

# RF MEMS TEKNOLOJİSİ İLE AYARLANABİLİR EMPEDANS UYUMLAMA DEVRESİ

Mehmet Ünlü, Kağan Topallı, Şimşek Demir, Özlem Aydın Çivi, Sencer Koç, Tayfun Akın  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara  
Tel: (312) 210 4526, Faks: (312) 210 2304, E-posta: [munlu@metu.edu.tr](mailto:munlu@metu.edu.tr), [simsek@metu.edu.tr](mailto:simsek@metu.edu.tr)

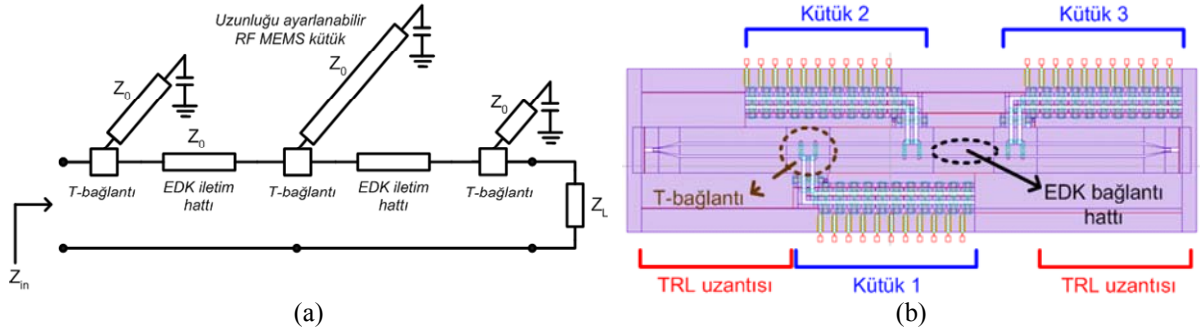
**Özet:** Bu bildiri RF MEMS teknolojisi ile tasarlanmış ve üretilmiş ayarlanabilir üç kütüklü empedans uyumlama devresi sunulmaktadır. Yapı üç adet uzunluğu ayarlanabilir kütük ile bu kütükleri birbirine bağlayan iki adet ara bağlantı hattından oluşmaktadır. Kütüklerin uzunluğunu MEMS anahtarlar kullanılarak istenildiği gibi ayarlanabilmekte ve Smith Aşağı üzerindeki 1000 noktaya empedans uyumlama yapılabilmektedir. Bu sayede yapı, Smith Aşağı'nın tamamını ayrı noktalarla kaplayabilmektedir. Uzunluğu ayarlanabilir kütükler, arka arkaya sıralanmış 12 adet MEMS anahtardan oluşmakta ve istenilen kütük uzunluğuna en yakın MEMS anahtar kapatılarak uzunluk ayarlaması yapılmaktadır. Boyutları 20 mm × 6.5 mm olan üretimi, tamamen yerli imkanlar ile ODTÜ Mikroelektronik Tesisleri'nde (ODTÜMET) yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları benzetim sonuçları ile uyum içerisinde.

## 1. Giriş

RF MEMS empedans uyumlama devreleri, ayarlanabilirlik ve düşük kayıplı olma özellikleriyle RF mühendisliğinin önemli problemleri olan düşük gürültülü yükselteç (LNA), güç yükseltici (PA) ve anten empedans uyumlama ile gürültü parametresi (NP) ve yük çekme (load-pull) ölçümlerinde yeni bir açılım getirmektedir [1-3]. Bu bildiri RF MEMS teknolojisi ile ODTÜ Mikroelektronik Tesisleri'nde (ODTÜMET) tamamen yerli imkanlarla üretilmiş, ayarlanabilir, üç kütüklü bir empedans uyumlama devresi sunulmaktadır. Yapı, elektriksel uzunluğu  $\lambda_g/2$  olan üç kütük üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş olan 12'şer adet RF MEMS anahtar ile kütükler arasında bağlantı için kullanılan ve elektriksel uzunluğu  $\lambda_g/8$  olan iki adet 50  $\Omega$  iletim hattından oluşmaktadır. Yapı, RF MEMS anahtarların değişik kombinasyonlar ile kapatılarak kütük uzunluklarının değiştirilmesi ile elde edilmesiyle Smith Aşağı'nın tamamını ayrı noktalarla kaplayabilmektedir. Yapı merkez frekans olarak 10 GHz frekansında tasarlanmasına rağmen, ayarlanabilirlik özelliğiyle çok geniş bir bantta çalışabilmektedir. Yapının toplam boyutları 20 mm × 6.5 mm'dir.

