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 ی اتصال روی اتلاف و ضریب محصورشدگی در موجبرهای تراهرتزی

علی اصغر خرمی[۱و۲]، 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 متاثر می کند. در این مقاله با استفاده از معادله موج ، تلفات موجبری و ضریب محصورشدگی 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 ضریب محصورشدگی نوری را بهبود بخشید. همچنین موجبر فلز- فلز به دلیل ضریب محصورشدگی 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، ضریب محصورشدگی، 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]

[۱]Department of Laser and Optic, Emam Hossein University, Tehran

[۲]Department of Engineering, Nanoelectronics group, Tarbiat Modares University, Tehran

[۳]Department 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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

هر لیزر از دو مولفه اصلی تشکیل شده است: یک تقویت کننده (محیط بهره) و یک مشدد (موجبر و آینه ها). 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 آینه ها با α_m نشان داده می شود. اتلاف آینه ها به میزان انعکاس و طول کاواک بستگی دارد، به طوری که افزایش میزان انعکاس یا افزایش طول کاواک، موجب کاهش اتلاف آینه ها می‌شود. اما اتلاف جذب موجبر به طول کاواک بستگی ندارد و باید تا حد امکان کوچک نگه داشته شود[۱].

موجبر دی‌الکتریک به دو دلیل برای امواج تراهرتز استفاده نمی شود: اولا، 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 نقص های زیر ناحیه فعال، موجب افزایش زمان رشد نیز خواهد شد. دوما، اتلاف به علت جذب حاملین آزاد به صورت λ^2، برای فرکانس های بالای فرکانس پلاسما، افزایش می یابد[۲و۳].

به همین دلیل برای امواج تراهرتز از موجبر فلز-فلز یا موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق استفاده می شود. که در آنها بعد از ناحیه ی فعال، از یک لایه نازک با آلایش زیاد به منظور برقراری اتصال استفاده می شود که به عنوان لایه ی اتصال شناخته می شود[۳و۴]. در این مقاله نیز اثر این لایه ی اتصال روی میزان اتلاف موجبر و ضریب محصورشدگی بررسی شده است. لازم به ذکر است که ساختار لیزر آبشار کوانتومی تراهرتزی مورد بررسی در این مقاله بر اساس گذار diagonal کار می کند 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 می شود.

۲- روشهای محاسباتی

در لیزرهایی که بر اساس گذارهای بین زیرترازی کار می کنند، فقط نیاز به بررسی مد مغناطیسی عرضی (TM) است چون قانون گزینش دوقطبی فقط تابش با میدان الکتریکی قطبیده شده در جهت رشد، را اجازه می دهد. جهت انتشار در جهت z، و جهت رشد را در جهت x در نظر می گیریم. برای مدهای TM موجبر، مناسب تر است که میدان H، که فقط در جهت y غیرصفر است، بررسی گردد[۵].

$$H(x,y,z) = \hat{y}\, H_y(z)\exp(i\beta Z) \qquad (۱)$$

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

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = (\beta^2 - \mu_0\varepsilon\omega^2)H_y \qquad (۲)$$

با استفاده از شرط پیوستگی H_y و $\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial H_y}{\partial x}$ در فصل مشترک و معادلات ماکسول می توانیم بقیه ی مولفه های غیرصفر میدان را بدست آوریم[۵]:

$$E_z = \frac{i}{\varepsilon\omega}\frac{\partial H_y}{\partial x} \qquad \text{و} \qquad E_x = \frac{\beta}{\varepsilon\omega}H_y \qquad (۳)$$

در هر لایه مد عرضی به صورت زیر است:

$$H_y(x) = A\exp(ikx) + B\exp(-ikx) \qquad (۴)$$

به طوری که: $$k^2 = \mu_0\varepsilon\omega^2 - \beta^2 \qquad (۵)$$

برای موجبرهای بدون اتلاف، مقدار β حقیقی است. برای موجبرهای با مقدار مختلط ε، ثابت انتشار مختلط است:

$$\beta = \beta' + i\beta'' \qquad (۶)$$

به طوری که به ازای $\beta'' > 0$ اتلاف و به ازای $\beta'' < 0$ بهره داریم. اتلاف توان موجبر برابر است با:

