

SIRALANMIŞ MEMS İLETİM HATLARI İÇİN YENİ BİR MODEL

M. Ünlü, K. Topallı, Ş. Demir, Ö. Aydın Çivi, S. Koç ve T. Akın
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
munlu@metu.edu.tr, kagan@metu.edu.tr, simsek@metu.edu.tr,
ozlem@metu.edu.tr, skoc@metu.edu.tr, tayfuna@metu.edu.tr

Özet: *Bu bildiriye, yüksek empedanslı eşdüzlemsel dalga kılavuzunun (EDK) periyodik olarak MEMS köprülerle yüklendiği sıralanmış MEMS iletim hatları (SMİH) için yeni bir model ve bu modelin parametrik çalışması sunulmuştur. Bu modelde, MEMS köprüler ayrıklı devre elemanları yerine düşük empedanslı iletim hatlarıyla temsil edilmiştir. Bu modelde de yüklenmemiş kısımlar yine yüksek empedanslı iletim hatlarıyla modellenirken, köprü kısmına geçişlerde akım ve alandaki süreksizlikleri modellemek amacıyla LC devreleri kullanılmıştır. Modelin doğruluğu farklı SMİH yapıları üzerindeki benzetim ve cam taban üstüne elektrokaplama teknolojisine dayanan RF MEMS üretim süreci sonucunda elde edilen ölçümlerle gösterilmiştir.*

1. Giriş

Bu çalışmada Sıralanmış MEMS İletim Hatları için yeni bir model önerilmiş ve doğruluğu ve kullanışlılığı gösterilmiştir. Son yıllarda RF MEMS konusunda yapılan çalışmalarda genellikle, anahtar, kapasitör, indüktör ve rezonatör gibi ayrıklı devre elemanları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu devre elemanlarına ek olarak, faz kaydırıcılar, uyumlama devreleri ve iletim hatları gibi dağıtılmış-sıralanmış (distributed) devre elemanları da ele alınmıştır. Bu elemanların gerçekleştirilmesinde, periyodik olarak dizilmiş reaktif yüklerle iletim hattının yüklenmesi esas alınmıştır. Hattı yükleyen devre elemanı olarak genellikle ayarlanabilir MEMS köprüler kullanılmaktadır. Köprülerin yüksekliklerinin ayarlanabilmesiyle, iletim hattının parametrelerini kontrol edebilmek mümkün olmaktadır. Bu tür iletim hatlarına sıralanmış MEMS iletim hatları (Distributed MEMS transmission lines - DMTL) adı verilmektedir. Sıralanmış MEMS iletim hatları (SMİH) kullanılarak faz kaydırıcılar, uyumlama devreleri, rezonatörler ve filtreler yapılabilmektedir.

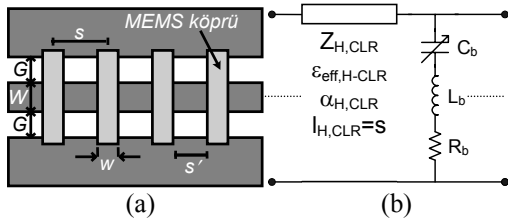
Yüksek empedanslı eşdüzlemlı dalga kılavuzunun (EDK) periyodik olarak MEMS köprülerle yüklendiği SMİHnin analizi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu analizlerde MEMS köprüler Şekil 1'de gösterildiği gibi ayrıklı CLR devreleriyle, yapının MEMS köprüler dışında kalan kısımları ise yüksek empedanslı iletim hatlarıyla modellenmiştir [1]. Yaptığımız çalışmalarda CLR modelinin bazı durumlar için yetersiz olduğu fark edilmiş ve yeni bir model önerilmiştir. Şekil 2'de sunulan bu yeni modelde, yüklenmemiş kısımlar yine yüksek empedanslı iletim hatlarıyla modellenirken, MEMS köprüler ise düşük empedanslı iletim hatları ile temsil edilmektedir. Düşük empedanslı iletim hatlarından yüksek empedanslı iletim hatlarına geçişler ise süreksizlik (discontinuity) etkilerini hesaba katmak için LC devreleriyle modellenmiştir.

Önerilen modeldeki parametrelerden, süreksizlik parametreleri dışındakiler literatürde bulunan formülasyonlarla hesaplanabilmektedir. Süreksizlik parametreleri ise Ansoft HFSSv9.1 ile yapılan 3B EM benzetimlerin önerilen modele uyumlanması (optimizasyon) sonucunda elde edilmiştir. Ayrıca önerilen modelin doğruluğunu göstermek amacıyla boyutları farklı üç SMİH yapısı ODTÜ bünyesindeki Mikroelektronik tesislerinde üretilmiş ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde de önerilen modelin SMİH yapısını modelleme konusunda iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