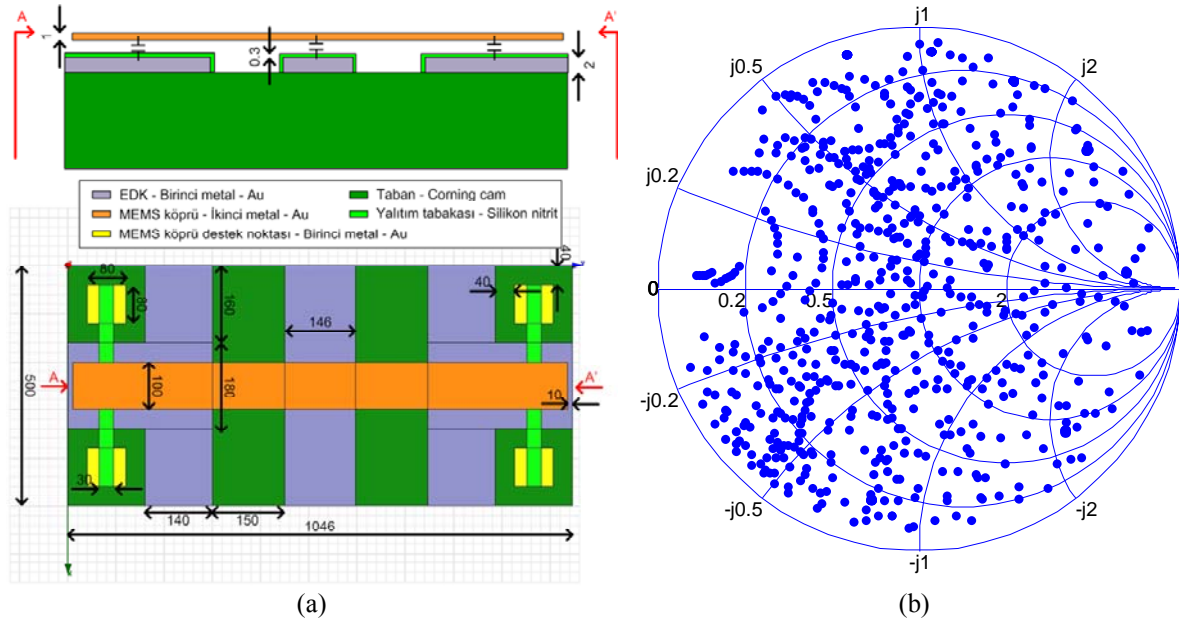
## 2. Empedans Uyumlama Devresi ve Elemanları

Ayarlanabilir empedans uyumlama devresinin şeması Şekil 1-a'da, serimi ise Şekil 1-b'de görülebilir. Yapı, tamamı eşdüzlemsel dalga kılavuzu (EDK) kullanılarak yapılmış üç adet uzunluğu ayarlanabilir kütük, iki adet kütükler arası bağlantı hattı ve kütükleri bağlantı hatlarına bağlamakta kullanılan üç adet T-bağlantıdan oluşmaktadır. Uzunluğu ayarlanabilir kütükler 12 adet MEMS anahtardan oluşmaktadır ve Sıralanmış MEMS İletim Hattı (SMİH) olarak tasarlanmıştır [4]. Yapıda istenilen bir kütük uzunluğu elde edebilmek için, o uzunluğa en yakın MEMS anahtara DC gerilim verilmekte ve o anahtar kapatılarak o noktada kapasitif bir kısa devre oluşturulmaktadır. Yapının Smith Aşağı'nın tamamını kapsayabilmesi amacıyla kütüklerin toplam uzunluğu merkez frekans olan 10 GHz'te  $\lambda_g/2$ , bağlantı hatlarının uzunlukları da yine aynı frekansta  $\lambda_g/8$  olarak seçilmiştir. Ayrıca pul üzerinde yapının daha az yer kaplaması amacıyla kütükler EDK köşeler ile eğilmiştir.



Şekil 1. (a) Ayarlanabilir empedans uyumlama devresinin şeması. (b) Yapının üretimi için kullanılan serimi.

Yapıda kullanılmak üzere Şekil 2-a'da görülen özel bir MEMS anahtar yapısı tasarlanmıştır. Bu anahtar yapısının klasik MEMS anahtarlarından farkı, EDK sinyal hattını toprak hattına bir yerine üç kapasitans ile bağlamasıdır. Bunun sebebi de yapının düzgün çalışabilmesi için her kütük üzerindeki 10 MEMS anahtardan sadece bir tanesine diğer anahtarların hareket ettirmeden DC gerilim uygulanması gereğidir. MEMS anahtarın üzerine yapıldığı EDK hattın empedansı  $85 \Omega$  olarak seçilmiştir. Burada amaç, MEMS köprülerin getirdiği kapasitansı hesaba katarak yapının yüklenmiş hat empedansı olarak  $50 \Omega$  elde edilebilmesidir. MEMS anahtarların boyutları  $1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 'dir.