$$\alpha_w = \qquad (۷)$$
$$2\beta''$$

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

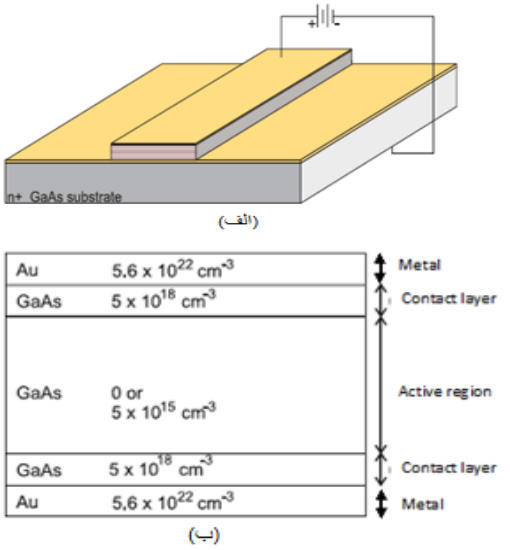
ضریب محصورشدگی Γ، که نشان دهنده ی همپوشانی مد اپتیکی با محیط بهره است از رابطه زیر بدست می آید[۵]:

$$\Gamma = \frac{\int_{active}|E_x|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty}|E|^2 dx} \qquad (۸)$$

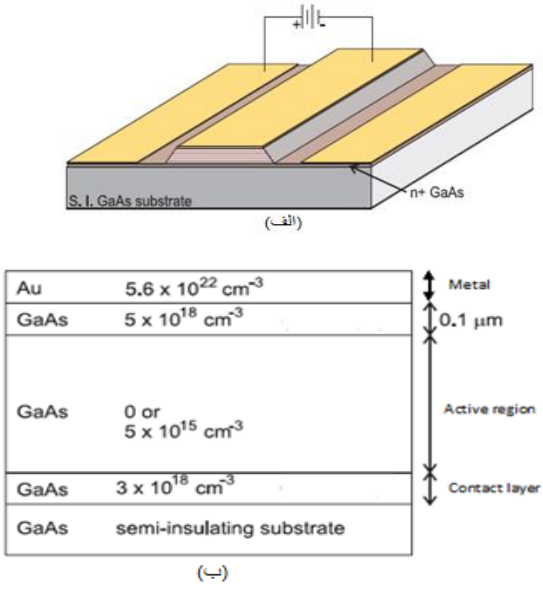
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

۳- نتایج شبیه سازی

پس از ارائه معادلات مربوط به اتلاف و ضریب محصورشدگی، می توان با محاسبه ی آنها اثر ضخامت ناحیه ی 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].

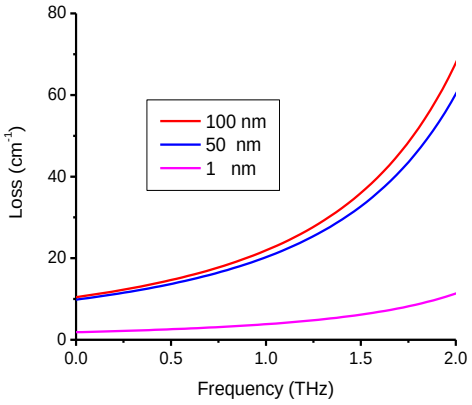


شکل(۱): (الف). موجبر فلز-فلز[۳] (ب). نمایش ناحیه فعال و اتصال.

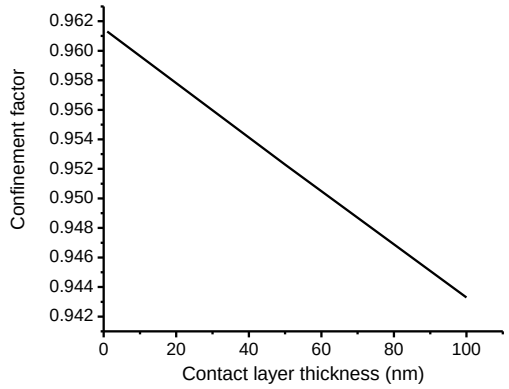


شکل(۲): (الف). موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق[۳] (ب). نمایش ناحیه-ی فعال و اتصال.

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.

