

RF MEMS TEKNOLOJİSİ İLE MİKRODALGA FAZ KAYDIRICILARI

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

ÖZET

Bu bildiride mikrodalga veya radyo frekanslarında (RF) çalışan ve Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) adlı teknoloji kullanılarak üretilen faz kaydırıcı devre elemanları sunulmuştur. Faz kaydırıcılar iki gruba ayrılmıştır. Birinci gruptakiler hattın elektriksel uzunluğunu değiştirmektedirler. Bunun için hattın üzerine yerleştirilen paralel bağlanmış MEMS sığaların değeri elektrostatik etkiye ile değiştirilerek hattın faz hızı değiştirilmektedir. Benzetim programlarında bu yapıların 15 GHz de 0°-35° aralığındaki bütün faz farklarını verebildiği gözlemlenmiştir. İkinci gruptakiler ise hattın fiziksel uzunluğunu değiştirmektedirler. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için elektrostatik etkiye ile çalışan MEMS anahtarlar kullanılmaktadır. Benzetim programlarında bu yapıların 15 GHz de 0°, 30°, ve 60° faz farkları verebildiği gözlenmiştir. Faz kaydırıcılar MEMS üretim teknikleri ile üretilmiştir.

GİRİŞ

Mikrodalga (RF) faz kaydırıcılar kablosuz iletişimin gerekli olduğu birçok noktada yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Kullanım alanlarına örnek olarak askeri ve sivil radarlar, uydu sistemleri, kablosuz iletişim cihazları, ve otomobiller verilebilir. Bu kullanım alanlarındaki ihtiyacı karşılamak üzere birçok çeşit faz kaydırıcı tasarlanmış ve hayata geçirilmiştir. İlk üretilen faz kaydırıcılar ferrit malzemeleri kullanarak dalganın ilerlediği ortamın özelliklerini değiştirmekte ve böylece faz değişimi yaratmışlardır. Fakat bu faz kaydırıcılar çok ağır ve büyük oldukları için yeni arayışları içine girilmiştir. Bu arayışların sonucu olarak yarıiletken teknolojisi kullanılarak üretilen faz kaydırıcılar ortaya çıkmıştır. Bu faz kaydırıcılar yarıiletken teknolojisi ile üretilen pin diyot veya FET anahtarları kullanarak faz kayması sağlamışlardır. Yarıiletken faz kaydırıcılar küçük, hafif, ve ucuzdurlar. Fakat bu faz kaydırıcıların RF performansları kötüdür. Genel olarak araya sokma yitimleri yüksek, yalıtımları ise düşüktür. Ayrıca diyotlar ve transistörler doğrusal olmayan davranışlar gösterdiklerinden çapraz konuşmaya (cross-talk) sebep olurlar. Bunun yanısıra diyotların ve transistörlerin sürekli akım çekmelerinden dolayı genel güç tüketimleri fazladır. Bu dezavantajların giderilebilmesi ve yarıiletken teknolojisinin getirdiği küçülmenin getirdiği avantajların korunabilmesi için yeni bir teknoloji olan Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) adı verilen teknolojiye yönelinmiştir. Çünkü MEMS teknolojisi ile üretilen RF devre elemanlarının RF performansları yüksektir. Bunun yanısıra MEMS teknolojisinde temel olarak yarıiletken teknolojisinde kullanılan teknikler ile küçük mekanik sistemler üretildiğinden yarıiletken cihazlar gibi küçük ve hafif cihazlar üretilebilir. MEMS teknolojisi ile üretilen RF devre elemanları anahtarlar, değişken sığalar (kapasitanslar), faz kaydırıcılar, ayarlanabilir elektriksel filtreler, ve mekanik filtrelerdir [1-7].

Şu ana kadar MEMS ile üretilen faz kaydırıcılar büyük faz kayması verebilmek için büyük alanlara ihtiyaç duyarlar. Bu bildiride küçük alanda büyük miktarda faz kayması sağlayan yeni faz kaydırıcılar hakkında bilgi verilmiştir. Öncelikle faz kaydırıcıların teorisi anlatılmıştır. Daha sonra yapılan tasarımlar ve bunların benzetim sonuçları verilmiştir. Son olarak da bu tasarımların üretimi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

TEORİ

Faz temel olarak periyodik bir işaretin bir periyodu içinde hangi noktada olduğumuzu belirleyen terimdir. Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi faz frekans bölgesi (frequency domain) için tanımlanmış bir terimdir. Fazın zaman bölgesindeki eşleniği zaman gecikmesidir. Bir iletim hattının fazı genel olarak aşağıdaki denklem ile belirlenebilir.

