



لیهی
جنبش
پژوهشی
فوتونیک

بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



اثر ضخامت لایه اتصال روی اتلاف و ضربی محصورشده در موجبرهای تراهرتزی

علی اصغر خرمی^{۱,۲}, محسن قهرمانی^۱, علی ریاحی^۱, حسین رضا یوسف وند^۳

^۱ مرکز تحقیقات لیزر و اپتیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

^۲ دانشکده فنی و مهندسی، گروه نانوالکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۳ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران

چکیده - تجربه نشان می دهد که لایه اتصال یکی از پارامترهایی است که عملکرد موجبرهای تراهرتزی را متأثر می کند. در این مقاله با استفاده از معادله موج، تلفات موجبری و ضربی محصورشده نوری در موجبرهای تراهرتزی محاسبه شده اند. نتایج بدست آمده از این مقاله نشان می دهند که می توان با تغییر ضخامت لایه اتصال، تلفات موجبری و ضربی محصورشده نوری را بهبود بخشید. همچنین موجبر فلز- فلز به دلیل ضربی محصورشده نوری بالاتر و تلفات موجبری کمتر، عملکرد بهتری نسبت به موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق دارد. نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی در این مقاله از انطباق بالایی برخوردارند.

کلید واژه- تلفات موجبری، ضربی محصورشده، موجبرهای تراهرتزی، لایه اتصال

Effect of the contact layer thickness on the loss and confinement factor in terahertz waveguides

Ali Asghar Khorami^{۱,۲}, Mohsen Ghahramani^۱, Ali Riahi^۱, Hossein Reza Usefvand^۳

^۱Department of Laser and Optic, Emam Hossein University, Tehran

^۲Department of Engineering, Nanoelectronics group, Tarbiat Modares University, Tehran

^۳Department of Electrical Engineering, Islamshahr Branch, Azad Islamic University, Tehran

Abstract- Experience shows that the contact layer is one of the parameters that affect the performance of terahertz waveguides. In this paper, with using of the wave equation, the loss and confinement factor in terahertz waveguides are calculated. The results of this paper show that by changing the thickness of the contact layer, the confinement factor and waveguide loss can be improved. Also, due to lower loss and higher confinement factor, the metal-metal waveguides have better performance rather than semi-insulating surface-plasmon waveguides. The obtained results from simulation in this paper are in good agreement with experimental results.

Keywords: Waveguide loss, Confinement factor, Terahertz waveguides, Contact layer

است چون قانون گزینش دوقطبی فقط تابش با میدان الکتریکی قطبیده شده در جهت r ، را اجازه می‌دهد. جهت انتشار در جهت z ، و جهت رشد را در جهت x در نظر می‌گیریم. برای مدهای TM موجبر، مناسب‌تر است که میدان H ، که فقط در جهت y غیرصفر است، بررسی گردد [۵].

$$H(x, y, z) = \hat{y} H_y(z) \exp(i\beta z) \quad (1)$$

β ثابت انتشار است. وابستگی زمانی نوسانی $e^{-i\omega t}$ در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله موج داریم [۵]:

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = (\beta^2 - \mu \cdot \epsilon \omega^2) H_y \quad (2)$$

با استفاده از شرط پیوستگی H_y و $\frac{\partial H_y}{\partial x}$ در فصل مشترک و معادلات ماکسول می‌توانیم بقیه مولفه‌های غیرصفر میدان را بدست آوریم [۵]:

$$E_z = \frac{i}{\epsilon \omega} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad \text{و} \quad E_x = \frac{\beta}{\epsilon \omega} H_y \quad (3)$$

در هر لایه مدعوضی به صورت زیر است:

$$H_y(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx) \quad (4)$$

$$k' = \mu \cdot \epsilon \omega' - \beta' \quad \text{به طوری که:} \quad (5)$$

برای موجبرهای بدون اتلاف، مقدار β حقیقی است. برای موجبرهای با مقدار مختلط β ، ثابت انتشار مختلط است: $\beta = \beta' + i\beta''$ [۶]

به طوری که از ای $> \beta$ اتلاف و به از ای $< \beta$ بهره داریم. اتلاف توان موجبر برابر است با:

$$\alpha_w = \frac{2\beta''}{\epsilon \omega} \quad (7)$$

که نشان می‌دهد توان اپتیکی در یک موجبر با جهت انتشار z ، به صورت $\exp(-\alpha_w Z)$ کاهش می‌یابد.

