

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٢٤



طراحی و شبیه سازی سوئیچ با استفاده از تکنولوژی  
میکروماشین به منظور استفاده در مدارات RF

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق

پژوهشکده میکروالکترونیک

سمیرا آقایی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

استاد راهنما: دکتر ابراهیم عباسپور ثانی

۱۳۸۹/۴/۸

شهریور ماه ۱۳۸۸

معاونت اساتید  
شهریور

۱۳۸۶۳۲



پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک خانم آقای علی احمدی به تاریخ ۳۱/۶/۸۸ شماره ۱۹۸-۲۲  
مورد پذیرش هیأت محترم داوران با رتبه عالی و نمره ۱۸۸ هم تقرر گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیأت داوران: استاد علی محمدی

۲- استاد مشاور:

۳- داور خارجی: ضیاءالدین حدیدی

۴- داور داخلی: داریوشی نعلجوهر

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی: میرزا نورانی

حق طبع و نشر مطالب این پایان نامه  
در انحصار دانشگاه ارومیه می باشد.

تقدیم به

پدر و مادر مهربان

و

خواهر و برادر عزیزم

## تقدیر و تشکر

اول سپاس بیکران خدایی را که هر توفیقی در گرو عنایت اوست. بر خود لازم می دانم که از زحمات استاد راهنمای خود جناب دکتر ابراهیم عباسپور به خاطر راهنمایی و حمایت های بی دریغشان در پیشبرد و به اتمام رساندن این پایان نامه کمال تشکر و قدردانی را به جا بیاورم. همچنین از جناب دکتر سعید افرنگ که با راهنمایی خود راهگشای اینجانب بوده اند، سپاسگذاری می نمایم. از دوستان بسیار عزیزم صدیقه علیدوست، سعیده ابرزاده، رها اشتیاقی و الهام ملکی به خاطر دوستی و کمکهایی که در طی این سه سال به من نموده اند صمیمانه سپاسگذارم. از تمام همکلاسی خود در مرکز میکروالکترونیک و همچنین دانشجویان مرکز مخابرات دانشگاه ارومیه تشکر می نمایم.

در نهایت از خانواده ام که تشویق ها و دلگرمی هایشان در تمام فراز و نشیب های زندگیم، پشتوانه ی بسیار محکمی برایم بوده اند و قطعاً تمامی موفقیت هایم را مدیون آنها هستم قدردانی می نمایم. امیدوارم که روزی پاسخگوی این همه محبت بی حد و اندازه ی آنها باشم.

## فهرست مطالب

۱	چکیده.....
۲	مقدمه - سوئیچهای الکترومغناطیسی.....
۷	فصل اول: مدل مکانیکی سوئیچهای میکروماشینی.....
۷	بخش ۱-۱: تحریک الکترواستاتیکی.....
۱۱	بخش ۲-۱: روش کاهش ولتاژ تحریک در سوئیچهای میکروماشینی.....
۱۳	بخش ۳-۱: مدل الکترومغناطیسی میکروسوئیچهای شانت.....
۱۶	بخش ۴-۱: مدل مداری سوئیچ شانت خازنی میکروماشینی.....
۱۸	بخش ۵-۱: مدل الکترومغناطیسی CLR معادل سوئیچ شانت میکروماشینی.....
۲۰	بخش ۶-۱: معادل سازی CLR میکروسوئیچ با مقادیر پارامترهای S.....
۲۳	بخش ۷-۱: تلفات.....
۲۶	بخش ۸-۱: مدل الکترومغناطیسی میکروسوئیچهای سری.....
۲۸	بخش ۹-۱: مدل مداری الکترومغناطیسی میکروسوئیچهای سری.....
۳۰	فصل دوم: تحریک سوئیچهای میکروماشینی.....
۳۳	بخش ۱-۲: تحریک الکترواستاتیکی صفحات موازی.....
۳۵	بخش ۲-۲: تحریک شانه ای الکترو استاتیکی.....
۳۸	فصل سوم: میکروسوئیچ RF با ساختار پیشنهادی جدید Vertical Comb Drive.....
۳۹	بخش ۱-۳: ساختار کلی میکروسوئیچ طراحی شده.....
۴۳	بخش ۲-۳: پروسه ساخت.....
۵۱	بخش ۳-۳: نتایج شبیه سازی.....
۵۸	نتیجه گیری.....
۵۹	مراجع.....

## فهرست جدولها و اشکال

- شکل ۱-۱. (الف) باریکه ی اهرمی (ب) باریکه ی میکروماشینی با پایه های ثابت با الکتروود تحریک..... ۸
- شکل ۱-۲ ارتفاع میکروسوئیچ بر حسب ولتاژ اعمال شده..... ۹
- شکل ۱-۳ ولتاژ تحریک بر حسب ارتفاع برای برای باریکه های با پایه های ثابت از جنس آلومینیوم و طلا..... ۱۰
- شکل ۱-۴ ولتاژ تحریک برای یک باریکه ی اهرمی از جنس نیتريد بر حسب ارتفاع..... ۱۱
- شکل ۱-۵ انواع مختلف نگهدارنده ی باریکه ی میکروماشینی با ثابت فنر کوچک..... ۱۲
- شکل ۱-۶ سوئیچ میکروماشینی دانشگاه Michigan با ثابت فنر و ولتاژ تحریک کم..... ۱۳
- شکل ۱-۷ سوئیچ شانت خازنی بر روی خط حامل CPW و در وضعیت حالت \_ بالا..... ۱۴
- شکل ۱-۸ سوئیچ شانت خازنی بر روی خط حامل CPW و در وضعیت حالت \_ پایین..... ۱۴
- شکل ۱-۹ تصویر یک نمونه سوئیچ شانت میکروماشینی و مدار الکتریکی معادل آن..... ۱۶
- شکل ۱-۱۰ ضرب بازگشت یک میکرو سوئیچ و مقادیر خازن معادل آن..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱ نمودار ایزولاسیون میکروسوئیچ در وضعیت حالت \_ پایین..... ۲۲
- شکل ۱-۱۲ شبیه سازی تلفات برای مقادیر مختلف  $R_p$  و  $\alpha$ ..... ۲۵
- شکل ۱-۱۳ سوئیچ سری میکروماشینی سری با کنتاکت DC..... ۲۷
- شکل ۱-۱۴ مدار معادل برای سوئیچ سری در مکان وضعیت حالت \_ پایین..... ۲۹
- شکل ۱-۲ سوئیچ میکروماشینی با الکتروودهای تحریک صفحات موازی بر روی هادی خط انتقال..... ۳۱
- شکل ۲-۲ صفحات خازنی به عنوان محرک الکترواستاتیکی..... ۳۱
- شکل ۳-۲ میکرو سوئیچ طراحی شده با ساختار سیستم تحریک شانه ای..... ۳۲
- شکل ۴-۲ مقطع عرضی سیستم تحریک شانه ای و جهت نیروهای الکترواستاتیکی..... ۳۲
- شکل ۵-۲ شماتیک محرک الکترواستاتیکی شانه ای..... ۳۵
- شکل ۱-۳ دیاگرام مقطع عرضی سوئیچ شانه ای عمودی..... ۴۰
- شکل ۲-۳ شماتیک کلی سوئیچ RF طراحی شده..... ۴۱
- شکل ۳-۳ مراحل ساخت سوئیچ میکروماشینی جدید..... ۴۹
- شکل ۴-۳ نتایج شبیه سازی جا به جایی برای ساختار شانه ای و میکروسوئیچ با صفحات موازی..... ۵۲
- شکل ۵-۳ تغییرات خازنی برای میکروسوئیچ شانه ای عمودی..... ۵۳
- شکل ۶-۳ تغییرات خازنی برای میکروسوئیچ با صفحات موازی..... ۵۳
- شکل ۷-۳ نتایج شبیه سازی مغناطیسی (الف) ایزولاسیون (ب) تلفات انتقال..... ۵۵
- جدول ۳-۱ خازن استاتیکی شبیه سازی شده برای یک سوئیچ میکروماشینی..... ۱۹

## چکیده

در این پایان نامه سعی شده است که ابتدا شرح کاملی از ساختار انواع سوئیچهای میکروماشینی و همچنین نحوه ی مدلسازی این میکروسوئیچها با عناصر فشرده الکتریکی بیان گردد. سپس طراحی کامل یک سوئیچ میکروماشینی فرکانس بالا با استفاده از سیستم تحریک شانه ای عمودی ارائه گردد. چگونگی ایجاد نیروی الکترواستاتیکی در ساختارهای تحریک شانه ای در فصل جداگانه ای شرح داده شده است. ویژگی ساختار جدید ارائه شده، ولتاژ تحریک کم و مشخصه جابه جایی نسبتاً خطی و تلفات سیگنال انتقالی بسیار کم آن در فرکانسهای بالا می باشد.

به منظور بررسی مزایای طرح پیشنهادی، پارامترهای اصلی آن با میکروسوئیچ با صفحات موازی مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها نشان می دهد که اندازه ی ولتاژ تحریک  $13\%$  و میزان مشخصه ی خطی نمودار جابه جایی بر حسب ولتاژ  $40\%$  نسبت به ساختار میکروسوئیچ با صفحات موازی بهبود یافته است. امروزه با گسترش مخابرات بی سیم استفاده از قطعات الکترونیکی بسیار کوچک و با توان مصرفی کم بسیار ضروری می باشد. همچنین این قطعات به منظور استفاده در فرکانسهای بالای مغناطیسی باید تلفات انتقالی و ولتاژ مصرفی کمی داشته باشند. برخلاف تلفات انتقالی مغناطیسی زیاد ساختارهای متداول در فرکانسهای بالا، تلفات انتقالی ساختار ارائه شده بسیار کم می باشد به طوری در فرکانس  $50\text{ GHz}$  میزان تلفات فقط  $0.2\text{ dB}$  می باشد.

به دلیل قابلیت ساخته شدن این میکروسوئیچ بر روی زیر لایه ی سیلیکانی، قابلیت کارایی این ساختار بسیار خوب می باشد. کلیه ی شبیه سازی های مکانیکی این میکروسوئیچ توسط نرم افزار *intellisuit* و شبیه سازی های مغناطیسی آن توسط نرم افزار *HFSS* انجام شده است. از مشخصات مغناطیسی مهم یک میکروسوئیچ، دارا بودن ایزولاسیون بالا و ضریب بازگشت بسیار کم می باشد. میکروسوئیچ پیشنهادی به گونه ای طراحی شده که این دو مشخصه ی مغناطیسی مهم را دارا می باشد. همچنین به واسطه ی کم بودن ضریب بازگشت سیگنال در این میکروسوئیچ، تلفات انتقالی سیگنال بسیار کم می باشد.



## سوئیچ های الکترومغناطیسی

یکی از اجزای اصلی مدارات الکترونیکی مدرن، امپدانس متغیر می باشد. ساده ترین امپدانس متغیر، یک سوئیچ مکانیکی است که امپدانس آن به وسیله ی یک کنتاکت از اتصال کوتاه به مدار باز تغییر می کند که این عمل مسیر عبور جریان را قطع می نماید. تحقیقات بسیار وسیع و روبه رشدی که در زمینه ی میکروالکترونیک انجام می گردد بر پایه ی ترکیب دو حوزه ی مکانیکی و الکتریکی می باشد. به این جهت به عنوان سیستمهای میکروالکترومکانیکی<sup>۱</sup> نام گرفته است. سوئیچ های الکتریکی به عنوان وسیله ای که می توانند مدار مسیر جریان را باز و بسته کنند، در مدارهای الکترونیکی نقش بسیار مهمی دارند.

اوایل بسیاری از سوئیچ ها قطعات کنتاکت مکانیکی حجمی<sup>۲</sup> بودند. با توسعه ی قطعات حالت جامد<sup>۳</sup> مدرن، ترانزیستورها و دیودها به گروه سوئیچ ها ملحق شدند. هر چند تمام این قطعات معایب خودشان را دارند نظیر توان مصرفی زیاد، متخصصین بر آن شدند که به دنبال راه حلی برای رفع این نقاط ضعف باشند. محققین همواره در پی تحقیق امکان استفاده از قطعات میکروماشینی به عنوان سوئیچ های الکتریکی هستند. سوئیچ های میکروماشینی سوئیچ های کوچک شده مکانیکی هستند که توسط پروسه های متداول ساخت مدارهای مجتمع مدرن ساخته می شوند [۱].

در سالهای اخیر سوئیچهای میکروماشینی به دلیل مزایای بسیار زیاد، توجه بسیاری را به خود جلب کرده اند. سوئیچ های الکتریکی، بر حسب خصوصیات کاربریشان، یک سری نیازمندیهایی دارند. برای مثال در الکترونیک قدرت یک سوئیچ باید قادر به انتقال توان بالایی باشد. در مورد سوئیچهایی که برای کاربردهای فرکانسهای رادیویی<sup>۴</sup> استفاده می شوند، محدوده ی فرکانس کاری سوئیچ بسیار مهم می باشد. سوئیچ های فرکانس رادیویی بر اساس میزان تلفات و ایزولاسیون توصیف می شوند.

در مقایسه با سوئیچهای معمولی، سوئیچهای میکروماشینی نوظهور قادر به پوشش طیف وسیعی از توان و فرکانس می باشند. نیروی لازم برای حرکت کنتاکتهای مکانیکی می تواند از نیروی الکترواستاتیکی یا مغناطیسی و یا پیزوالکتریک به دست آید. تا سال ۲۰۰۱ تنها سوئیچهای میکروماشینی ساخته شده از نوع الکترواستاتیکی بودند که قابلیت کارایی بسیار بالایی داشتند. (با سیکل کارایی بیشتر از میلیون بار یا در برخی موارد بلیون بار)

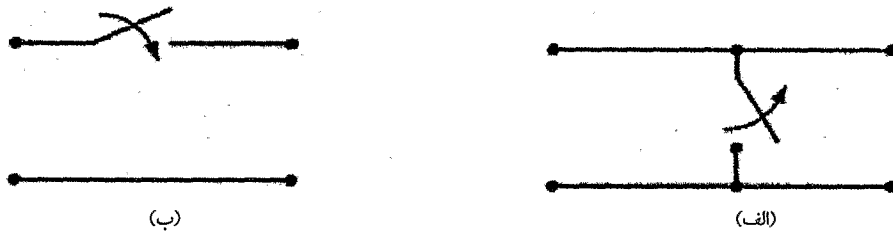
<sup>۱</sup> Micro electro mechanical systems (MEMS)

<sup>۲</sup> bulky

<sup>۳</sup> Solid-state devices

<sup>۴</sup> Radio frequency (RF)

[۲]. سوئیچهای میکروماشینی فرکانس بالا به دو صورت سری و شانت وجود دارند. شکل زیر این دو نوع میکروسوئیچ را نشان می دهد.



شکل ۱-۱ ساختار سوئیچهای میکروماشینی (الف) شانت (ب) سری [۳].

یک میکروسوئیچ سری یا مانع عبور جریان در طول هادی سیگنال می شوند و یا با ایجاد کنتاکت مستقیم فلز با فلز<sup>۱</sup> میکروسوئیچ با هادی خط انتقال باعث تداوم سیگنال هادی جریان می گردد. میکروسوئیچ شانت هم یا سیگنال هادی جریان را به هادی زمین کوپل می کند و باعث ایجاد اتصال کوتاه می شود و یا بدون هیچ تاثیری، به سیگنال هادی جریان اجازه عبور می دهد. میکروسوئیچ های سری بیشتر برای کاربردهای فرکانس پایین از (۰-۳۰GHz) و میکروسوئیچ های شانت برای کاربردهای فرکانس بالا از (۱۵-۱۰۰GHz) مناسب هستند.

برخی از مهمترین پارامترهای سوئیچ های فرکانس بالا در این قسمت بحث می شود. این پارامترها برای مقایسه کارایی انواع مختلف سوئیچهای فرکانس رادیویی و همچنین برای انتخاب سوئیچهای فرکانس بالا برای یک کاربرد خاص مورد استفاده قرار می گیرند [۳].

## پارامترهای مهم سوئیچهای فرکانس رادیویی

ایزولاسیون<sup>۲</sup>: ایزولاسیون به میزان سیگنال ظاهر شده در ترمینال خروجی زمانی که سوئیچ خاموش است، اتلاق می شود. که با dB اندازه گیری می شود و به این صورت تعریف می شود.  $10 \times \log_{10}(P_{OFF} / P_{ON})$  که  $P_{ON}$  و  $P_{OFF}$  به ترتیب به توان منتقل شده در حالت خاموش و روشن گفته می شود. در حالت ایده ال ما به ایزولاسیون  $-\infty$  نیاز داریم.

تلفات انتقال<sup>۳</sup>: تلفات موجود در مسیر انتقال سیگنال، زمانی که سوئیچ روشن است، می باشد که این پارامتر هم به صورت dB بیان می شود و به صورت  $10 \times \log_{10}(P_{OUT} / P_{IN})$  تعریف می شود که

<sup>۱</sup> Metal to metal  
<sup>۲</sup> Isolation  
<sup>۳</sup> Insertion loss

$P_{IN}$  و  $P_{OUT}$  توان خروجی و توان ورودی در طول مسیر سوئیچ می باشد. در حالت ایده آل ما به تلفات  $0\text{ dB}$  نیاز داریم.

زمان گذر: زمان لازم برای رسیدن دامنه ی ولتاژ خروجی از  $10\%$  به  $90\%$  مقدار حداکثر آن، برای زمان روشن و یا از  $90\%$  به  $10\%$  برای زمان خاموش شدن آن می باشد.

توان انتقالی فرکانس رادیویی: به مقیاسی برای اندازه گیری مقدار یا به عبارت دیگر کیفیت انتقال سیگنال فرکانس رادیویی توسط سوئیچ اطلاق می شود. میزان انتقال توان در مورد سوئیچهای حالت جامد تابعی از فرکانس می باشد.

نقطه ی رهگیری: اگر نسبت توان خروجی به توان ورودی یک سوئیچ (بهره ی سوئیچ) تابعی از توان ورودی باشد، گفته می شود که سوئیچ همانند یک قطعه ی غیر خطی عمل می کند. زمانی که سیگنالهای فرکانسهای مختلف به طور همزمان در طول یک سوئیچ عبور می کنند، در خروجی علاوه بر فرکانسهای ورودی، فرکانسهایی که حاصل جمع و تفریق هارمونیکهای فرکانسهای ورودی است دیده می شود که به آن اعوجاج گفته می شود.

ولتاژ تحریک: ولتاژی است که باعث تغییر وضعیت سوئیچ از حالت خاموش به حالت روشن می گردد.

شاخص شایستگی: معیاری که از آن برای ارزیابی عملکرد سوئیچهای فرکانس رادیویی، استفاده می گردد شاخص شایستگی می باشد. که از روی نقطه ای که نسبت امپدانس حالت روشن به امپدانس حالت خاموش به

واحد کاهش پیدا می کند، تعریف می شود. این فرکانس (فرکانس قطع  $f_c$ ) به صورت  $f_c = \frac{1}{2\pi R_{on} C_{off}}$

تعریف می شود [۷].

## مزایای سوئیچهای میکروماشینی نسبت به **pin diode** ها و سوئیچهای **FET**

الف) توان مصرفی بسیار کم: ولتاژ تحریک این سوئیچها  $V_{10-120}$  می باشد ولی چون جریان مصرفی شان بسیار کم می باشد لذا توان مصرفی شان بسیار کم خواهد بود. که این خصوصیت در سیستمهای ماهواره ای و یا در آنتنهای بزرگ که به هزاران المان احتیاج دارند بسیار سودمند می باشد.

ب) ایزولاسیون بسیار بالا: چون بسیاری از سوئیچهای سری میکروماشینی با فاصله ی هوایی ساخته می شوند. لذا میزان خازن حالت خاموش سوئیچ خیلی کوچک می باشد. در حدود  $(2-8 \text{ fF})$  که منجر به ایزولاسیون بسیار بالایی از فرکانس  $(0.1-30 \text{ GHz})$  می گردد.

ج) میزان تلفات بسیار کم: در سوئیچهای سری و شانت به دلیل اینکه از لایه های فلزی به جای لایه های نیمه هادی استفاده می شود تا فرکانس  $40 \text{ GHz}$  میزان تلفات  $0.1 \text{ dB}$  می باشد.

د) فرکانس قطع بسیار بالا: مقدار فرکانس قطع برای سوئیچهای میکروماشینی در حدود  $30-80 \text{ THz}$  می باشد در حالی که برای سوئیچهای **FET** در حدود  $0.2-0.5 \text{ THz}$  می باشد.

ر) ضریب مدولاسیون: چون سوئیچهای میکروماشینی اکثراً قطعات خطی می باشد لذا ضرایب مدولاسیون بسیار کمی دارند.

ز) قیمت کم و قابلیت مجتمع سازی آسان: چون سوئیچهای میکروماشینی فرکانس رادیویی توسط تکنیکهای ریز ماشین کاری سطحی<sup>۱</sup> ساخته می شوند. به همین دلیل می توانند بر روی زیر لایه ی کوارتز، پیرکس، LTCC و یا سیلیکان با مقاومت بسیار بالا (از لحاظ مکانیکی) ساخته شوند.

با وجود تمامی این مزایا سوئیچهای میکروماشینی فرکانس رادیویی مشکلات خودشان را دارند. هم اکنون بزرگترین مشکل آنها این است که به صورت کاملاً تجاری در دسترس نیستند. این معایب عبارتند از:

الف) سرعت نسبتاً پایین: سرعت سوئیچینگ بیشتر سوئیچهای میکروماشینی در حدود  $3$  الی  $40 \text{ ms}$  می باشد. که این سرعت برای بسیاری از کاربردها به جز کاربردهای مخابراتی و سیستمهای رادار قابل قبول می باشد.

<sup>۱</sup> Surface micromachining techniques

ب) قابلیت کارایی: قابلیت کارایی سوئیچهای میکروماشینی در حدود  $10^{-4}$  -  $10^{-1}$  بیلیون سیکل کاری می باشد که برای بسیاری از کاربردها قابل قبول می باشد ولی نیاز شدیدی به سوئیچهایی با سیکل کاری  $10^2$  -  $10^3$  بیلیون بار می باشد.

ج) بسته بندی: سوئیچهای میکروماشینی باید در محیطی با اتمسفر بی اثر (مثل نیتروژن- آرگن.....) و در رطوبت کم بسته بندی شوند که این هم مستلزم درزگیری بی منفذ<sup>۱</sup> می باشد. به همین دلیل هم اکنون هزینه بسته بندی بسیار بالا می باشد و برای سوئیچهای میکروماشینی غیر محقق می باشد. تکنیکهای بسته بندی خود به تنهایی ممکن است بر روی کارایی سوئیچهای میکروماشینی تاثیر بگذارد.

چ) میزان توان انتقالی: بیشتر سوئیچهای میکروماشینی نمی توانند توان بیشتر از  $10^{-2}$  -  $10^{-1}$  mW همراه با حفظ کارایی بالا را منتقل کنند. به صورت ساده تر امروزه سوئیچهای میکروماشینی  $10^{-1}$  -  $10^{-2}$  W وجود ندارند. تغییرات اساسی باید در مکانیزم تحریک و ساخت انجام شود تا سوئیچهایی با توان بالا اصلاح شود. برای اینکه سوئیچهای میکروماشینی از لحاظ تجاری قابل استفاده باشند در بسیاری از جنبه ها باید از pin diode ها و سوئیچهای FET برتر باشند [۴].

---

<sup>۱</sup> Hermetic seals

# فصل اول

## مدل مکانیکی سوئیچ های میکروماشینی

این بخش جزئیات طراحی مکانیکی سوئیچهای میکروماشینی تحت نیروی الکترواستاتیکی را بررسی می کند.

### بخش ۱-۱

#### تحریک الکترواستاتیکی

زمانی که ولتاژی بین باریکه ی اهرمی<sup>۱</sup> یا باریکه ی با پایه های ثابت<sup>۲</sup> و الکتروود تحریک پایین آورنده<sup>۳</sup> اعمال می شود نیروی الکترواستاتیکی روی باریکه القا می شود شکل ۱-۱. این نیرو که بین صفحات خازنی تحت تاثیر ولتاژ اعمالی ایجاد می شود نیروی الکترواستاتیکی نامیده می شود. برای اینکه مقدار این نیرو را تقریب بزنیم باریکه بر روی الکتروود تحریک با یک خازن با صفحات موازی مدل می شود. گرچه اندازه ی خازن واقعی به دلیل میدان حاشیه ای<sup>۴</sup> در حدود ۲۰-۴۰٪ بزرگتر است ولی این مدل فهم درستی از چگونگی کار نیروی الکترواستاتیکی فراهم می کند. اگر پهنای باریکه  $W$  باشد و پهنای الکتروود پایین آورنده  $W$  باشد  $(A=Ww)$ ، اندازه ی خازن صفحات موازی به صورت بیان می گردد:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{g} = \frac{\epsilon_0 Ww}{g} \quad (1-1)$$

که  $g$  فاصله ی باریکه با الکتروود تحریک می باشد. نیروی الکترواستاتیکی که بر روی باریکه اعمال می شود با در نظر گرفتن نیروی متقابل شده به یک خازن مستقل از زمان به صورت زیر به دست می آید [۵].

<sup>۱</sup> Cantilever beam

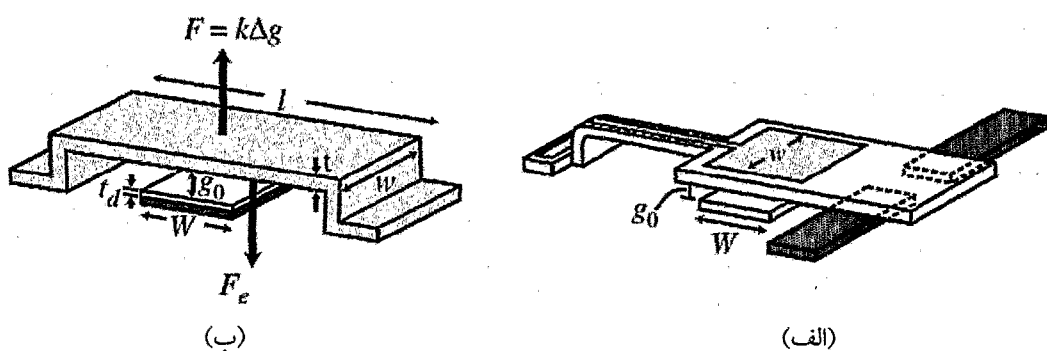
<sup>۲</sup> Fixed\_Fixed beam

<sup>۳</sup> Pull down

<sup>۴</sup> Fringing field

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{dg} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon \cdot W w V^2}{g^3} \quad (2-1)$$

که  $V$  ولتاژ اعمالی بین باریکه و الکتروود می باشد. توجه کنید که نیرو مستقل از پلاریته ولتاژ می باشد. در معادله ی (۲-۱) اثر لایه ی دی الکتریک بین باریکه ی میکروماشینی و الکتروود در نظر گرفته نشده است.



شکل ۱-۱. (الف) باریکه ی اهرمی (ب) باریکه ی میکروماشینی با پایه های ثابت با الکتروود تحریک [۳].

نیروی الکترواستاتیکی به صورت کاملاً توزیع شده در طول بخشی از باریکه که بر روی الکتروود قرار گرفته تقریب زده می شود. با تساوی نیروی الکترواستاتیکی با نیروی مکانیکی ذخیره شده که ناشی از سختی فنر می باشد رابطه ی زیر حاصل می شود [۳]:

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon \cdot W w V^2}{g} = k(g_0 - g) \quad (3-1)$$

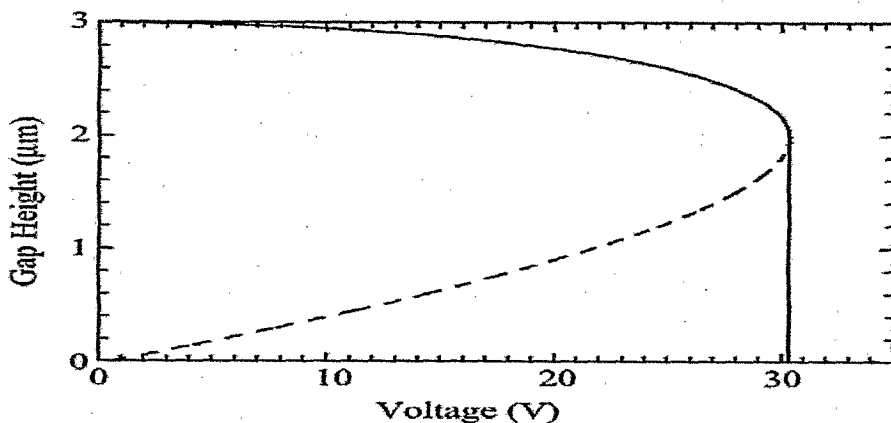
که در آن  $g_0$  اندازه ی فاصله ی باریکه میکروماشینی با الکتروود تحریک در ولتاژ بایاس صفر و  $k$  ثابت فنر معادل میکروسویچ می باشد. با محاسبه ی این معادله بر حسب ولتاژ رابطه ی زیر حاصل می شود:

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon \cdot W w} g_0^3 (g_0 - g)} \quad (4-1)$$

با رسم نمودار ارتفاع بر حسب ولتاژ، برای هر ولتاژ اعمالی دو مقدار برای ارتفاع به دست می آید شکل ۲-۱. دلیل این امر ناپایدار شدن میکروسویچ در نقطه ی  $(\frac{2}{3} g_0)$  می باشد که آن هم به دلیل فیدبک

مثبت در ولتاژ تحریک الکترواستاتیکی می باشد. این پدیده با در نظر گرفتن نیروی الکترواستاتیکی به فرم میدان الکتریکی وارد شده به باریکه ی میکروماشینی کاملاً مفهوم می شود [۶].

$$F_e = \frac{QE}{\gamma} \quad (5-1)$$



شکل ۱-۲ ارتفاع میکروسویچ بر حسب ولتاژ اعمال شده با،  $g = 2 \mu m$ ،  $W = 100 \mu m$  و  $k = 10 N/m$ . ولتاژ تحریک ۳۰ V می باشد. خط نقطه چین بخش ناپایداری میکروسویچ را نشان می دهد [۳].

$Q$  مقدار بار روی باریکه و  $E = V/g$  مقدار میدان الکتریکی در اثر ولتاژ اعمالی می باشد. زمانی که ولتاژ DC افزایش می یابد میزان نیرو به دلیل افزایش بار افزایش می یابد. همزمان نیروی افزایشی مقدار ارتفاع میله را کاهش می دهد که به نوبه ی خود اندازه ی خازن و بنابراین اندازه ی بار و میدان الکتریکی را افزایش می دهد. در نقطه ی  $(2/3 g)$  میزان افزایش نیروی الکترواستاتیکی بزرگتر از میزان افزایش نیروی ذخیره شده در میکروسویچ می گردد که منجر به (۱) ناپایداری باریکه در این نقطه (۲) سقوط<sup>۱</sup> باریکه در جهت پایین می شود. توجه کنید که معادله ی بالا در مورد هر دو باریکه ی اهرمی و باریکه ی با پایه های ثابت صادق است. با مشتق گیری از رابطه ی (۴-۱) نسبت به ارتفاع و با تساوی آن با صفر ارتفاع ناپایداری در  $2/3$  ارتفاع در ولتاژ بایاس صفر به دست می آید. با جایگزین کردن این ارتفاع در معادله ی (۴-۱) ولتاژ پایین آورندگی (تحریک) به دست می آید [۲]:

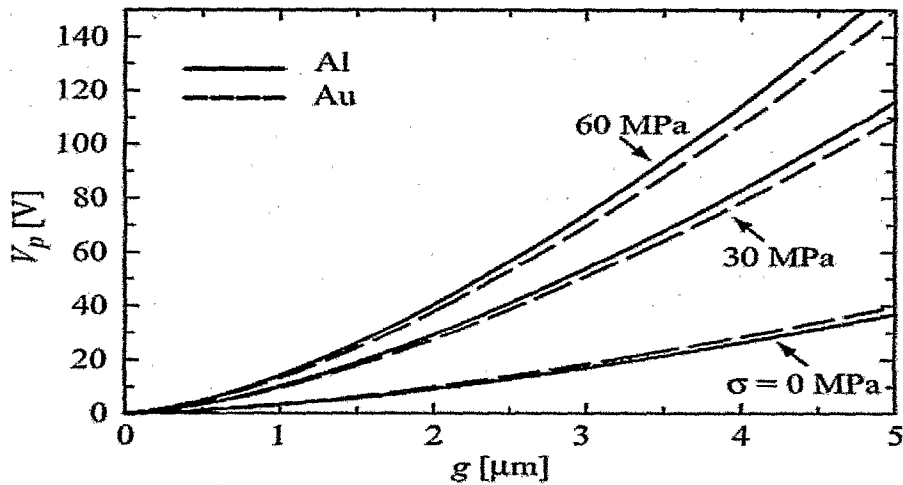
$$V_p = V(2/3 g) = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 W}} g^2 \quad (6-1)$$

<sup>۱</sup> collapse



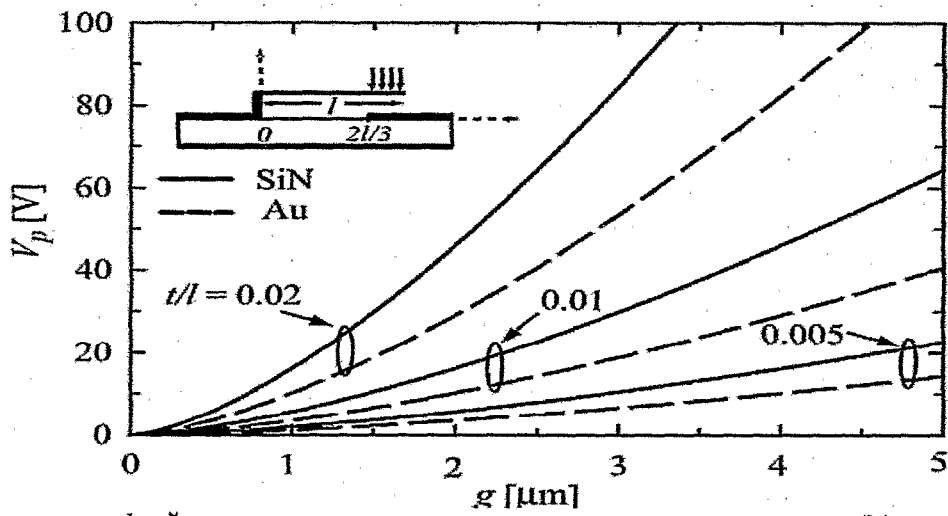
باید ذکر شود که گرچه معادله ی (۶-۱) وابستگی این معادله را به پهنای باریکه نشان می دهد ولی ولتاژ تحریک مستقل از پهنای باریکه می باشد. چون مقدار ثابت فنر به صورت کاملاً خطی با  $w$  تغییر می کند. شکل ۳-۱ اندازه ی ولتاژ تحریک را برای میکروسوئیچ با جنس طلا برای استرس پسماند<sup>۱</sup> ۰ و ۳۰ و ۶۰ MPa نشان می دهد که توسط معادله ی (۶-۱) محاسبه شده است. همین طور به دلیل مشابه بودن ثابت فنر آلومینیوم با طلا ولتاژ تحریک برای آلومینیوم نیز محاسبه شده است. شکل ۳-۱ و ۴-۱ ولتاژ تحریک بر حسب ارتفاع را برای میکروسوئیچ با پایه های ثابت و باریکه ی اهرمی نشان می دهد.

مشاهده می شود که در میکروسوئیچ با  $g \geq 3 \mu\text{m}$  و  $\sigma \geq 30 \text{ MPa}$  است اندازه ی ولتاژ تحریک بسیار بزرگ می باشد. میکروسوئیچهای اهرمی به ازای نسبت  $t/l$  مشابه ثابت فنر نسبتاً کوچکتر و در نتیجه ولتاژ تحریک کمتری دارند.



شکل ۳-۱ نمودار ولتاژ تحریک بر حسب ارتفاع برای باریکه های با پایه های ثابت از جنس آلومینیوم و طلا و با مشخصات  $W = 100 \mu\text{m}$ ،  $l = 300 \mu\text{m}$  و  $t = 1 \mu\text{m}$  و  $(t/l = 0.0033)$  [۳].

<sup>1</sup> Residual stress



شکل ۴-۱ ولتاژ تحریک برای یک باریکه ی اهرمی از جنس نیتريد بر حسب ارتفاع برای مشخصات  $l = 200 \mu\text{m}$  و مقادير مختلف  $t/l$  [۳].

## بخش ۲-۱

### روشهای کاهش ولتاژ تحریک در سوئیچهای میکروماشینی

(۱) ایجاد حفره در باریکه میکروماشینی

(۲) ساخت باریکه هایی با ثابت فنر کم

#### تاثیر حفره ها در باریکه:

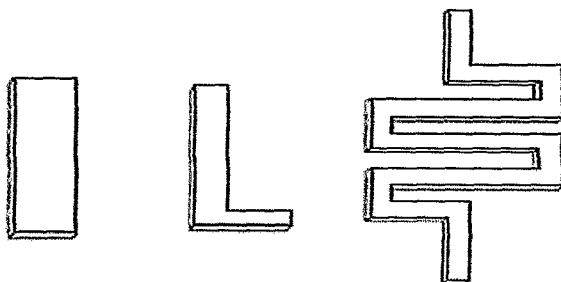
در بسیاری از میکروسوئیچها و ورکتورها، حفره های به قطر کوچک  $3-8 \mu\text{m}$  بر روی باریکه ایجاد می کنند تا اثر فشار میرایی را کاهش دهد و در نتیجه سرعت سوئیچینگ سوئیچ میکروماشینی را افزایش دهد. مساحت حفره ها می تواند تا حدود ۶۰٪ مساحت کل ساختار میکروماشینی افزایش یابد. حفره ها تا حدودی استرس داخلی را کاهش می دهد و در نتیجه مدول یانگ<sup>۱</sup> ساختار نیز کاهش می یابد.

<sup>۱</sup> Young modulus

اگر قطر حفره ها  $3-4\text{ g}$  باشد تاثیر حفره ها روی خازن وضعیت **up-state** بسیار ناچیز می باشد. دلیل آن وجود میدان های حاشیه ای می باشد که مساحت حفره ها را پر می کند. این امر توسط شبیه سازهای الکترواستاتیکی ۲D هم تایید شده است [۷].

## باریکه هایی با ثابت فتر کوچک

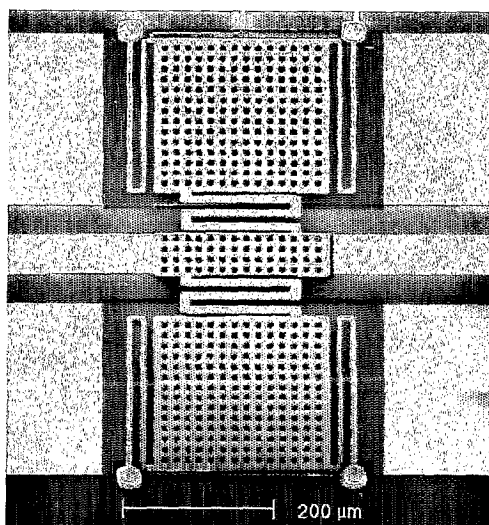
نگهدارنده باریکه های<sup>۱</sup> متفاوتی وجود دارد که می توانند ثابت فتر موثر سوئیچهای میکروماشینی را کاهش دهند. بعضی از انواع مختلف نگهدارنده ها در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. به دلیل شکل خاص این نوع نگهدارنده ها به آنها **meander support beam** گفته می شود.



شکل ۵-۱ انواع مختلف نگهدارنده های باریکه ی میکروماشینی با ثابت فتر کوچک [۸].

شکل ۶-۱ یکی از میکروسوئیچهای ساخته شده با نگهدارنده های با ثابت فتر کم را نشان می دهد. این میکرو سوئیچ توسط دانشگاه Michigan طراحی و ساخته شده است.

<sup>۱</sup> Support beams



شکل ۶-۱ سوئیچ میکروماشینی دانشگاه Michigan با ثابت فنر و ولتاژ تحریک کم [۹]

### بخش ۳-۱

## مدل الکترومغناطیسی میکروسوئیچهای شانت

در طراحی مدارهای موجهای RF تا موجهای میلیمتری<sup>۱</sup> دو ساختار اصلی برای میکروسوئیچها استفاده شده است. میکروسوئیچهای شانت و سری. میکروسوئیچ شانت با خط انتقال و زمین خط انتقال به صورت عمود قرار گرفته و بسته به ولتاژ بایاس اعمالی یا سیگنال فرکانس رادیویی را به زمین کوپل می کند (حالت\_ پایین)<sup>۲</sup> شکل ۱-۸ و یا بدون هیچ تاثیری در مسیر عبور جریان به سیگنال اجازه ی عبور می دهد (حالت\_ بالا)<sup>۳</sup> شکل ۱-۷. بنابراین میکروسوئیچ شانت ایده ال زمانی که ولتاژ بایاسی به آن اعمال نشده (وضعیت حالت\_ بالا) به تلفات انتقال صفر منجر می شود و زمانی که ولتاژ بایاس اعمال می شود (وضعیت حالت\_ پایین) به ایزولاسیون بی نهایت منجر می شود.

همان طور در بخش مقدمه توضیح داده شده، تلفات انتقالی زمانی تعیین می شود که سیگنال هادی فرکانس رادیویی جریان دارد و سوئیچ شانت در وضعیت حالت\_بالا شکل ۱-۷ قرار دارد. این مشخصه معیاری برای اندازه گیری کیفیت سیگنال انتقالی از ترمینال ورودی به خروجی می باشد و توسط پارامتر مغناطیسی  $S_{۲۱}$

<sup>۱</sup> RF to millimeter wave

<sup>۲</sup> Down\_state

<sup>۳</sup> Up\_state