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

استفاده از موجبر بازتابی براگ در تشدید کننده‌های ریزحلقه برای بهبود تولید هارمونی دوم

مرتضی حاجتی [۱]، مجتبی گندم‌کار [۲،*]

[۱] گروه مهندسی برق ، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات هرمزگان،
[۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول
* gandomkar@jsu.ac.ir

چکیده - در این مقاله، ساختار تشدیدکننده‌ی ریزحلقه با استفاده از موجبر بازتابی براگ حلقوی برای تولید بهینه هارمونی دوم نور پیشنهاد و به روش عددی المان محدود شبیه‌سازی شده است. استفاده از خصوصیات قوی پاشندگی مد در موجبر بازتابی براگ برای برقراری شرط تطبیق‌فاز در فرایند تولید هارمونی دوم، در کنار خاصیت تشدید ساختار ریزحلقه در بهبود رفتارهای غیرخطی نوری از ویژگی‌های ساختار طراحی شده است. با بررسی اثر شعاع ریزحلقه بر شرایط تطبیق‌فاز نشان داده می‌شود که با وجود لایه‌بندی یکسان در موجبر بازتابی براگ، ساختار موجبر ریزحلقه را می‌توان در شعاع‌های مختلف و صرفاً با تنظیم عرض موجبر به تطبیق‌فاز مورد نیاز رساند.

کلید واژه - تشدیدکننده‌های ریزحلقه، تطبیق‌فاز، تولید هارمونی دوم، موجبر بازتابی براگ.

Utilization of Bragg Reflection Waveguides in Microring Resonators for Enhanced Second Harmonic Generation

Morteza Hajati [۱] and Mojtaba Gandomkar [۲,*]

[۱] *Department of Electrical Engineering, Hormozgan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Hormozgan, Iran*
[۲] *Department of Electrical and Computer Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran*
* *gandomkar@jsu.ac.ir*

Abstract- In this paper, we propose a microring (MR) resonator, based on Bragg reflection waveguides (BRWs) for enhanced second harmonic generation (SHG) and numerically simulate it using finite element method (FEM). Our proposed structure uses strong modal dispersion properties of BRW for phase matching in SHG process, and uses the resonance of MR to enhance nonlinear optical processes. We designed our MR resonator for three different radii. According to the results, SHG is achievable for different MR radii with the same layers only by tuning the width of the waveguide.

Keywords: Bragg reflection waveguides, microring resonator, second harmonic generation, phase matching.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

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

۱ – مقدمه

اخیراً، موجبر بازتابی براگ برای تطبیق‌فاز در فرایندهای تبدیل فرکانس نوری، از جمله تولید هامونی دوم، تولید فرکانس مجموع و تولید فرکانس تفاضل استفاده شده است [۵-۱]. در این مقاله قصد داریم تا با قرار دادن موجبر بازتابی براگ در ساختار ریزحلقه، از خصوصیات قوی پاشندگی موجبر براگ در کنار خاصیت تشدید موجبر ریزحلقه، برای برقراری شرایط تطبیق‌فاز در فرایند تولید هارمونی دوم استفاده کنیم.

به طور کلی، موجبر بازتابی براگ یک موجبر چندلایه از جنس AlGaAs/GaAs است که برای هارمونی پایه از مد بازتاب داخلی کلی و برای هارمونی دوم از مد بازتاب براگ استفاده می‌کند. استفاده از بازتاب براگ در هارمونی دوم باعث می‌شود که ضریب شکست مؤثر ساختار موجبر در هارمونی دوم از ضرایب شکست تمامی لایه‌های موجبر کمتر شود. این کار باعث جبران پاشندگی ماده به کار رفته در لایه‌های موجبر و پاشندگی ناشی از موجبر خمیده شده، تا در نهایت هارمونی پایه و هارمونی دوم در مد عرضی اول با هم تطبیق‌فاز پیدا کنند [۱].

در تولید هارمونی دوم در ریزحلقه‌ها، تاکنون برای جبران پاشندگی ماده، پاشندگی موجبر، و پاشندگی ناشی از خمیدگی در تطبیق‌فاز راه‌های مختلفی پیشنهاد شده است؛ در ابتدا از پاشندگی مد برای تطبیق‌فاز هارمونی پایه و هارمونی دوم استفاده شده بود [۷-۶]. اما به دلیل استفاده از مدهای عرضی با مرتبه‌های مختلف، همپوشانی مدهای درون ساختار کاهش یافته و بنابراین در این ساختارها، ضریب راندمان غیرخطی کاهش می‌یابد.

