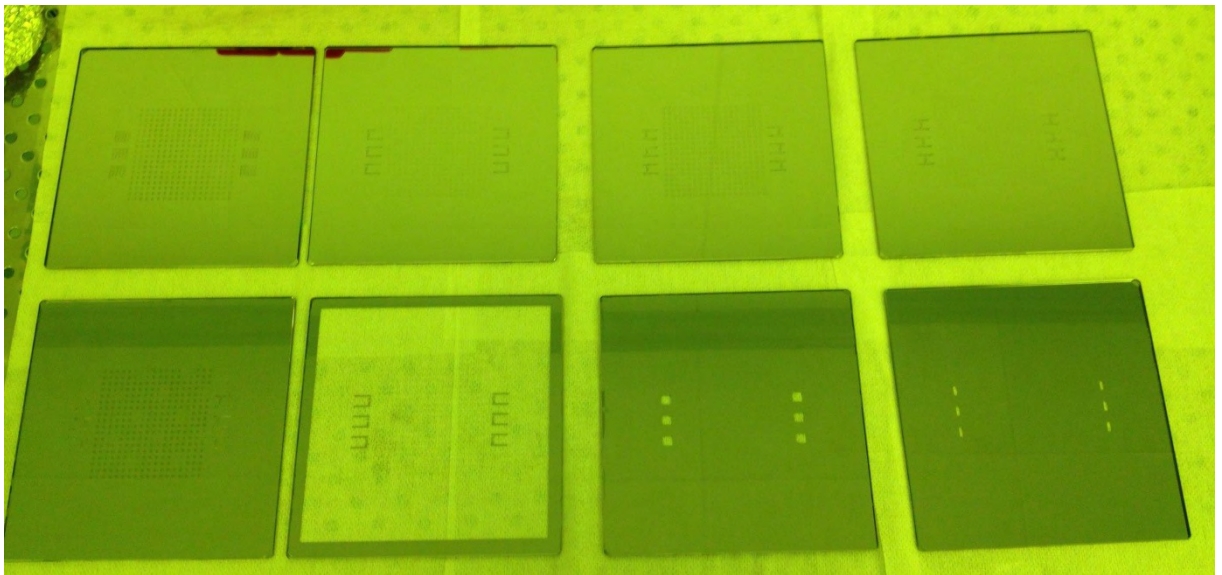
Şekil 19. FPGA için gerekli geciktirme kodlarını hesaplayan MATLAB GUI programının kullanıcı arayüzü.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Proje çalışmasında kullanılan maske setleri Şekil 20 ve Şekil 21'de gösterilmiştir. Şekil 20'de görülen 8 maske sırasıyla 1CAVITY, 2SEPARATE, 3ELECTRODE, 4ISOLATION, 5FRAME, 6METAL, MARK345 ve MARK2 maskeleridir. Şekil 21'de maskeler aynı düzende açık olarak gösterilmiştir. 6 maskeli üretim süreci için basılan maskeler ilk altı maske olup; son iki maske olan MARK345 ve MARK2 ise sırasıyla 3, 4, 5 hizalama imgelerini ve 2 hizalama imgesini açmak üzere tasarlanmıştır.

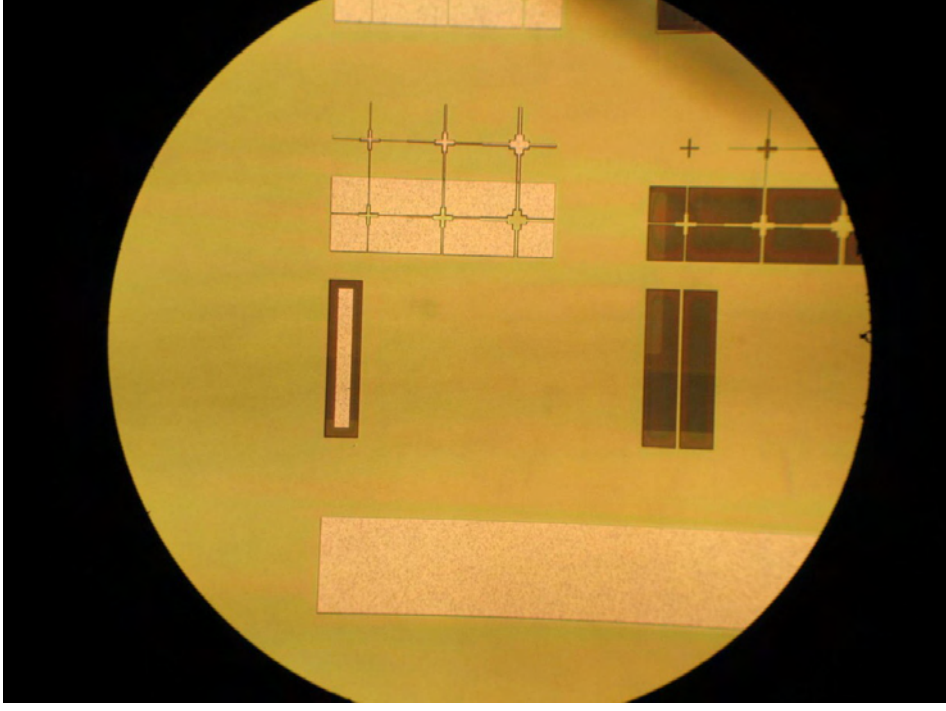


Şekil 20. Maskelerin toplu görüntüsü

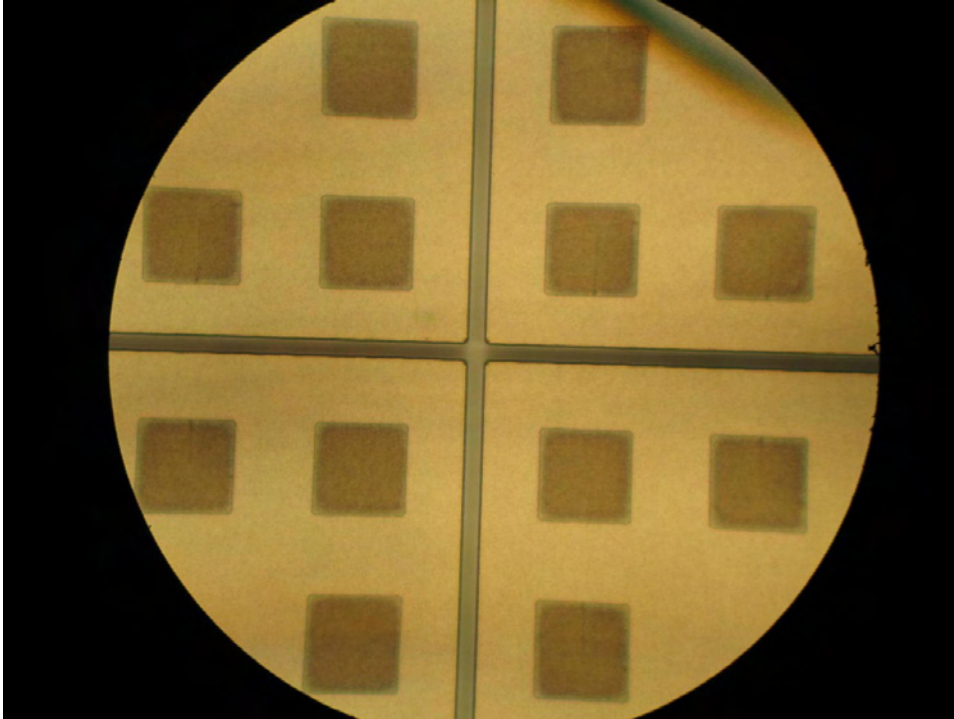


Şekil 21. Maskelerin açık görüntüsü

Şekil 22'de 1CAVITY ve 2SEPARATE maskeleri uygulandıktan sonraki hizalama imgelerinin mikroskop görüntüsü görülebilir. Pulların birleştirilmesi öncesi ilk 2 maske uygulaması sonrası elde edilen CMUT hücrelerinin görüntüsü Şekil 23'te gösterilmiştir.



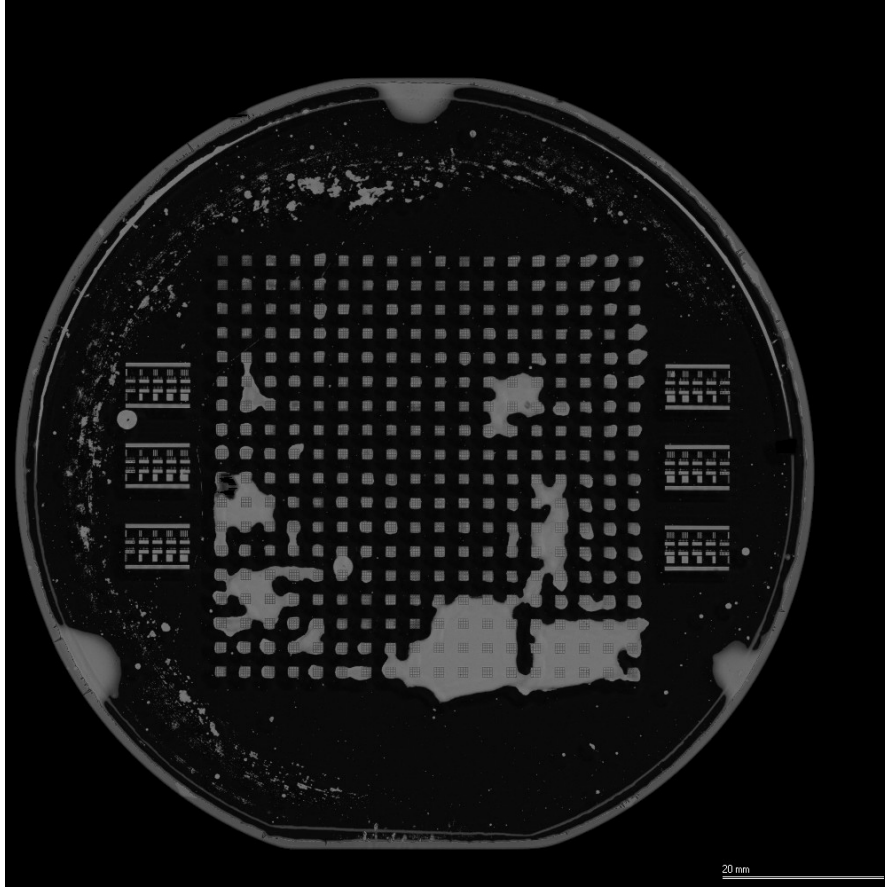
Şekil 22. Hizalama imgesi 1'in mikroskop görüntüsü



Şekil 23. Hücrelerin mikroskop altındaki fotoğrafı

Mikroüretimin en kritik aşamasını oluşturan pulların birleştirilmesi öncesi yüzey pürüzünün 0.5 nm'nin altında tutulması önemlidir. Bunun için özellikle fotorezistin temizlenmesine yönelik plasma ve piranha işlemlerine önem gösterilmiştir.

