

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

کارگاه آنلاین  
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

ICMEMS2014-2276

## طراحی سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی با دی‌الکتریک اکسید آلومینیوم

مرضیه قلی<sup>۱</sup>، توحید زرگرارشادی<sup>۲</sup>، رحیم فائز<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات قزوین، maz.gholi@gmail.com<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، zargar@qiau.ac.ir<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، faez@sharif.edu

## چکیده

حرارتی [۷]. با توجه به مصرف توان نزدیک به صفر و خطی بودن، تحریک الکترواستاتیکی به طور گسترده استفاده می‌شود، در تحریک الکترواستاتیکی، بین الکتروود ثابت و غشای متحرک نیروی الکترواستاتیکی تولید می‌کند. از معایب آن، سرعت سوئیچینگ کند، ولتاژ تحریک بالا و سوئیچینگ داغ در توان بالا در کاربردهای فرکانس بالا است [۸].

در این مقاله سوئیچی با دی‌الکتریک اکسید آلومینیوم طراحی می‌شود. با تغییر بازوها، ولتاژ پایین آورنده را کاهش می‌دهیم. اهمیت ماده دی‌الکتریک در سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی با بررسی در ظرفیت و جریان عبوری آن حاصل می‌شود. که در نیتريد سيليكن بررسی شد [۹]. اکسید آلومینیوم به عنوان ماده دی‌الکتریک، ظرفیت خازن در حالت تحریک را افزایش می‌دهد، افزایش در ظرفیت این خازن باعث زیاد شدن ایزولاسیون سوئیچ می‌شود و نسبت ظرفیت در سوئیچ را به نسبت بالا می‌برد و در نتیجه قابلیت آن را در فرکانس‌های رادیویی بهتر می‌کند.

## طراحی سوئیچ

شکل ۱ سوئیچ طراحی شده را نشان می‌دهد. زیرلایه سیلیکونی به طول ۳۲۰ میکرومتر، عرض ۱۸۰ میکرومتر و ارتفاع ۳۰ میکرومتر است. روی زیر لایه، لایه‌ای از اکسید سیلیکون به ارتفاع ۱ میکرومتر قرار دارد. لایه‌ای از ماده طلا روی اکسید با ضخامت ۱ میکرومتر قرار می‌گیرد که در واقع مسیر عبور سیگنال با فرکانس رادیویی<sup>۷</sup> است. بعد از آن دی‌الکتریک مورد نظر که ماده اکسید آلومینیوم است روی الکتروود پایینی قرار می‌گیرد، ضخامت دی‌الکتریک را ۰/۵ میکرومتر در نظر می‌گیریم، در انتها غشایی از جنس طلا و با ضخامت ۱ میکرومتر در حالی که از دو طرف ثابت است با فاصله ۳ میکرومتر روی دی‌الکتریک قرار می‌گیرد. این غشا دارای حفره‌هایی به ابعاد ۵×۵ میکرومتر است وجود حفره در غشای سوئیچ، روی ضریب فنر موثر است و باعث می‌شود نیروی لازم برای کشش بازو به سمت پایین کمتر شود و جرم غشا را هم کاهش می‌دهند که این امر به نوبه خود فرکانس رزونانس مکانیکی بالاتری را ایجاد می‌کند. در حالت عدم تحریک سوئیچ، وجود حفره در خازن عدم تحریک ناچیز می‌باشد. علت این امر در برگیری ناحیه حفره‌ها توسط میدان‌های

در این مقاله سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی<sup>۱</sup> در فرکانس‌های رادیویی، با دی‌الکتریک از ماده اکسید آلومینیوم<sup>۲</sup> طراحی می‌شود. با توجه به ویژگی‌های الکتریکی اکسید آلومینیوم، این ماده به عنوان دی‌الکتریک در سوئیچ‌ها بسیار مناسب است. ثابت دی‌الکتریک اکسید آلومینیوم ۹/۴ بوده که در نتیجه ظرفیت خازنی در حالت تحریک سوئیچ را زیاد می‌کند و نسبت ظرفیت سوئیچ را بالا می‌برد. با کم کردن ثابت فنر ولتاژ پایین‌آورنده<sup>۳</sup> در سوئیچ کاهش می‌یابد و به مقدار ۶/۵ ولت می‌رسد.