ضریب محصورشدنی Γ ، که نشان دهنده می‌همپوشانی مد اپتیکی با محیط بهره است از رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{active}} |E_x|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E|^2 dx} \quad (8)$$

۱- مقدمه

هر لیزر از دو مولفه اصلی تشکیل شده است: یک تقویت کننده (محیط بهره) و یک مشدد (موجبر و آینه‌ها). مشدد به منظور محدود کردن تابش و فراهم کردن فیدبک اپتیکی است در حالی که باید طوری طراحی شود تا مینیمم سهم در اتلاف ناشی از جذب داشته باشد. اتلاف جذب موجبر با α_w و اتلاف آینه‌ها با α_m نشان داده می‌شود. اتلاف آینه‌ها به میزان انعکاس و طول کواک بستگی دارد، به طوری که افزایش میزان انعکاس یا افزایش طول کواک، موجب کاهش اتلاف آینه‌ها می‌شود. اما اتلاف جذب موجبر به طول کواک بستگی ندارد و باید تا حد امکان کوچک نگه داشته شود [۱].

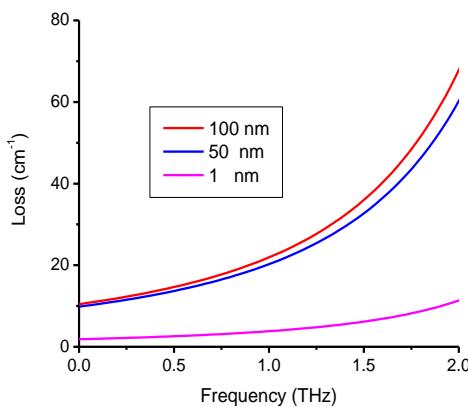
موجبر دیالکتریک به دو دلیل برای امواج تراهertz استفاده نمی‌شود: اولاً، ضخامت لایه clad حداقل باید از مرتبه نصف طول موج باشد که با روش رشد برآرایی ملکولی سازگاری ندارد. چون این لایه علاوه بر مقاومت گرمایی و افزایش چشمگیر تعداد نقص‌های زیر ناحیه فعال، موجب افزایش زمان رشد نیز خواهد شد. دوماً، اتلاف به علت جذب حاملین آزاد به صورت λ^2 برای فرکانس‌های بالای فرکانس پلاسماء، افزایش می‌یابد [۲ و ۳].

به همین دلیل برای امواج تراهertz از موجبر فلز-فلز یا موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق استفاده می‌شود. که در آنها بعد از ناحیه فعال، از یک لایه نازک با آلایش زیاد به منظور برقراری اتصال استفاده می‌شود که به عنوان لایه‌ی اتصال شناخته می‌شود [۴ و ۵]. در این مقاله نیز اثر این لایه‌ی اتصال روی میزان اتلاف موجبر و ضریب محصورشدنی بررسی شده است. لازم به ذکر است که ساختار لیزر آبشار کوانتمی تراهertzی مورد بررسی در این مقاله بر اساس گذار diagonal کار می‌کند که این ساختارها اولین بار در سال ۲۰۰۹ مطرح شدند و نسبت به لیزرهای آبشاری با گذار vertical، قابل کاربرد در دماهای بالاتر هستند چون بالاترین تراز لیزری در آنها دارای طول عمر بیشتری است که خود منجر به وارونگی بیشتر جمعیت و در نتیجه بهره بیشتری می‌شود.

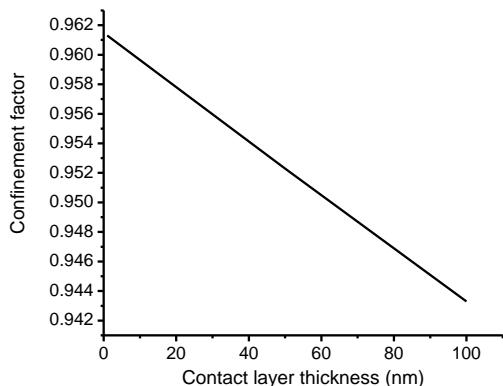
۲- روش‌های محاسباتی

در لیزرهایی که بر اساس گذارهای بین زیرترازی کار می‌کنند، فقط نیاز به بررسی مد معناطیسی عرضی (TM)

مقدار اتلاف بر حسب فرکانس، به ازای ضخامت های مختلف لایه اتصال، در شکل (۳) نشان داده شده است. هر چند لایه اتصال، که به مقدار زیاد آلایش شده است، باعث کاهش سد شاتکی و برقراری ارتباط الکتریکی می‌شود و وجود آن ضروری به نظر می‌رسد اما افزایش ضخامت آن، اتلافات موجبر را افزایش می‌دهد و باعث کاهش ضریب محدودیت اپتیکی می‌شود که در شکل (۴) تغییرات آن نشان داده شده است.