1CAVITY ve 2SEPARATE maskeleriyle şekillendirilmiş SOI pulun hazırlanan elmas kaplı pullarla yapıştırılmış halinin taramalı akustik mikroskopu altındaki görüntüsü Şekil 24'te verilmiştir. Genel olarak iyi bir bağlanma elde edilmesine rağmen bazı kısımlarda (beyaz kısımlar) bağ elde edilememiştir. Bunun sebebi yüzeydeki pürüzün yeterince düşük olmamasıdır.



Şekil 24. Birleştirilen pulların taramalı akustik mikroskop görüntüsü

Pulların birleştirilmesi sonrası SOI pulun arka tarafı metal kaplama (Ti/Cu/Au) ile kaplanmış (Şekil 25 soldaki) ve bu kaplama SiO₂ kaplaması (Şekil 25 sağdaki) ile TMAH içindeki ıslak aşındırmadan korunmaya çalışılmıştır.

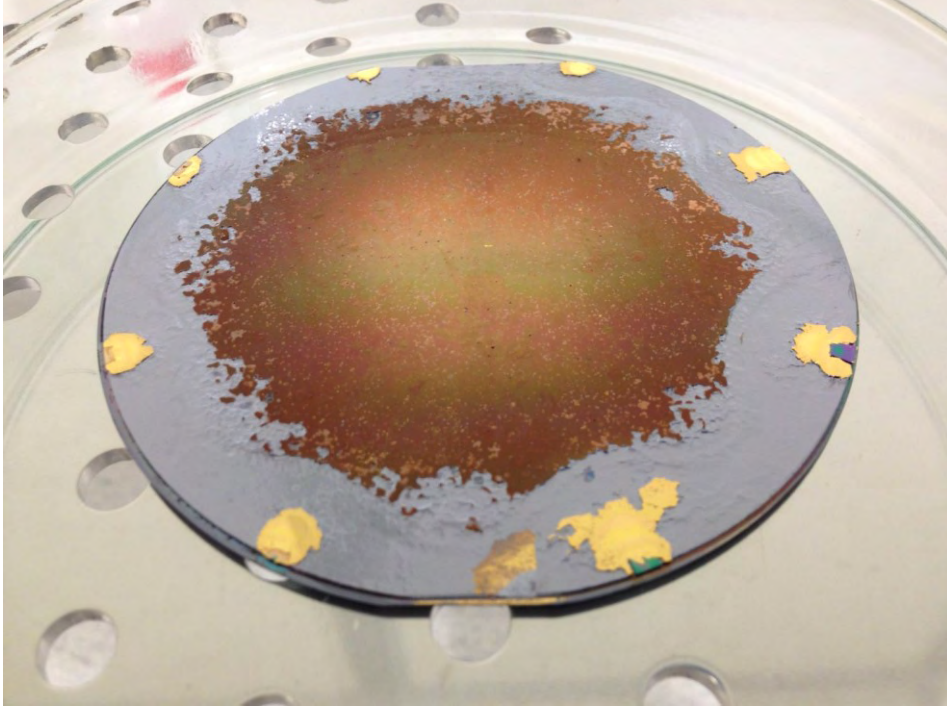


Şekil 25. Soldan sağa Ti/Cu/Au kaplanmış pul ve Ti/Cu/Au üzerine SiO₂ kaplanmış pul

TMAH aşındırması ile ilgili Şekil 26'da kurulu düzeneğe kullanılarak gerçekleştirilen aşındırma sonrası Şekil 27'de gösterilen pul elde edilmiştir. İstenilen seviyede koruma metal kaplamanın kalkması sonu mümkün olmamış ve görüldüğü üzere pul arka taraftan da aşınarak incelmıştır. Sonraki aşamada RIE aşındırması işleminde pul kırılarak mikroüretim işlemlerinin devamı mümkün olmamıştır.

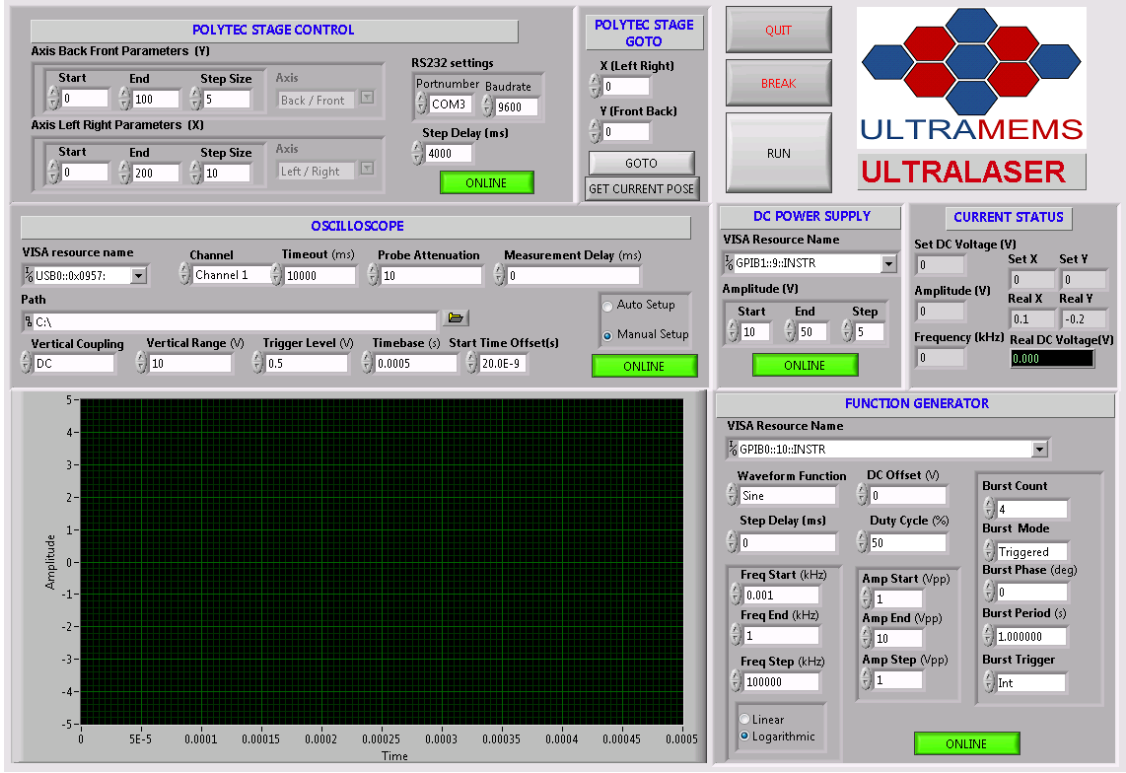


Şekil 26. TMAH aşındırma düzeneği



Şekil 27. TMAH aşındırması yapılmış pulun arka yüzeyi

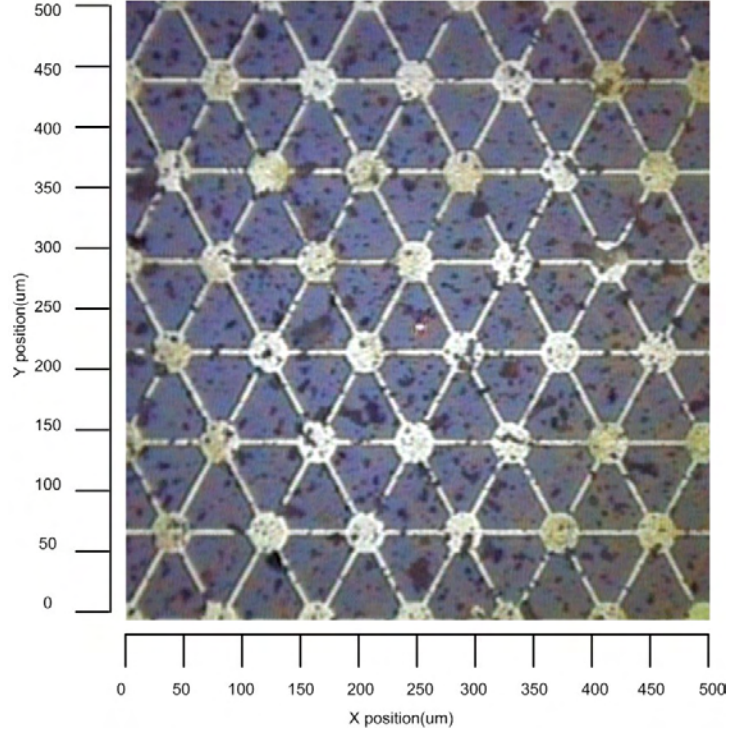
CMUT'lar için uygun ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm sistemi otomatik yüzey taraması yaparak lazer vibrometre yardımıyla yer değiştirme ölçümlerini yapmaktadır. Bu sistemin arayüzü Şekil 28'de gösterilmiştir. Bu program başka proje kapsamında üretilen CMUT'lar üzerinde test edilmiş ve istenilen özellikleri sağladığı doğrulanmıştır. Arayüz tarafından (LabView) control edilen donanım Şekil 29'da gösterilmiştir. Alınan ölçüm sonuçları Şekil 30'da sunulmuştur.