این سوئیچ با نرم افزار Intellisuite finit element طراحی می‌شود. نسبت خازنی این سوئیچ با دی‌الکتریک اکسید آلومینیوم، ۲۱۰ بدست می‌آید که در مقایسه با سوئیچ‌هایی که از دی‌الکتریک نیتريد سيليكن استفاده می‌کنند، عدد بالایی است.

## واژه‌های کلیدی

دی‌الکتریک، سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی، ولتاژ پایین‌آورنده، نسبت خازنی.

## مقدمه

سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی فرکانس رادیویی، ویژگی‌هایی چون، ایزولاسیون بالا، تلفات هدایتی خیلی کم، قابلیت کار در باندهای فرکانسی وسیع و قدرت خطی سازی بالا دارند که به خوبی جای سوئیچ‌های حالت جامد ( سوئیچ های پین دیود و سوئیچ های اثر میدانی) قرار می‌گیرند [۱].

به طور معمول سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی با استفاده از فرآیندهای ریز ماشینکاری سطحی ساخته می‌شوند و غشای<sup>۴</sup> فلز نازک و به حالت معلق تحت عنوان "پل"<sup>۵</sup>، (باریکه ثابت ثابت، سگدست<sup>۶</sup> و یا چرخش باریکه) دارند. حرکت مکانیکی غشا در بالای الکتروود انتقال الکترونی را اجازه می‌دهد یا جلوگیری می‌کند [۱]. سوئیچ را می‌توان با روش‌های مختلف، از جمله تحریک الکترواستاتیکی [۲-۴]، الکترومغناطیسی فعال [۵]، پیزوالکتریک [۶] و

MEMS<sup>۱</sup>  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>۲</sup>  
Pull-in<sup>۳</sup>  
membrane<sup>۴</sup>  
bridge<sup>۵</sup>  
cantilever<sup>۶</sup>

CPW<sup>۷</sup>

$$K_m = \frac{Ew\left(\frac{t}{L_c}\right)^3}{1 + \frac{L_s}{L_c} \left[ \left(\frac{L_s}{L_c}\right)^2 + 12 \frac{1+\nu}{1 + \left(\frac{w}{t}\right)^2} \right]} \quad (2)$$

و برای فنر بدون پیچ، ثابت فنر از رابطه ۴ بدست می‌آید [۱۰].

$$K_{n-m} = \frac{32EWH^3}{L^3} \quad (3)$$

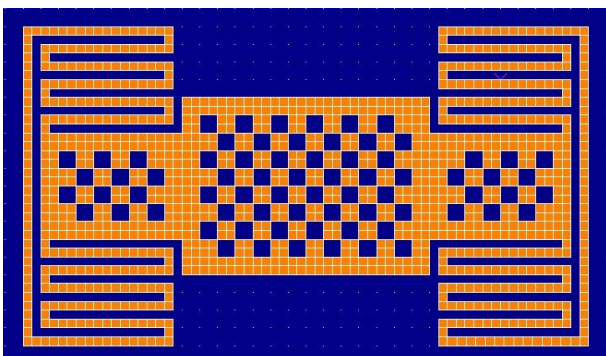
ثابت فنر موثر برای سوئیچی با دو مارپیچ سری با فنر بدون پیچ از رابطه ۴ حاصل می‌شود.

$$K_{eff} = \frac{K_m K_{n-m}}{K_m + 2K_{n-m}} \quad (4)$$

ثابت فنر در N ساختار سری از رابطه ۵ بدست می‌آید [۱۲].

$$K = \frac{K_{eff}}{N} \quad (5)$$

شکل ۳ غشای سوئیچ با بازوهای مارپیچی را نشان می‌دهد. ثابت فنر باتوجه به جنس غشا، ۰/۶۵ نیوتن بر متر بدست می‌آید.