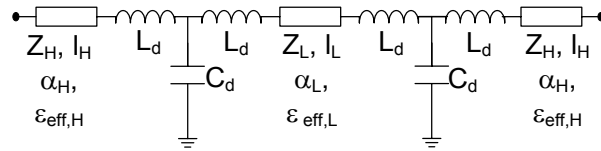
2. Önerilen modelin elemanları

Önerilen model, SMİH yapısının tamamının aslında iletim hatları ve bu iletim hatları arasındaki süreksizlik etkilerinin hesaba katılmasıyla modellenebileceği öngörüsüne dayanır. Yüksek empedanslı iletim hatlarının parametreleri kaynaklarda sunulan formülasyonlarla hesaplanabilir [2]. Düşük empedanslı iletim hattı MEMS köprüleri modellemektedir. Tabanın alt yüzü iletken kaplı EDK'nın üzerine tavan şeklinde bir iletken konduğundaki

elektrik alan dağılımı incelendiğinde, MEMS köprüler için niye düşük empedanslı iletim hattının kullanıldığı daha iyi anlaşılabilir. Böyle bir yapıda, elektrik alan EDK'nın sinyal hattından çıkıp düzlemsel toprak hatlarına ve taban ile tavandaki iletkenlere doğru yayılmaktadır. Eğer MEMS köprüler bu yapıdaki tavan kısmına benzetilirse, elektrik alanların çok büyük bir kısmının sinyal hattı ile MEMS köprü arasına sıkışacağı öngörülebilir. Çünkü MEMS köprü, düzlemsel toprak hatlarına ve tabandaki iletkenlere kıyasla çok daha yakın bir mesafededir (sadece 5 μm). Bu durumda, EDK mikroşerit hat yapısına dönüşmeye başlar. MEMS köprü bu mikroşerit hattın toprağı gibi, köprü ile sinyal arasındaki boşluk ise mikroşerit hattın dielektrik malzemesi gibi davranmaktadır. Yüklenmemiş EDK ile yüklenmiş kısım arasındaki süreksizliği modelleyebilmek amacıyla, *LC* devreleri kullanılmıştır. Burada sözü edilen süreksizlik, ani empedans ve alan değişiminden dolayı meydana gelmektedir. *LC* devrelerindeki indüktans, akım dağılımındaki değişimi, kapasitans ise süreksizlik bölgesindeki saçak alanları modellemek için kullanılmıştır.



Şekil 1. (a) SMİH'nin genel görüntüsü. (b) Arka arkaya bağlanmış yapılardan her biri için sunulan CLR modeli.



Şekil 2. MEMS köprülerim düşük empedanslı iletim hatlarıyla temsil edildiği SMİH yapılarında kullanılmak sunulan yeni model.

3. Model parametrelerinin hesaplanması

Modelin geçerliliğini göstermek amacıyla 500 μm kalınlığında Pyrex 7740 cam taban üzerine ($\epsilon_r = 4.6$, $\tan \delta = 0.005$) farklı köprü aralıkları ve köprü yüksekliklerinde çeşitli SMİH tasarlanmış ve üretilmiştir. Tablo 1'de bu yapıların fiziksel boyutları ve hesap edilen yüksek empedanslı iletim hattının parametreleri verilmiştir [2]. Düşük empedanslı iletim hattının parametrelerinin (Z_L , $\epsilon_{eff,L}$, α_L) hesaplanmasında daha öncede belirtildiği gibi, EDK'nın üzerine tavan şeklinde bir iletken konulduğundaki formülasyon kullanılmıştır [2]. MEMS köprü, formülasyonda kullanılan yapı için tavan olarak kabul edilmiştir ve yüksekliği $h = 2, 3, 4$ ve $5 \mu\text{m}$ 'dir. Düşük empedanslı hat için hesap edilen parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerler Ansoft HFSSv9.1 kullanılarak yapılan EM benzetimlerle de uyum içindedir. Modeldeki süreksizlik parametreleri, L_d ve C_d , ölçümler ile model arasında yapılan optimizasyon sonucunda elde edilmiştir ve Tablo 3'de sunulmuştur. Önerilen model, ölçüm sonuçlarıyla iki şekilde doğrulanmaya çalışılmıştır. 5 μm yüksekliğindeki SMİH yapılarının S-parametreleri ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 2'de sunulan model ile modellenmiştir. Şekil 3'de bu ölçüm ve model için yansıma ve iletim katsayılarının kıyaslandığı grafikler görülebilir. Buradan da anlaşılacağı üzere, model ve ölçüm arasında oldukça iyi bir uyum vardır ve bu da modelin geçerliliğini göstermektedir.

Tablo 1. Üç farklı SMİH yapısı için fiziksel boyutlar ve yüksek empedanslı iletim hattının hesap edilen parametreleri (@ 10 GHz). Bütün yapılar için $w=100 \mu\text{m}$ 'dir.

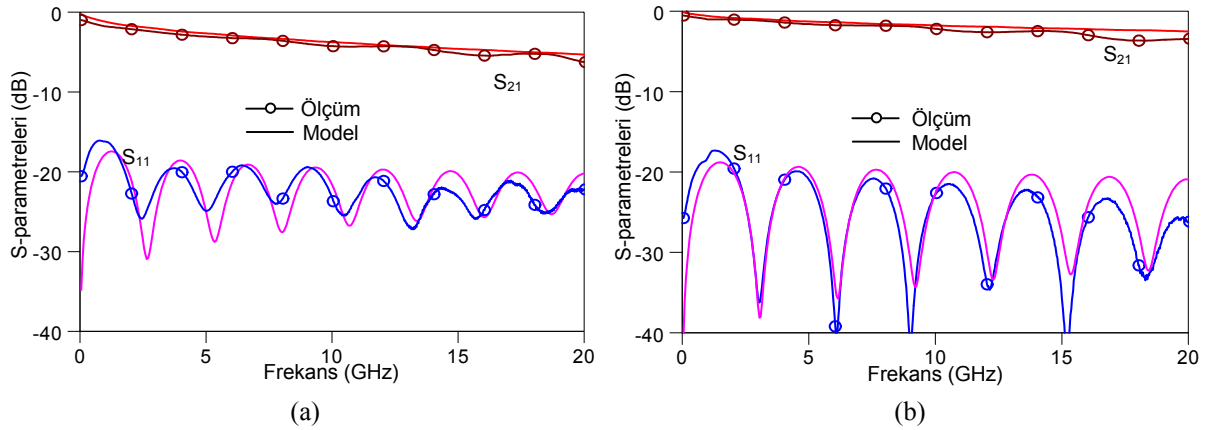
Tip	W (μm)	G (μm)	s' (μm)	Köprü sayısı	Toplam uzunluk (mm)	Z_H (Ω)	$\epsilon_{eff,H}$	α_H (dB/cm)
Tip I	74	83	100	112	22.4	89	2.78	0.25
Tip II	96	87	200	75	22.5	83	2.78	0.23
Tip III	122	59	400	45	22.5	70	2.77	0.25

Tablo 2. Düşük empedanslı iletim hattı için hesap edilen parametreler (@ 10 GHz).

Tip	h = 2 μm			h = 3 μm			h = 4 μm			h = 5 μm		
	Z_L (Ω)	α_L (dB/cm)	$\epsilon_{\text{eff},L}$	Z_L (Ω)	α_L (dB/cm)	$\epsilon_{\text{eff},L}$	Z_L (Ω)	α_L (dB/cm)	$\epsilon_{\text{eff},L}$	Z_L (Ω)	α_L (dB/cm)	$\epsilon_{\text{eff},L}$
Tip I	9.12	3.96	1.12	13.01	2.62	1.17	16.54	1.96	1.22	19.76	1.57	1.27
Tip II	7.17	3.99	1.1	10.31	2.64	1.14	13.21	1.97	1.19	15.89	1.58	1.23
Tip III	5.68	4.02	1.09	8.2	2.66	1.13	10.54	1.99	1.18	12.72	1.59	1.22

Tablo 3. Optimizasyon sonucunda elde edilmiş farklı yüksekliklerdeki SMİH yapıları için L_d ve C_d değerleri. Optimizasyon sırasında L_d , C_d ve α_L dışında bütün parametreler sabit tutulmuştur.

Tip	h = 2 μm		h = 3 μm		h = 4 μm		h = 5 μm	
	L_d (pH)	C_d (fF)	L_d (pH)	C_d (fF)	L_d (pH)	C_d (fF)	L_d (pH)	C_d (fF)
Tip I	6.27	4.09	5.89	3.81	5.88	3.01	5.89	2.47
Tip II	6.47	4.91	6.09	4.36	5.47	4.10	6.39	3.15
Tip III	4.03	6.97	3.38	6.07	3.27	5.13	3.88	3.98

**Şekil 3.** (a) SMİH Tip I (h = 5 μm) için ölçüm sonuçları. (b) SMİH Tip III (h = 5 μm) için ölçüm sonuçları.

4. Sonuçlar

Bu bildiriye sıralanmış MEMS iletim hatları için yeni bir model önerilmiş ve bu model üzerinde yapılan parametrik bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Bu yeni modelde MEMS köprü, kümelenebilir (lumped) bir CLR devresi yerine düşük empedanslı bir iletim hattı ve bu hattın her iki tarafında bulunan LC devreleriyle modellenmiştir. Bu LC devreleri, ani empedans ve alan değişimlerini modellemektedir. Bu çalışma içerisinde sunulan model parametrelerinin MEMS köprü yüksekliğine ve EDK boyutlarına göre değişimi de incelenmiştir. Önerilen modelin geçerliliğini ortaya koymak amacıyla, değişik boyutlara sahip SMİH yapıların EM benzetimleri yapılmış ve ayrıca yapılar ODTÜ Mikroelektronik Tesislerinde üretilmiştir. Önerilen model ile yapılan devre bazlı benzetimler, hem EM benzetimlerle, hem de ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında gayet tutarlı sonuçlar elde edilmiş, böylece modelin geçerliliği kanıtlanmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] G. M. Rebeiz, "RF MEMS theory, design, and technology," John Wiley & Sons, 2003.
- [2] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, "Microstrip lines and slotlines," Arctech House, 1996.