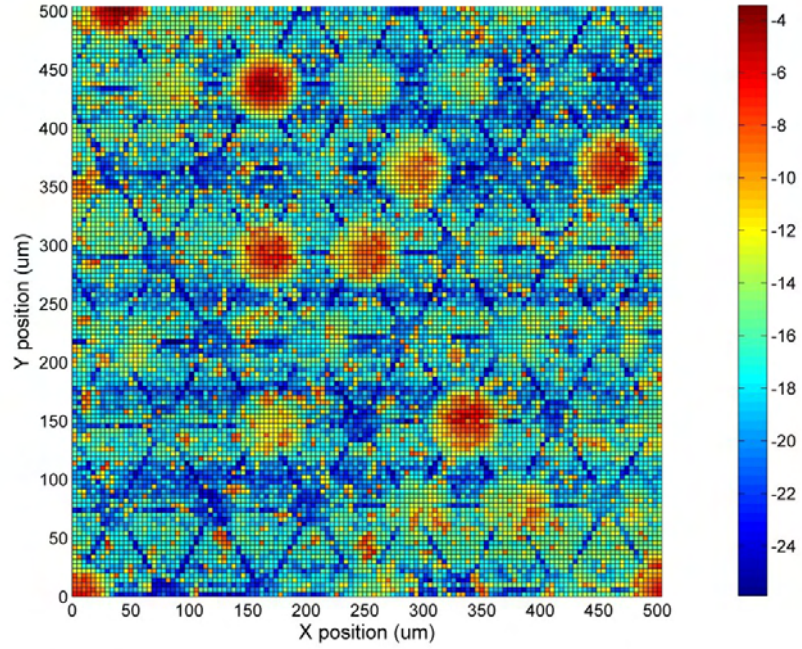
Şekil 28. Geliştirilen ölçüm sistemi arayüzü



Şekil 29. Ölçüm sistemi donanımı



a) Taranan CMUT yüzeyinin mikroskop görüntüsü



b) Taranan CMUT yüzeyinin lazer vibrometre ölçüm sonuçları

Şekil 30. Ölçüm sonuçları.

CMUT mikroüretiminde yapılan deneysel çalışmalara yönelik bilgiler aşağıda sunulmuştur:

- Eşit kalınlıkta oksit elde etme çalışması

Sürecimizin ilk adımı olarak, her Si pulun üzerine öncelikle SiO₂ kaplama yapılması gerekmektedir. Bu oksit kaplama işlemi için UNAM laboratuvarında bulunan PECVD cihazı kullanılmıştır. Vaksis'in ürettiği CVD-Handy model PECVD cihazı tek seferde bir pul kaplayabilmektedir. Çeşitli denemelerden sonra cihazın tüm yüzeyi eşit kalınlıkta kaplayamadığı gözlemlenmiştir.

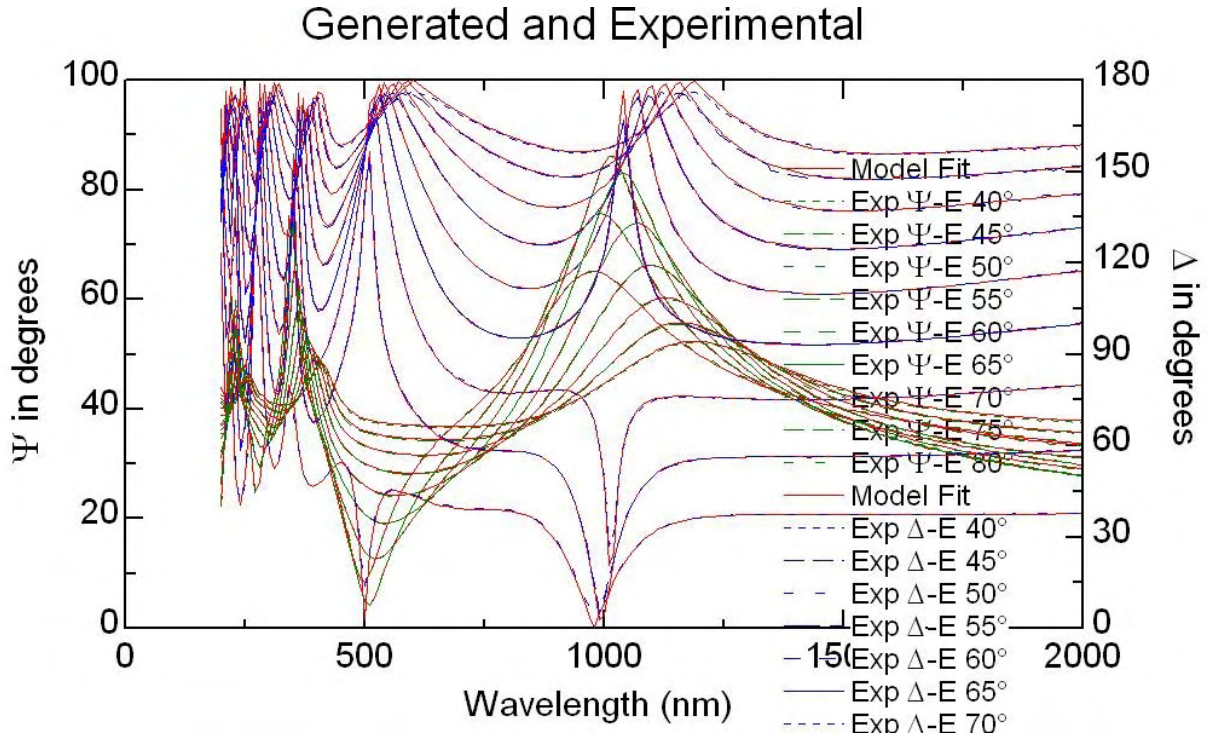
Oksit kalınlığının net olarak kaç olduğu bakılarak anlaşılammaktadır. Ancak pulun rengi oksit kalınlığıyla değiştiğinden; pul üzerinde nerede kalınlık farkı olduğu renginden kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Deneyler sonucu bu kalınlık farkının rastgele olmadığı farkedilmiştir. Bu durumun cihazda bulunan eşit olarak gaz akışı sağlaması gereken deliklerin aynı büyüklükte olmamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu sebeple gazların akış hızı arttıkça Si pul üzerinde oksit kalınlığı farkı yükselmektedir. Gazların akış hızı değiştirilerek süreç yavaşlatılmış dolayısıyla bu etki en aza indirgenmiştir. Sürecin yavaşlaması için plazmadaki silan gazının konsantrasyonunun seyreltilmesi gerekmektedir. Bu amaçla helyum gazı taşıyıcı olarak kullanılmış ve silan yoğunluğu azaltılmıştır. Bu duruma sebep olan gaz akış delikleri Şekil 31'deki gibidir. Bu şekilde okla gösterilen üç deliğin diğerlerinden daha büyük olduğu görülebilir.



Şekil 31. Vaxis PECVD cihazı gaz akış delikleri

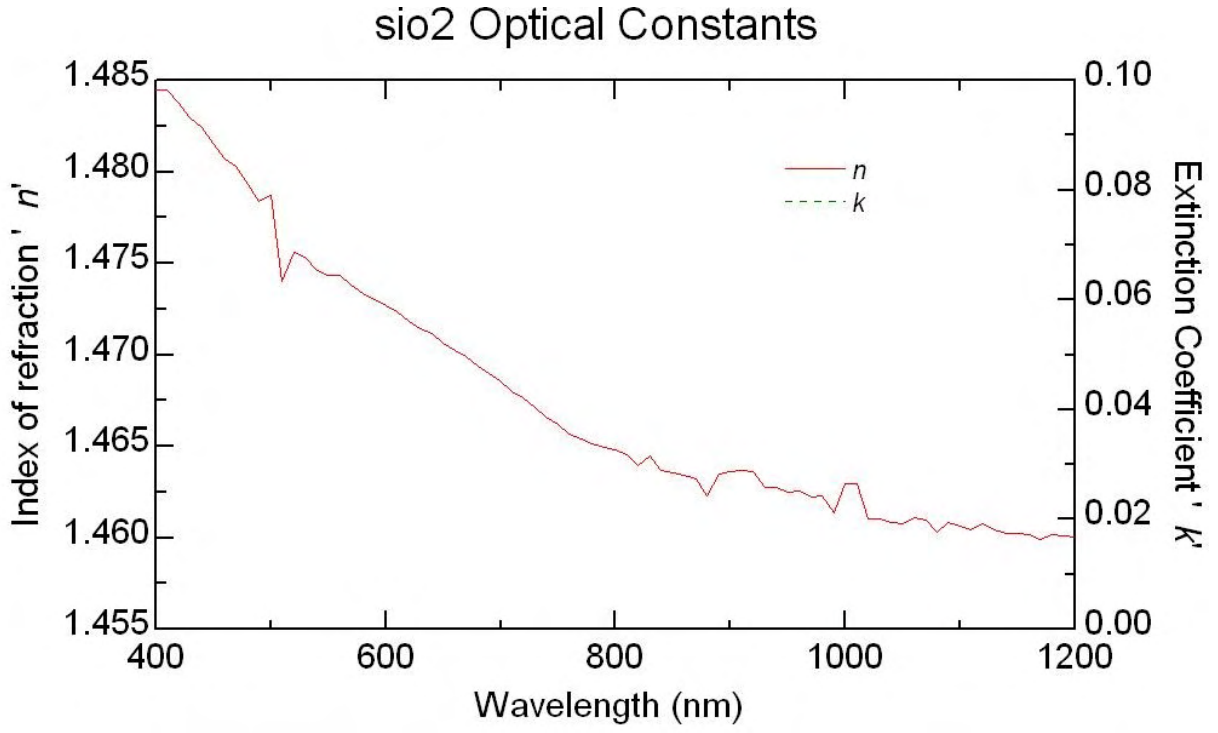
PECVD cihazı kullanılarak yavaş reçete ile bir Si pul yaklaşık 200 nm SiO₂ ile kaplanmak istenmiştir.

Daha sonra kaplanan oksidin kalınlığının ve kalitesinin anlaşılabilmesi için yine UNAM'da bulunan V-VASE elipsometre ile ölçüm yapılmış; bu ölçümlerde oksit kalınlığı, n ve k optik sabitleri ölçülmüştür. Optik sabitlerin ve kalınlığın elde edilebilmesi; alınan açı değerlerinin software deki modelle uyuşması sağlanarak mümkündür. Bu uyuşmanın verileri Şekil 32'de görülebilir.



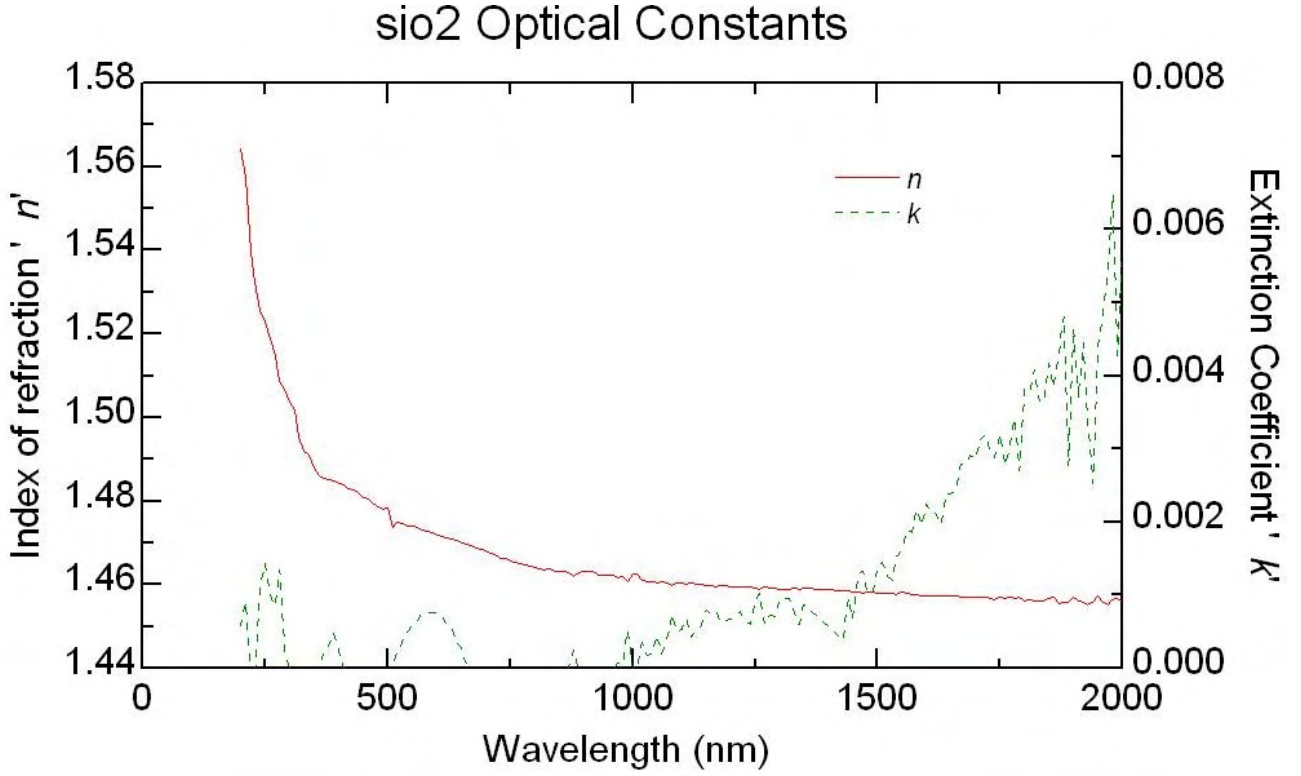
Şekil 32. ψ ve Δ açıları

Şekil 33'te, 200 nm SiO₂ 'nin optik değerlerinin(n, k) grafiği, 400-1200 dalga boyu aralığında görülebilir. Bu değerler oksit kalitesi bakımından önem taşımaktadır.



Şekil 33. Kırılma sabiti 'n'

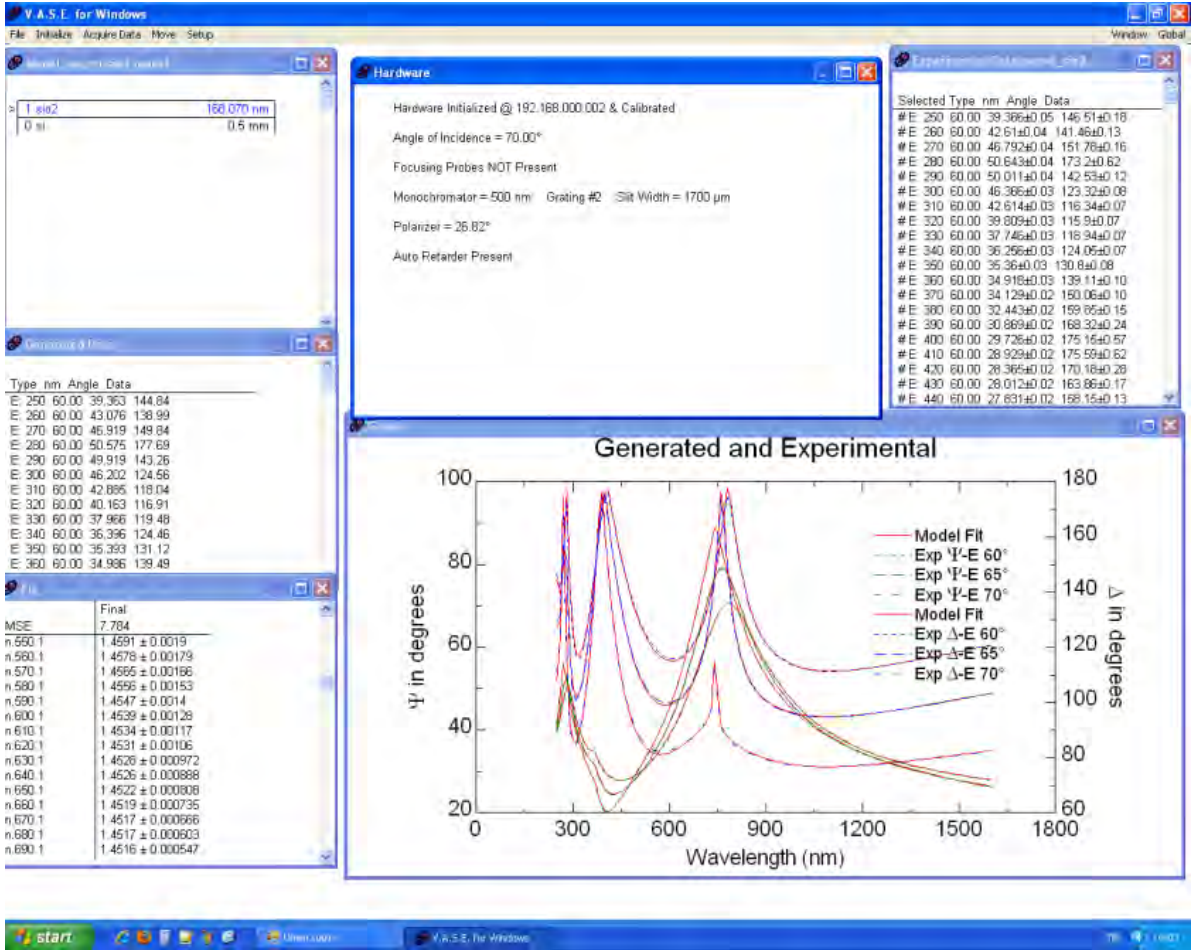
Şekil 34'de, SiO₂ 'nin hem n hem de k değerlerinin grafiği geniş dalga boyu aralığında görülebilir.



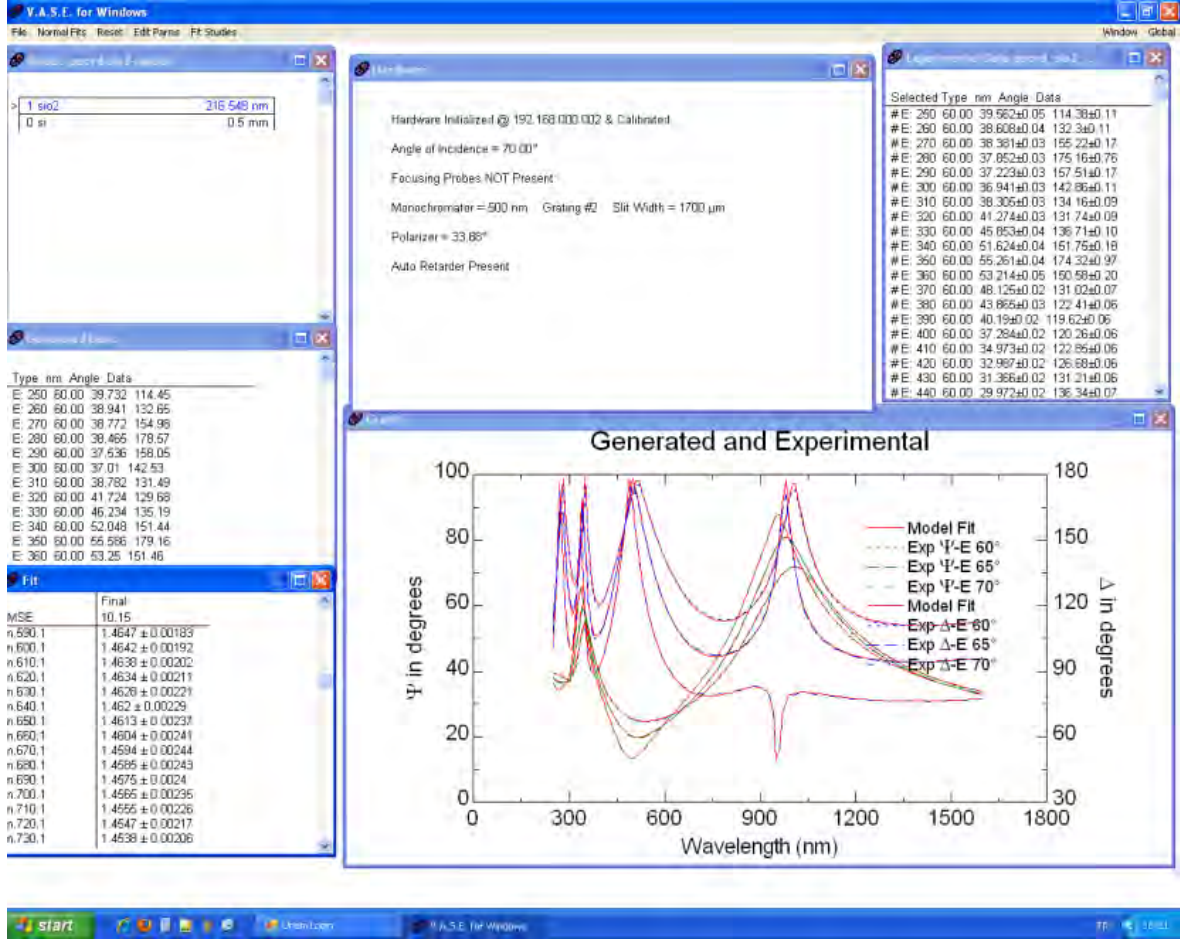
Şekil 34. n ve k değerleri

Daha önce bahsedildiği gibi oksit film pulun her yerinde aynı kalınlıkta kaplanamadı. Pulun bir kısmının sarı bir kısmının ise yeşil olduğu gözlemlendi. Buna sebep olan etmenin oksit kalınlığı olduğu varsayılarak, iki farklı renkteki bölgede V-VASE ölçümleri tekrarlanarak oksit kalınlığı hesaplandı.

Şekil 35 ve 36'da görüldüğü üzere sarı kısmın kalınlığı 216.548 nm olarak hesaplanırken; yeşil olan kısmınki 168.070 nm olarak hesaplandı. Bu veriler oksit filmin eşit kalınlıkta kaplanmadığını doğruladı.



Şekil 35. Yeşil kısmın verileri



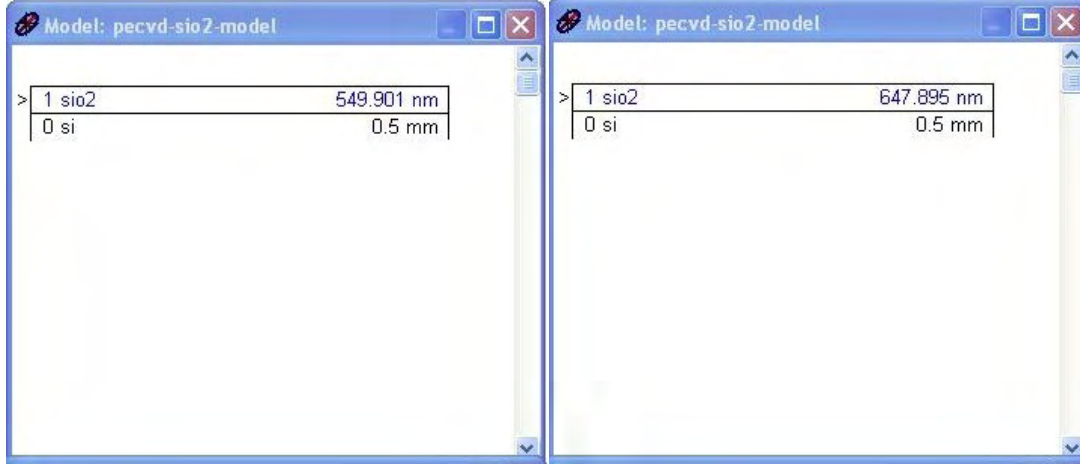
Şekil 36. Sarı kısmın verileri

- n ve k optik sabitlerinin RTA ile düşürülmesi

Bu çalışmada RTA'in n ve k değerlerine etkisi gözlemlenmiştir. 3 saatlik oksit kaplama işlemine tabi tutulan pullar önce elipsometrede incelenmiştir. RTA işleminden geçirildikten sonra tekrar elipsometrede ölçümleri alınan pulların bu iki verileri karşılaştırılmış; böylece RTA'in kaliteye etkisi gözlemlenmiştir.

Daha önce incelenen 226nm oksitli pul 1 saatlik PECVD kaplama ile elde edilmiştir. Kaliteyi düşürmeden kalınlığı arttırabilmek için 3 saatlik süreçlerle SiO2 kaplanmasına karar verilmiştir. Bu kaplama sonrası elde edilen pulda yine iki farklı renk gözlemlenmiştir. Farklı oksit kalınlığına bağlı olarak bir tarafı yeşil bir yarafı mor bir pul elde edilmiştir. Yine aynı şekilde kalınlık ve kalite farkını anlayabilmek için iki taraf ayrı ayrı elipsometre ölçümüne tabi tutulmuştur.

Şekil 37'de 3 saatlik oksit kaplamadan geçirilmiş pulun sırasıyla yeşil ve mor kısımlarının elipsometre ölçümlerinden elde edilen kalınlık verileri görülebilir. Bu ölçümlerde SiO₂ kalınlığının yeşil bölge için 549.901 nm; mor bölge için 647.895 nm olduğu tespit edilmiştir.

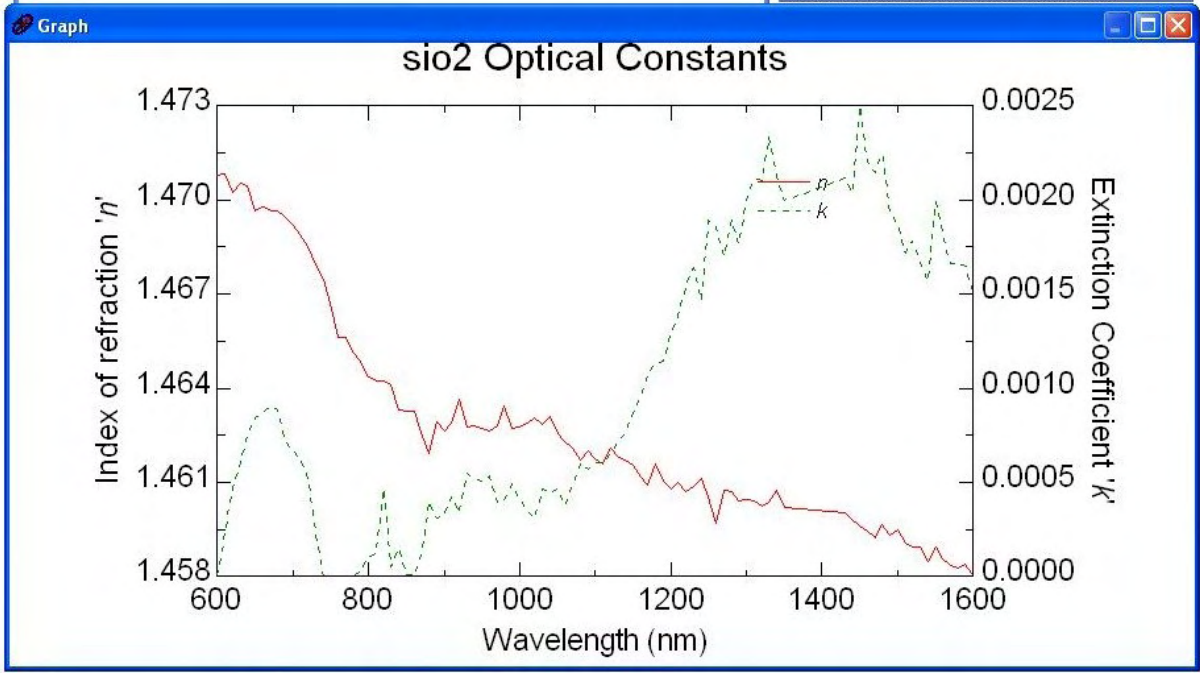


Layer	Thickness
1 sio2	549.901 nm
0 si	0.5 mm

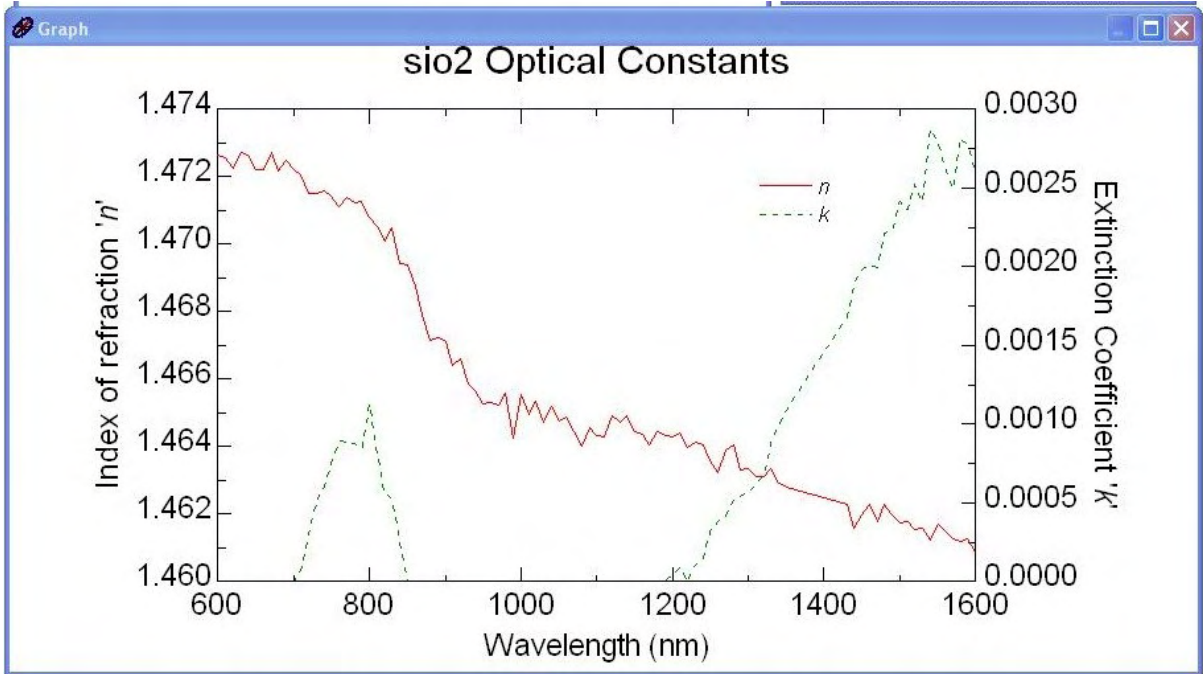
Layer	Thickness
1 sio2	647.895 nm
0 si	0.5 mm

Şekil 37. Sırasıyla yeşil kısmın ve mor kısmın kalınlık verileri

Şekil 38'de yeşil kısmın optik sabitlerinin 600-1600nm dalga boyu aralığındaki değerleri görülebilirken; Şekil 39 da ise mor kısmın optik sabitlerinin aynı dalga boyu aralığındaki değerleri görülebilir.



Şekil 38. Yeşil kısım için n ve k değerleri



Şekil 39. Mor kısım için n ve k değerleri

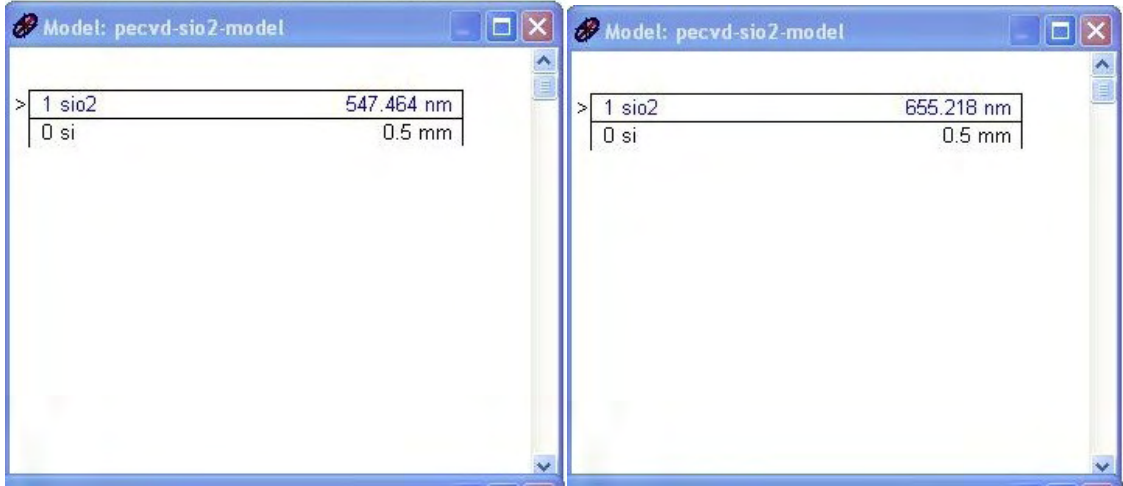
Şekil 37'de görülebileceği üzere mor kısım daha kalın oksitle kaplanmıştır. Şekil 38 ve 39'daki n değerleri incelendiğinde daha kalın olan mor kısmın daha kalitesiz olduğu görülebilir. Bu durumun sebebi; kalınlık arttıkça oksit içinde hapsolan gaz miktarının da artmış olmasıdır.

Daha önce bahsedildiği gibi oksit kalitesini anlayabilmek için özellikle n değeri oldukça önemlidir. n optik sabitinin termal oksit için daha düşük olmasının sebebi PECVD oksit içinde hapsolmuş gazlardır. Işık hava boşluklarından geçerken daha hızlı ilerleyeceğinden; hapsolmuş gaz yoğunluğu arttıkça n değeri de artmaktadır. Termal oksitte hiç hapsolmuş gaz olmadığından ideal olan termal oksitin n değeridir. PECVD oksitle bu değere yaklaşabilmek ise ancak RTA ile hapsolmuş gazların çıkarılması işlemi yapılarak mümkün olabilir.

RTA işlemiyle PECVD oksitli pulun n değerinin düşürülmesi ve termal oksitin kalitesine yaklaşabilmesi amaçlanmıştır. Elmas malzeme 650°C'nin üstündeki sıcaklıklarda O₂ bulunan ortamda yandığı bilinmektedir. Bu süreçte oksit deneme amaçlı olarak Si pul üzerine kaplanmış olsa da asıl amaç elmas üzerinde büyütme işlemidir. Bu sebeple en az 700°C RTA için daha standart olsa da RTA işleminin bu süreçte 600°C yapılması kararlaştırılmıştır. Sonuç olarak PECVD oksitli pul 600°C'de 15 dakika RTA işleminden geçirilmiştir.

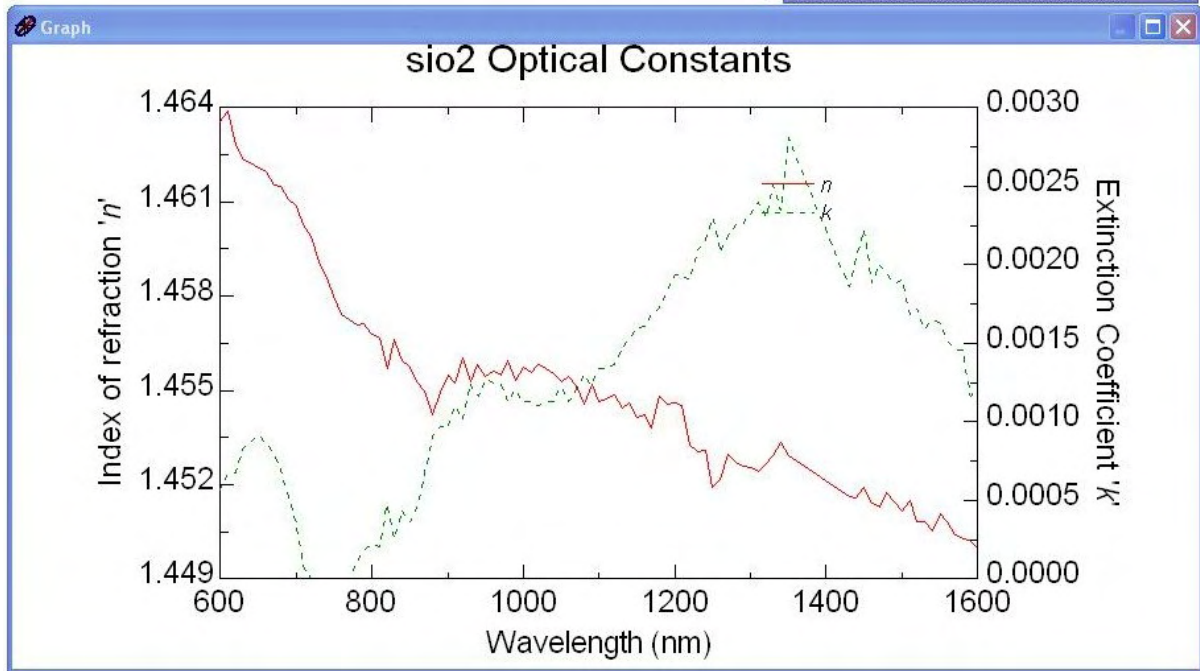
Bu işlemde geçen pul daha sonra tekrar elipsometre ile incelenmiştir. Elipsometreden elde edilen veriler RTA işleminin n değerini ne kadar değiştirdiği ve bu sırada kalınlığı değiştirip değiştirmediğini göstermektedir.

Şekil 40'da RTA işleminden geçirilmiş pulun sırasıyla yeşil ve mor kısımlarının elipsometre ölçümlerinden elde edilen kalınlık verileri görülebilir. Yeşil kısım için kalınlık 549.901nm iken RTA sonrası 547.464nm olarak ölçülmüş; mor kısım için ise aynı değer 647.895nm iken RTA sonrası 655.218nm olmuştur. Bu değerlere göre kalınlığın bir tarafta artıp diğer tarafta azaldığı düşünülebilir. Ancak elipsometre kullanılırken tam olarak aynı nokta ölçülemediğinden kalınlık verisinin RTA ile değişmediği varsayılabilir.

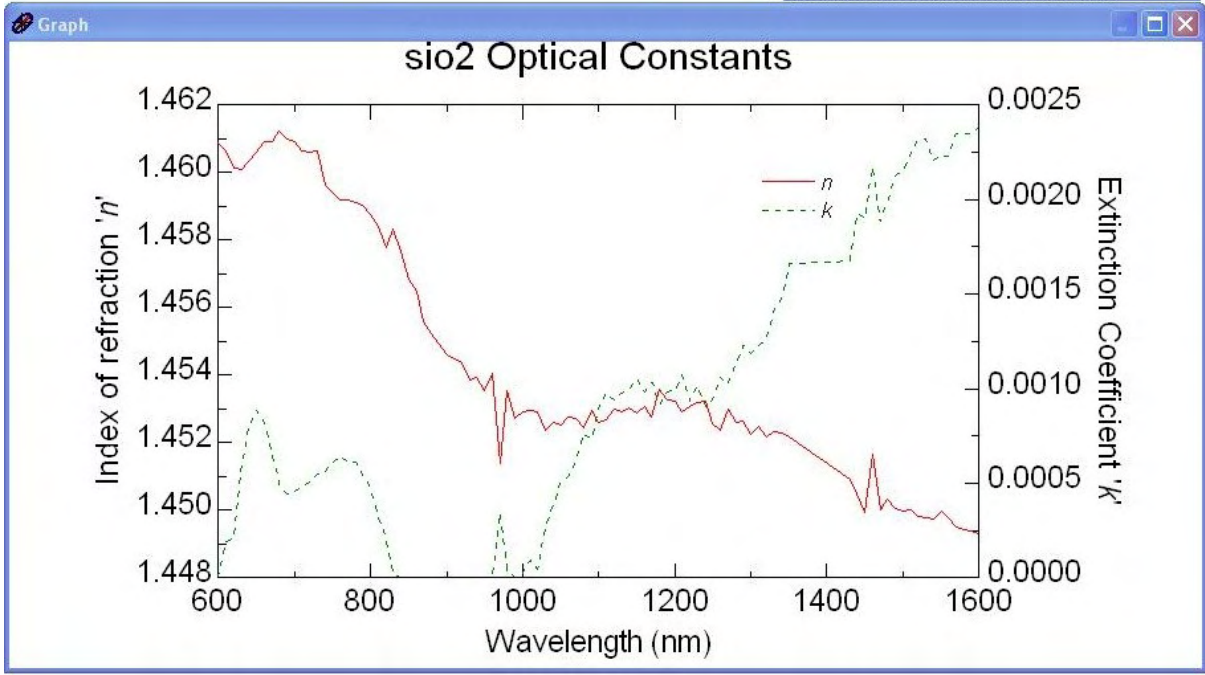


Şekil 40. RTA işleminden sonra sırasıyla yeşil kısmın ve mor kısmın kalınlık verileri

Şekil 41 ve 42'de elipsometre ölçümlerinden elde edilen n ve k değerleri 600-1600nm dalga boyu aralığında görülebilir.



Şekil 41. RTA işleminden sonra yeşil kısım için n ve k değerleri



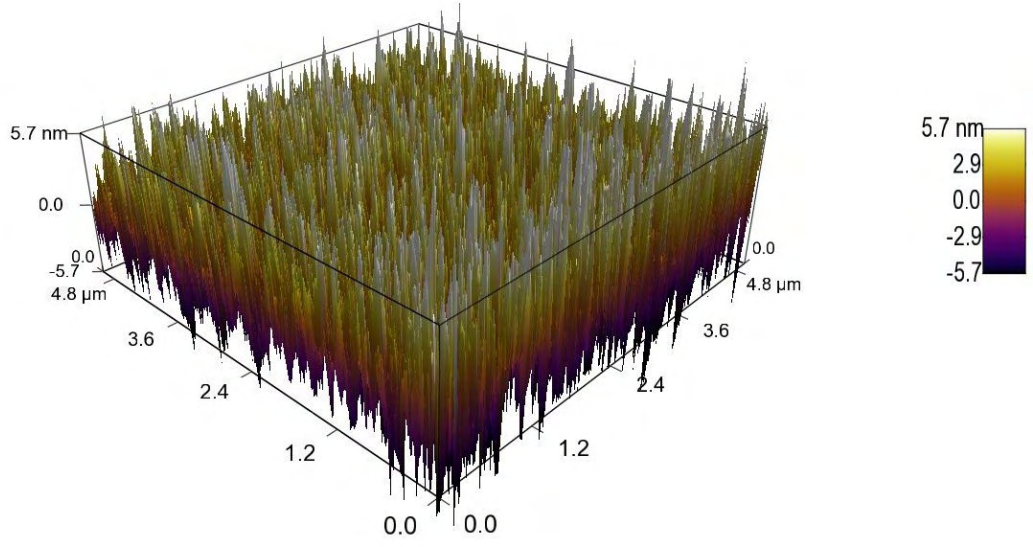
Şekil 42. RTA işleminden sonra mor kısım için n ve k değerleri

Şekil 38 ve 41 karşılaştırıldığında RTA işleminin n değerinin yeşil kısım için nasıl düştüğü görülebilir. Benzer olarak mor kısım için Şekil 39 ve 42 incelenebilir.

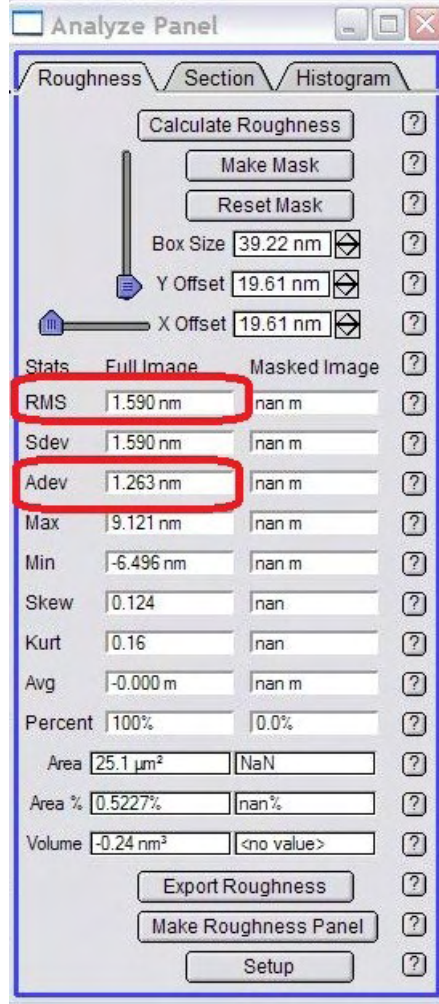
Son olarak, AFM ile PECVD oksit ile kaplı yüzeyin AFM ile karakterizasyonu yapılmıştır.

Termal oksitli pul ile PECVD oksitli pulun UNAM(Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi)'da yapılan AFM(Atomik Kuvvet Mikroskobu) ölçümlerinde yüzey pürüzü değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Şekil 43'deki üç boyutlu yüzey görüntüsünden görüldüğü üzere PECVD oksit için yüzey pürüzü çok yüksektir. Şekil 44'deki analiz panelinde görülen Adev değeri yüzey pürüzünü ifade eder ve 1.263 nm olarak hesaplanmıştır.

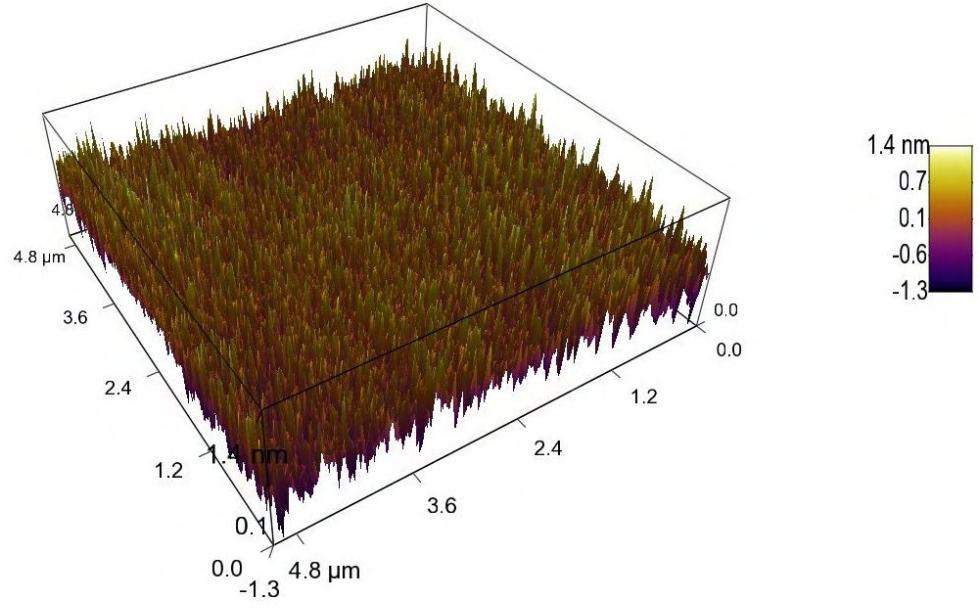


Şekil 43. 0.226um PECVD oksitli pul için AFM ölçüm sonucu

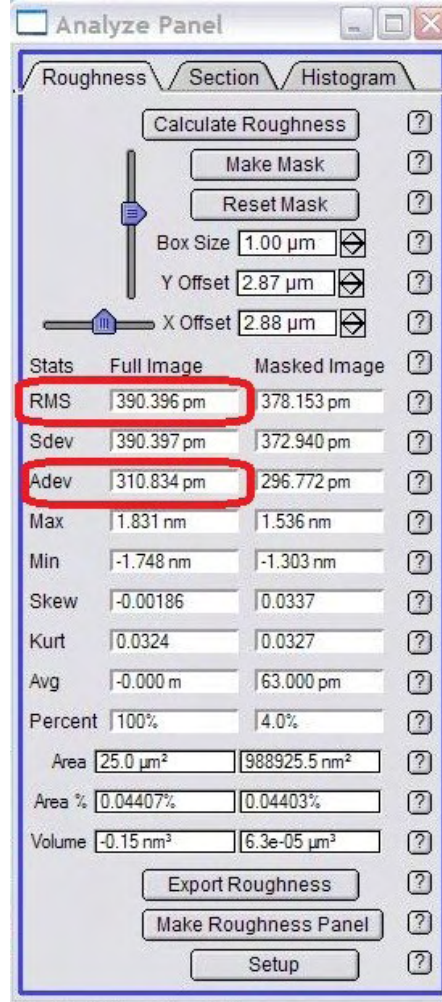


Şekil 44. 0.226 μm PECVD oksitli pul için AFM analiz paneli

Aynı karakterizasyon 1 μm termal oksitli pulla tekrarlandığında yüzey pürüzü için elde edilen sonuç beklendiği üzere oldukça düşüktür. Ölçüm sonucu ve analiz paneli Şekil 45-46'da görülebilir. Termal oksitli pul için yüzey pürüz değeri 0.310 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 45. 1 μm termal oksitli pul için AFM ölçüm sonucu



Şekil 46. 1um termal oksitli pul için AFM analiz paneli

Yüzey pürüzünün düşük olması pul yapıştırma işleminde pulların birbirine iyi tutunabilmesi için oldukça önemlidir. PECVD oksitli pullarda oksit kalınlığı arttıkça yüzey pürüzünün de artacağı bilinmektedir. Ancak termal oksitle(1um) kıyaslandığında PECVD oksit(0.226um) kalınlığı çok daha az olsa da yüzey pürüzü oldukça yüksektir. Bu sebeple pul yapıştırma işleminden önce PECVD oksitli pul CMP(kimyasal mekanik cilalama) işleminden geçirilerek yüzey pürüzü düşürülmelidir. CMP işlemi için gerekli cihaz UNAM'da bulunmadığı için yurt dışı hizmet alımı yapılmıştır.

- CMP işlemleri

CMP işlemleri Axus Technology tarafından yapılmıştır. Elde edilen pulların yüzey pürüzü işlemleri UNAM'daki AFM o sırada "kullanım dışı" olduğu için yapılamamıştır.

- Pulların yapıştırılması işlemleri

Belirtilen mikroüretim sürecine uygun olarak işlenen pullar yapıştırma işlemleri için EVG şirketine gönderilmiştir. Ancak yapıştırma işlemleri başarılı olmamıştır. Bununla ilgili yapılan çalışmalarımız sonrası iki önemli problem tespit edilmiştir.

- 1) İşlenmiş SOI pullarda fotorezist kalıntıları tam olarak temizlenememektedir. Plazma ve piranha temizlemeleri yeterli gelmemektedir. İhtiyaç duyulan megasonik temizleme cihazı ise UNAM'da ya da erişilebilir temizalanlarda bulunmamaktadır.
- 2) CMP ile yüzey pürüzü düzeltme işlemleri UNAM'da bulunan VAKSİS'te kaplanan PECVD-SiO₂ ile istenilen sonucu vermemiştir. İhtiyaç duyulan kaliteli oksit elde edilemediği için CMP işlemleri sonrası yüzey pürüzü 0.5 nm'nin altına düşürülemediği için.

Bu durum üzerine PECVD-SiO₂ kaplama işlemleri için Sabancı Üniversitesi SUNUM temizalanında bulunan PECVD-SiO₂ kaplama cihazı kullanılarak proses tekrarlanmıştır. CMP işlemleri TÜBİTAK Gebze Yerleşke'sinde bulunan YİTAL yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu 2. problemi çözmektedir. 1. problemin çözümü için megasonik bulunamamıştır. Fotorezist kalıntılarının temizlenmesi için kısa süreli CMP işlemleri kullanılarak ara çözüm üretilmiştir. Bununla raporda sunulan yapıştırma sonucu elde edilmiştir. Ancak bazı bölgelerde yapışma elde edilememiştir. Bunun sebebi CMP işlemleri sırasında kullanılan slurry denilen kimyasalın kalıntılarının temizlenmesinin zorluğudur.

Mevcut imkanlar dahilinde mikroöretim çalışmalarının önemli aşamaları geliştirilmiştir. Tam teşekküllü ve erişilebilir bir temizalan imkanı olması durumunda birkaç ay içerisinde tamamlanabilecek bir mikroöretim süreci ortaya konulmuştur. TÜBİTAK, Bilim Sanayi Bakanlığı ya da Sağlık Bakanlığı'nın sağlayacağı temizalan imkanları ve mali destekle test edilebilir bir 2-D CMUT ortaya konabilir. Bu yönüyle tamamlanan proje planlanan hedeflerine ulaşmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar 2-D elmas membranlı ultrason çevirgeçlerin mikroüretim tekniğinin belirlenmesine ve buna uygun entegre devrelerin tasarım ve üretimine olanak sağlamıştır. 2-D CMUT dizi mikroüretim için gerekli tüm işlemler tamamlanamamıştır. Dizilere uygun entegre devre tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, ancak üretilen çiplerin alımı için finansal kaynak olmadığı için çipler XFAB'dan alınamamış ve testleri gerçekleştirilmemiştir. Türkiye'de tam teşekküllü ve erişilebilir uygun temizalan altyapısı bulunmadığı için MEMS işlemlerinin tamamlanması mümkün olmamıştır. Yurt dışından alınan hizmet alımı da yeterli olmamıştır.

