

بررسی اثرات ناشی از تراکم ناخالصی بستر و حداکثر توان تابشی لیزر بر پالس تولیدی آنتن‌های نورهدایتی تراهرتز

محمدعلی ملکوتیان^{۱*}، مرتضی فتحی پور^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۰۶)

چکیده

در این مقاله، بررسی نحوه تولید امواج تراهرتزی آنتن نورهدایتی با بستر گالیم آرسناید، برای استفاده در ساختار رادارهای تراهرتز را بررسی خواهیم کرد. این آنتن که بر بستر گالیم آرسناید رشد داده شده در دمای پایین ساخته می‌شود و با تابش نور لیزر فمپتوثانیه‌ای تحریک می‌گردد. هر سه بخش مورد نیاز در این نوع آنتن، یعنی منبع، خط انتقال و بخش تشعشع کننده، در ساختار آن خلاصه می‌شود. بستر نقش منبع و خط انتقال را ایفا کرده و اتصالات و وظیفه بخش تشعشع کننده را انجام می‌دهند. افزایش در میزان تراکم حامل‌های بستر آنتن و توان تابشی نور لیزر موجب افزایش توان تابشی آنتن می‌شود و عرض پالس حاصله را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: آنتن نورهدایتی، لیزر پالسی شکل فمپتوثانیه‌ای، تشعشعات تراهرتزی، گالیم آرسناید رشدیافته در دمای پایین.

۱. مقدمه

نورهدایتی هستند؛ بنابراین عناصر گروه سه-پنج برای دستیابی به چنین ویژگی‌هایی مورد بررسی و پردازش قرار می‌گیرند [۶-۷]. اگر بلور ماده گالیم آرسناید^۶، در دماهای پائین رشد داده شده باشد، به‌عنوان یکی از متداول‌ترین مواد در ساخت زیر لایه آنتن‌های نورهدایتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده، دارای مشخصات الکتریکی و ساختاری بسیار مناسب بوده و پاسخ بسیار سریع و زمان خیز کوتاه این ماده به هنگام تحریک نوری، بسیار حائز اهمیت است [۸-۱۱].

در اکثر موارد، مدل جریان ناگهانی، اساس مکانیزم تولید امواج تراهرتزی توسط آنتن نورهدایتی بایاس شده است. در این مدل، میدان الکترومغناطیسی تابشی تراهرتزی، ناشی از جریان گذرای است که در سطح ماده نورهدایتی ایجاد می‌گردد [۱۲]. با تابش نور لیزر به سطح آنتن (بین دو الکتروُد)، هم حامل‌های الکتریکی و هم با توجه به اختلاف پتانسیل، جریان گذرای تولید می‌شود. جریان گذرای حاصل از حرکت حامل‌ها یا همان جریان ناگهانی، در سطح ماده بستر، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی در فضا منتشر می‌شود و پالس الکترومغناطیسی تراهرتزی تولید می‌کند. فاصله بین الکتروودها در آزمایشات صورت گرفته، نسبتاً کم و در حدود ۵ تا ۲۰ میکرومتر می‌باشد.

در دهه اخیر، سامانه‌های با تشعشعات تراهرتزی^۱ پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه تولید، تشخیص و ساخت افزاره‌های نوری (مانند: موج‌برها^۲، صفحه‌های موج^۳ و فیلترها) داشته‌اند. این افزاره‌های نوری به‌تازگی در زمینه مخابرات سرعت بالا (مانند: رادارهای تراهرتز) و پزشکی کاربرد گسترده یافته‌اند. محققین در سال‌های اخیر به چنین سامانه‌هایی، به‌دلیل قابلیت‌های ذکر شده، توجه فراوان کرده‌اند. اشعه ایکس، به‌دلیل خاصیت یونیزاسیون، آسیب‌های فراوانی به بافت‌های زیر مجموعه‌اش وارد می‌کند. این در حالی است که امواج تراهرتزی از این مشکل مبرا بوده و همچنین نفوذ این نوع امواج، در اکثر مواد ارگانیک، ممکن می‌باشد [۱-۲].

تولید امواج تراهرتزی با تکنیک‌های مختلفی از جمله کلید زنی بسیار سریع در آنتن‌های نورهدایتی^۴ ممکن است [۳-۵]. طول عمر بسیار کوتاه (کمتر از یک پیکو ثانیه)، قابلیت حرکت^۵ بالای حامل‌ها و نیز مقاومت بالای ماده بستر، ویژگی‌های مناسبی برای ساخت آنتن‌های

* ایمیل نویسنده پاسخگو: m.a.malakoutian@ut.ac.ir

¹ Terahertz (THz) Radiation

² Wave Guide

³ Wave Plate

⁴ Photoconductive Antenna (PCA)

⁵ Mobility

⁶ GaAs

الکتریکی در آنتن را با این روابط تعیین می‌نماییم [۱۳-۱۴]. می‌توان با استفاده از معادله (۲)، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در آنتن، به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E}(t) &= -\mu \frac{\partial \vec{H}(t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H}(t) &= -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} + \vec{J}_n(t) + \vec{J}_p(t) \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله فوق $E(t)$ میدان الکتریکی متغیر با زمان، $H(t)$ میدان مغناطیسی متغیر با زمان، $J_n(t)$ و $J_p(t)$ به ترتیب، چگالی جریان الکترون و حفره و در نهایت، μ و ε به ترتیب نشان‌دهنده نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی ماده در خلأ می‌باشند. محاسبه چگالی جریان ناشی از الکترون و حفره، به ترتیب توسط معادلات ۳ و ۴ صورت می‌گیرد و داریم:

$$\begin{aligned} q \frac{\partial n(t)}{\partial t} &= \nabla \cdot \vec{J}_n(t) + qG - qR \\ q \frac{\partial p(t)}{\partial t} &= -\nabla \cdot \vec{J}_p(t) + qG - qR \\ \vec{J}_n(t) &= q \mu_n n(t) [\vec{E}_0 + \vec{E}(t)] + qD_n \nabla n(t) \\ \vec{J}_p(t) &= q \mu_p p(t) [\vec{E}_0 + \vec{E}(t)] - qD_p \nabla p(t) \end{aligned} \quad (3)$$

که در معادلات فوق μ_n و μ_p به ترتیب، قابلیت حرکت الکترون و حفره، D_n و D_p ضرایب انتشار انیشتین برای الکترون و حفره و در نهایت G و R ، نرخ تولید و بازترکیب حامل‌ها در گالیم آرسناید را بیان می‌کنند. با استفاده از معادله ۵ میزان نرخ تولید و بازترکیب حامل‌ها به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} G(x, y, z, t) &= G_0 \exp(-\alpha(z - z_0)) \\ &\times \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(z - z_0)^2}{\sigma_z^2}\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{\left(t - (z - z_0) \cdot \sqrt{\varepsilon_s} / c - t_0\right)^2}{\sigma_t^2}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

در معادله (۵)، α ضریب جذب و C سرعت نور را در خلأ نشان می‌دهند. پارامتر G_0 در این معادله، علاوه بر ضریب جذب α ، به میزان انرژی فوتون وابسته است. بخش اول معادله (۵) مربوط به فرآیند نفوذ نور در ماده بستر، دومین عبارت نمایی، شعاع ناحیه تحریک و آخرین عبارت نمایی، بیان‌گر شکل گذرای پالس نوری می‌باشد. تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی شدید، میزان حرکت مؤثر حامل‌ها کاهش یافته و در نتیجه سرعت حامل، با افزایش میدان الکتریکی به حالت اشباع درمی‌آید.

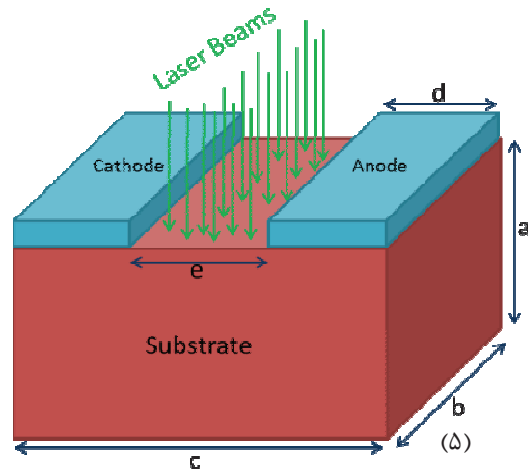
در این تحقیق، آنتن نورهادیته گالیم آرسناید، با ابعادی در حد میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است که هدف اصلی، بررسی شکل پالس جریان برقرار شده در این آنتن می‌باشد که منجر به ساطع شدن تشعشعات الکترومغناطیسی می‌شود. در بخش دوم مقاله، جریان آنتن، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی مدل‌سازی و فرآیند تولید حامل‌ها شرح می‌گردد. در بخش سوم، نتایج شبیه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. مدل‌سازی آنتن‌های نورهادیته