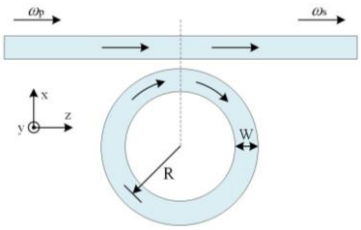
سپس ساختار دیگری با استفاده از روش تطبیق‌فاز دو شکستی پیشنهاد گردید که در آن برقراری تطبیق‌فاز بین مد عرضی مرتبه اول هارمونی‌های پایه و دوم، با یک ساختار چندلایه $AlGaAs/AlO_x/AlGaAs$ امکان‌پذیر شد [۸]. با این حال در این روش، زبری موجود بین سطوح لایه‌های غیرهمجنس موجبر، باعث افزایش تلفات و کاهش راندمان غیرخطی می‌گردد.

در این مقاله، استفاده از موجبر بازتابی براگ را پیشنهاد می‌کنیم. با این کار امکان تطبیق‌فاز مدهای عرضی مرتبه اول در یک موجبر تک‌جنس با پارامترهای طراحی متنوع فراهم می‌گردد. بعلاوه، این ساختار برای مجتمع‌سازی یکپارچه با ادوات الکترونیک نوری چندلایه نیز مناسب است. در این راستا سعی خواهیم کرد ساختاری برای تولید هارمونی دوم از طول‌موج مخابراتی ۱٫۵۵ میکرومتر به طول‌موج ۰٫۷۷۵ میکرومتر طراحی کنیم.

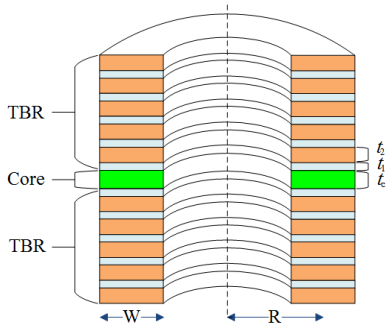
۲ – ساختار موجبر پیشنهادی

ساختار پیشنهادی از یک ریزحلقه تک‌کاناله از جنس AlGaAs تشکیل شده که نمای آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این ساختار نور با طول‌موج هارمونی پایه با قطبش TE وارد قطعه شده و حین چرخش در ریزحلقه، نوری با طول‌موج هارمونی دوم و با قطبش TM تولید می‌کند. همچنین در شکل ۲، سطح مقطع این موجبر چندلایه ترسیم شده است. در این شکل، لایه هسته با ضخامت t_c توسط دو آینه‌ی بازتاب دهنده براگ، با توالی لایه‌هایی با ضخامت t_1 و t_2 محصور شده است.

در این مقاله از موجبر بازتابی براگ ربع‌موجی استفاده شده است. در این موجبرها، هر لایه از آینه‌های بازتاب دهنده براگ دارای ضخامتی معادل یک‌چهارم طول‌موج نور در ماده خود است [۹]. موجبر براگ با لایه تطبیق دهنده و موجبر براگ پشته‌ای انواع دیگری از موجبرهای بازتابی براگ هستند که در این مجال به آن‌ها پرداخته نشده است. ولی روش تحلیل ارائه شده در این مقاله برای آن‌ها نیز قابل استفاده خواهد بود.



شکل ۱: ساختار ریزحلقه برای تولید هارمونی دوم. R و W به ترتیب شعاع و عرض ساختار ریزحلقه را تشکیل می‌دهند.



شکل ۲: سطح مقطع چند لایه‌ی موجبر ریزحلقه پیشنهادی بر پایه موجبر بازتابی براگ برای تولید هارمونی دوم. R و W به ترتیب شعاع و عرض ساختار ریزحلقه را تشکیل می‌دهند.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

۳- شرایط تولید هارمونی دوم در ساختار

برای تولید هارمونی دوم در ساختار موجبر پیشنهادی، به صورت همزمان سه شرط باید برقرار گردند؛ شرط تطبیق‌فاز مجازی بین طول‌موج هارمونی پایه و هارمونی دوم، شرط تشدید در محیط ریزحلقه و شرط براگ در موجبر بازتابی براگ برای هارمونی دوم.