Şekil 2. (a) Empedans uyumlama devresi için tasarlanmış olan MEMS anahtarın kesiti ve tepeden görünümü. (b) Yapının bütün empedans noktalarının Smith Abağı üzerindeki dağılımı.

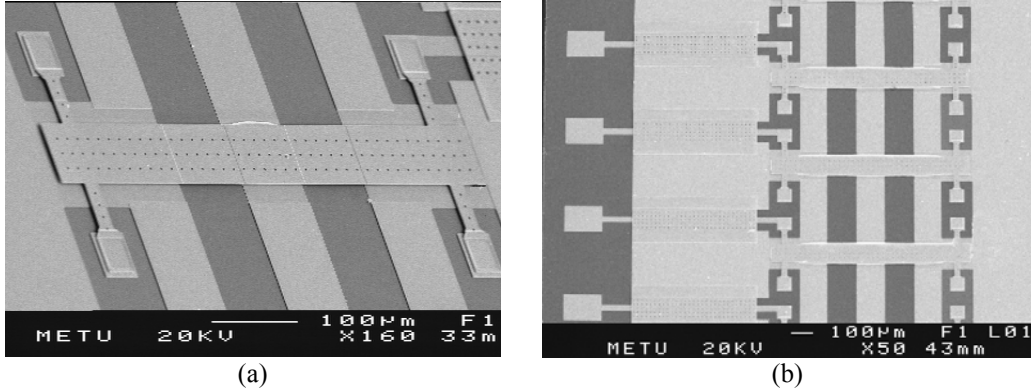
Uzunluğu ayarlanabilir MEMS kütükler, tasarlanan MEMS anahtarlardan 12 tanesinin arka arkaya sıralanmasıyla elde edilmiştir ve bu kütük tasarımı için SMİH yaklaşımı kullanılmıştır [4]. Yapının benzetimleri önce HFSS programı kullanılarak tamdalga EM olarak yapılmış, sonra ADS 2005A programı kullanılarak [4]'te anlatılan devre modeli ile modellenmiştir. Bu yaklaşımın sebebi, empedans uyumlama devresinin tamamının tamdalga EM olarak benzetim yapmak için çok büyük olmasıdır. Çıkarılan devre modeli ile yapının bütün anahtar kombinasyonları için Smith Abağı üzerindeki dağılımını elde etmek mümkündür. Kütükler arası bağlantı hattının uzunluğu Smith Abağı üzerinde tek biçimli bir dağılım elde etmek için çok önemlidir. Kütüklerin tamdalga EM benzetimlerinden elde edilen devre modeli kullanılarak yapılan Matlab benzetimlerinde, bağlantı hattı  $200 \mu\text{m}$  ile  $2800 \mu\text{m}$  arasında değiştirilmiş ve  $2000 \mu\text{m}$ 'de tek biçimli bir dağılım elde edilmiştir ki, bu değer beklenen değer olan  $10 \text{ GHz}$  frekansında  $\lambda_g/8 = 2217 \mu\text{m}$ 'ye çok yakındır. Aradaki farklılık ise yapıda kullanılan T-bağlantılardan kaynaklanmaktadır.  $2000 \mu\text{m}$  için elde edilen dağılım Şekil 2-b'de görülebilir.

### 3. Üretim ve Ölçüm Sonuçları

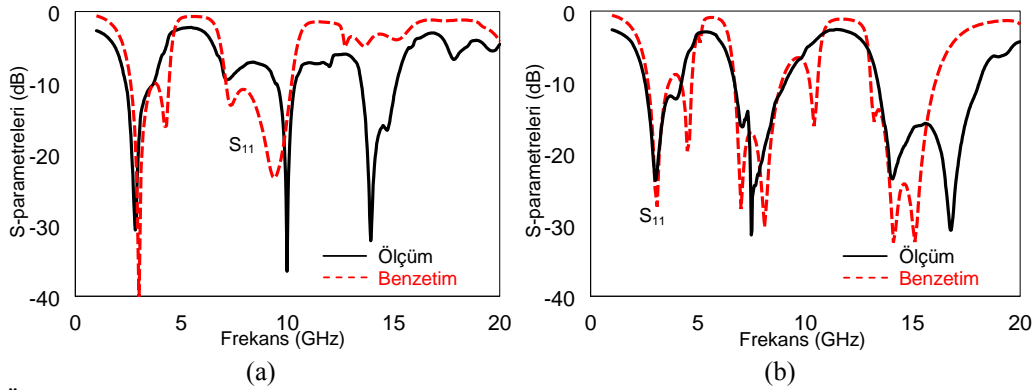
Empedans uyumlama devresinin üretim sürecinin tamamı ODTÜMET'te yapılmıştır. Yapı  $500 \mu\text{m}$  cam taban üzerine ( $\epsilon_r=4.6$ ,  $\tan \delta=0.005$ ) yüzey mikroişleme teknolojisi ile üretilmiştir. Üretim süreci RF hatları oluşturan birinci metal katmanının ( $1 \mu\text{m}$ -Au) serimi ve şekillendirilmesiyle başlar. Daha sonra MEMS anahtarlarda DC yalıtım için kullanılan tabakanın ( $0.3 \mu\text{m}$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) serimi ve şekillendirilmesi yapılır. MEMS köprülerin üzerine konulacağı ara katmanın ( $2 \mu\text{m}$ -polimit) serilip şekillendirilmesinden sonra, MEMS köprüleri oluşturan ikinci metal katmanının ( $2 \mu\text{m}$ -Au) serilip şekillendirilmesiyle devam eder. Son olarak ara katman aşındırılır ve yapılar kritik nokta kurutucusunda serbest bırakılır. Üretilmiş olan yapıların taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında çekilmiş görüntüleri Şekil 3'te görülebilir.

Şekil 4'te üretilmiş olan yapının iki farklı MEMS anahtar kombinasyonu için ölçüm sonuçları görülebilir. Ölçüm sonuçları benzetimlerle karşılaştırıldığında, elde edilen ölçümlerin tasarım ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenebilir. Ölçüm sırasında benzetimlerden farklı olarak yapılan tek değişiklik, MEMS anahtarın aşağı durum

kapasitanslarındaki azalmadır. Aşağıda görülen ölçümlerdeki kapasitans değerleri 4.5 pF yerine 0.6 pF, 10 pF yerine de 1.4 pF olarak modellenmiştir. Kapasitanslardaki bu azalmanın sebebinin üretimin son aşaması olan ara katman aşındırma sırasında bir miktar ara katmanın köprülerin altında kalması olduğu görülmüştür. Daha düşük dielektrik sabitine sahip olan bu katman ise aşağı durum kapasitansının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durumu engellemek için bir yöntem geliştirilmiş ve bundan sonraki üretim süreçlerinde kullanılacaktır.



Şekil 3. Empedans uyumlama devresinin SEM fotoğrafları (a) MEMS anahtar. (b) MEMS kütük.



Şekil 4. Ölçüm sonuçları. (a) 1. kütükte 3. anahtar, 2. kütükte 9. anahtar, 3. kütükte 5. anahtar kapatılmış durum. (b) Bütün kütüklerde 7. anahtar kapatılmış durum.

#### 4. Sonuç

Bu bildiriye RF MEMS teknolojisi ile üretilmiş ayarlanabilir, üç kütüklü bir empedans uyumlama devresi sunulmuştur. ODTÜMET'te geliştirilen bir yüzey mikroişleme yöntemi ile üretilen yapı, Smith Abağı üzerini ayrıntı noktalarla tamamen kaplayabilmektedir. Yapılan üretimler sonucunda elde edilen yapılar test edilmiş ve ölçüm sonuçlarının benzetimlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

#### 5. Bilgilendirme

Bu araştırma TÜBİTAK (EEEAG-104E048), DPT ve Avrupa Birliği 6. Çerçeve Programı kapsamında AMICOM (Advanced MEMS For RF and Millimeter Wave Communications) Mükemmeliyet Ağı tarafından desteklenmektedir.

#### 6. Referanslar

- [1] H.-T. Kim, S. Jung, K. Kang, J.-H. Park, Y.-K. Kim ve Y. Kwon, "Low-Loss Analog and Digital Micromachined Impedance Tuners at the Ka-Band," IEEE Trans. on MTT, vol. 49, no. 12, Aralık 2001.
- [2] Y. Lu, D. Peroulis, S. Mohammadi ve L. P. B. Katehi, "A MEMS Reconfigurable Matching Network for a Class AB Amplifier," vol. 13, no. 10, Ekim 2003.
- [3] T. Vähä-Heikkilä, J. Varis, J. Tuovinen ve G. M. Rebeiz, "A 20–50 GHz RF MEMS Single-Stub Impedance Tuner," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 15, no. 4, Nisan 2005.
- [4] K. Topalli, M. Unlu, S. Demir, O. Aydın Civi, S. Koc ve T. Akin, "New Approach For Modelling Distributed MEMS Transmission Lines", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., vol. 153, no. 2, Nisan 2006.