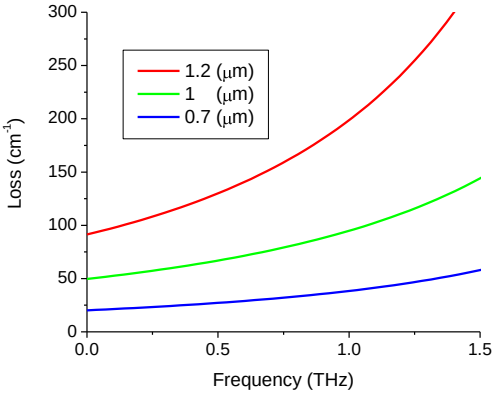
در شکلهای (۵) و (۶)، مقدار اتلاف موجبر و ضریب محصورشدگی به ازای ضخامت های مختلف لایه ی اتصال در موجبرهای پلاسمون سطحی نیمه عایق بدست آورده شده است. که مشابه با موجبرهای فلز-فلز، افزایش ضخامت لایه اتصال، تاثیر منفی روی عملکرد موجبر می گذارد.

با مقایسه مقدار اتلاف و ضریب محصورشدگی در این دو

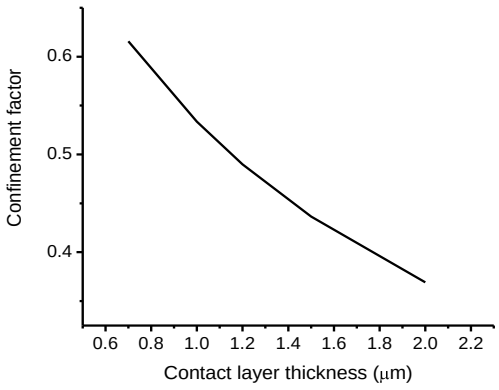
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

نوع موجبر می‌بینیم که موجبر فلز- فلز عملکرد خیلی بهتری نسبت به موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق دارد. چون نسبت Γ/α بزرگتری دارد. توجه شود که "Γ/α" 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.

مقایسه ی نتایج این مقاله با داده های تجربی حاکی از توافق خیلی خوب با آنها دارد به عنوان مثال در مرجع [۳] برای موجبر فلز-فلز مقدار ضریب محصورشدگی تقریبا برابر با یک بدست آمده که در این مقاله هم برای ضخامت های کوچک لایه ی اتصال، مقدار این ضریب ۰,۹۶ بدست آمده است. از طرفی در همین مرجع برای موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق مقدار ضریب محصورشدگی بین ۰,۱ تا ۰,۵ 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 ضخامت های لایه ی اتصال کوچک (۱nm) مقدار اتلاف تقریبا در این گستره قرار می گیرد.



شکل(۵). اتلاف برحسب ضخامت های مختلف ناحیه اتصال در موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق.



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

۴- نتیجه‌گیری

هر چند وجود لایه ی اتصال با مقدار آلایش زیاد، برای کاهش سد شاتکی و برقراری اتصال الکتریکی در موجبرهای تراهرتزی ضروری به نظر می رسد، اما خود این لایه ها می توانند موجب اتلافات زیادی شوند که بستگی به ضخامت آنها دارد. با افزایش ضخامت آنها میزان اتلافات موجبری افزایش می یابد و باعث کاهش ضریب محصورشدگی می شود، 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 محصورشدگی بالایی دارند و برای امواج تراهرتز مناسب تر هستند.

سپاسگزاری

از دانشگاه جامع امام حسین (ع) به خاطر حمایت های همه جانبه ی 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. ٤, (۲۰۰۹).

[۲] S. Atakaramians and et al, "*Terahertz Dielectric Waveguides*", **Advanced in Optics and Photonics ٥**, ١٦٩-٢١٥, (٢٠١٣).

[۳] B. S. Williams, "*Terahertz Quantum Cascade Lasers*", **Nature Photonics**, VOL ١, ٥١٧-٥٢٥, (٢٠٠٧).

[٤] P. Doralda and et al, "*Characterization of Bending Loss in Hollow Flexible Terahertz Waveguides*", **Optics Express**, Vol. ٢٠, No. ١٧, (٢٠١٢).

[٥] S. J. Orfanidis, "*Electromagnetics Waves and Antennas*", Rutgers University, USA, (٢٠١٣).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]