برای برقرار شدن شرط تطبیق‌فاز مجازی، باید رابطه $m_s = ۲m_p + ۲$ برقرار گردد [۸]. در این رابطه، پارامتر m_p و m_s اعدادی طبیعی و به ترتیب شماره‌ی مدهای کمانی نور هارمونی پایه و هارمونی دوم در ساختار ریزحلقه هستند. در شرط تشدید، طول‌موج هارمونی پایه و هارمونی دوم، هر دو باید یکی از طول‌موج‌های تشدید ریزحلقه باشند. در این محدودیت، رابطه $k_pR = m_p$ و $k_sR = m_s$ باید برقرار باشد که در آن‌ها، k_p و k_s به ترتیب عدد موج هارمونی پایه و هارمونی دوم بوده و به صورت $k_p=\omega_p n_{TE}/c$ و $k_s=\omega_s n_{TM}/c$ تعریف می‌شوند. در این رابطه، پارامترهای n_{TE} و n_{TM} به ترتیب ضریب شکست مؤثر مدهای دیده شده در طول‌موج هارمونی پایه و هارمونی دوم و مقادیری بسیار نزدیک هم هستند. $\omega_s = ۲\omega_p$ فرکانس زاویه‌ای پرتو ورودی و خروجی و c نیز سرعت نور در خلأ است.

محدودیت سوم یعنی شرط براگ فقط در مورد طول‌موج هارمونی دوم اعمال می‌شود. در ساختار موجبر بازتابی براگ ربع‌موجی مستقیم، ضریب شکست مؤثر ساختار موجبر طبق فرمول زیر بیان می‌شود:

$$n_{\mathrm{eff}} = \sqrt{n_c^{\,2} - \left(\lambda^{2\omega}/2t_c\right)^2} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، $\lambda^{2\omega} = ۰/۷۷۵\ \mu m$، طول‌موج هارمونی دوم و n_c، ضریب شکست هسته در هارمونی دوم است. برای به دست آوردن مقادیر ضخامت لایه‌های متناوب $t_۱$ و $t_۲$ نسبت به t_c نیز می‌توان از مرجع [۹] استفاده کرد.

اما در ساختار پیشنهادی، به دلیل افزایش پاشندگی ناشی از خمیدگی موجبر ریزحلقه، ضریب شکست مؤثر n_{TM} نسبت به یک موجبر مستقیم، (n_{eff}) افزایش می‌یابد. ما برای طراحی لایه‌های ساختار خود، ضخامت لایه‌های مختلف موجبر بازتابی براگ را نسبت به موجبر مستقیم، به تدریج و البته با در نظر گرفتن شرط براگ، کاهش می‌دهیم تا به محدوده مناسب برسیم. تنظیم نهایی ساختار با تغییر عرض موجبر ریزحلقه انجام خواهد شد.

٤- روش‌های محاسبه مدهای عرضی و نتایج

برای محاسبه ضرایب شکست مؤثر و مدهای عرضی ساختار پیشنهادی، از روش شبه سه‌بعدی المان محدود استفاده شده است [۱۰]. در این روش، با انتخاب شماره مدهای کمانی هارمونی پایه و هارمونی دوم، طول‌موج تشدید و شکل مدهای عرضی، در ساختار موجبر ریزحلقه محاسبه می‌گردد.

به دلیل وجود لایه‌های زیاد در ساختار موجبر پیشنهادی، مدهای عرضی متنوعی در ساختار دیده می‌شود که تشخیص براگ یا بازتاب داخلی بودن این مدها به سادگی امکان پذیر نیست. برای پیدا کردن محل مدهای عرضی مورد نظر، ابتدا سطح مقطع دوبعدی موجبر ریزحلقه را با دو ساختار تک‌بعدی مسطح (یکی در جهت شعاع برای در نظر گرفتن اثر خمیدگی و دیگری در جهت ارتفاع برای اثر لایه‌های ساختار) تقریب زده و سپس ضرایب شکست مؤثر مدهای عرضی مورد نظر را به کمک آن‌ها تقریب می‌زنیم (روش تقریبی). این کار طراحی ضخامت لایه‌ها را برای ما آسان خواهد کرد. بعد از انجام طراحی اولیه به این روش، برای به دست آوردن ضخامت دقیق لایه‌های موجبر، شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی با استفاده از روش دوبعدی مستقیم (روش دقیق) تکرار خواهد شد. در تمامی محاسبات، برای سادگی شبیه‌سازی‌ها از تلفات درون ساختار موجبر ریزحلقه صرفه‌نظر شده است.

مشخصات کلی لایه‌های مختلف موجبر بازتابی براگ، شامل جنس ماده هر لایه و ضریب شکست آن طبق جدول ۱ انتخاب شده است. در این جدول، ($x_۱, x_۲, x_c$) غلظت نسبی آلومینیم در ترکیب $Al_xGa_{۱-x}As$ در هر لایه است. همچنین ($n_۱^{\omega}, n_۲^{\omega}, n_c^{\omega}$) ضرایب شکست هر لایه در طول‌موج هارمونی پایه و ($n_۱^{۲\omega}, n_۲^{۲\omega}, n_c^{۲\omega}$) نیز ضرایب شکست هر لایه در طول‌موج هارمونی دوم هستند. لایه پوششی اول، لایه پوششی دوم و لایه هسته به ترتیب با اندیس ۱، ۲ و c مشخص شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات کلی لایه‌های مختلف موجبر بازتابی براگ ربع‌موجی.

پارامترها	مقادیر
$x_۱, x_۲, x_c$	۰/۲۵، ۰/۸۵، ۰/۶۵
$n_۱^{\omega}, n_۲^{\omega}, n_c^{\omega}$	۳/۲۳۹، ۲/۹۵۵، ۳/۰۴۵
$n_۱^{۲\omega}, n_۲^{۲\omega}, n_c^{۲\omega}$	۳/۴۸۲، ۳/۰۹۲، ۳/۲۰۶

ابتدا با انتخاب شعاع ریزحلقه برابر با ۱۰ μm و استفاده از روش تقریبی مشاهده شد که شماره‌های مد کمانی هارمونی پایه و دوم به ترتیب برابر $m_p = ۱۲۰$ و

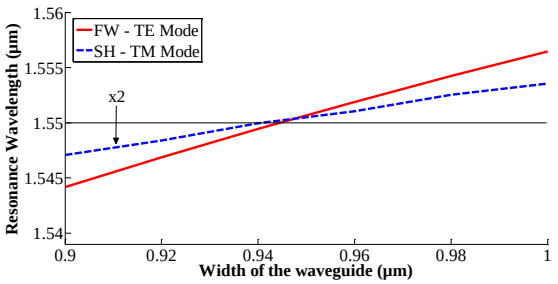
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

m_s = ۲۴۲ و ضخامت لایه‌های موجبر بازتابی براگ ربع‌موجی شامل t_c = ۳۲۴ nm، t_1 = ۱۰۷ nm و t_2 = ۲۳۰ nm برای ایجاد شرط تطبیق‌فاز و براگ مناسب می‌باشند. سپس با تنظیم کردن عرض ریزحلقه مشاهده شد که در عرض ۹۵۴ nm، همه شرایط تولید هارمونی دوم از طول‌موج ۱٫۵۵ µm در قطعه فراهم می‌شود.

با تکرار شبیه‌سازی‌ها به روش دقیق مشاهده گردید که با استفاده از همان ضخامت‌های به دست آمده از روش تقریبی و با تنظیم کردن عرض موجبر ریزحلقه در مقدار ۹۴۸ nm، شرایط تولید هارمونی دوم برقرار می‌گردد. با مقایسه کردن نتایج حاصل از این دو روش، قابلیت روش تقریبی در تسهیل طراحی موجبر تأیید می‌گردد.

در شکل ۳، با استفاده از روش دقیق، طول‌موج تشدید ریزحلقه طراحی شده برای شعاع ۱۰ µm براساس تابعی از عرض موجبر آن برای هارمونی پایه و دوم ترسیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که در نقطه تقاطع دو منحنی (W = ۹۴۸ nm و طول‌موج ۱٫۵۵۰۴ µm) تمام شرایط تولید هارمونی دوم برقرار است.

با تکرار طراحی به روش دقیق برای سه شعاع مختلف ۶، ۱۰ و ۲۰ میکرومتری مشاهده شد که بدون تغییر در ضخامت لایه‌ها و فقط با تنظیم شعاع ریزحلقه، امکان برقراری شرایط تولید هارمونی دوم وجود دارد. این نکته هنگام ساخت ریزحلقه‌های دلخواه از یک ویفر چندلایه بسیار مفید خواهد بود. در جدول ۲ عرض موجبر مناسب برای تولید هارمونی دوم و همچنین شماره مد کمانی هارمونی پایه و هارمونی دوم به ازای ضخامت لایه‌های یکسان و شعاع‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات طول‌موج تشدید ریزحلقه براساس تغییرات عرض موجبر در روش دقیق. به منظور مقایسه‌کردن آسان‌تر منحنی‌های تطبیق‌فاز، طول‌موج مربوط به هارمونی دوم در عدد ۲ ضرب شده است.

جدول ۲: پارامترهای طراحی موجبر ریزحلقه برای سه شعاع مختلف.

W (nm)	m_s	m_p	R (µm)
۱۱۸۴	۱۴۸	۷۳	۶
۹۴۸	۲۴۲	۱۲۰	۱۰
۹۱۴	۴۸۴	۲۴۱	۲۰

۵ – نتیجه‌گیری

در این مقاله به طور عددی احتمال استفاده از موجبر بازتابی براگ در ساختار ریزحلقه به منظور بهبود فرایند تولید هارمونی دوم بررسی شد. ساختار پیشنهادی از اثرات تشدید ریزحلقه در کنار خصوصیت پاشندگی قوی مدها در موجبرهای بازتابی براگ به صورت همزمان بهره می‌گیرد. برای یافتن مدهای مورد نظر و طراحی ساختار، روشی ساده کننده پیشنهاد شد که نتایج حاصل از آن به کمک روش مستقیم دوبعدی تأیید گردید. طبق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها، با یک لایه‌بندی یکسان می‌توان ساختار پیشنهادی را تنها با تنظیم عرض موجبر در شعاع‌های مختلف طراحی کرد.

مراجع

[۱] Helmy A. S., *Phase matching using Bragg reflection waveguides for monolithic nonlinear optics applications*, **Opt. Express** ۱۴ (۲۰۰۶) ۱۲۴۳-۱۲۵۲.

[۲] Das R. and Thyagarajan K., *Broadening of the phase-matching bandwidth in quasi-phase-matched second-harmonic generation using GaN-based Bragg reflection waveguide*, **Optics Letters** ۳۲ (۲۰۰۷) ۳۱۲۸-۳۱۳۰.

[۳] Bijlani B., Abolghasem P., and Helmy A. S., *Second harmonic generation in ridge Bragg reflection waveguides*, **Appl. Phys. Lett.** ۹۲ (۲۰۰۸) ۱۰۱۱۲۴.

[۴] Han J. B., Abolghasem P., Bijlani B. J., Helmy A. S., *Continuous-wave sum-frequency generation in AlGaAs Bragg reflection waveguides*, **Opt. Lett.** ۳۴ (۲۰۰۹) ۳۶۵۶-۳۶۵۸.

[۵] Han J. B., Abolghasem P., Kang D., Bijlani B. J., Helmy A. S., *Difference-frequency generation in AlGaAs Bragg reflection waveguides*, **Opt. Lett.** ۳۵ (۲۰۱۰) ۲۳۳۴-۲۳۳۶.

[۶] Dumeige Y. and Feron P., *Whispering-gallery-mode analysis of phase-matched doubly resonant second-harmonic generation*, **Phys. Rev. A** ۷۴ (۲۰۰۶) ۰۶۳۸۰۴.

[۷] Yang Z., Chak P., Bristow A. D., van Driel H. M., Iyer R., Aitchison J. S., Smirl A. L., and Sipe J. E., *Enhanced second-harmonic generation in AlGaAs microring resonators*, **Opt. Lett.** ۳۲ (۲۰۰۷) ۸۲۶–۸۲۸.

[۸] Gandomkar M., Ahmadi V., *Design and analysis of enhanced second harmonic generation in AlGaAs/AlOx microring waveguide*, **Opt. Express** ۱۹ (۲۰۱۱) ۹۴۰۸-۹۴۱۸.

[۹] West B. R. and Helmy A. S., *Properties of the quarter-wave Bragg reflection waveguide: theory*, **J. Opt. Soc. Am. B** ۲۳ (۲۰۰۶) ۱۲۰۷-۱۲۲۰.

[۱۰] Oxborrow M., *Traceable ۲-D Finite-Element Simulation of the Whispering-Gallery Modes of Axisymmetric Electromagnetic Resonators*, **IEEE Trans. Microwave Theory and Technique** ۵۵ (۲۰۰۷) ۱۲۰۹-۱۲۱۸.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]