Bu proje desteğiyle gerçekleştirilen çalışmaların literatüre katkı sağlama potansiyeli bulunmaktadır:

1) Entegre devre tasarımı CMUT dizilerinin sürülmesi için gerçekleştirilmiştir. 45-V yüksek gerilim elde edilmesi hedefine uygun tasarımlar XFAB tarafından üretilmiştir. Bu çalışma ULTRAMEMS Araştırma Laboratuvarı'nın entegre devrelerle ilgili ilk çalışması olması yönüyle önemli bir deneyim kazandırmıştır. Bu çalışmaların literatüre katkıları olacağı değerlendirilmektedir.

2) Kapasitif ultrason çevirgeçlerin maskelerinin tasarlanması Tanner L-EDIT programı kullanılarak yapılmıştır. Mikroüretim aşamaları belirlenen elmas membranlı 2-D CMUT'lara yönelik maske çalışmalarının ilk ve özgün bir mikroüretim yöntemi olduğu düşünülmektedir.

3) Elmas üzerine ince silisyum dioksit kaplamanın PECVD metoduyla yapılması ve ısı ile kalitesinin yükseltilmesiyle pulların birleştirilmesi işleminde kullanılması mümkün olmuştur. Bu kalitenin yükseltilmesi özellikle yüzey pürüzünün azaltılmasında kullanılan kimyasal cilalama metodunun (CMP) başarısını doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmalarla Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde elmas MEMS yapıları ve ultrason alanında faaliyet gösteren ULTRAMEMS Araştırma Grubu'nun gelişmesi ve kabiliyetlerinin artırılması başarılmıştır.

MEMS alanında Türkiye'de yürütülecek çalışmalar için araştırmacıların faydalanabileceği altyapıların yetersizliği bu proje kapsamındaki çalışmalarda gözlemlenmiştir. TÜBİTAK MEMS alanında sağladığı destekleri genel olarak kurumsal yapılara değil, birey ya da gruplara proje kapsamında sağladığı imkanlarla sunmaktadır. Kurumsal yapı olarak görülen üniversitelere bağlı bazı merkez ve enstitülerin aslında altyapı olarak faydalanılmasının mümkün olmadığı ve bu durumun ne üniversiteler ne de TÜBİTAK için de öncelikli bir sorun olmadığı anlaşılmıştır. Özellikle üniversite sayılarının arttığı ve değerli bilim insanlarının akın

akın Türkiye'ye geldiği bir ortamda tüm araştırmacılara açık kurumsal araştırma altyapı ve imkanlarının TÜBİTAK tarafından kurulması gerekmektedir. Bu kurumların yönetim kurullarının oluşturulması ve altyapı kullanımının sürekli denetlenmesi önemlidir. Üniversiteler bünyesinde oluşturulan merkez ve enstitüler kurumsal yapılar gibi görünmesine rağmen buraların kurumsal bir kimlik taşımadığı ve bireylere ait kişisel tasarruflarla yönetildiği, oluşturulan yönetim kurullarının yalnızca kağıt üzerinde yer aldığı ve karar mekanizmasında yeterli varlığının olmadığı durumlar söz konusudur. Bu konuda da TÜBİTAK üzerine düşen görevi ivedilikle yerine getirmelidir.

REFERANSLAR

- ALTUKHOV A.A., Afanas'ev M.S., Kvaskov V.B., Lyubchenko V.E., Mityagin A.Y., Murav'ev E.N., Pomortsev L.A., Potapov V.A., Spitsyn B.V., *Application of Diamond in High Technology*, INORG MATER+, 40, 1, 50-70, (2004).
- ARCHER S.B., Sims M.M., Giklich R., Traverso B., Laycock B., Wolfe B.M., Apfelgren K.N., Fitzgibbons R.J., Hunter J.G., *Outcomes Assessment and Minimally Invasive Surgery*, SURG ENDOSC, 14, 883-90, (2000).
- BAYRAM B., Akar O., Akin T., *Plasma-Activated Direct Bonding of Diamond-on-Insulator Wafers to Thermal Oxide Grown Silicon Wafers*, DIAM RELAT MATER, 19, 1431-5, (2010).
- BAYRAM B., *Fabrication of SiO₂-stacked Diamond Membranes and Their Characteristics for Microelectromechanical Applications*, DIAM RELAT MATER, 20, 459-63, (2011).
- BAYRAM B., Altinoluk H.S., *Microfabrication of Vacuum-sealed Cavities with Nanocrystalline and Ultrananocrystalline Diamond Membranes and Their Characteristics*, DIAM RELAT MATER, 20, 1149-54, (2011).
- BAYRAM B., *Diamond-based Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers*, DIAM RELAT MATER, 22, 6-11, (2012).
- CETIN A.M., Bayram B., *Diamond-based Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers in Immersion*, IEEE T ULTRASON FERR, 60, 414-20, (2013).
- D'SOUZA A.L., Tseng J.R., Pauly K.B., Guccione S., Rosenberg J., Gambhir S.S., Glazer G.M., *A Strategy for Blood Biomarker Amplification and Localization Using Ultrasound*, Proc. Natl. Acad. Sci., 106, 40, 17152-7, (2009).
- ECCARDT P.C., Niederer K., *Micromachined Ultrasound Transducers with Improved coupling Factors from a CMOS Compatible Process*, ULTRASONICS, 38, 774-80, (2000).
- FRENCH P.J., Sarro P.M., *Surface Versus Bulk Micromachining: The Contest for Suitable Applications*, J MICROMECH MICROENG, UK, 8 (1998), pp:45-53.
- HALLER M.I., Khuri-Yakub B.T., *A Micromachined Electrostatic Ultrasonic Air Transducer*, ULTRASON, (1994), pp: 1241-4.
- HESLEY G.K., Krzysztof R.G., Henrichsen T.L., Woodrum D.A., Brown D.L., *A Clinical Review of Focused Ultrasound Ablation With Magnetic Resonance Guidance*, ULTRASOUND QUARTERLY, 24, 2, 131-9, (2008).

HUANG Y., Ergun A.S., Hæggström E., Khuri-Yakub B.T., *New Fabrication Process for Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers*, PROC IEEE MICR ELECT, 522-5, (2003).

HUANG Y., Hæggström E.O., Zhuang X., Ergun A.S., Khuri-Yakub B.T., *Optimized Membrane Configuration Improves CMUT Performance*, IEEE T ULTRASON FERR Joint 50th Anniversary Conference, (2004), pp: 505-8.

HUANG Y., Hæggström E.O., Zhuang X., Ergun A.S., Khuri-Yakub B.T., *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) with Piston-Shaped Membranes*, IEEE ULTRASON, (2005), pp:589-92.

JIN X.C., Ladabaum I., Khuri-Yakub B.T., *Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Immersion Transducers*, PROC IEEE MICR ELECT, (1998), pp: 649-54.

KENNEDY J.E., Haar G.R., Cranston D., *High Intensity Focused Ultrasound: Surgery of the Future?*, The British Journal of Radiology, 76, 590-9, (2003).

KHURI-YAKUB B.T., Cheng C.H., Degertekin F.L., Ergun S., Hansen S., Jin X.C., Oralkan O., *Silicon Micromachined Ultrasonic Transducers*, Proceedings of the NOISE CONT ACOUST DI, 27, (2000), pp:153-71.

KHURI-YAKUB B.T., Oralkan O., Kupnik M., *Next-Gen Ultrasound*, IEEE Spectr., 46, 5, 44-54, (2009).

KOPELMAN D., Papa M., *Magnetic Resonance-Guided Focused Ultrasound Surgery for the Noninvasive Curative Ablation of Tumors and Palliative Treatments: A Review*, ANN SURG ONCOL, 14(5), 1540-50, (2007).

LADABAUM I., Jin X., Soh H.T., Atalar A., Khuri-Yakub B.T., *Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers*, IEEE T ULTRASON FERR, 45, 3, 678-90 (1998).

SENLİK M.N., Olcum S., Atalar A., *Improved Performance of CMUT with Nonuniform Membranes*, ULTRASON, (2005), pp:597-600.

WONG S.H., Kupnik M., Zhuang X., Lin D.S., Butts-Pauly K., Khuri-Yakub B.T., *Evaluation of Wafer Bonded CMUTs with Rectangular Membranes Featuring High Fill Factor*, IEEE T ULTRASON FERR, 55, 9, 2053-65, (2008).

WONG S.H., Kupnik M., Watkins R.D., Butts-Pauly K., Khuri-Yakub B.T., *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers for Therapeutic Ultrasound Applications*, IEEE T BIO-MED ENG, 57, 1, 114-23, (2010).

ZHOU S., Reynolds P., Hossack J.A., *Improving the Performance of Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers using Modified Membrane and Support Structures*, ULTRASON, (2005), pp:1925-8.

ZHUANG X., Ergun A.S., Huang Y., Wygant I.O., Oralkan O., Khuri-Yakub B.T., *Integration of Trench-Isolated Through-Wafer Interconnections with 2D Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays*, SENSOR ACTUATOR, A, 138, 221-9, (2007).

TÜBİTAK

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 110E072
Proje Başlığı: Akustik Dalga Karışımları Azaltılmış 2-D Elmas Membranlı Mikroüretilmiş Kapasitif Ultrason Çevirgeç Dizileri
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç. Dr. Barış Bayram
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, C-105, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara 06531
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Yoktur.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Eylül 2010-1 Eylül 2013
Öz (en çok 70 kelime) Bu proje kapsamında 2-D mikroüretilmiş kapasitif ultrason çevirgeç dizilerinin tasarımı ve mikroüretimin önemli bir kısmı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen çevirgeç dizilerine uygun özgün bir tümdevre tasarlanmış ve hizmet alımı yoluyla üretimi tamamlanmıştır. Tıpta tedavide kullanılmaya uygun yüksek performanslı ve elmasa dayalı özgün bir 2-D ultrason çevirgeç dizisi gelecekte endüstriyel ürüne dönüştürülmek üzere geliştirilmiştir. Bu çevirgeç dizisinin performans ve dayanıklılık yönüyle uluslararası düzeyde rekabet edebilecek özgün bir ürün olması literatüre katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır.
Anahtar Kelimeler: ultrason, CMUT, FEM, MEMS, elmas, çevirgeç, mikroüretim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/>
Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Tezler: Mohammad Maadi, "Integrated Circuit Design for Flip-chip bonded Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers", September 2013 (Yüksek Lisans Tezi), Danışman: Doç.Dr. Barış Bayram.