

## موج‌برهای پلاسمونی MIM عمودی بر روی ساختار لایه SOI

وحید صادق زاده مرقی<sup>۱</sup>، محمود نیکوفرد<sup>۲</sup>، مهدی اسلامی<sup>۳</sup> و عماد رجبعلی زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب

<sup>۲</sup>دانشگاه کاشان، دانشکده برق و کامپیوتر [mnik@kashanu.ac.ir](mailto:mnik@kashanu.ac.ir)

<sup>۳</sup>گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران [Eslami@wtiau.ac.ir](mailto:Eslami@wtiau.ac.ir)

چکیده - در این مقاله، یک نوع ساختار فلز-عایق-فلز (Ag/SiO<sub>2</sub>/Ag) معرفی گردیده است که ساختار لایه آن بر روی هم قرار گرفته‌اند. این ساختار موج‌بری منطبق بر فناوری CMOS بوده و در طول موج مخابراتی 1550nm کار می‌کند. توزیع میدان الکتریکی و ضریب شکست مؤثر (قسمت حقیقی و طول انتشار) این موج‌بر با تغییر پهنای پشته، ضخامت لایه موج‌بری SiO<sub>2</sub>، ضخامت فلز نقره و طول موج محاسبه شده است. این موج‌بر برای متمرکز نمودن نور در راستای افقی و عمودی بسیار مناسب می‌باشد. کلید واژه - موج‌بر پلاسمونی، فلز-عایق-فلز، طول انتشار، ضریب شکست مؤثر.

می‌کند. از مزیت این ساختار برای استفاده از ساختار SOI این است که قابلیت مجتمع سازی با ساختار SOI و SOI هیبریدی پلاسمونی دارد. ضمناً تلاش خواهد شد که پارامترهای پاشندگی و طول انتشار را در این نوع موج‌بر بررسی نموده و تأثیر چند پارامتر ساختاری همچون ضخامت لایه‌های متفاوت را بر روی این دو پارامتر مهم مشاهده نماییم.

### ۲- ساختار موج‌بر پیشنهادی و پارامترهای انتشار

سطح مقطع موج‌بر MIM عمودی پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. ساختار لایه موج‌بر پیشنهادی از بالا به پایین عبارتند از: لایه نقره به ضخامت  $n_{Ag}$ ، لایه موج‌بری SiO<sub>2</sub> به ضخامت  $n_{SiO_2}$ ، لایه Ag به ضخامت  $n_{Ag}$ ، لایه‌های موج‌بر Ag/SiO<sub>2</sub>/Ag بر روی لایه Si و SiO<sub>2</sub> قرار گرفته است به گونه‌ای که این ساختار لایه منطبق بر فناوری CMOS می‌باشد. ضرایب شکست Ag، SiO<sub>2</sub> و Si در طول موج مخابراتی 1550nm برابرند با:  $n_{SiO_2}=1.444$ ،  $n_{Si}=3.48$  و  $n_{Ag}=0.144+11.366i$ . از نکات مهم در ساختار فوق این است که دارای تکنولوژی ساخت ساده و منطبق بر موج‌برهای عایقی مبتنی بر تکنولوژی SOI می‌باشد.

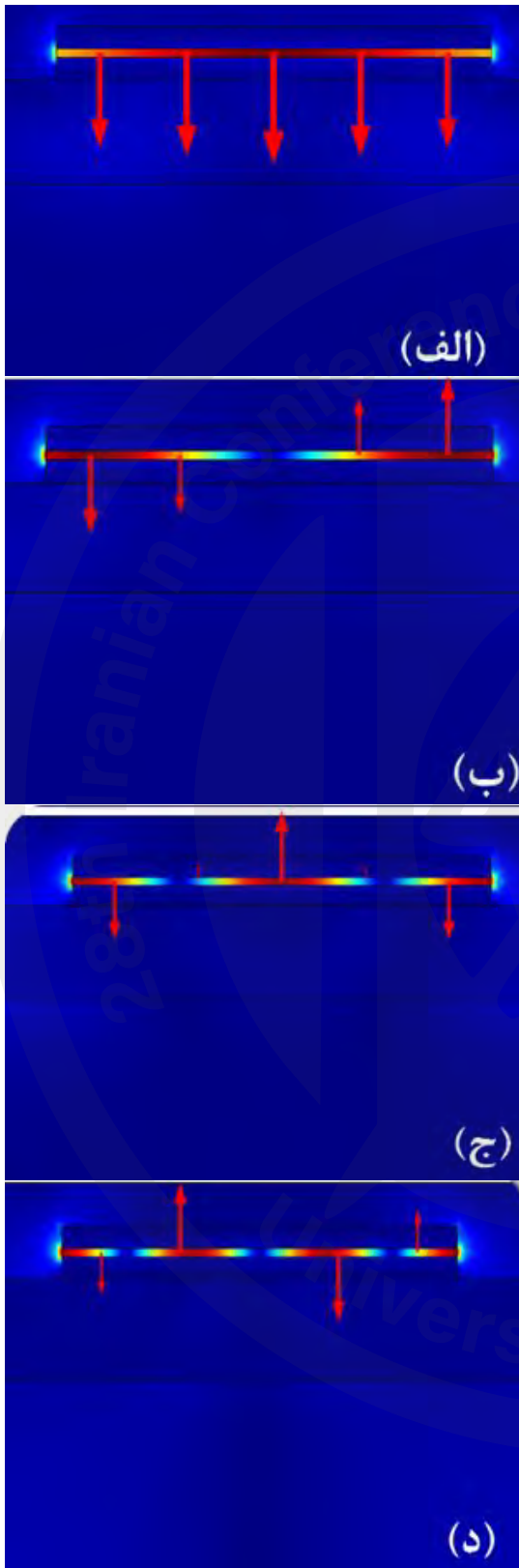
توزیع میدان الکتریکی (اندازه و جهت) و ضریب شکست موثر مودهای منتشر شونده با استفاده از روش عناصر محدود محاسبه گردیده است. در شکل ۲ مودهای منتشر شونده در یک موج‌بر با پهنای پشته  $W=1200nm$  نشان داده شده است. این موج‌بر چهار مود میدان مغناطیسی عرضی (TM) را منتشر می‌نماید و میدان الکتریکی

۱- مقدمه  
پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPPs) در دو دهه اخیر موضوع تحقیقات محققین علم فوتونیک بوده است. SPPها نور را در مرز عایق-فلز منتشر می‌کنند [1, 2]. توسعه ادوات نوری جهت متمرکز نمودن نور در ابعاد زیر طول موج کاربردهای فراوانی در نانو لیتوگرافی [3]، ذخیره‌سازی داده [4] و میکروسکوپی نوری با اسکن میدان‌های نزدیک (NSOM) [5] دارد.

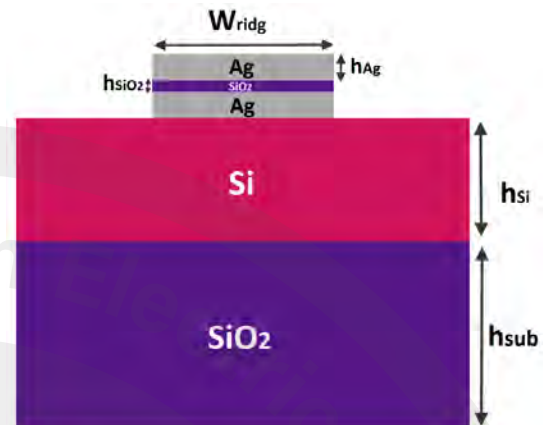
تاکنون ساختارهای متفاوتی برای هدایت نور به وسیله SPPها ارائه شده‌اند. از میان این ساختارها، ساختار موج‌برهای پلاسمونی هیبریدی (HP) از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا دارای طول انتشار زیاد بوده و ساختار لایه آن مشابه ساختار لایه موج‌بری عایقی معمولی است [6, 7]. اما در ساختار هیبریدی پلاسمونی، نور در زیر فلز به سمت لایه‌های زیرین کشیده شده است و نور متمرکز نیست. ساختار دیگری که بر روی آن تحقیقات فراوانی انجام شده است ساختارهای فلز-عایق-فلز (MIM) می‌باشند که بر روی زیر لایه و به صورت افقی قرار دارند [8, 9]. این ساختارها علیرغم مزایای فراوان، توانایی تمرکز نور فقط در راستای افقی را داشته و نمی‌توانند در راستای عمودی نور را متمرکز نمایند.

در این مقاله تلاش شده است که موج‌بر MIM معرفی شود که در راستای افقی و عمودی به طور توأمان توانایی متمرکز نمودن نور را داراست. ساختار ارائه شده بر روی زیر لایه سیلیکون بر روی عایق (SOI) قابل ساخت است و در طول موج مخابراتی 1550nm کار

در بین دو فلز متمرکز گردیده است.



شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی (اندازه و جهت) در موجبر پیشنهادی MIM عمودی. (الف) مود اصلی  $TM_{00}$  (ب) مود اول  $TM_{10}$  (ج) مود دوم  $TM_{20}$  و (د) مود سوم  $TM_{30}$ .



شکل ۱: سطح مقطع موجبر پیشنهادی MIM عمودی و  
 $h_{Ag}=50nm, h_{SiO_2}=20nm$

قسمت حقیقی ضریب شکست موثر بر حسب پهنای پشته موجبر در شکل ۳ دیده میشود. با افزایش پهنای پشته، قسمت حقیقی ضریب شکست به سمت مقدار متوسط ضرایب شکست Si و  $SiO_2$  میل میکند  $((1.44+3.48)/2=2.46)$ .

تعداد مودها در راستای افقی به پهنای پشته بستگی دارد. ضمناً برای انتشار مدهای یک ( $TM_{10}$ )، دو ( $TM_{20}$ ) و سه ( $TM_{30}$ ) کمترین پهنای پشته به ترتیب برابر با 350nm، 650nm، 1100nm و 1400nm است. چون موجبر MIM متقارن است لذا مود اصلی در موجبری با هر پهنایی منتشر خواهد شد. طول انتشار موجبر طولی است که توان نوری به  $1/e$  مقدار اولیه خود می‌رسد و از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$L_p = \frac{\lambda}{2\pi n_{e,imag}} \quad (1)$$

که  $\lambda$  طول موج نور تابیده شده به موجبر و  $n_{e,imag}$  قسمت موهومی ضریب شکست موثر موجبر می‌باشد. در شکل ۴، طول انتشار موجبر بر حسب پهنای پشته محاسبه و نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پهنای موجبر، طول انتشار افزایش می‌یابد. ماکزیمم طول انتشار مود اصلی برابر  $11\mu m$  است در حالیکه برای مدهای اول، دوم و سوم به ترتیب  $10\mu m$ ،  $9\mu m$  و  $8.5\mu m$  است. مینیمم طول انتشار برای مود اصلی  $4\mu m$  است.

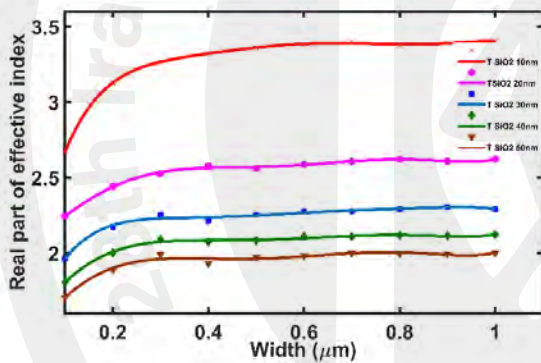
تضعیف شدید در این موجبر ناشی از نفوذ میدان نوری به داخل لایه های فلز نقره می‌باشد که عیب تمام موجبرهای پلاسمونی می‌باشد. زیرا هر چه تماس فیزیکی نور با سطح فلز در موجبرهای پلاسمونی بیشتر باشد تضعیف بیشتری را مشاهده خواهیم نمود. لذا اگر پهنای موجبر را کمتر از 400nm نگاهداریم، می‌توانیم مود اصلی را در موجبر منتشر و در عین حال طول انتشار چندان کاهش نداشته است.

لایه نقره کاهش می‌یابد.

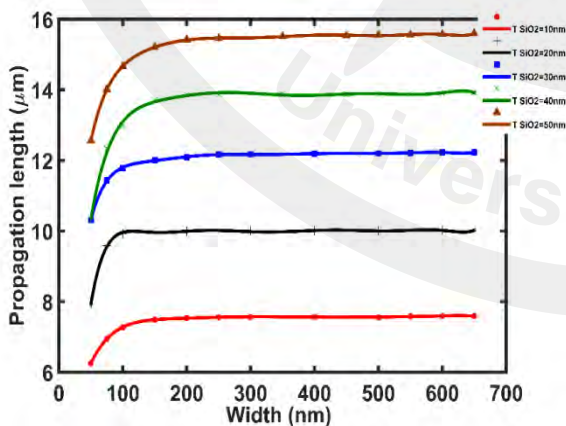
تأثیر ضخامت لایه نقره بر روی قسمت حقیقی ضریب شکست و طول انتشار به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات قسمت حقیقی ضریب شکست موثر و طول انتشار برای ضخامت نقره بزرگ‌تر از 100nm بسیار جزئی می‌باشد به گونه‌ای که افزایش طول انتشار حدود 1μm برای افزایش ضخامت نقره از 50nm تا 100nm دیده می‌شود.

این بدین معنی است که میدان نوری در داخل نقره در 50nm مرز نقره-دی اکسید سیلیکون متمرکز شده است. به همین دلیل در شبیه‌سازی‌ها ضخامت نقره را 50nm در نظر گرفته ایم.

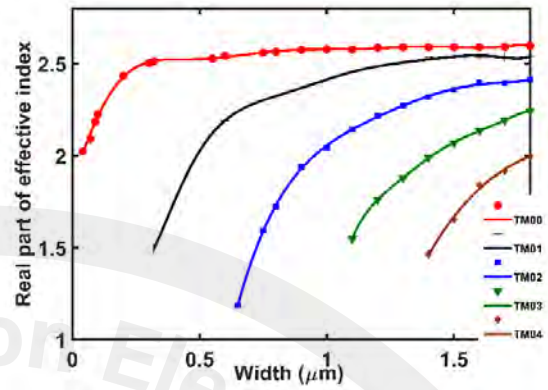
تأثیر تغییرات طول موج بر روی قسمت حقیقی ضریب شکست و طول انتشار در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب دیده می‌شود. در این شبیه‌سازی ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> را 20nm و پهنای پشته را 200nm فرض و طول موج را در محدوده 1.4μm تا 1.7μm اسکن نموده‌ایم. قسمت حقیقی ضریب شکست موثر از 2.65 به 2.54 کاهش یافته در حالیکه طول انتشار از 7.6μm تا 9.6μm افزایش یافته است.



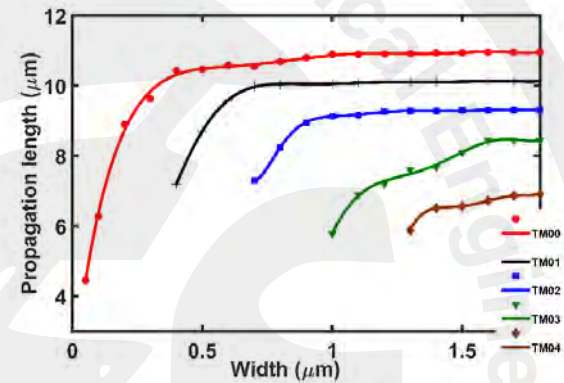
شکل ۵: قسمت حقیقی ضریب شکست موجبر بر حسب پهنای پشته برای مود اصلی و ضخامت‌های متفاوت لایه SiO<sub>2</sub>.



شکل ۶: طول انتشار بر حسب پهنای پشته برای مود اصلی و ضخامت‌های متفاوت لایه SiO<sub>2</sub>.



شکل ۳: قسمت حقیقی ضریب شکست موجبر بر حسب پهنای پشته.

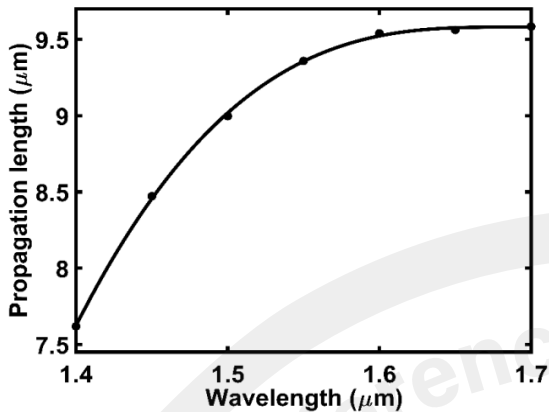


شکل ۴: طول انتشار موجبر بر حسب پهنای پشته.

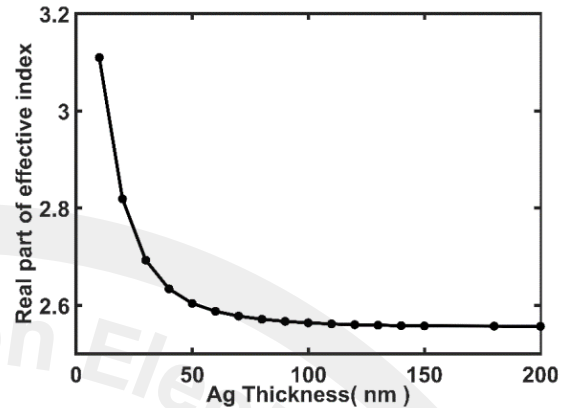
### ۳- تأثیر پارامترهای مختلف ساختار بر روی ضریب شکست مؤثر

تأثیر ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> بر روی قسمت حقیقی ضریب شکست موثر مود اصلی در شکل ۵ نشان داده شده است. ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> از 10nm تا 50nm در گام‌های 10nm تغییر یافته است. در این شکل دیده می‌شود که قسمت حقیقی ضریب شکست موثر از 1.44 تا 3.48 برای  $h_{SiO_2}=10nm$  و  $W=100nm$  تا  $h_{SiO_2}=50nm$  و  $W=1000nm$  تغییر می‌کند.

موقعی که ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> زیاد می‌باشد (مثلاً 50nm)، قسمت حقیقی ضریب شکست به سمت ضریب شکست لایه SiO<sub>2</sub> میل می‌کند و موقعی که ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> کم است ضریب شکست لایه Si غالب خواهد بود. طول انتشار موج بر پیشنهادی بر حسب ضخامت‌های متفاوت لایه SiO<sub>2</sub> در شکل ۶ رسم شده است. طول انتشار تقریباً یک رابطه خطی با ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> برای پهنای پشته بزرگ‌تر از 200nm دارد. ماکزیمم طول انتشار 15.5μm برای  $h_{SiO_2}=50nm$  به دست می‌آید. دلیل افزایش طول انتشار در لایه SiO<sub>2</sub> با ضخامت‌های بیشتر این است که میدان نوری نفوذی به داخل



شکل ۱۰: طول انتشار بر حسب طول موج برای مود اصلی و  $h_{SiO_2}=20nm$  و  $h_{Ag}=50nm$



شکل ۷: قسمت حقیقی ضریب شکست موجبر بر حسب ضخامت فلز نقره برای مود اصلی و  $h_{SiO_2}=20nm$

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک موجبر پلاسمونی Ag/SiO<sub>2</sub>/Ag بر روی ساختار SOI برای اولین بار بررسی شده است به گونه ای که لایه های موجبر پلاسمونی به طور عمودی بر روی هم قرار گرفته اند. در این موجبر، ضریب شکست مؤثر (قسمت حقیقی و طول انتشار) بر حسب پهنای پشته موجبر، ضخامت لایه موجبری SiO<sub>2</sub>، ضخامت نقره و طول موج محاسبه گردیده است.

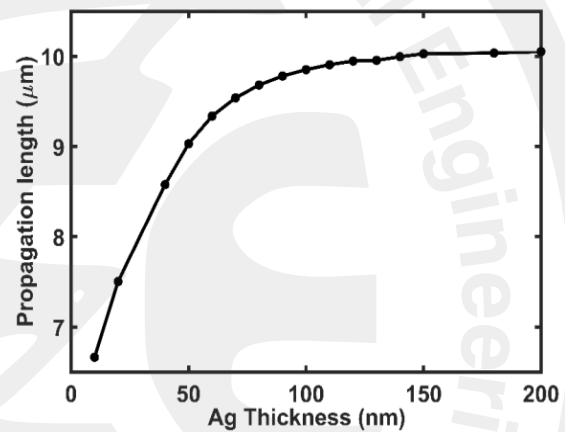
با تغییر ضخامت لایه SiO<sub>2</sub> قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر از 2.65 به 2.54 کاهش یافته در حالیکه طول انتشار از 7.6 μm تا 9.6 μm افزایش یافته است. دلیل افزایش طول انتشار در لایه SiO<sub>2</sub> با ضخامت های بیشتر این است که میدان نوری نفوذی به داخل لایه نقره کاهش می یابد. این ساختار برای متمرکز نمودن نور در ابعاد نانو در دو راستای افقی و عمودی به طور هم زمان بسیار مناسب می باشد.

#### سپاسگزاری

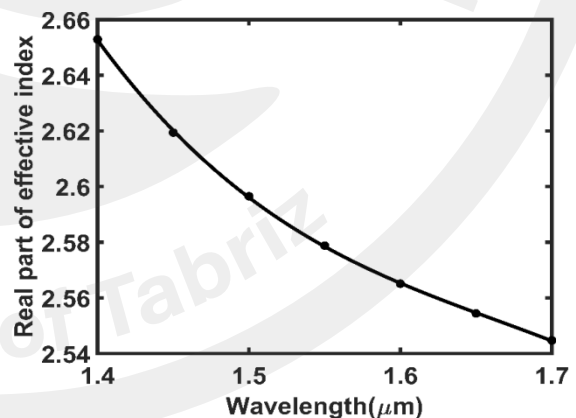
از استادان عالیقدرم، دکتر محمود نیکوفرد و دکتر مهدی اسلامی که در دوران تحصیلم، کمک کردند تشکر و قدرانی می کنم.

#### مراجع

- [1] S. A. Maier and H. A. Atwater, "Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures," Journal of applied physics, vol. 98, no. 1, pp. 10, 2005.
- [2] E. Feigenbaum and M. Orenstein, "Modeling of complementary (void) plasmon waveguiding," Journal of lightwave technology, vol. 25, no. 9, pp. 2547-2562, 2007.
- [3] W. Srituravanich, N. Fang, C. Sun, Q. Luo, and X. Zhang, "Plasmonic nanolithography," Nano letters, vol. 4, no. 6, pp. 1085-1088, 2004.
- [4] M. Mansuripur et al., "Plasmonic nano-structures for optical data storage," Optics Express, vol. 17, no. 16, pp. 14001-14014, 2009.
- [5] Y. Wang, W. Srituravanich, C. Sun, and X. Zhang, "Plasmonic nearfield scanning probe with high transmission," Nano letters, vol. 8, no. 9, pp. 3041-3045, 2008.



شکل ۸: طول انتشار موجبر بر حسب ضخامت فلز نقره برای مود اصلی و  $h_{SiO_2}=20nm$



شکل ۹: قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر بر حسب طول موج برای مود اصلی و  $h_{SiO_2}=20nm$  و  $h_{Ag}=50nm$

- [6] D. Dai and S. He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement," *Optics express*, vol. 17, no. 19, pp. 16646-16653, 2009.
- [7] M. Nikoufard, A. Nourmohammadi, S. Esmaili, Hybrid plasmonic nanoantenna with the capability of monolithic integration with laser and photodetector on inp substrate, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no 8, pp. 1558-2221, 2017.
- [8] M. Saad-Bin-Alam, M.I. Khalil, A. Rahman, A.M. Chowdhury, Hybrid plasmonic waveguide fed broadband nanoantenna for nanophotonic applications, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 1092-1095, 2015
- [9] D. F. Pile, D. K. Gramotnev, R. F. Oulton, and X. Zhang, "On long-range plasmonic modes in metallic gaps," *Optics Express*, vol. 15, no. 21, pp. 13669-13674, 2007.