ساختار آنتن دو قطبی^۱ طراحی شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. این آنتن دارای ابعاد $a=50 \mu\text{m}$ ، $b=50 \mu\text{m}$ ، $c=50 \mu\text{m}$ ، $d=20 \mu\text{m}$ ، $e=10 \mu\text{m}$ می‌باشد. در ابتدا، هر دو الکترون و ولتاژ صفر بایاس می‌گردند. سپس ولتاژ آند تا مقدار ۱۰۰ ولت افزایش داده می‌شود. در ابتدا برای تحلیل توزیع پتانسیل داخلی ψ افزاره، از معادله سه بعدی پواسون استفاده می‌شود که این رابطه، برای تحلیل میدان الکتریکی در افزاره به کار برده می‌شود.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\frac{q}{\varepsilon_s} [p - n + N_D - N_A] \quad (1)$$

در این معادله، n و p به ترتیب بیان‌گر تراکم الکترون و حفره، N_D - N_A تراکم ناخالصی‌ها، q بار الکترون و ε_s میزان گذردهی الکتریکی ماده بستر می‌باشد. با استفاده از پتانسیل ψ ، می‌توان مقادیر مربوط به n_0 و p_0 را در حالت پایدار، در حالی که مقدار آنها بیان‌گر شرایط اولیه می‌باشند، به دست آورد. مقدار ψ با تغییر مقادیر n و p در معادله ۱، تغییر می‌کند.



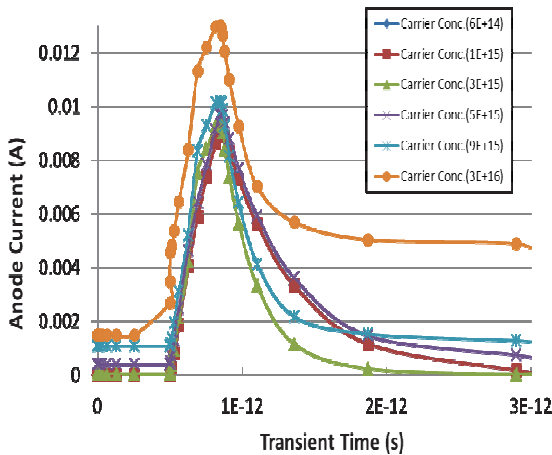
شکل ۱. ساختار و ابعاد آنتن دو قطبی نورهادیته

معادلات (۲) تا (۵) که دربرگیرنده معادلات ماکسول، رانشی-نفوذی و تولید - بازترکیب‌اند، در حوزه زمان بررسی می‌شوند. الگوی میدان

^۱ Dipole Antenna

۳-۲. اثرات تغییر توان تابشی

تغییر توان تابشی منبع لیزر، منجر به تغییر بیشینه چگالی جریان و نیز پارامتر FWHM می‌گردد. نتایج در جدول ۲ مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش توان تابشی لیزر، جریان افزازده و پارامتر FWHM افزایش می‌یابد. در توان تابشی 50 MW/cm^2 ، بیشینه جریان برابر با $466/5 \text{ mA}$ و مقدار پارامتر FWHM برابر با 577 فمپتو ثانیه می‌باشد. کاهش مقدار FWHM، به‌عنوان عامل مؤثر در افزایش محدوده عملکرد فرکانسی، افزاره را افزایش می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات جریان آند بر حسب زمان و در حالت $b=1 \mu\text{m}$

جدول ۱. مقادیر بیشینه جریان آنتن و پارامتر FWHM به ازای تغییر تراکم

حامل‌ها در حالت $b=50 \mu\text{m}$

تراکم حامل‌ها (cm^{-3})	بیشینه جریان (mA)	FWHM (fs)
6×10^{14}	۴۵۱	۶۵۵
1×10^{15}	۴۵۹	۶۵۰
3×10^{15}	۴۶۶	۶۴۱
5×10^{15}	۴۸۹	۵۸۹
9×10^{15}	۵۰۵	۵۳۳
3×10^{16}	۶۵۰	۴۹۰

می‌توان به‌وسیله مدل وابستگی قابلیت حرکت به میدان الکتریکی توماس و کاگی^۱، اثر اشباع سرعت حامل را در نظر گرفت [۱۳]. با استفاده از فرآیند بازترکیب شاکلی-رید-هال^۲، می‌توان نرخ بازترکیب را نیز مدل‌سازی نمود.