شکل(۳). اتلافات موجبر فلز-فلز به ازای ضخامت های مختلف لایه اتصال.



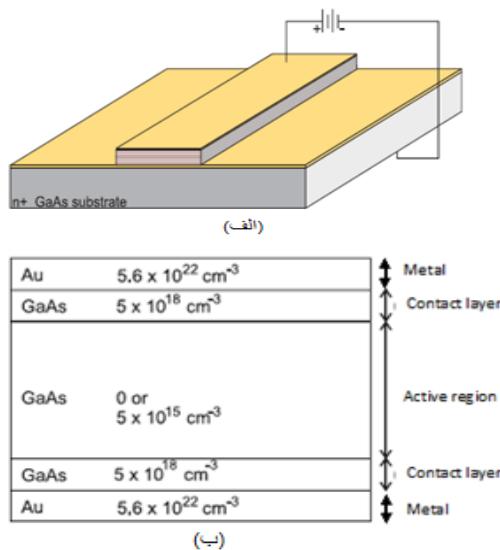
شکل(۴). فاکتور محدودیت (Γ) بر حسب ضخامت لایه اتصال موجبر فلز-فلز.

در شکل‌های (۵) و (۶)، مقدار اتلاف موجبر و ضریب محسوس شدگی به ازای ضخامت های مختلف لایه‌ی اتصال در موجبرهای پلاسمون سطحی نیمه عایق بدست آورده شده است. که مشابه با موجبرهای فلز-فلز، افزایش ضخامت لایه اتصال، تاثیر منفی روی عملکرد موجبر می‌گذارد.

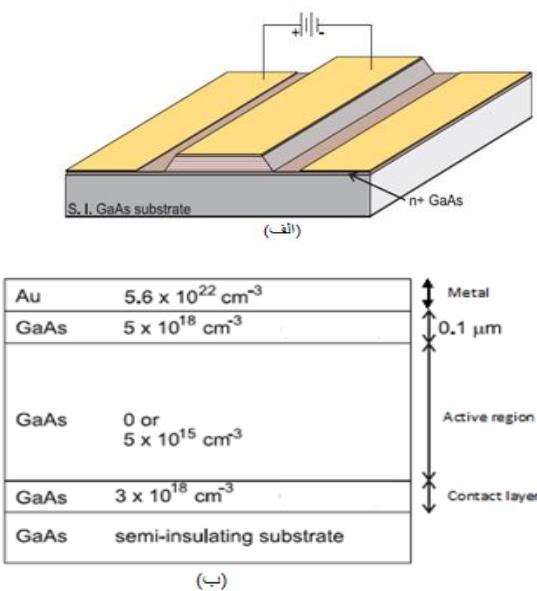
با مقایسه مقدار اتلاف و ضریب محسوس شدگی در این دو

۳- نتایج شبیه سازی

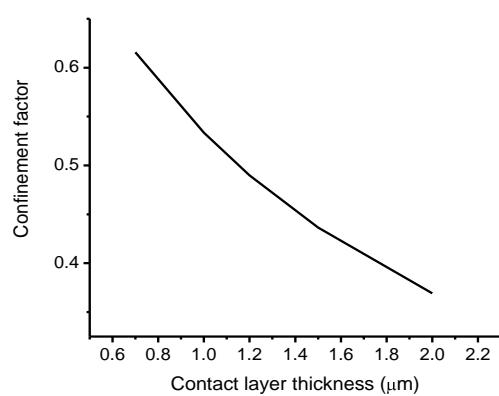
پس از ارائه معادلات مربوط به اتلاف و ضریب محسوس شدگی، می‌توان با محاسبه‌ی آنها اثر ضخامت ناحیه‌ی اتصال روی این دو کمیت در موجبرهای فلز-فلز و موجبرهای پلاسمون سطحی نیمه عایق را بررسی کرد. یکی از روش‌های مطلوب برای بررسی این معادلات استفاده از روش ماتریس انتقال است که در این مقاله هم از آن استفاده شده است. در شکل(۱) و (۲)، موجبر فلز-فلز و موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق و لایه اتصال در آنها نشان داده شده است [۳].



شکل(۱): (الف). موجبر فلز-فلز [۳] (ب). نمایش ناحیه فعال و اتصال.



شکل(۲): (الف). موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق [۳] (ب). نمایش ناحیه فعال و اتصال.



شکل(۶). فاکتور محدودیت (Γ) بر حسب ضخامت لایه اتصال موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق.

۴- نتیجه‌گیری

هر چند وجود لایه‌ی اتصال با مقدار آلایش زیاد، برای کاهش سد شاتکی و برقراری اتصال الکتریکی در موجبرهای تراهertzی ضروری به نظر می‌رسد، اما خود این لایه‌ها می‌توانند موجب اتلافات زیادی شوند که بستگی به ضخامت آنها دارد. با افزایش ضخامت آنها میزان اتلافات موجبری افزایش می‌یابد و باعث کاهش ضریب محصورشده‌ی می‌شود، که تاثیر منفی روی عملکرد موجبر دارد. از این‌رو ضخامت آنها باید تا حد امکان کوچک شود. از طرفی موجبرهای فلز-فلز عملکرد خیلی بهتری نسبت به موجبرهای پلاسمون سطحی نیمه عایق دارند، چون هم اتلاف موجبری کمتری دارند و هم ضریب محصورشده‌ی بالایی دارند و برای امواج تراهertz مناسب‌تر هستند.

سپاسگزاری

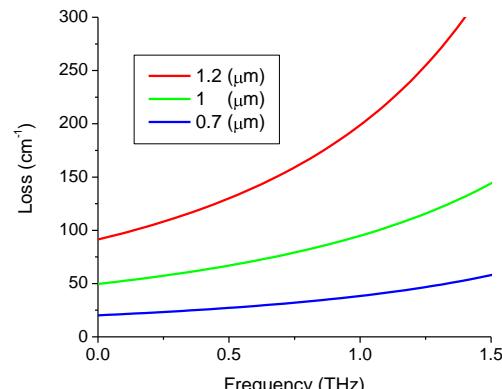
از دانشگاه جامع امام حسین (ع) به خاطر حمایت‌های همه جانبه‌ی آنها کمال تشکر را داریم.

مراجع

- [۱] H. Zhan and et al, "Terahertz Energy Confinement in Finite-Width Parallel-Plate Waveguides", *Terahertz Science and Technology*, Vol. ۲, No. ۴, (۲۰۰۹).
- [۲] S. Atakaramians and et al, "Terahertz Dielectric Waveguides", *Advanced in Optics and Photonics* ۵, ۱۶۹-۲۱۵, (۲۰۱۳).
- [۳] B. S. Williams, "Terahertz Quantum Cascade Lasers", *Nature Photonics*, VOL ۱, ۵۱۷-۵۲۰, (۲۰۰۷).
- [۴] P. Doralda and et al, "Characterization of Bending Loss in Hollow Flexible Terahertz Waveguides", *Optics Express*, Vol. ۲۰, No. ۱۷, (۲۰۱۲).
- [۵] S. J. Orfanidis, "Electromagnetics Waves and Antennas", Rutgers University, USA, (۲۰۱۳).

نوع موجبر می‌بینیم که موجبر فلز-فلز عملکرد خیلی بهتری نسبت به موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق دارد. چون نسبت α/Γ بزرگتری دارد. توجه شود که " α/Γ " فاکتور شایستگی موجبرها نامیده می‌شود که هرچه بزرگ‌تر باشد عملکرد موجبر بهتر است. از طرفی با استفاده از موجبرهای فلز-فلز، موجبرهای باریکتر و نازکتری ایجاد می‌شود، که باعث کاهش اتلاف توان و همچنین آسانتر شدن انتقال گرما می‌شوند.

مقایسه‌ی نتایج این مقاله با داده‌های تجربی حاکی از توافق خیلی خوب با آنها دارد به عنوان مثال در مرجع [۳] برای موجبر فلز-فلز مقدار ضریب محصورشده‌ی تقریباً برابر با یک بدست آمده که در این مقاله هم برای ضخامت‌های کوچک لایه‌ی اتصال، مقدار این ضریب ۰,۹۶ بدست آمده است. از طرفی در همین مرجع برای موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق مقدار ضریب محصورشده‌ی بین ۱,۰۵ تا ۱,۰ ذکر شده که نتایج این مقاله در توافق خوبی با آن است. همچنین در همین مرجع مقدار اتلاف موجبر فلز-فلز بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر گزارش شده که در این مقاله هم برای ضخامت‌های لایه‌ی اتصال کوچک (۱nm) مقدار اتلاف تقریباً در این گستره قرار می‌گیرد.



شکل(۵). اتلاف بر حسب ضخامت‌های مختلف ناحیه اتصال در موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق.