



کد مقاله : ۱-۲۵۷۹-۱۰-A

کنترل بهره تابش تراهرتز تولید شده توسط فرآیند تولید فرکانس اختلافی در موجبرهای غیرخطی

محمدامین همتیان، فاضل جهانگیری

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده - با بررسی مشخصات اپتیکی چند ماده غیرخطی مرتبه دوم، فرآیند غیر خطی تولید فرکانس اختلافی در بازه فرکانسی تراهرتز در موجبرهای ساخته شده از این مواد با هندسه یکسان را مورد شبیه‌سازی قرار داده‌ایم. به منظور مقایسه نتایج حاصل در این موجبرها، از یک معیار شایستگی مبنی بر توانایی سیستم موجبری در تبدیل فوتونی استفاده کرده‌ایم. نتایج مقایسه برای چهار ماده غیرخطی ZnO ، $GaAs$ ، InP و InP ارائه شده است.

کلیدواژه - تابش تراهرتز، ترکیب سه موج، تولید فرکانس اختلافی، زینک مونواکسید، شبیه‌سازی

Controlling the efficiency of terahertz radiation generation via difference frequency generation in nonlinear waveguides

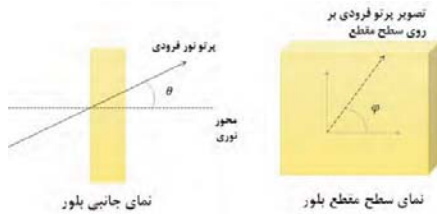
Mohammad Amin Hemmatian, Fazel Jahangiri

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- By investigating nonlinear optical parameters of some conventional second order nonlinear materials, the nonlinear process of difference frequency generation at terahertz frequency range is simulated in waveguides made of these materials with the same geometry. In order to compare the results obtained in these waveguides, we have employed a figure of merit, based on the ability of the structure to convert input frequencies to terahertz frequency. The comparative results are presented for ZnO , $GaAs$, InP , and InP .

Keywords: difference frequency generation, simulation, three-wave mixing, THz generation

دهنده موجبر است. در این مقاله ما از ماده ZnO برای این منظور استفاده کرده‌ایم.



شکل ۱. نمایش زاویه θ و φ . اگر محور نوری کریستال در جهت نشان داده شده باشد، آنگاه زاویه نور فرودی با این محور را زاویه θ می‌نامیم.

تانسور پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم $(\chi^{(2)})$ برای ماده ZnO ، سه عنصر مستقل و غیر صفر و تانسور مرتبه سوم فقط یک عنصر غیر صفر دارد [۶]. $\chi^{(2)}$ یا یک مجموعه عملیات ساده‌سازی به یک ماتریس 3×6 تبدیل می‌شود که با عنوان ماتریس d شناخته می‌شود [۱]. حال با توجه به جهت‌گیری کریستال و نیز قطبش هر کدام از سه موج پمپ و سیگنال و تراهرتز به دست آمده و به هر کدام از حالات قرار گرفتن کریستال، ضریب غیرخطی موثر (d_{eff}) نسبت داده می‌شود [۷]. برای یک حالت کلی که در آن \vec{E} یک میدان الکتریکی تصادفی به شکل $\vec{E} = E \begin{pmatrix} \sin\theta\cos\varphi \\ \sin\theta\sin\varphi \\ \cos\theta \end{pmatrix}$ باشد، قطبش به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d_{15} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{31} & \cdot & d_{33} & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ 2E_y E_z \\ 2E_z E_x \\ 2E_x E_y \end{pmatrix}$$

$$= \epsilon_0 E^2 \begin{pmatrix} d_{15} \sin 2\theta \cos \varphi \\ \cdot \\ d_{31} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + d_{33} \cos^2 \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

مقدمه

در میان روشهای متعدد مبتنی بر به کارگیری لیزر برای تولید تابش تراهرتز، فرآیند غیرخطی تولید فرکانس اختلافی یکی از شناخته شده‌ترین روشهای تولید تابش تراهرتز پالسی و پیوسته محسوب می‌شود. اما از مهم‌ترین عوامل محدودکننده بازده تولید در این فرآیند، در کنار جذب فونونی و فوتونی و نیز جذب غیرخطی ماده در بازه فرکانسی تراهرتز، می‌توان به عدم تطبیق سرعت بین دو موج فرودی و فرکانس تراهرتز تولید شده اشاره کرد که منجر به تقویت ناهمدوس تابش در طول کریستال و در نتیجه کاهش توان نهایی می‌شود [۱]. تطبیق فازی مدی، از جمله روشهای غلبه بر مسئله عدم تطبیق سرعت است که اولین بار در موجبرهای $GaAs$ برای تولید موج تراهرتز از لیزر CO_2 استفاده شد [۲] و به صورت تئوری و نیز تجربی در موجبرهای سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت [۳-۵]. در این روش تطبیق فازی، با تغییر هندسه موجبر می‌توان ضریب شکست موثر برای تابش تراهرتز را تغییر داد و سرعت آن درون کریستال را برای دستیابی به تقویت همدوس کنترل کرد. در این مقاله، با استفاده از یک موجبر دارای سطح مقطع مستطیلی، به کنترل ضریب شکست موثر موج تراهرتز تولید شده در فرآیند تولید فرکانس اختلافی می‌پردازیم و با انجام شبیه‌سازی، وابستگی بازده تولید به پارامترهای هندسی موجبر را استخراج می‌کنیم.

تئوری و شبیه‌سازی

مساحت موثر موجبر که به توزیع فضایی هر مد مرتبط است، می‌تواند با تغییر شدت باریکه برهمکنش کننده در فرآیند ترکیب سه موج، توان تولیدی تابش تراهرتز و در نتیجه بازده آن را تغییر دهد. از سوی دیگر، توان خروجی وابسته به خصوصیات غیرخطی ماده تشکیل

$$\xi \equiv d_{eff} \sqrt{\frac{\gamma Z \cdot \hbar w_u w_v w_w}{c^2 n_u n_v n_w A_{DFG}}} \quad (5)$$

و C در آن سرعت نور است. در اینجا به منظور مقایسه نتایج از یک پارامتر ترجیحی FOM به صورت زیر استفاده می‌کنیم [۱۰].

$$\mathcal{F} \equiv \frac{\xi^2}{\alpha^2} = \frac{\gamma \hbar w_u w_v w_w}{c^2 \epsilon_0 A_{DFG}} \times \frac{d_{eff}^2}{n_u n_v n_w \alpha^2} = \mathcal{F}_W \times \mathcal{F}_M \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \gamma \epsilon_0 E_0^2 \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \frac{1}{\gamma} d_{zz} \end{pmatrix} \quad (7)$$

این FOM معیاری از توانایی کل سیستم موجبری در تبدیل فوتونی است. \mathcal{F}_M و \mathcal{F}_W هم که به ترتیب به بخش موجبری و ماده مربوطاند نیز جزئی ازین معادله هستند. مزیت استفاده از این FOM ازین جهت است که اگر دو موجبر از دو ماده مختلف با فرکانس‌های خروجی تراهرتز متفاوت، FOM یکسانی داشته باشند به این معنی است که هر دو ماده توان تولید فرکانس یکسان دارند.

علاوه بر این، تطبیق فاز بین سه موج، از عوامل مهم و تاثیرگذار در خروجی فرآیند فوق‌الذکر است. تطبیق فازی مدی که در واقع روشی بر اساس هندسه و مشخصات اپتیکی موجبر بوده، باعث آزادی عمل بیشتری در انتخاب فرکانس تراهرتز خروجی و همچنین جنس ماده می‌شود. شیوه کار این روش بر پایه توانایی تغییر ضریب شکست موجبر با تغییر دادن هندسه و نوع ساختار آن است. با در اختیار داشتن این امکان، به ازای هر فرکانس خروجی تراهرتز، فرکانس اپتیکی مشخصی وجود دارد که با استفاده از آن تطبیق فازی برقرار خواهد بود. پس هندسه موجبر به عنوان یک درجه آزادی اضافه برای سیستم موجبری مطرح شد. [۱۰]

ZnO در فرکانس $1 THz$ ضریب جذبی حدوداً برابر $2 \frac{1}{cm}$ دارد [۱۱] و برای محاسبه ضریب شکست آن، می‌توان از رابطه سل‌مایر این ماده استفاده کرد. [۱۲]
اگر برای موجبر ZnO طولی برابر $800 mm$ و توان‌های پمپ و سیگنال برابر با $2 KW$ به عنوان توان ورودی در نظر گرفته شود، طرح شکل ۲ حاصل خواهد شد.

که در آن، θ زاویه بین پرتو فرودی و محور اپتیکی کریستال و φ زاویه سمتی روی صفحه سطح مقطع کریستال است. حال اگر در ماتریس بالا $\theta = 45^\circ$ و $\varphi = 90^\circ$ باشد، نور قطبیده خطی می‌شود و تنها یک عنصر باقی می‌ماند. در نتیجه رابطه (۱) به صورت زیر اصلاح

می‌شود:

$$\mathcal{F} \equiv \frac{\xi^2}{\alpha^2} = \frac{\gamma \hbar w_u w_v w_w}{c^2 \epsilon_0 A_{DFG}} \times \frac{d_{eff}^2}{n_u n_v n_w \alpha^2} = \mathcal{F}_W \times \mathcal{F}_M \quad (7)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت خاص رابطه $d_{eff} = \frac{1}{\gamma} d_{zz}$ برقرار می‌باشد. حال برای سطح مقطع موجبر در نقطه Z ، می‌توان میدان‌های الکتریکی را به شکل زیر در نظر گرفت [۸]:

$$E_q(x, y, z; t) = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\gamma Z \cdot \hbar}{n_q |e_q|}} \quad (8)$$

که در آن $e_q(x, y)$ توزیع‌های فضایی میدان الکتریکی، \hbar ثابت پلانک، Z امیدانس خلأ، n_q ضریب شکست موثر سه مد در حال انتشار و $q(z; t) = u \cdot v \cdot w$ توابع کند تغییر در راستای Z هستند. این توابع به نحوی بهنجار شده‌اند که توان دوم آن‌ها شار فوتونی برای هر مد (تعداد فوتون‌ها در واحد زمان) باشد. با استفاده از تقریب کند تغییری [۹] معادلات ترکیب سه موج به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{du}{dz} = -i \xi v w e^{i \Delta k z} \quad (4 - \text{الف})$$

$$\frac{dv}{dz} = -i \xi u w^* e^{-i \Delta k z} \quad (4 - \text{ب})$$

$$\frac{dw}{dz} = -i \xi u v^* e^{-i \Delta k z} - \frac{\alpha}{\gamma} w \quad (4 - \text{پ})$$

که $\Delta k \equiv k_u - k_v - k_w$ و همچنین در عبارات بالا از پارامتر ξ استفاده شده است که

ماده	ارتفاع \times عرض (μm)	β	β	β	β
<i>InP</i>	115×200	۱.۵۵۸	۱	۰.۶۱۳	۱.۶
<i>GaP</i>	67.4×100	۱.۵۶۶	۲	۸.۹۲۹	
<i>GaAs</i>	20.38×300	۱.۵۵۸	۱	۰.۲۶۶	
<i>ZnO</i>	115×200	۱.۰۰۳	۱	۱۵۶۲	

شکل ۳. طول پهنه‌انتشار. به‌ازای 2KW توان فرود باز پرتوها، می‌توان کمتر از 7W پرتو تراهرتز گرفت که نسبتاً بازدهی خوبی محسوب می‌شود.

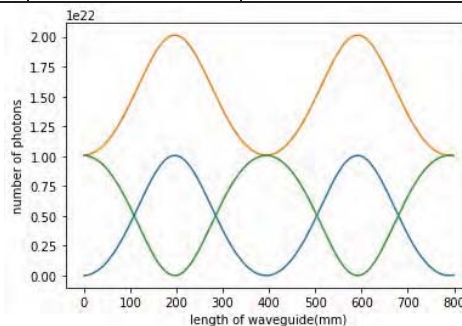
با تکرار محاسبات فوق برای سه موجبر دیگر ساخته شده از مواد *GaP* و *InP* و *GaAs*، به مقایسه نتایج حاصل در این چهار موجبر پرداخته‌ایم. این مقایسه در جدول (۱) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که ماده *InP* در مقایسه با سایر موجبرها از *FOM* بالاتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تولید تابش تراهرتز با استفاده از فرآیند غیرخطی «تولید فرکانس اختلافی»، شبیه‌سازی شده است. همچنین با استفاده از تعریف یک *FOM* که معیاری برای مقایسه موجبرهای با هندسه و جنس متفاوت است، ماده مد نظر در این مقاله یعنی *ZnO* از نظر توانایی تبدیل فوتونی با *GaAs* و *InP* و *GaP* مقایسه شده است. مقدار عددی بدست آمده برای این موجبر در مقایسه با سایر موجبرها کمتر است فلذا اگر از ماده *ZnO* برای تولید تابش تراهرتز از طریق این فرآیند غیرخطی استفاده شود، بازدهی فوتونی کمتری حاصل خواهد شد. بازدهی فوتونی نسبت تعداد فوتون‌های تراهرتز تولید شده به تعداد فوتون‌های پمپ فرودی است.

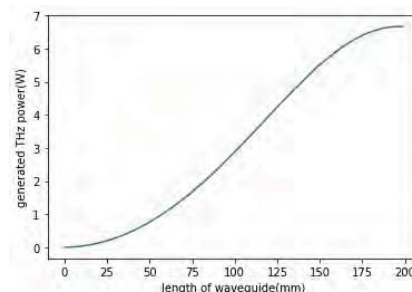
مراجع

- [۱] R. W. Boyd, nonlinear optics, New York: Academic Press, 2008.
- [۲] D. E. T. a. P. D. Coleman, Trans. Microwave Theory Tech. MTT-22, pp. 995-1000, 1974.
- [۳] V. B. a. C. Sirtori, Technol. 19, pp. 964-970, 2004.



شکل ۲. نمایش تعداد فوتون‌های پمپ (سبز) و سیگنال (قهوه‌ای) و تراهرتز (آبی) بر اساس طول موجبر.

همانطور که مشاهده می‌شود، در لبه ابتدای کریستال شاهد تولید فرکانس اختلافی در ناحیه تراهرتز هستیم. به این معنا که هر فوتون پمپ در حال تبدیل شدن به یک فوتون سیگنال و یک فوتون تراهرتز است. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که هیچ فوتون پمپی برای تبدیل وجود نداشته باشد. در این نقاط، فرآیند غیرخطی از *DFG* به *SFG* یا همان تولید فرکانس مجموع تبدیل خواهد شد. در این حالت، از ترکیب دو فوتون سیگنال و تراهرتز، یک فوتون پمپ حاصل می‌شود. در این حالت بازده فرآیند کلی به طول موجبر وابسته است.



- [۴] K. S. T. T. K. S. T. K. a. Y. O. J.-I. Nishizawa, Photonics, pp. 2008-2010, 2006.
- [۵] A. A. H. C. a. A. N. W. Zhu, Express 16, pp. 8433-9, 2008.
- [۶] D. H. A. B. M. B. F. S. P. G. M.C. Larciprete, Appl. Phys. B 82, pp. 431-437, 2006.
- [۷] P. Y. A. Yariv, Optical waves in crystals, Hoboken: Wiley, 1984.
- [۸] A. P. L. C. G. A. A. B. M. S. R.-S. A. C. a. A. P. S. Stivala, J. Opt. Soc. Am. B 24, pp. 1564-1570, 2007.
- [۹] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, New York: Academic, 1989.
- [۱۰] A. T. A. C. B. R. L. O. S. B. A. C. C. S. S. S. R. S. a. C. L. M. Cherchi, IEEE J. Quantum Electron. 46(3), p. 368-376, 2010.
- [۱۱] A. K. Azad, J. G. HanZhang, W. L. Appl. Phys. Lett., p. 88, 2006.
- [۱۲] Handbook of Optics, 3rd edition, Vol. 4., McGraw-Hill, 2009.