



دانشگاه زنجان
دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

گرایش: الکترونیک - مخابرات

عنوان:

آنتن های استفاده شده در فناوری MEMS

استاد راهنما: امیر مهدی رضایی

نگارش: تشکری محسن - فیض علی

بهار 92

تقدیم به خانواده های عزیزمان که بدون حمایت آنها طی این مسیر ممکن نبود....

پایان نامه کارشناسی



آزمایشگاه پژوهش برق

Contents

1.مقدمه	6
2.سیستم های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)	7
2.1 MEMS چیست؟	7
2.2 تعاریف و طبقه بندی ها	10
2.3 کاربردها	12
2.3.1 کاربرد های MEMS	13
2.3.2 کاربردهای جدید MEMS	20
3.روش های ساخت MEMS (یعنی سیستم های میکرو الکترو مکانیکی)	24
3.1:نقش کردن به وسیله ی عکاسی (photolithography)	25
3.2:مواد میکروسازه ها:	27
3.2.1:زیر لایه	27
3.2.2:مواد و فیلم های افزایشی (برای افزایش خواص)	29
3.3:میکروسازه های حجمی	29
3.3.1:حکاکی خیس	30
3.3.2:حکاکی خشک	31
3.4:میکروسازه ی سطح	32
3.4.1:پیوند ترکیب	34
3.5:میکروسازه ی نرخ وجه بالا:	35
3.5.1:LIGA	36
3.5.2:میکروسازی لیزر	37
3.6:طراحی کامپوتری	38
3.7:مونتاژ و یکپارچه سازی سیستم	39
3.8:بسته بندی	42
3.8.1:ماژول های مولتی تراشه	45

45.....ENCAPSULATION و PASSIVATION(تلفیق داده ها با داده های دیگر).....

45.....3.9:سرویس های کارخانه های گداز فلز.....

47.....4- مبدل انرژی MEMS.....

48.....4.1 مبدل های مکانیکی.....

48.....4.1.1 سنسورهای مکانیکی.....

52.....4.1.2 سیستم های محرک مکانیکی.....

54.....4.2 مبدل های تشعشی.....

54.....4.2.1 سنسورهای تشعشی.....

56.....4.2.2 سیستم های محرک تشعشی(نوری):.....

57.....4.3.1 سنسورهای گرمایی:.....

58.....4.3.2 سیستم های محرک گرمایی:.....

59.....4.4 مبدل های مغناطیسی.....

59.....4.4.1 سنسورهای مغناطیسی:.....

60.....4.4.2 سیستم های محرک مغناطیسی:.....

61.....4.5 مبدل های شیمیایی و زیستی:.....

61.....4.5.1 سنسورهای شیمیایی و زیستی:.....

64.....4.5.2 سیستم های محرک شیمیایی:.....

64.....4.6 قطعات میکروسیال:.....

65.....4.7 مقدمه ای بر استفاده ی MEMS در اتن ها.....

66.....5. سوئیچ های RF-MEMS و فناوری MICROMACHINING.....

66.....5.1 سوئیچ های RF-MEMS.....

69.....5.2 تکنولوژی میکروماشین.....

71.....5.3 تنظیم آنتن های استفاده شده در سوئیچ های MEMS:.....

72.....5.3.1: تنظیم کردن فرکانس آنتن های استفاده شده در MEMS:

80.....5.3.2: آنتن های تنظیم کننده ی الگوی تشعشی.....

86.....5.3.3 تنظیم پلاریزاسیون آنتن ها.....

91.....5.4 آنتن های متحرک مکانیکی.....

5.4.1 تنظیم میکروالکترومکانیکی آنتن Vee با قابلیت اسکن پرتو 92

5.4.2 قابلیت گسترش آنتن مایکرواستریپ با محرک MEMS 94

5.5 شیفت دهنده فاز MEMS در شبکه تغذیه آنتن 94

5.5.1 شیفت دهنده ی فاز تغییر خط 96

5.5.2 شیفت دهنده ی فاز MEMS (توزیع شده) 98

5.5.3 انواع دیگر شیفت دهنده فاز MEMS 100

5.6 بهبود عملکرد آنتن های میکروماشینی 100

5.6.1 آنتن های ساخته شده با میکروماشین های سیلیکونی 103

5.6.2 آنتن ساخته شده با میکروماشین های سطحی ضخیم 104

5.7 طراحی و جریان توسعه 106

5.7.1 طرح فرمولاسیون و شبیه سازی مقدماتی برق با فرض شرایط مدار باز و اتصالات کوتاه ایده آل 108

5.7.2 طراحی الکتریکی - مکانیکی سوئیچ های MEMS 108

5.7.3 طراحی بایاس 108

5.7.4 شبیه سازی موج الکتریکی : 109

5.7.5 مفهوم سیم سخت 109

5.7.6 پیاده سازی با استفاده از سوئیچ های MEMS و تأیید آزمایش 110

5.8 خلاصه ی کلی 110

6 منابع 111

۱. مقدمه

این گزارش به زمینه ای نوظهور از سیستم های میکروالکترومکانیکی یا MEMS می پردازد. MEMS

فناوری فرایند مورد استفاده برای ایجاد دستگاه های یکپارچه کوچک و یا سیستم هایی است که عناصر

الکتریکی و مکانیکی را ترکیب می کند.

انها با استفاده از تکنیک های پردازش دسته ای مدارهای مجتمع (IC) ساخته می شوند و می توانند در

مقیاس چند میکرومتر تا چند میلی متر متغیر باشند. این سیستم ها توانایی حس، کنترل و به کار انداختن

در مقیاس های کوچک و ایجاد تغییر در مقیاس بزرگ را دارند. استفاده فناوری MEMS میان رشته های

مختلف شامل طراحی، مهندسی و تولید تخصص از طیف گسترده و متنوعی از زمینه های فنی، علم مواد،

مهندسی برق، مهندسی شیمی و همچنین مهندسی سیالات، اپتیک، ابزار دقیق و بسته بندی است.

پیچیدگی MEMS در طیف گسترده ای از بازارها و کاربردها که در دستگاه های MEMS گنجانده می

شوند، نشان داده می شود.

MEMS را می توان در سیستم های مختلف سراسر خودرو، پزشکی، الکترونیک، ارتباطی و کاربردهای

دفاعی پیدا کرد. دستگاه های کنونی MEMS شامل شتاب سنج برای سنسورهای کیسه هوا، سرهای

پرینتر جوهرافشان، سرهای خواندن و نوشتن هارد دیسک کامپیوتر، سنسورهای فشارخون، سویچ های نوری

، حسگرهای زیستی و بسیاری از محصولات دیگر که همه در حجم تجاری بالا تولید و حمل می شوند.

MEMS به عنوان یکی از امیدوار کننده ترین فناوری های قرن 21 شناخته شده است و دارای پتانسیل

قوی برای ایجاد تحول در محصولات صنعتی و مصرفی توسط میکروالکترونیک های siliconbase و

تکنولوژی micromaching است.

فناوری MEMS دارای پتانسیل قوی و قابل ملاحظه ای برای تاثیر در راه و رسم زندگی ما است. اگر

نیمه هادیها به عنوان اولین عامل تحول در ابعاد میکرو دیده می شوند، MEMS دومین عامل تحول است.

در ادامه به شرح بیشتری از فناوری MEMS، کاربردها و به طور خاص استفاده ی MEMS در انتن ها می پردازیم.

۲. سیستم های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)

۲.۱. MEMS چیست؟

سیستم های میکرو الکترومکانیکی (MEMS) فناوری فرایند مورد استفاده برای ایجاد دستگاه های کوچک و یا مدارهای مجتمع است که عناصر مکانیکی و الکترونیک را ترکیب می کند. آنها با استفاده از تکنیک های پردازش دسته ای مدارهای مجتمع (IC)، ساخته شده اند و می توانند در محدوده ی چند میکرومتر تا چند میلی متر اندازه گیری شوند. این دستگاه ها (یا سیستمها) توانایی حس، کنترل و تحریک در مقیاس های کوچک، و تولید اثر در مقیاس های بزرگ را دارند.

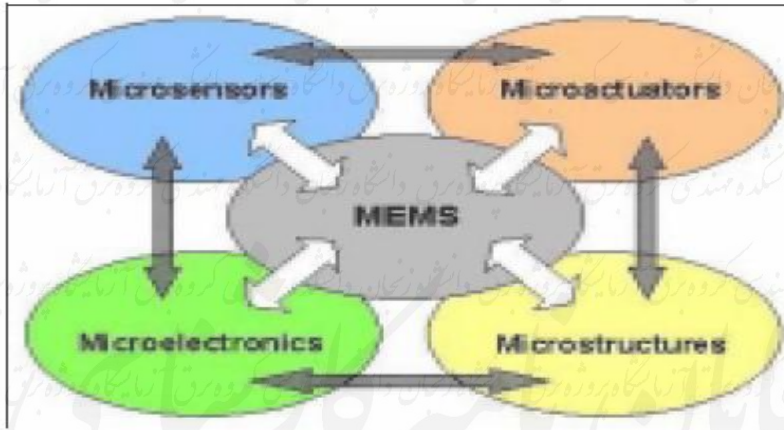
MEMS، مخفف عبارت است که از ایالات متحده سرچشمه گرفته است، و همچنین به عنوان فناوری مایکروسیستم (MST) در اروپا، و ماشین آلات میکرو در ژاپن ارجاع داده می شود. صرف نظر از

واژگان، عامل وحدت بخش دستگاه MEMS راه ساخته شدن آن است. در حالی که دستگاه های الکترونیکی با استفاده از تراشه کامپیوتر، فناوری IC ساخته شده اند، عناصر میکرومکانیکی آن توسط دست کاری پیچیده سیلیکون و بسترهای دیگر با استفاده از فرآیندهای micromachining ساخته شده اند. فرایندهایی مانند micromachining حجم و سطح، و همچنین micromachining نسبت، بعد

، بالا، (HARM)، به صورت انتخابی بخش هایی در سیلیکون را حذف می کنند و یا لایه های ساختاری اضافی را اضافه می کنند تا اجزای مکانیکی و الکترومکانیکی را شکل دهند. در حالی که مدارهای مجتمع

برای بهره برداری از خواص الکتریکی سیلیکون طراحی شده اند، MEMS از هر دو خواص مکانیکی و الکتریکی سیلیکون بهره می گیرد. در عمومی ترین شکل، MEMS شامل میکروساختارها مکانیکی،

میکرو حسگرها، میکرو تحریک کنندهها و میکروالکترونیک ها است که همه بر روی همان چیپ سیلیکونی ادغام شده اند. این به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.



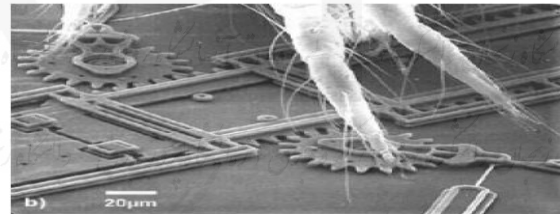
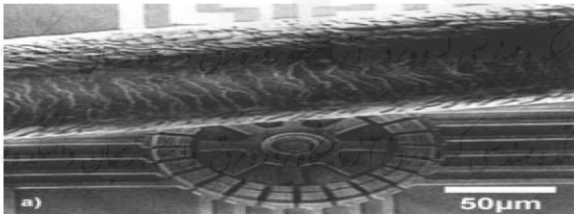
شکل 1: نمایش شماتیک اجزا MEMS

میکرو حسگرها تغییرات را در محیط سیستم توسط اندازه گیری اطلاعات و یا پدیده های مکانیکی، حرارتی، مغناطیسی، شیمیایی و یا الکترومغناطیسی شناسایی می کنند و میکرو الکترونیک این اطلاعات را پردازش می کند و به میکرو تحریک کننده ها سیگنال می فرستد تا واکنش مناسب را نشان دهند و شکلی

از تغییرات را در محیط ایجاد کنند. دستگاه های MEMS بسیار کوچک هستند و قطعات آنها معمولاً

میکروسکوپی است. اهرم ها، چرخ دنده ها، پیستون ها، و همچنین موتور و حتی موتورهای بخار توسط

MEMS ساخته شده اند. (شکل 2)



شکل 2: (a) موتور سیلیکون MEMS همراه با یک رشته از موی انسان، پاهای عنکبوت ایستاده بر چرخ دنده های میکرو موتور

با این حال، MEMS فقط در مورد کوچک سازی قطعات مکانیکی و یا فقط ساختن چیزهای از سیلیکون نیست (در واقع، واژه MEMS است که در واقع گمراه کننده است، که بسیاری از دستگاه های

میکروماشینی، در هر زمینه مکانیکی نیستند). MEMS فن آوری تولید، الگویی برای طراحی و ایجاد

دستگاه های مکانیکی پیچیده و سیستمها و همچنین مدارهای الکترونیکی مجتمع با استفاده از تکنیک های ساخت دسته ای است.

از دیدگاهی اولیه در اوایل دهه 1950، MEMS به تدریج راه خود را از آزمایشگاههای تحقیقاتی تا

محصولات روزمره باز کرد. در اواسط سال 1990، قطعات MEMS شروع به ظاهر شدن در محصولات تجاری متعدد و برنامه های کاربردی از جمله شتاب سنج مورد استفاده برای کنترل کیسه هوا در خودرو، سنسورهای فشار برای کاربردهای پزشکی، و سرهای چاپگر جوهر افشان کردند. امروز، دستگاه های

MEMS در صفحه نمایش طرح ریزی و برای میکروپوزیشنر در سیستم های ذخیره سازی داده ها یافت

می شود. با این حال، بیشترین پتانسیل برای دستگاه های MEMS در برنامه های کاربردی جدید در ارتباطات راه دور (نوری و بی سیم)، پزشکی و نواحی کنترل فرآیند است.

MEMS دارای مزیت های متمایز به عنوان فن آوری تولید است. وهله اول، ماهیت بین رشته ای فناوری

MEMS و تکنیک های میکرومچینگ آن است، و همچنین تنوع کاربردهای آن در یک طیف بی سابقه از

دستگاه ها و سودمندی آن در زمینه های نامربوط است. (برای مثال زیست شناسی و میکروالکترونیک).

در وهله دوم، MEMS با استفاده از تکنیک های ساخت دسته ای، قطعات و دستگاه ها را قادر می

سازد تا با افزایش عملکرد و قابلیت اطمینان، همراه با مزایای آشکار از کاهش حجم فیزیکی، وزن و هزینه

تولید شوند. ثالثاً، MEMS پایه ای برای تولید محصولات می باشد که نمی توانند با روش های دیگر ساخته شوند را

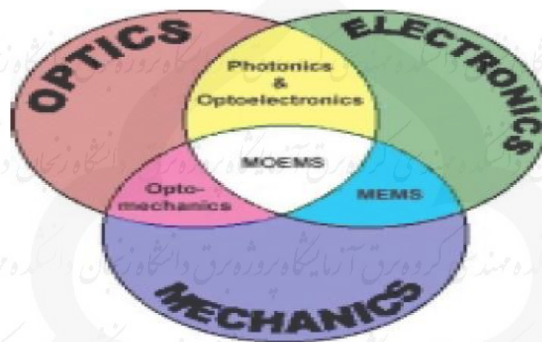
فراهم می کند.

این عوامل MEMS را به طور بالقوه یک تکنولوژی بسیار فراگیر تر از تراشه مدار مجتمع می کند. با این حال، بسیاری از چالش ها و موانع تکنولوژیک مرتبط با کوچک سازی است که باید به آنها پرداخته شود و

غلبه بر آنها قبل از اینکه پتانسیل MEMS را درک کنیم باید صورت گیرد.

۲.۲. تعاریف و طبقه بندی ها

در این بخش برخی از اصطلاحات کلیدی و طبقه بندی ها در ارتباط با MEMS را تعریف می شود. شکل 3 طبقه بندی تکنولوژی میکروسیستم (MST) را نشان می دهد. اگر چه MEMS همچنین به عنوان MST ارجاع داده می شود، MEMS فناوری فرایند مورد استفاده برای ایجاد این دستگاه ها یا سیستم های کوچک مکانیکی است، و به عنوان نتیجه، زیر مجموعه ای از MST است.



شکل 3: طبقه بندی تکنولوژی میکروسیستم

سیستم های Micro-optoelectromechanical (MOEMS) یک زیر مجموعه از MST است و همراه با MEMS زمینه های تکنولوژی تخصصی با استفاده از ترکیبات کوچک شده اپتیک، الکترونیک و مکانیک را تشکیل می دهند.

هر دو میکروسیستم استفاده از تکنیک های پردازش دسته ای میکروالکترونیک را برای طراحی و ساخت ترکیب می کنند. همپوشانی قابل توجهی بین زمینه های یکپارچه سازی فن آوری ها و برنامه های کاربردی وجود دارد، از این رو طبقه بندی دستگاه های MEMS در شرایط سنجش حوزه یا در زیر مجموعه

MST بودن بسیار دشوار است. تفاوت واقعی بین MEMS و MST در این است، که MEMS تمایل به

استفاده از فرآیندهای نیمه هادی برای ایجاد یک بخش مکانیکی دارد. در مقابل، رسوب مواد بر سیلیکون به

عنوان مثال، MEMS تلقی نمی شود اما کاربردی از MST است.

مبدل

مبدل دستگاهی است که یک نوع سیگنال یا انرژی را به شکل دیگر تبدیل می کند. اصطلاح مبدل

همچنین می تواند مورد استفاده قرار گیرد در سنسورها و محرک ها که به طور گسترده ای مورد استفاده در

MEMS است.

حسگری

سنسور دستگاهی است که اطلاعات را از محیط اطراف اندازه گیری و فراهم می کند و یک سیگنال

خروجی الکتریکی در پاسخ به پارامتر اندازه گیری شده می دهد. در طول این سالها، این اطلاعات (یا پدیده

ها) از نظر حوزه های نوع انرژی دسته بندی شده اند اما دستگاه های MEMS به طور کلی یا در چند

حوزه با هم همپوشانی دارند و یا حتی در هیچ یک از رده ها دسته بندی نمی شوند.

این حوزه های انرژی عبارتند از:

• مکانیکی: نیرو، فشار، سرعت، شتاب، موقعیت

• حرارتی: درجه حرارت، آنتروپی، گرما، جریان گرمایی

• شیمیایی: غلظت، ترکیب، سرعت واکنش

• تابشی: شدت موج الکترومغناطیسی، فاز، طول موج، قطبش، بازتابش، ضریب شکست، گسیل

• مغناطیسی: شدت میدان، چگالی شار، گشتاور مغناطیسی، نفوذپذیری

• برق: ولتاژ، جریان، شارژ، مقاومت، خازن، قطبش

۵.۷.۶ پیاده سازی با استفاده از سوئیچ های MEMS و تأیید آزمایش.

در اولین مرحله ، نمونه های اولیه Mems با کیفیت بالا ساخته می شوند و برای نتیجه گیری

مطلوب کنترل می شوند.

۵.۸ خلاصه ی کلی.

در اولین فصل بطور مختصر به معرفی پیشرفت های ایجاد شده در مدار مجتمع Mems آنتن ها

پرداختیم و همچنین آنتن های میلیمتری که با تکنولوژی میکروماشین ساخته می شوند را بررسی

کردیم. در این قسمت طرح های خوب زیادی بود. مهمترین مزیت RF-mems در طراحی آنتن ،

کاهش مصرف برق سوئیچ است و این موضوع در ساخت سیستم بی سیم با قدرتی مناسب موثر

خواهد بود که در نسل های بعدی سیستم های ارتباطی هوشمند بکار خواهد رفت. مطمئناً با گذشت

زمان استفاده از سوئیچ های Mems در آنتن ها بسیار زیاد می شود.

1. G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2003.
2. N. Kingsley, Development of miniature, multilayer, integrated, reconfigurable RF MEMS communication module on liquid crystal polymer (LCP) substrate, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, May 2007.
3. V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and K. A. Jose, *RF MEMS and Their Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2003.
4. G. Wang, RF MEMS switches with novel materials and micromachining techniques for Soc/SoP RF front ends, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, December 2006.
5. C. L. Goldsmith, Z. M. Yao, S. Eshelman, and D. Dennston, Performance of low loss RF MEMS capacitive switches, *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol. 8, No. 8, pp. 269–271, 1998.
6. G. M. Rebeiz, G.-L. Tan, and J. S. Hayden, RF MEMS phase shifters: design and applications, *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 3, No. 2, pp. 72–81, June 2002.
7. S. Liu, M. Lee, C.-W. Jung; G.-P. Li, and F. De Flaviis, A frequency-reconfigurable circularly polarized patch antenna by integrating MEMS switches, in *Proceedings of the 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2A, pp. 413–416.
8. B. A. Cetiner, Q. Xu, and L. Jofre, Frequency reconfigurable annular slot antenna, in *Proceedings of the IEEE Antenna and Propagation Symposium*, June 2007, pp. 5845–5848.
9. D. Anagnostou, G. Zheng, M. Chryssomallis, J. C. Lyke, G. E. Ponchak, J. Papapolymerou, and C. Christodoulou, Design, fabrication, and measurements of an RF-MEMS-based self-similar reconfigurable antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 54, No. 2, Part 1, pp. 422–432, February 2007.
10. S. Yang, H. K. Pan, A. E. Fathy, S. El-Ghazaly, and V. K. Nair, A novel reconfigurable mini-maze antenna for multi-service wireless universal receiver using RF MEMS, in *Digest of 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 182–185.
11. B. A. Cetiner, J. Y. Qian, H. P. Chang, M. Bachman, G. P. Li, and F. De Flaviis, Monolithic integration of RF MEMS switches with a diversity antenna on PCB substrate, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 1, Part 2, pp. 332–335, 2003.
12. B. A. Cetiner, L. Jofre, J. Y. Qian, S. Liu, G. P. Li, and F. De Flaviis, A compact broadband MEMS-integrated diversity system, *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, Vol. 56, No. 2, pp. 436–444, March 2007.
13. L. Petit, L. Dussopt, and J. M. Laheurte, MEMS-switched parasitic-antenna array for radiation pattern diversity, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 54, No. 9, pp. 2624–2631, September 2006.
14. G. H. Huff and J. T. Bernhard, Integration of packaged RF MEMS switches with radiation pattern reconfigurable square spiral microstrip antennas, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 54, No. 2, Pt. 1, pp. 464–469, February 2006.
15. R. N. Simons, D.-H. Chun, and L. P. B. Katehi, Polarization reconfigurable patch antenna using microelectromechanical systems (MEMS) actuators, in *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium of Antennas and Propagation*, Vol. 2, pp. 6–9.

16. B. A. Cetiner, E. Akay, E. Sengul, and E. Ayanoglu, A MIMO system with multifunctional reconfigurable antennas, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 5, No. 1, pp. 463–466, December 2006.
17. J. C. Chiao, Y. Fu, I. M. Chio, M. DeLisio, and L.-Y. Lin, MEMS reconfigurable Vee antenna, in *Digest of 1999 IEEE MTT Symposium*, pp. 1515–1518.
18. C.-W. Baek, S.-H. Song, J.-H. Park, S.-H. Lee, J.-M. Kim, W. Choi, C. Cheon, Y.-K. Kim, and Y.-W. Kwon, A V-band micromachined 2-D beam-steering antenna driven by magnetic force with polymer-based hinges, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 1, Pt. 2, pp. 325–331, January 2003.
19. P. Blondy, D. Bouyge, A. Crunteanu, and A. Pothier, A wide tuning range MEMS switched patch antenna, in *Digest of 2006 IEEE MTT Symposium*, pp. 152–154.
20. C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1997.
21. J. B. Hacker, R. E. Mihailovich, M. Kim, and J. F. DeNatale, A Ka-band 3-bit RF MEMS true-time-delay network, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 1, pp. 305–308, Pt. 2, January 2003.
22. N. S. Barker and G. M. Rebeiz, Optimization of distributed MEMS transmission-line phase shifters—U-band and W-band designs, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 11, Pt. 1, pp. 1957–1966, November 2000.
24. J. S. Hayden, and G. M. Rebeiz, Very low-loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal–air–metal capacitors, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 1, Pt. 2, pp. 309–314, January 2003.
25. H.-T. Kim, J.-H. Park, S. Lee, S. Kim, J.-M. Kim, Y.-K. Kim, and Y. Kwon, V-band 2-b and 4-b low-loss and low-voltage distributed MEMS digital phase shifter using metal–air–metal capacitors, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 50, No. 12, pp. 2918–2923, December 2002.
26. J.-J. Hung, L. Dussopt, and G. M. Rebeiz, Distributed 2- and 3-bit W-band MEMS phase shifters on glass substrates, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No. 2, pp. 600–606, February 2004.
27. M. Kim, J. B. Hacker, R. E. Mihailovich, and J. F. DeNatale, A DC-to-40 GHz four-bit RF MEMS true-time delay network, *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 11, No. 2, pp. 56–58, February 2001. (See also *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*.)
28. B. Pillans, S. Eshelman, A. Malczewski, J. Ehmke, and C. Goldsmith, Ka-band RF MEMS phase shifters, *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol. 9, No. 12, pp. 520–522, December 1999. (See also *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.)
29. J. W. Digby, C. E. McIntosh, G. M. Parkhurst, B. M. Towilson, S. Hadjiloucas, J. W. Bowen, J. M. Chamberlain, R. D. Pollard, R. E. Miles, D. P. Steenson, L. S. Karatzas, N. J. Cronin, and S. R. Davies, Fabrication and characterization of micromachined rectangular waveguide components for use at millimeter-wave and terahertz frequencies, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 8, pp. 1293–1302, August 2000.
30. B. A. Shenouda, L. W. Pearson, and J. E. Harriss, Etched-silicon micromachined W-band waveguides and horn antennas, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 49, No. 4, Pt. 1, pp. 724–727, April 2001.

30. V. Douvalis, Y. Hao, and C. G. Parini, A monolithic active conical horn antenna array for millimeter and submillimeter wave applications, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 54,
31. William Trimmer's Home Page contains details of over 100 websites for MEMS related journals, books as well as company, university and organization information. It is a huge resource for MEMS, MST and micromechanics (<http://www.trimmer.net>).
32. Memsleadership.com operated by Standard MEMS Corporation (William Trimmer, CTO) contains over 200 industry and academic links, as well as an excellent MEMS Glossary and an updated calendar of global MEMS events (<http://www.memsleadership.com>).
33. The MEMS Superlink operated by Cornell University offers a 'MEMS Virtual Learning Cyber Center', (<http://www.people.cornell.edu/pages/akt1/superlink.html>).
34. *Microsensors*, Muller, R.S., Howe, R.T., Senturia, S.D., Smith, R.L., and White, R.M. [Eds.], IEEE Press, New York, NY, 1991.
35. *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Paper to 1990*, Trimmer, W.S., IEEE Press, New York, NY, 1997.
35. J.-J. Hung, L. Dussopt, and G. M. Rebeiz, Distributed 2- and 3-bit W-band MEMS phase shifters on glass substrates, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No. 2, pp. 600–606, February 2004.
36. M. Kim, J. B. Hacker, R. E. Mihailovich, and J. F. DeNatale, A DC-to-40 GHz four-bit RF MEMS true-time delay network, *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 11, No. 2, pp. 56–58, February 2001. (See also *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*.)
37. B. Pillans, S. Eshelman, A. Malczewski, J. Ehmke, and C. Goldsmith, Ka-band RF MEMS phase shifters, *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol. 9, No. 12, pp. 520–522, December 1999. (See also *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.)
38. S. Barker and G. M. Rebeiz, Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 46, No. 11, Pt. 2, pp. 1881–1890, November 1998.
39. J. Zou, C. Liu, J. Schutt-Aine, J. Chen, and S.-M. Kang, Development of a wide tuning range MEMS tunable capacitor for wireless communication systems, in *Technical Digest of 2000 IEDM*, December 2000, pp. 403–406.
40. G. McFeetors and M. Okoniewski, Distributed MEMS analog phase shifter with enhanced tuning, *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 16, No. 1, pp. 34–36, January 2006.
41. B. Lakshminarayanan and T. M. Weller, Design and modeling of 4-bit slow-wave MEMS phase shifters, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 1, pp. 120–127, January 2006.
42. D. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004.
44. J.-H. Park, H.-T. Kim, W. Choi, Y. Kwon, and Y.-K. Kim, V-band reflection-type phase shifters using micromachined CPW coupler and RF switches, *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 808–814, December 2002.