۳. بحث در نتایج

توان خروجی پالس تراهرتزی (الگوی میدان دور)^۳ تابشی از آنتن، تحت تأثیر عوامل زیر می‌باشد: ولتاژ بایاس اعمال شده به آنتن، میزان تراکم حامل در ماده بستر آنتن، توان لیزر اعمال شده، نوع آنتن و در نهایت میزان قابلیت حرکت حامل‌ها در ماده بستر.

در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار Silvaco-TCAD، اثرات تغییر تراکم حامل‌های ماده سازنده آنتن و نیز توان تابشی لیزر، بر مقدار بیشینه جریان خروجی و پارامتر FWHM آنتن نورهادی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در این شبیه‌سازی از مدل‌های فیزیکی نفوذ رانشی، اثرات میدان الکتریکی و تراکم حامل‌ها روی قابلیت حرکت و تولید و بازترکیب شاکلی-رید-هال استفاده شده است.

به‌منظور انجام شبیه‌سازی روی آنتن قطاری از پالس‌های لیزری با فرکانس 1 kHz به آن اعمال می‌گردد و خروجی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱. اثرات تغییر تراکم ناخالصی بستر

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بیشینه چگالی جریان، با افزایش میزان تراکم حامل‌ها در بستر نیمه‌هادی آنتن افزایش می‌یابد. چنین افزایشی در چگالی جریان، از ایجاد یک روند رو به رشد در المان‌های $p(t)$ و $n(t)$ در معادله چگالی جریان (معادله ۴) حاصل می‌گردد. پارامتر FWHM با افزایش تراکم حامل‌ها کاهش پیدا می‌کند.

زمان خیز^۵ کمینه و بیشینه جریان بالاتر، سبب افزایش FWHM شده، اما برای تراکم‌های پایین، زمان نشست^۶ بزرگتر باعث شده تا FWHM بزرگتری داشته باشد.

جدول ۱، مقادیر بیشینه جریان و FWHM با افزایش تراکم ناخالصی در بستر آنتن را نشان می‌دهد. توان تابشی منبع لیزر و نیز ولتاژ بایاس آنتن در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت و به ترتیب برابر با 50 MW/cm^2 و 100 V در نظر گرفته شده است.

در تراکم‌های بسیار پایین دیده می‌شود که نشست نمودار از روند دیگر نمودارها تبعیت نمی‌کند که دلیل اصلی آن، کاهش رسانندگی بستر آنتن است.

¹ Caughey and Thomas Field-Dependent Mobility

² Shockley-Read-Hall (SRH)

³ Far-Field Pattern

⁴ Full Width at Half Maximum

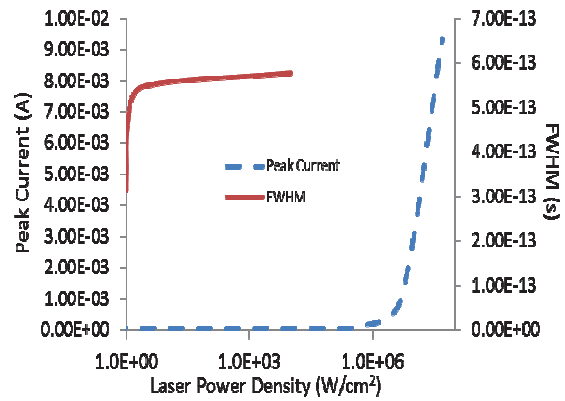
⁵ Rise Time

⁶ Settling Time

تراهرتزی با انرژی بالا و برای کاربردهای مخابراتی، اپتیک غیر خطی^۲ و کنترل همدوس^۳ استفاده می‌شود. در تمامی موارد، افزایش میزان تراکم حامل‌ها، این امکان را فراهم می‌آورد که به تشعشعات تراهرتزی با شدت بالاتر و هم‌چنین پهنای باند فرکانسی عریض‌تری دست یابیم.

۵. مراجع

- [1] Lo er, T., Siebert, K. J., Hasegawa, N., Hahn, T., Loata, G., Wipf, R., Kress, M., Thomson, M., Roskos, H. G., "Terahertz surface and interface characterization", 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pages 4, 2005.
- [2] Ferguson, B., Wang, S., Gray, D., Abbott, D., Zhang, X-C., "Towards functional 3d t-ray imaging", Phys. Med. Biol, 47:3735_3742, 2002.
- [3] Fitzgerald, A. J., Wallace, V. P., Jimenez-Linan, M., Bobrow, L., Pye, R. J., Purushotham, A. D., Arnone, D. D., "Terahertz Pulsed Imaging of Human Breast Tumors", Radiology, 239 (2): 533- 540, 2006.
- [4] Tribe, W. R., Newnham, D. A., Taday, P. F., Kemp, M. C., "Hidden object detection: security applications of terahertz technology", In R. Jennifer Hwu, editor, Proceedings of SPIE, Vol. 5354 of Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III, pp. 168_176, 2004.
- [5] Fuller, J. F. Fuchs, E. F. and Roesler, K. J. "Influence of harmonics on power distribution system protection," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, pp. 549-557, Apr. 1988.
- [6] Auston, D. H., Cheung, K. P., Smith, P. R., "Picosecond photoconducting hertzian dipoles", Appl. Phys. Lett., 1984, 45, (3), pp. 284-286
- [7] Grischkowsky, D., Keiding, S., Vanexter, M., Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors", J. Opt. Soc. Am. B, 1990, 7, (10), pp. 2006-2015
- [8] Zhang, X. C., Auston, D. H., "Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics", J. Appl. Phys., 1992, 71, (1), pp. 326-338
- [9] Hu, B. B., Zhang, X. C., Auston, D. H., Smith, "Free-space radiation from electrooptic crystals", Appl. Phys. Lett., 1990, 56, (6), pp. 506-508
- [10] Roskos, H. G., Nuss, M. C., Shah, J., Leo, K., Miller, D. A. B., Fox, A. M., Schmit-Trink, S., Kohler, "Coherent submillimeter-wave emission from charge oscillations in a double-well potential", Phys. Rev. Lett., 1994, 68, (14), pp. 2216-2219
- [11] Tani, M., Fukasawa, R., Abe, H., Matsuura, S., Sakai, K., Nakashima, "Terahertz radiation from coherent phonons excited in semiconductors", J. Appl. Phys., 1998, 83, (5), pp. 2473-2477.
- [12] Darrow, J. T., Zhang, X.-C., Auston, D. H., Morse, J. D., IEEE J. Quantum Electron. 28 (1992) 1607. R.
- [13] Caughey, D. M., Thomas, R. E., "Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field," Proc. IEEE, Vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [14] Luebbers, R., Kunz, K., Schneider, M., Hunsberger, F., "A finitedifference time-domain near zone to far zone transformation", IEEE Trans. Antennas. Propagat., Vol 39, No 4, pp 429-433, April 1991.



شکل ۳. نمودار تغییرات جریان آنتن و پارامتر FWHM را به ازای تغییر توان تابشی لیزر در حالت $b=1\mu\text{m}$

جدول ۲. مقادیر بیشینه جریان آنتن و پارامتر FWHM به ازای تغییر توان تابشی لیزر در حالت $b=50\mu\text{m}$

قدرت لیزر (w/cm^2)	جریان بیشینه (mA)	FWHM (fs)
۰/۵	۱/۶۵	۳۱۵
۵	۱/۶۵	۳۲۱
۵۰	۱/۶۵	۳۲۲
۵۰۰	۱/۶۵۵	۳۲۵
۵K	۱/۶۷	۳۳۰
۵۰K	۱/۹۳	۳۵۸
۵۰۰K	۶	۴۶۵
۵M	۵۰/۵	۵۴۶
۵۰M	۴۶۶/۵	۵۷۷

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه انجام شده، مشخصات مربوط به تشعشعات تراهرتزی تولید شده با آنتن نورهدایتی بایاس شده و تحریک شده، توسط قطاری از پالس‌های نور لیزری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، پیک جریان و نیز پارامتر FWHM، با افزایش توان منبع لیزر، نسبت مستقیم داشته و این بدان معناست که با این افزایش، پیک جریان و نیز پارامتر FWHM و پهنای باند فرکانسی آنتن کاهش خواهد یافت. با داشتن اطلاعات مطلوب و کافی در مورد ماهیت نقص‌ها در بلور و نیز نحوه توزیع فضایی آنها، می‌توان مواد بهینه‌ای طراحی نمود که دارای حامل‌هایی با طول عمر کوتاه‌تر و قابلیت حرکت بالاتر بوده و نیز توانایی حضور در میدان‌های الکتریکی بالاتر را داشته باشند. می‌توان از نتایج این مطالعه، در طراحی امیترهای^۱ بهینه بهره برد که از آنها در تولید قطارهای پالس

^۲ Non-linear Optics

^۳ Coherent Control

^۱ Emitters