سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی
سه شنبه و چهارشنبه ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲

No. 15-F-AAA-0000

خازن‌های متغیر میکروالکترومکانیکی برای کاربرد در صنعت برق

علی همتی یادکوری
شرکت مدیریت تولید برق خلیج فارس
شرکت توانیر
بندرعباس، ایران
ali.hemati1391@yahoo.com

چکیده

در سال های اخیر، ظهور سیستم ها و ادواتی که با بهره‌گیری از تکنولوژی سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی و برای کار در فرکانس‌های نسبتاً بالا ساخته می‌شوند، تحولی شگرف در علم مهندسی و شاخه مخابرات پدید آورده است. نیاز به ضرایب کیفیت بالا و مشخصه‌های تنظیم‌پذیری و محدوده تغییرات بالا در ادوات غیرفعالی نظیر سلف ها، خازن ها و... که در سیستم‌های مخابراتی کاربردی وسیع دارند، سبب روی آوردن این رشته به فناوری سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی به سبب توانایی بالای آن در رفع این موانع و معضلات می‌باشد. در این تحقیق به محدودیت استفاده از فناوری استاندارد سیلیکونی در استفاده از خازن‌های متغیر خواهیم پرداخت و ساختار کلی خازن‌های میکرو الکترومکانیکی و ***طراحی و فرایند ساخت خازن و همچنین راه‌هایی را برای افزایش محدوده تغییرات خازن متغیر*** *سیستم‌های میکروالکترومکانیکی* ***بیان خواهیم کرد.***

واژه‌های کلیدی — ورکتور، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، خازن متغیر، MEMS

۱. مقدمه

در سال ۲۰۰۱ ، کتابی با نام جهان آینده: «استراتژی امنیت ملی آمریکا در قرن۲۱» توسط کمیسیون امنیت ملی آمریکا تدوین و منتشر شد که پیش بینی علوم و فناوری‌های نوظهور در ۲۵ سال آینده توسط مولفان این کتاب شامل، فناوری **اطلاعات، فناوری زیستی، *میکروالکترومکانیک (ممز)*، فناوری نانو بودند.** اگر المان سیستم‌های میکروالکترومکانیکی را عنصری تعریف کنیم که اولاً ماشین‌کاری شده باشد و ثانیاً جزئی از آن به صورت مکانیکی حرکت کند، در اینصورت تنها سه المان محقق شدهMEMS، که تا کنون گزارش شده‌اند، عبارت از سوئیچ، خازن و آنتن می‌باشند. اولین مقالات مرتبط به کاربرد

MEMS در فرکانس بالا در حدود ربع قرن پیش منتشر شد. با وجود چنین قدمتی فناوری RF MEMS هنوز در دوران طفولیت خود به سر می‌برد زیرا اولین سری از مدارهای مورد علاقه در این حیطه تنها ظرف ده سال گذشته مطرح شده‌اند[۱]. خازن المان الکتریکی است که می‌تواند انرژی الکتریکی را توسط میدان الکترواستاتیکی (بار الکتریکی) در خود ذخیره کند. هرگاه دو هادی در مقابل هم قرار گرفته و در بین آنها عایقی قرار داده شود، تشکیل خازن می‌دهند. معمولا صفحات هادی خازن از جنس آلومینیوم ، روی و نقره با سطح نسبتا زیاد بوده و در بین آنها عایقی (دی الکتریک) از جنس هوا، کاغذ، میکا، پلاستیک، سرامیک، اکسید آلومینیوم و اکسید تانتالیوم استفاده می شود. از خازن‌ها برای صاف کردن سطح تغییرات ولتاژ مستقیم استفاده می‌شود و همچنین در مدارات بعنوان فیلتر هم استفاده می‌شود، زیرا خازن‌ها به راحتی سیگنال‌های غیر مستقیم **AC** را عبور می‌دهند ولی مانع عبور سیگنالهای مستقیم **DC** می‌شوند . در مدارهای دیجیتال از خازن‌ها به عنوان عنصر ذخیره کننده انرژی استفاده می‌کنند که در یک لحظه شارژ و در لحظه دیگر دشارژ می‌شود ولی در مدارات آنالوگ از خازن جهت ایزوله کردن (جداساختن) دو منبع متناوب و مستقیم استفاده می‌شود. خازن در برابر ولتاژ متناوب مثل اتصال کوتاه عمل می‌کند و اجازه ورود یا خروج می‌دهد ولی در مقابل ولتاژ مستقیم همانند سد عمل می‌کند و اجازه ورود و یا خارج شدن ولتاژ مستقیم از مدار را به قسمت تحت ایزوله خود نمی‌دهد. خازن ها به اشکال گوناگون ساخته می‌شوند که پر استفاده‌ترین آنها در صنایع برق و الکترونیک خازن‌های مسطح هستند. به صفحات خازن ، جوشن های خازن نیز می‌گویند که معمولا از آلومینیوم ، نقره ، قلع و روی ساخته می‌شوند.

.

۲. ویژگیهای‌خازن‌های متغیر میکروالکترومکانیکی

بسیاری از کاربردهای پهن باند (باندگسترده) با طراحی‌های خاص و ویژه وجود دارند که به خازن به عنوان کنترل‌کننده پارامترهای مهم و اساسی الکترونیکی نیاز مبرم دارند. این کابردها شامل تقویت کننده های با نویزپایین (LNAS)، ژنراتورهای یا مولدهای امواج با فرکانس‌های متفاوت و نیز کنترل‌کننده‌های فرکانس می‌باشند. به دلیل وجود مشکلات و مسائلی که در ساخت خازن‌های متغیر با ضریب کیفیت بالا بر روی تراشه موجود می‌باشد، به طراحی عناصر و خازن‌هایی در بیرون از تراشه در بسیاری از مدارها هستیم. در مقایسه با ورکتورهای حالت جامد، خازن های ساخته شده با فناوری MEMS میزان تلفات پایین تر و نیز قابلیت تنظیم و محدوده تغییرات وسیع تری دارند. نیاز به ضرایب کیفیت بالا و مشخصه های تنظیم پذیری و محدوده تغییرات بالا در ادوات غیرفعالی نظیر سلف ها، خازن ها و...که درسیستم های مخابراتی کاربردی وسیع دارند، سبب روی آوردن این رشته به تکنولوژیMEMS به سبب توانایی بالای آن در رفع این موانع و معضلات می‌باشد. سیستم‌های

میکروالکترومکانیکی(MEMS) قابلیت حرکت دادن و جابجایی صفحات و تیرها را با ولتاژهای بسیار پایین را دارد و نیز از این تکنولوژی برای مجتمع سازی سیستم‌هایی در فرکانس‌های رادیویی و بالا به منظور تنظیم و سوییچینگ استفاده می‌شود[2]. به عبارت بهتر هدف از به کارگیری این تکنولوژی در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، تحقق عملکرد و کارایی به مراتب بسیار بهتر و عالی‌تر از ادوات و قطعات مورد استفاده فعلی می‌باشد. خازن‌های متغیر ساخته شده با استفاده از تکنولوژی MEMS این قابلیت را دارند که در بسیاری از کاربردها از قبیل نوسان سازهای کنترل شده با ولتاژ، فیلترهای قابل‌تنظیم و شیفت‌دهنده‌های فاز، جایگزین دیودهای ورکتور گردند. خازن‌های متغیر با استفاده از تکنولوژی MEMS با دو صفحه (یک صفحه متحرک ویک صفحه ثابت) ساخته شده‌اند. ورکتورها یا قطعات وریکاپ به خازن‌های متغیری گفته می شود که ظرفیتشان با اعمال ولتاژ قابل کنترل است. ورکتور در مدارات مایکروویو کاربردهای زیادی دارند که از مهمترین آنها می توان ایسلاتورهای کنترل شده با ولتاژ و فیلترهای فعال اشاره کرد. ورکتورها را می‌توان به صورت قطعات جدا یا مدارات مجتمع ایجاد کرد. ورکتورهایی که در بازار به صورت جداگانه وجود دارد در واقع شامل یک پیوند PN در حالت بایاس معکوس است که با تغییر این ولتاژ معکوس عرض ناحیه تهی در پیوند تغییر و به تبعه آن ظرفیت خازن تغییر می کند. این ورکتورها دارای کیفیت خوبی هستند ولی ضریب کیفیت (پارامتری است که بیانگر میزان تلفات در مدار مایکروویو است) پایینی دارند[3]. در بسیاری از سیستم‌های بیسیم مدرن و امروزی نیاز مبرم و شدیدی به کیفیت بالا، پایداری، نویز فاز پایین به همراه محدوده تغییرات و گستره تنظیمات وسیع فرکانسی برای اسیلاتورهای کنترل شده با ولتاژ(VCO) مشاهده می شود. محدوده تغییرات این اسیلاتورها می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا باند فرکانسی مورد نظر ما را به طور کامل پوشش دهد. در بسیاری از نوسان‌سازهای کنترل‌شده با ولتاژ (VCOها)، وجود خازن‌های الکترونیکی متغیر به عنوان عناصری کلیدی برای تحقق اهداف ما ضروری می باشند. عناصری از قبیل انتخاب کننده‌های باند فرکانسی، کانال‌های مخابراتی و ادواتی که به منظور تنظیم نوسان‌سازهای کنترل شونده با ولتاژ به کار می‌رود، در بیرون از تراشه‌ها ساخته شده و به کار می‌روند که دلیل امر، این مطلب می‌باشد که ساخت سلفها و خازن‌های متغیر با ضریب کیفیت بالا با استفاده از تکنولوژی استاندارد سیلیکونی محقق نمی‌گردد. ضریب کیفیت ورکتورهای متداول و مرسوم که با استفاده از سیلیکون یا گالیم آرسناید یا پیوندهای شاتکی برای کاربردهای تنظیم جریان که در ساخت ادواتی با نویز فاز پایین مورد نیاز می‌باشد، بسیار اندک و ناکافی میباشد.

۳. تکنیکهای اصلی در ساخت ورکتورهای MEMS

۳.۱. استفاده از صفحات موازی (عمودی) و تغییرات خازن با استفاده از تغییرات شکاف هوایی

۳.۲. استفاده از روش بین انگشتی (افقی) و تغییرات خازن با استفاده از تغییرات شکاف هوایی

۳.۳. استفاده از بانک خازنهای ثابت و بکارگیری از سوییچ‌های MEMS برای انتخاب خازن‌های مناسب

۳.۱. استفاده از صفحات موازی (عمودی) و تغییرات خازن با استفاده از تغییرات شکاف هوایی

بسیاری از خازن های متغیر خطی را با استفاده از این روش‌ها محقق می‌سازند. تحریک الکترواستاتیکی و نیز بهره‌گیری از هوا یا خلا به عنوان دی‌الکتریک بین صفحات خازن سبب ایجاد ادواتی با توان مصرفی پایین و ضرایب کیفیت بالا می‌شوند. خازن‌های متغیر بسیاری با استفاده ازتکنولوژیMEMS ساخته شده‌اند (با دو صفحه موازی که یکی از آنها ثابت و دیگری متحرک می‌باشد). در میان خازن‌های متغیر بسیاری که در سال‌های اخیر ساخته شده‌اند خازن‌هایی با صفحات موازی که در آنها از تحریک الکترواستاتیکی بهره گرفته می‌شود، بسیار متداول و مرسوم می‌باشند. هدف تغییر دادن مقدار ظرفیت خازن است به طوری که با تغییر ولتاژ اعمالی به صفحه بالایی فاصله بین دو صفحه کاهش می‌یابد در ولتاژ معینی به نام ولتاژ متوقف‌کنندگی سیستم مربوطه دچار ناپایداری می‌گردد که این امر در مکانی به وقوع می‌پیوندد که صفحه متحرک خازن مسافتی در حدود یک سوم فاصله اولیه بین دو صفحه ثابت و متحرک را پیموده باشد. هنگامی که ولتاژ به مقداری بالاتر از ولتاژ متوقف کنندگی برسد نیروی الکترواستاتیکی حاصل سبب افتادن یا فرو ریختگی صفحه متحرک برروی صفحه ثابت می‌گردد و در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم خازن اتصال کوتاه شده است[4]. روش الکترواستاتیکی به دلیل سرعت بالا، امکان ساخت و تحقق راحتتر در کنار المان‌های کوچک، قابلیت اطمینان زیاد خصوصا در مقابل تغییرات محیطی و دمایی، مصرف توان بسیار کم(در حد صفر)، تکیه بر انرژی ذخیره شده برای حفظ حالت دلخواه المان، مقیاس گذاری مطلوب و ساخت ساده‌تر و همساز با تکنولوژی CMOS به عنوان رایجترین روش تحقق تحریک مدار مطرح می گردد.در این خازن با تغییر صفحه میانی عملاً مقدار ظرفیت خازن بالا و پایین را کنترل می کنیم[5].

۳.۲. استفاده از روش بین انگشتی (افقی) و تغییرات خازن با استفاده از تغییرات شکاف‌هوایی

درسال‌های اخیر، به منظور بالا بردن محدوده تغییرات در خازن‌های متغیر، خازن‌هایی با دو صفحه متحرک و نیز با صفحات به شکل شانه ساخته شده و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. برای افزایش میزان خازنی و قرار گرفتن در محدوده پیکوفاراد از ساختار میان انگشتی استفاده می گردد و حرکت شانه‌ها می‌تواند در جهت افقی یا عمودی باشد. خازن شانه‌ای پرکاربردترین خازن در تکنولوژیMEMS است. این خازن‌ها علاوه بر دارا بودن گستره تغییرات ظرفیت بالا ، دارای ضریب کیفیت بالایی نیز می‌باشند[6]. خازن‌های بین انگشتی می‌توان به خازن‌های تقریباً بزرگ

(۴-۱۰ پیکو فاراد) دست یافت چون هزاران انگشت یا لبه را می‌توان به صورت موازی به یکدیگر متصل کرد. دارای دو نوع خازن می باشد ،که از دو طرف ثابت و از یک طرف توسط صفحه متحرکی که به لحاظ الکتریکی زمین شده است، متصل شده است. یک قسمت ،خازنهای مربوط به ولتاژ تحریک و خازنهای دیگر مربوط به قسمت فرکانس بالا می باشد. بطوری که با اعمال ولتاژ تحریک صفحه متحرک جابه‌جا شده و خازن قسمت RF با رنج وسیعی تغییر می‌کند. مزیت اصلی این ورکتورها انعطاف‌پذیری زیاد در هنگام طراحی است به طوری که با انتخاب انگشتها برای خازن تحریک و برای خازن RF می‌توان به محدوده بی‌شماری از خازن‌ها دست یافت. خازن‌های متغیر شانه‌ای دارای تعدادی نقیصه می‌باشند که از جمله آنها می توان به ولتاژ کنترل بالا، ناسازگاری با تکنولوژی ساخت" مدارهای مجتمع"، قابلیت اطمینان پایین و نیز پیچیدگی‌هایی در زمینه ساخت آن اشاره نمود.

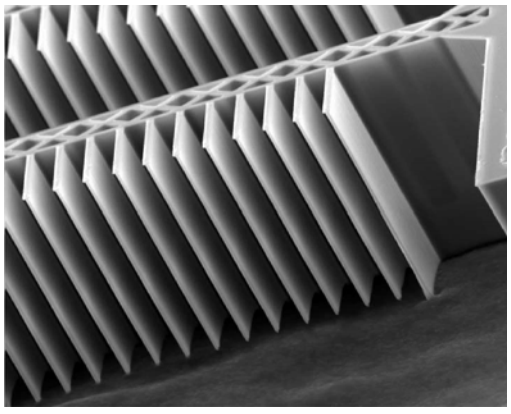
۳.۳. استفاده از بانک خازنهای ثابت

در این روش از یک بانک خازن‌های ثابت و سوییچ‌های سری با آن استفاده می شود. در شکل (۳-۲)خازن‌های سوییچ شده به دو گونه سری و موازی با خط انتقال نشان داده شده است. به دلیل تلفات زیاد در سوییچ‌های فلزی معمولا این سوییچ‌ها را از نوع خازنی انتخاب می‌کنند، تا ضریب کیفیت ورکتور زیاد شود. یکی از معایب این ورکتورها قابلیت اطمینان کم آنها در مقایسه با ورکتورهای آنالوگ MEMS است. همچنین ورکتورهای آنالوگ بر خلاف ورکتورهای دیجیتال نیاز به بسته‌بندی ندارند. ورکتورهای آنالوگ با صفحات موازی دارای ضریب کیفیت بسیار بالایی می باشند، اما دارای نسبت خازنی محدودی می‌باشند. خازن‌های بین انگشتی و خازن‌های سوییچ شده دارای عملکرد بهتری مخصوصا محدوده تغییرات خازن بیشتر و ضریب کیفیت ۵۰-۷۰ در فرکانسهای مایکروویو است.

۴. انواع خازن متغیر میکروالکترومکانیکی

۴.۱. خازن‌های شانه‌ای

در این قسمت به معرفی یک نمونه از خازن‌های میکروالکترومکانیکی که به عنوان خازن‌های شانه‌ای (شکل (۴-۱) شناخته می‌شوند، می‌پردازیم. برای تغییر ظرفیت خازن مقدار مساحت مشترک دو صفحه را تغییر می دهند.



شکل (۴-۱) تصویر خازن شانه ای با استفاده از میکروسکوپSEM

این نوع خازن‌ها علاوه بر دارا بودن گستره تغییرات ظرفیت بالا، دارای ضریب کیفیت بالایی نیز می‌باشند. به طوری که

برای نمونه ساخته شده فوق میزان ضریب کیفیت برای فرکانس ۲ گیگا هرتز بالای ۳۶ می‌باشد که این مشخصه‌ها و ویژگی‌ها، خازن‌های مربوطه را برای کاربردهای فرکانس بالا مناسب می‌گرداند.

۴.۲. خازن‌های با لبه جفت شده

همانطور که می‌دانیم یکی از عوامل محدود کننده گستره تغییرات، خاصیت غیرخطی نیروی الکترواستاتیکی می‌باشد. در اینجا از عملگر مکانیکی استفاده شده است تا دیگر پدیده متوقف‌کنندگی رخ ندهد و به این ترتیب محدوده تغییرات را زیاد نمایند. از طرف دیگر می‌دانیم برای ایجاد نیروی الکترواستاتیکی نیاز به ولتاژ بالایی داریم که این در مدارات الکترونیکی معقول به نظر نمی رسد بنابراین با استفاده از عملگر مکانیکی ولتاژ کاری را بسیار پایین آوردند، به طوری‌که بتوان از آن در مدارات مجتمع استفاده نمود.

۵. نتیجه گیری

هدف از به کارگیری تکنولوژی MEMS، ساخت سنسورها وعملگرها درمقیاس بسیارکوچک و با هزینه ای بسیار پایین تر از تکنولوژی‌های متداول می‌باشد. استفاده از این تکنولوژی سبب گردید تا بسیاری از قطعات متداول از قبیل خازن‌ها وسلف‌ها، به تدریج با ادوات معادل خود که با استفاده از تکنولوژی MEMS ساخته می‌شوند جایگزین گردند. ساخت خازن‌ها و سلف‌ها ازاساسی‌ترین ادوات به کار رفته در تمامی این سیستم‌ها می‌باشند، که در مقایسه با تکنولوژی‌های دیگرعبارتند از: ابعاد بسیارکوچک،ضرایب کیفیت بالا، هزینه ای به مراتب پایین‌تر، سادگی ساخت، جریان نشتی کم، قابلیت استفاده در ولتاژهای نسبتاً بالا.

منابع *REFERENCES*

[1]T. Bernhard, “Reconfigurable Antennas”,Morgan & Claypool Publisher, pp. 5, 2007.

[2] Jun Zou, Chang Liu, Jos´e E. Schutt-Ain,"Development of a Wide-Tuning-Range Two-Parallel-Plate Tunable Capacitor for Integrated Wireless Communicat ion Systems,"Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801, 2001 John Wiley & Sons, Inc.

[3] Jinghong Chen,et al"Design and Modeling of a Micromachined High-Q Tunable Capacitor With Large Tuning Range and a Vertical Planar Spiral Inductor," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2003.

[4] F. Barrière, et al “AN INVERTED-GAP ANALOG TUNING RF-MEMS WITH 250 MILLIWATTS POWER HANDLING CAPABILITY,” *P Paris, FRANCE, 29 January - 2 February 2012*.

[5]Dong-Ming Fang, et al,"Surface Micromachined RF MEMS Variable Capacitor, "Microelectronics Journal 38 (2007) 855–859.

[6] Vijay K.Varadan,K.J.Vinoy And K.A.Jose , "RF MEMS And Their Applications," John Wiley and Sons,pp 217-228, 2003.