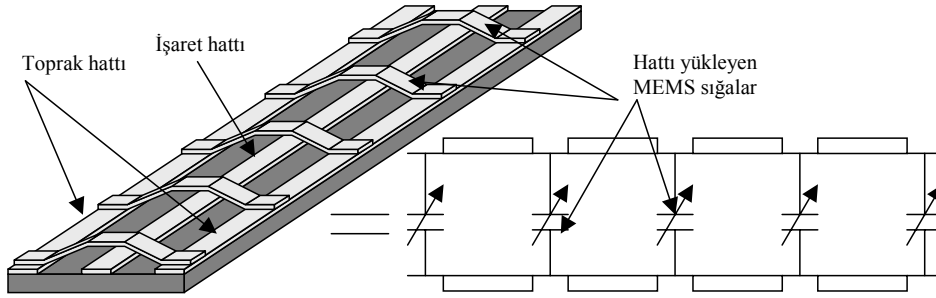
$$\theta = \beta \times d \quad (1)$$

Bu denklemde “ θ ” faz miktarını ya da elektriksel uzunluğu, “ β ” iletim sabitini ya da faz hızını, ve “ d ” hattın fiziksel uzunluğunu belirtmektedir. Hattın araya sokma fazını değiştirebilmek için bu iki terimden herhangi bir tanesini değiştirmek yeterlidir. Faz kaydırıcılar da bu iki özellikten bir tanesini kontrollü olarak değiştirmektedirler. Bu sebepten dolayı faz kaydırıcılar iki gruba ayrılmıştır.

İlk gruptaki faz kaydırıcılar iletim hattının karakteristik özelliği olan faz hızını değiştirirler. İletim hattının faz hızını belirleyen iki parametre vardır.

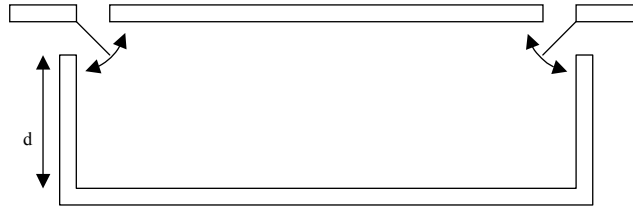
$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2)$$

Bu denklemde L ve C hattın birim uzunluktaki endüktans ve sığasını göstermektedirler. Bu iki parametre hattın geometrik ölçülerine bağlıdır. Hattın geometrik özelliklerini değiştirmek zor olduğundan faz hızını değiştirmek için seri endüktanslar veya paralel sığalar eklemek daha uygundur. Paralel sığalar eklemek MEMS yapıları için kolay olduğundan MEMS faz kaydırıcılarda hattın üzerine periyodik olarak paralel sığalar eklenir. Örnek bir yapı ve bunun modeli Şekil 1 de verilmiştir. Modelde de görüldüğü gibi periyodik olarak yerleştirilen sığalar hattın birim uzunluktaki sığasını değiştirerek faz hızını değiştirmektedirler.



Şekil 1: Birinci tip MEMS faz kaydırıcıların üç boyutlu şekline bir örnek ve bu şeklin devre modeli. Hattın üzerine yerleştirilen köprüler paralel olarak bağlanmış değişken sığalar olarak görev yapmaktadırlar.

İkinci gruptaki faz kaydırıcılarda ise hattın fiziksel uzunluğu değiştirilmektedir. Şekil 2 de verilmiş olan modelde de görülmüş olduğu gibi tek girişli ve iki çıkışlı anahtarlar vasıtasıyla iki farklı yoldan bir tanesi seçilerek hattın fiziksel uzunluğu değiştirilmiş olur. İki yol arasındaki uzunluk farkının faz hızıyla çarpılması fazdaki kayma miktarını verir. Elde edilen faz kayması ayrıntı adımlarla gerçekleşmektedir; yani ancak iki yol arasındaki fark kadar faz farkı verilebilir, aradaki bir değeri elde etmek mümkün değildir.



Şekil 2: İkinci tip faz kaydırıcının devre modeli. İki anahtar sayesinde yollardan bir tanesi seçilmektedir. İki yol arasındaki uzunluk farkı $2xd$ kadardır.

TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

İlk gruptaki yapılar eşdüzlemlı dalga kılavuzu (EDK) hatların üzerine periyodik olarak köprüler yerleştirilmesi ile oluşturulur. Bu köprüler EDK'nın toprak hattı ile işaret hattı arasında paralel olarak bağlanmış sığalar olarak görev yaparlar. Bu sığalar hattın karakteristik özelliği olan birim uzunluk sığasını değiştirir. Bu değişiklik faz hızına yansır. Fakat aynı zaman da aşağıdaki denklemle belirtilmiş olan karakteristik empedansını da değiştirir.

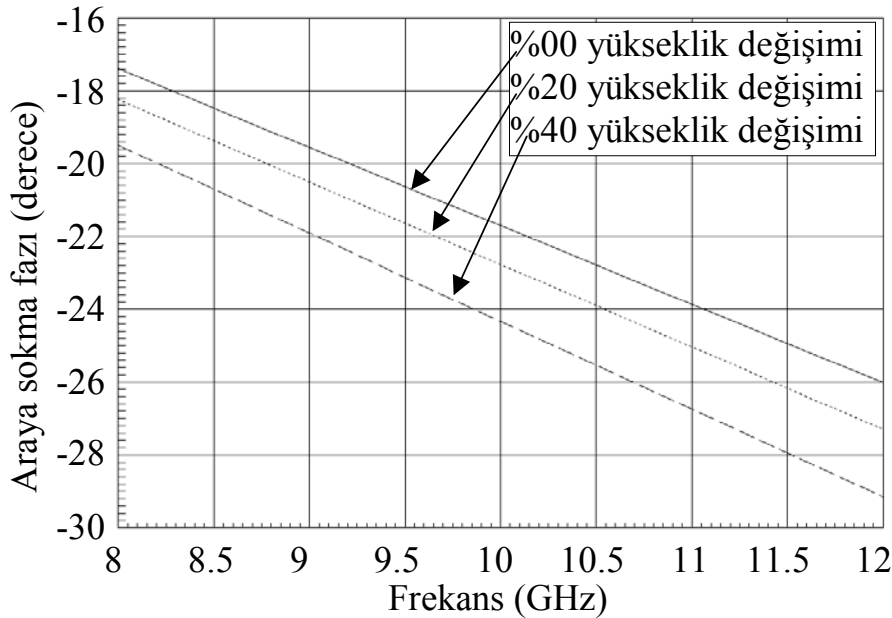
$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

Bu nedenle tasarım yapılırken yüklenmemiş hattın empedansı yüksek tutulmalıdır ki daha sonra sığalarla yüklendiğinde düşüp istenilen değere ulaşsın. Bu değişim göz önüne alındığında 50Ω karakteristik empedansı olması istenilen bir faz kaydırıcı için yerleştirilen sığa miktarına bağlı olarak yaklaşık 80Ω gibi bir karakteristik empedansa sahip bir EDK kullanılmalıdır.

EDK üzerine yüklenen periyodik sığa miktarının ilk değeri karakteristik empedansın istenilen değerde tasarlanması için önemlidir. Fakat asıl faz kaymasını sağlayan şey bu sığanın kontrollü bir şekilde değiştirilebilen kısmıdır. Bu değiştirilebilir sığanın miktarı da hattın üzerine yerleştirdiğiniz köprünün yüksekliğinin ne kadarının değiştirilebildiği ile ilgilidir. Bu yükseklik değişimi elektrostatik etkiye ile gerçekleştirildiği için burada elektromekanik dengenin hangi yüksekliğe kadar korunabileceği önem kazanır çünkü elektrostatik kuvvetin miktarı sabit bir gerilime karşın yükseklikle değişmektedir. Belli bir yükseklikteki elektrostatik kuvvet köprünün kollarının geri çekme kuvvetini aşarsa köprü tamamen yapının üzerine çöker. Bu olay gerçekleşmeden önce ayarlanabilecek yükseklik miktarı toplam yüksekliğin %30'u kadardır. Bu durumda toplam sığanın ancak %25'i kadarını kontrollü bir şekilde değiştirebiliriz. Buradan da anlaşılacağı gibi yapının performansının tamamını kullanmak mümkün olamamaktadır. Yapılan tasarımlarda bu konu gözönünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak tasarım yapılırken hattın yüklenmemiş halinin karakteristik empedansı yerine yüklenmiş halinin empedansı uygun bir şekilde ayarlanmalıdır. Ayrıca değişken sığaların performansının tamamının kullanılamayacağı da hesaba katılmalıdır.

İkinci gruptaki yapılarda dikkat edilmesi gereken husus yollar arasındaki seçimi yapan anahtarların tasarımının iyi yapılmasıdır. Bu anahtarlar açık ve kapalı durumda iki değişik sığa değeri alırlar. Bu sığa değerleri frekansla değişen belirli empedanslara karşılık gelmektedir. Anahtar kapalı durumdayken bu empedansın değeri işaretin yalıtım miktarını etkilemektedir. Eğer bu empedans düşük olursa işaret yalıtımı yerince yapılamaz ve giriş kapısından çıkış kapısına istenmeyen işaret geçişi olur. Bu işaret geçişini engelleyebilmek için kapalı durumdaki sığanın mümkün olduğu kadar düşük tutulması gerekir. Anahtar açık durumdayken ise empedansın değeri araya sokma yitimini etkilemektedir. İdealde sıfır olması gereken bu değeri mümkün olduğu kadar düşük tutmak gerekir. Bunu sağlayabilmek için açık durumdaki anahtar sığası yükseltilmelidir. Bu nedenle sığa değerlerinin çalışma frekansına uygun olarak ayarlanması gerekir.

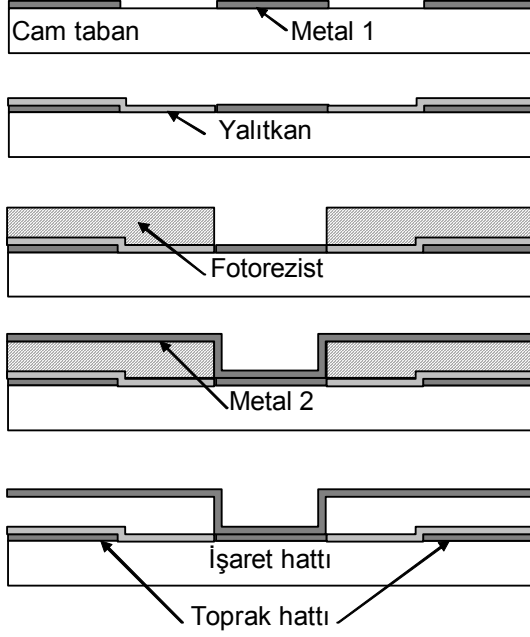
Yukarıda belirtilen tasarım problemleri göz önüne alınarak yapılan tasarımlar çeşitli benzetim programlarında (HFSS, ENSEMBLE) denenmiştir. Birinci tip yapılar için yapılan benzetimlerde öncelikle yüklenmiş hattın karakteristik empedansının 50 Ω olmasına çalışılmıştır. Bunu sağlayan yüklenmemiş hattın empedansı 73 Ω olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu hattın faz kaydırma miktarı benzetim programları kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3 te görüldüğü üzere 10 GHz de 0.8 mm uzunluğundaki bir hattın üzerindeki köprülerin yüksekliği 20% değiştirildiğinde 1.06° faz kayması elde edilmektedir. Yükseklik değişimi artırıldığında faz kaymasının miktarı da doğrusal olmayan bir orantıyla artmaktadır. Benzetimi yapılan yapının 10 GHz de araya sokma yitimi 0.05 dB olarak bulunmuştur.



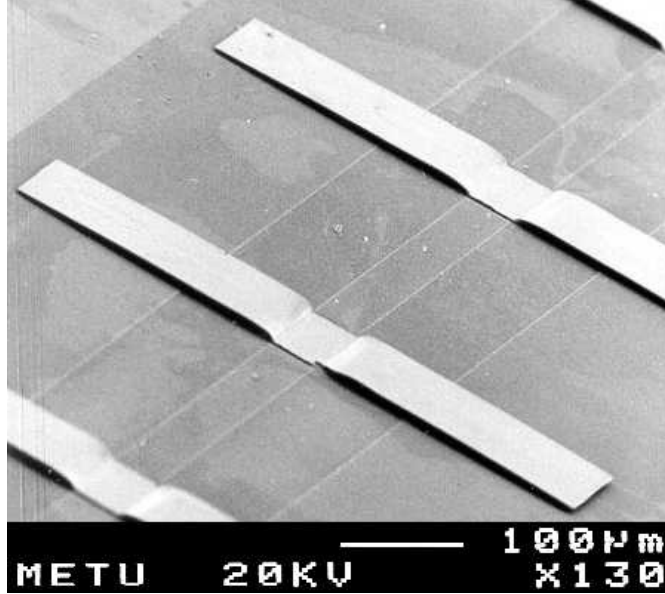
Şekil 3: 0.8 mm uzunluğundaki bir faz kaydırıcı için araya sokma fazının frekansa göre grafiği. Köprü yüksekliği azaltıldıkça araya sokma fazı artmaktadır. Yükseklik değişimi ile faz değişimi doğrusal olmayan bir orantıdadır.

ÜRETİM

Yapılar temel olarak üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman eşdüzlemli dalga kılavuzlarının gerçekleştirildiği 1. metal katmandır. İkincisi ise doğru akım yalıtımını sağlayan yalıtkan katmandır. Üçüncüsü de hareketli kısımların oluşturulmasında kullanılan yapısal katman olarak da bilinen ve bazı kısımları havada duran 2. metal katmandır. Bu üç katmanlı yapıyı oluştururken şu süreç takip edilmiştir: 1) İlk metal katmanı olarak 0.1 $\mu\text{m}/0.9 \mu\text{m}$ Cr/Au serilip şekillendirilmesi, 2) Yalıtım için 0.2 μm Si_3N_4 serilip şekillendirilmesi, 3) Yapısal katmanın havada kalan kısımlarını desteklemek amacıyla 5 μm kalınlığında fotodirenç (photoresist) serilip şekillendirilmesi, 4) yapısal metal katmanın elektrokaplama tekniğiyle büyütülüp şekillendirilmesi, 5) Yapıların havada kalması amacıyla daha önce serilen fotodirençin kaldırılması. Üretim sürecini gösteren akış Şekil 4 te verilmiştir. Ayrıca bu süreç sonucunda elde edilen yapılardan birtanesinin elektron tarama mikroskobu (SEM) kullanılarak çekilen fotoğrafı Şekil 5 te verilmiştir.



Şekil 4: Üretim sürecinin akışını gösteren grafik.



Şekil 5: Üretilmiş olan faz kaydırıcının SEM fotoğrafı. Köprülerin orta noktaları EDK'nın işaret hattına sabitlenmiştir, diğer kısımları ise hareketlidir.

SONUÇ

Bu bildiriye MEMS Teknolojisi kullanılarak üretilen RF MEMS faz kaydırıcıların çalışma prensipleri ve tasarım kriterleri anlatılmıştır. Bu kriterler gözönüne alınarak tasarlanan yapıların benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimlere göre birinci tip faz kaydırıcılarda 35° sürekli, ikinci tip yapılarda ise 30° ve 60° ayrık faz değişimleri elde etmek mümkündür. Daha sonra tasarlanan bu yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinin iyileştirilmesi devam etmektedir. Üretilen yapıların RF performansı ile ilgili bilgiler konferansta sunulacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] J. J. Yao, M. F. Chang, "A Surface Micromachined Miniature Switch for Telecommunications with Signal Frequencies from DC to 4 GHz," 8. Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators Stockholm, Sweden, Haziran 25, 1995, Sf. 384-387.
- [2] Elliott R. Brown, "RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, Sf. 1868-1880, Kasım 1998.
- [3] Kevin F. Harsh, Bingzhi Su, Wenge Zhang, Victor M. Bright, Y. C. Lee, "The Realization and Design Considerations of a Flip-Chip Integrated MEMS Tunable Capacitor," Sensors and Actuators A, vol. 80, Sf. 108-118, 2000.
- [4] N. Scott Barker, Gabriel M. Rebeiz, "Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, Sf. 1881-1890, Kasım 1998.
- [5] P. Billans, S. Eshelman, A. Malczewski, J. Ehmke ve C. Goldsmith, "X-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 9, Sf.517-519, Aralık 1999.
- [6] Hayden J.S., Malczewski A., Kleber J., Goldsmith C.L., Rebeiz, G.M., "2 and 4-bit DC-18 GHz Microstrip MEMS Distributed Phase Shifters," Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, vol. 1, Sf. 219-222, 2001.
- [7] C.L. Goldsmith, A. Malczewski, Z.J. Yao, S. Chen, J. Ehmke, D.H. Hinzl, "RF MEMS Variable Capacitors for Tunable Filters," Int. J. RF and microwave computer aided engineering, Sf. 362-374, 1999.