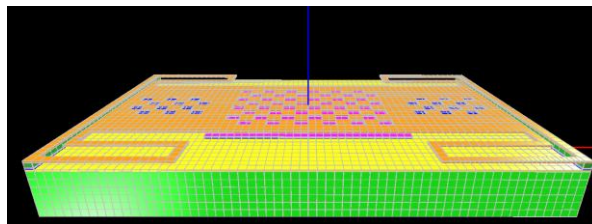
شکل ۳: غشای سوئیچ با بازوهای مارپیچی

لازم به ذکر است، هرچند افزایش بیشتر مارپیچ ولتاژ تحریک را کاهش می‌دهد، اما فضای مورد نیاز برای ساخت سوئیچ افزایش می‌یابد.

### نسبت خازنی

وقتی ولتاژی به سوئیچ اعمال نمی‌شود، غشا در حالت عدم تحریک است و خازن در حالت عدم تحریک شامل ظرفیت ناشی از فاصله هوایی  $g_0$  بین دی الکتریک و غشا است و ظرفیت ناشی از لایه دی الکتریک است. در مجموع ظرفیت در حالت عدم تحریک از رابطه ۶ بدست می‌آید.

لبه‌ای می‌باشد. در حالت تحریک، حفره‌ها خازن تحریک را تحت تاثیر قرار داده و نسبت خازنی را کاهش می‌دهند.



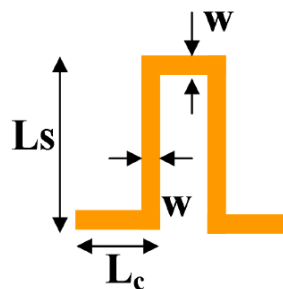
شکل ۱: سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی

سوئیچ ارائه شده توسط نیروی الکترواستاتیکی تحریک می‌شود. هنگامی که ولتاژ به الکترودها وارد می‌شود غشا به سمت پایین متمایل می‌شود و با دی الکتریک زیرش تماس می‌یابد و سیگنال زمین می‌شود در این حالت سوئیچ روشن است. طبق (۱) ولتاژ پایین آورنده در  $\frac{2}{3}$  فاصله هوایی اتفاق می‌افتد [۱].

$$V_p = \sqrt{\frac{8Kg_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (1)$$

در حالت تحریک، وقتی غشا به سمت پایین منحرف می‌شود وجود بازوها باعث سرعت افزایش انعطاف غشا می‌شوند.

به منظور کاهش ولتاژ مورد نیاز برای عمل نمودن سوئیچ مربوطه می‌توان از روش‌هایی چون کاهش فاصله هوایی، افزایش سطح غشا و کاهش ثابت سختی مؤثر<sup>۸</sup> استفاده نمود. برای یک ماده مشخص، ثابت فنر مربوط به غشا را می‌توان با استفاده از بازوهای مارپیچی که برای ساختارهای پل هوایی<sup>۹</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش داد. برای بدست آوردن ثابت فنر کوچک در این سوئیچ، استفاده از بازوهای که به‌طور سری کنار هم قرار گرفته‌اند پیشنهاد می‌شود. شکل ۲ به‌طور ساده ابعاد یک بازوی سوئیچ را نشان می‌دهد.



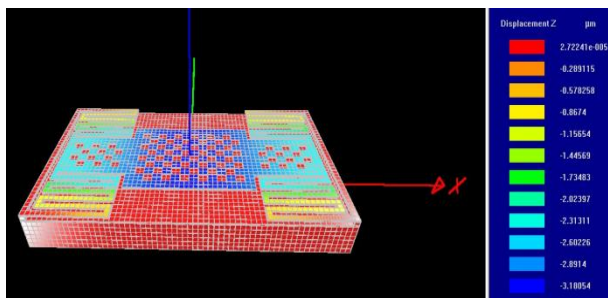
شکل ۲: ابعاد بازوی مارپیچی [۱۰]

ثابت فنر سوئیچ مورد نظر با توجه به روابط ۵-۲ بدست می‌آید. ثابت موثر فنر برای بازوی مارپیچی از رابطه ۲ حاصل می‌شود [۱۱].

<sup>۸</sup> Effective Constant  
<sup>۹</sup> Air-Bridge

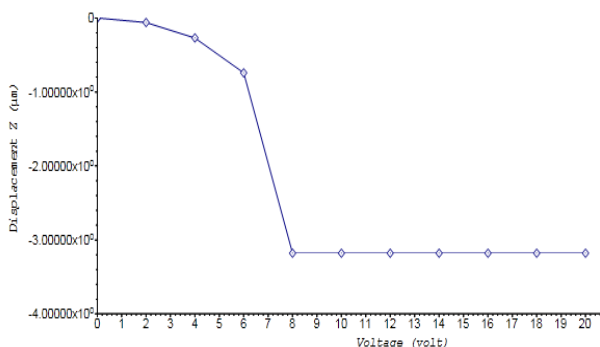
نتایج

شکل ۴ سوئیچ طراحی شده در نرم افزار Intellisuite finit element را نشان می‌دهد.



شکل ۴: سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی در حالت تحریک

شکل ۵ نمودار تغییرات فاصله غشا به ولتاژ را نشان می‌دهد، ولتاژ پایین آورنده سوئیچ در  $\frac{2}{3}$  فاصله هوایی سوئیچ و به مقدار ۶،۵ ولت است. مقدار ولتاژ تئوری بدست آمده با توجه به رابطه ۱ و مقدار ثابت فنر  $0.165$  نیوتن بر متر برابر با  $6/4$  ولت می‌شود که به مقدار بدست آمده در تحلیل نزدیک است. این مقدار در مقایسه با سوئیچ‌هایی بدون بازوی مارپیچ [۱۵] کاهش چشمگیری دارد.



شکل ۵: نمودار فاصله غشا به ولتاژ تحریک

با توجه به اینکه خازن در حالت تحریک به شدت روی فرکانس تشدید تاثیر دارد، انتخاب بزرگ آن ایزولاسیون سوئیچ را بیشتر می‌کند، شکل ۳، نمودار تغییرات ظرفیت خازن در حالت تحریک را نشان می‌دهد و این مقدار حدود  $10$  پیکو فاراد در ولتاژ پایین آورنده  $6/5$  ولت است. مقدار خازن تحریک با توجه به رابطه  $7, 9/6$  پیکوفاراد محاسبه شده است.

$$C_{up} = \left( \frac{\epsilon_0 A}{g_0 + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \right) + C_f \quad (6)$$

در حالت تحریک، با اتصال خازنی غشا و لایه دی‌الکتریک که روی خط انتقال قرار دارد، سوئیچ به شکل یک خازن فلز-عایق-فلز در می‌آید. وقتی ظرفیت بالا می‌رود یعنی وقتی که غشا در تماس با لایه دی‌الکتریک است، اتصال خازنی زیاد شده و سیگنال از ورودی به سمت زمین هدایت می‌شود. ظرفیت در حالت تحریک از رابطه ۷ بدست می‌آید:

$$C_{down} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d} \quad (7)$$

نسبت خازنی، نسبت خازن در حالت تحریک به خازن در حالت عدم تحریک است.

$$\frac{C_{down}}{C_{up}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d} \left( \frac{\epsilon_0 A}{g_0 + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \right) + C_f \quad (8)$$

نسبت خازنی با افزایش ثابت دی‌الکتریک یا افزایش فاصله هوایی یا کاهش ضخامت دی‌الکتریک، افزایش می‌یابد. افزایش در فاصله هوایی باعث افزایش در پیچیدگی فرایند و کاهش در ضخامت دی‌الکتریک باعث محدودیت در ماده انتخابی می‌شود. برای مثال نفوذ سیلیکون دی‌اکسید و سیلیکون نیتريد زیر  $100$  نانومتر بدون حفره کار سختی است. بنابراین انتخاب ماده دی‌الکتریک بالا بهترین گزینه برای افزایش نسبت خازنی است.

ویژگی‌های ماده دی‌الکتریک

در سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی خازنی، ثابت دی‌الکتریک بالای ماده، پارامتری مطلوب در افزایش نسبت خازنی است. دی‌الکتریک باید، تلفات رادیو فرکانسی کمی را نشان دهد بدین معنی که تانژانت سیگما به سمت صفر میل کند. لایه دی‌الکتریک باید به گونه ای انتخاب شود که در دراز مدت قابلیت اطمینان سوئیچ را تضمین کند. علاوه بر این باید دارای ولتاژ شکست بالا و کمترین ضایعات بلوری باشد. در این سوئیچ از اکسید آلومینیوم به عنوان ماده دی‌الکتریک استفاده می‌شود.

اکسید آلومینیوم خاصیت یونی بالایی دارد. کریستال این ماده بار الکتریکی کمی دارد [۱۳]. این ویژگی‌ها قابلیت اطمینان آن را به عنوان دی‌الکتریک بالا می‌برند. از طرفی ثابت دی‌الکتریک آن  $9/4$  است که در مقایسه با سوئیچ‌هایی با دی‌الکتریک نیتريد سیلیکون با مقدار  $7/6$  بیشتر است [۱۴]. این موضوع ظرفیت خازنی را طبق رابطه (۲) افزایش می‌دهد.

زیر نویس	
انتهای فنر تا شروع مارپیچ	$c$
دی الکتریک	$d$
حالت تحریک	$down$
موثر	$eff$
حاشیه‌ای	$f$
بازوی مارپیچی	$m$
بدون پیچ	$m-n$
پایین آورنده	$p$
کل فنر	$s$
حالت عدم تحریک	$up$

مراجع

[1] G. Rebeiz, 2003. *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, Wiley Interscience, New York, NY, USA.

[2] J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz., 2000. "High isolation CPW MEMS shunt switches-Part 2: Design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June vol. 48, no. 6, pp. 1053-1056.

[3] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston and C. L. Goldsmith., 1999. "Micro machined low-loss microwave switches," *IEEE Journal of Micro electromechanical Systems*, June, vol. 8, pp. 129-134.

[4] S. P. Pacheco, L. P. B. Katehi and C. T. -C Nguyen., 2000. "Design of low actuation voltage RF MEMS switch," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, , vol. 1, pp. 165-168.

[5] M. Ruan, J. Shen and C. B. Wheeler., 2001. "Latching micro magnetic relays with microstrip permalloy cantilevers," *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Interlaken, Switzerland, January, pp. 224-227.

[6] H. C. Lee, J. H. Park, J. Y. Park, H. J. Nam and J. U. Bu., 2009 "Design, fabrication and RF performances of two different types of piezoelectrically actuated Ohmic MEMS switches", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 11, pp. 2098-2104.

[7] M. Daneshmand, S. Fauladi, R. R. Mansour, M. Lisi and T. Stajcer., "Thermally-actuated latching RF MEMS switch," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1217-1220, 2009.

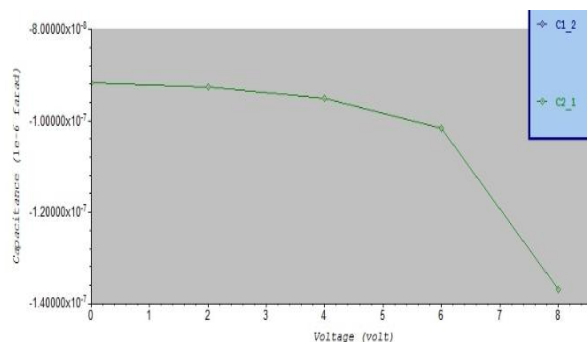
[8] W. M. V. Spenger, R. Puers and I. D. Wolf., 2003. "On the physics of stiction and its impact on the reliability of microstructures," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 563-582.

[9] U. Zaghoul, G. Papaioannou, F. Coccetti, P. Pons, and R. Plana., 2009. "Dielectric charging in silicon nitride films for MEMS capacitive switches: effect of film thickness and deposition conditions". *Microelectronics Reliability*, vol. 49, no. 9-11, pp.1309-1314.

[10] H. Gere, 2003. *Mechanics of Materials*: Thompson-Engineering.

[11] G. Wang, D. Thompson, J. Papapolymerou, and E. M. Tentzeris., 2004. "Low Cost RF MEMS Switch Using LCP Substrate," *Proc. IEEE European Microwave Conference*, pp. 1441-1444.

[12] N. Kingsley, G. Wang, and J. Papapolymerou, 2006. "Comparative Study of Analytical and Simulated Doubly-Supported RF MEMS Switches for Mechanical and Electrical Performance," *The Applied Computation Electromagnetics Society Journal*, vol. 21, pp. 9-15.



شکل ۶: نمودار ظرفیت خازن در حالت تحریک به ولتاژ تحریک

خازن در حالت عدم تحریک برابر با ۴/۶ فمتوفاراد است. بنابراین نسبت خازنی ۲۱۰ بدست می‌آید. با توجه به [۱] مقداری که نسبت خازنی باید داشته باشد بیش از ۱۰۰:۱ که در این جا ۲۱۰:۱ به دست آمده است و بسیار مطلوب است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی با غشایی طراحی شد که بازوهای مارپیچی آن ثابت فنر رادر سوئیچ کاهش دادند. کاهش در ثابت فنر ولتاژ پایین آورنده را که یکی از پارامترهای مهم در سوئیچ است، کاهش داد. دی الکتریک سوئیچ از ماده اکسید آلومینیوم انتخاب شد. اکسید آلومینیوم از ثابت دی الکتریک بالایی برخوردار است. با تغییر دی الکتریک نسبت ظرفیت خازنی افزایش می‌یابد تا سوئیچ از ایزولاسیون بالا برخوردار شود و قابلیت کار در فرکانس‌های رادیویی را داشته باشد.

فهرست علائم

$A$	مساحت، $m^2$
$C$	ظرفیت خازن $f$
$E$	مدول یانگ
$g_0$	فاصله هوایی، $m$
$H$	ضخامت الکتروود تحریک
$K$	ثابت فنر، $\frac{N}{m}$
$L$	طول، $m$
$N$	تعداد مارپیچ
$t$	ضخامت دی الکتریک، $m$
$V$	ولتاژ پایین آورنده غشا، $V$
$w$	عرض مارپیچ، $m$
	علائم یونانی
$\epsilon_0$	قابلیت گذردهی خلا، $8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$
$\epsilon_r$	ثابت دی الکتریک
$\nu$	نسبت پواسون

- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dielectric". *Microelectromechanical systems*, vol. 21, no. 5, pp. 1229-1240.
- [15] . Hung, L. Dussopt, and G. M. Rebeiz, 2004. "Distributed 2- and 3 – bit W - band MEMS phase shifters on glass substrates", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*,2(52) Feb. pp. 600-605.
- [13] S. Bécu, S. Crémer, and J. L. Aufran, 2006. "Capacitance non-linearity study in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MIM capacitors using an ionic polarization model". *Microelectronic Engineering*, vol. 83, pp. 2422-2426.
- [14] M. F. Badía, E. Butrado and A. M. Ionescu, 2012. "RF MEMS shunt capacitive switches using AlN compared to

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



توجه: ترمینال

بررسی مقاله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین  
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)



PROPOSAL  
پروپوزال

توجه: ترمینال

پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



توجه: ترمینال

آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو