

آشکارساز آستانه بلور فوتونی تمام نوری براساس اثر غیرخطی کر

حجت شریفی

گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان ، h.sharifi@vru.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک آشکار ساز آستانه تمام نوری بر مبنای ساختارهای بلور فوتونی طراحی و شبیه سازی شده است. در ساختار پیشنهادی از تشدیدگرهای حلقوی و همچنین اثر غیرخطی کر استفاده شده است. برای فراهم کردن مقادیر بزرگتر سطح آستانه، تعداد دو عدد از تشدیدگرها بصورت آبشاری پست سر هم قرار داده شده است. از روش تفاضل محدود در حوزه زمان و همچنین روش بسط امواج تخت برای شبیه سازی استفاده شده است. بیشترین توان مورد نیاز برای عملیات سویچینگ مقدار ۵ وات می باشد. کلید واژه- آشکار ساز آستانه، منطق آستانه، بلور فوتونی، دروازه منطقی تمام نوری، اثر غیرخطی کر

۱- مقدمه

مدارهای مجتمع نوری مطرح هستند. بلورهای فوتونی را می توان بصورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی ایجاد کرد اما به دلیل شباهت فرآیند ساخت بلورهای فوتونی دوبعدی با فرآیند ساخت مدارهای مجتمع الکترونیک مسطح، این ساختارها جذابیت بسیار زیادی پیدا کرده اند. این ساختارها بیشترین شانس را برای استفاده در طراحی و پیاده سازی افزارهای نوری سریع مانند موج برها، کاواکها، دروازه ها و سویچ های منطقی دارند [۷-۱۰]. با ایجاد نقص در ساختار شبکه بلور فوتونی کامل می توان موج برها و کاواک های بلور فوتونی را ایجاد که کاربردهای زیادی در مدارهای تمام نوری دارند. [۱۱ و ۱۲]. برای تنظیم مشخصات سویچ از اثر غیرخطی کر^۲ استفاده می شود که برای طراحی مدارهای تمام نوری مناسب است. اخیرا طراحی دروازه های منطقی بلور فوتونی توجه زیادی را به خود جلب کرده اند [۱۳-۱۷]. اما مهمترین مشکل آنها ورودی ها و خروجی های ناهمگن می باشد. به این معنی که ورودی ها و خروجی ها دارای مشخصات

با توجه به اینکه پیش بینی شده است که آینده مدارهای الکترونیک با محدودیت سرعت مواجه می شود، مدارهای مجتمع تمام نوری بعنوان یکی از بهترین روشهای جایگزین برای مواجه با این مساله مطرح می شوند. سویچ ها و دروازه های منطقی تمام نوری بلور فوتونی سریع از جمله اجزاء اساسی برای طراحی سیستم های پردازش اطلاعات و شبکه های نوری آینده می باشند [۱-۴].

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که در آنها ضریب شکست ماده بصورت متناوب می باشد که گاف فوتونی^۱ را فراهم می کنند-یک بازه فرکانسی که در محدوده آن موج الکترومغناطیس قابلیت انتشار ندارد و قابلیت کنترل و مهندسی مسیر حرکت نور را فراهم می کند [۵ و ۶]. بلورهای فوتونی به دلیل قابلیت متراکم سازی کلی بعنوان یک ساختار مناسب در

² Optical Kerr Effect

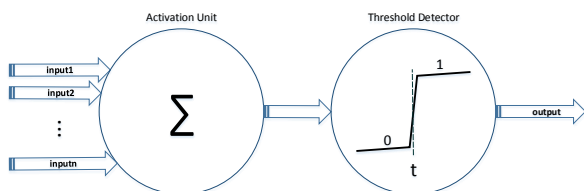
¹ Photonic Band gap

کرد. مفهوم کلی این روش طراحی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای ایجاد مدارهای تمام نوری با استفاده از منطق آستانه دو مرحله باید انجام شود. مرحله اول شامل واحد فعال‌سازی می‌باشد. مرحله دوم با اعمال خروجی مرحله قبل به یک آشکار ساز آستانه خروجی نهایی را ایجاد می‌کند. در واحد فعال‌سازی مجموع ورودی‌ها محاسبه می‌شود و خروجی با استفاده از یک آشکار ساز آستانه بدست خواهد آمد.

$$act = \sum_{i=1}^n in_i \quad (1)$$

$$z = \begin{cases} 0, & \text{if } ac < t \\ 1, & \text{if } ac \geq t \end{cases} \quad (2)$$

بطوریکه act ، z و t به ترتیب مقادیر فعال‌سازی، خروجی و سطح آستانه می‌باشند. در صورتیکه مقدار فعال‌سازی (مجموع ورودی‌ها) کمتر از مقدار سطح آستانه باشد، خروجی مقدار صفر و در غیر این صورت مقدار یک خواهد داشت.



شکل ۱. مفهوم کلی منطق آستانه

جدول درستی دروازه‌های منطقی AND و OR دو ورودی، AND سه ورودی و به ترتیب در جدول ۱، جدول ۲، جدول ۳ نشان داده شده‌اند. همانطور که از جدول‌ها مشخص است این توابع دارای الگوی منظمی در ورودی‌ها هستند و مقادیر سطح آستانه برای پیاده‌سازی آنها به ترتیب ۰.۵، ۱.۵، ۲.۵ و ۱.۵ می‌باشد. به راحتی می‌توان مقادیر کلی برای دروازه منطقی AND، OR و تابع اکثریت n ورودی با مقادیر سطح آستانه به ترتیب $0.5, n-0.5$ و $n/2$ را طراحی کرد.

برای طراحی توابع منطقی دقیق و کارا با استفاده از مفهوم منطق آستانه برخی نیازمندی‌ها برای استفاده در مدارهای

متفاوتی هستند. با استفاده مفهوم منطق آستانه می‌توان دروازه‌ها و توابع منطقی طراحی کرد که در آنها فرکانس ورودی‌ها و خروجی‌ها یکسان باشند

در این مقاله یک روش کارا برای طراحی آشکار ساز آستانه^۳ براساس بلور فوتونی غیرخطی پیشنهاد شده است. آشکار ساز آستانه، یک مولفه اساسی برای طراحی مدارات بر مبنای منطق آستانه می‌باشد. برای ساختار پیشنهادی از یک شبکه بلور فوتونی دوبعدی مربعی با میله‌های سیلیکون در هوا استفاده شده است. با کاربرد مواد غیرخطی در ساختار بلور فوتونی بسیاری از پدیده‌های جالب توجه از جمله پایداری دوسویه^۴ ایجاد می‌شود. در سیستم‌هایی که پایداری دوسویه را فراهم می‌کنند توان خروجی تابعی از توان ورودی می‌باشد. هنگامی که توان ورودی کم است، توان خروجی یک مقدار کمی از توان سیگنال ورودی می‌باشد در حالیکه با افزایش توان ورودی، توان خروجی در ابتدا به آرامی افزایش می‌یابد اما زمانیکه توان ورودی به یک مقدار مشخص برسد، توان خروجی به یکباره افزایش می‌یابد. این رفتار، اساس مفهوم منطق آستانه می‌باشد که بعنوان روش طراحی دروازه‌ها و توابع منطقی پیشنهاد شده است.

این مقاله به این صورت سازماندهی شده است که در قسمت ۲، مفهوم منطق آستانه بصورت اجمالی توضیح داده شده است. در قسمت ۳ ساختار سیستم بلور فوتونی مورد استفاده در طراحی توصیف شده است. روش طراحی و نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها در قسمت ۴ آورده شده است. در قسمت ۵ نتیجه گیری مقاله انجام شده است.

۲- منطق آستانه

برخی از عملیات منطقی را که به الگوی مقادیر ورودی وابسته نیستند مانند دروازه‌های منطقی (AND, OR)، سوییچ‌ها و توابع اکثریت را می‌توان با استفاده از روش منطق آستانه طراحی

³ Threshold detector

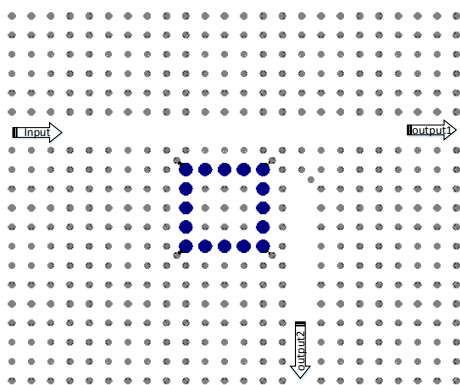
⁴ Bistability

فوتونی ساختار از روش بسط امواج تخت استفاده شده است و ساختار داری دو گاف فوتونی برای قطبش TM می‌باشد که بازه بزرگتر در محدوده $0.2823(a/\lambda)$ و $0.4172(a/\lambda)$ است.

موج‌ها مورد استفاده در این ساختار با حذف یک سطر از میله‌ها در ساختار بلور فوتونی دوبعدی ایجاد شده است. موج‌ها ورودی با یک تشدیدگر حلقوی غیرخطی تزویج شده است. با استفاده از این ساختار می‌توان پدیده پایداری دوسویه را مشاهده کرد که یک جنبه اساسی از مکانیزم سویچینگ مورد استفاده در این مقاله است. پدیده پایداری دوسویه یک حالت موثر برای سویچینگ نوری می‌باشد که باعث ایجاد حلقه پسماند^۵ می‌شود. ماده غیرخطی نانو کریستال‌های سیلیکون (Si-nc) که داری اثر کر می‌باشد، در تشدیدگر حلقوی نهفته شده است [۱۸ و ۱۹]. در موادی که دارای اثر غیرخطی کر هستند، ضریب شکست ماده متناسب با شدت سیگنال بصورت خطی تغییر می‌کند.

$$n = n_0 + n_2 I \quad (3)$$

در رابطه ۳ کمیت n_0 ، مقدار ضریب شکست در ناحیه خطی می‌باشد و n_2 و I نیز به ترتیب ضریب اثر غیرخطی کر و شدت نور می‌باشند. فرض شده است که ناحیه غیرخطی نقص دارای ضریب شکست 1.5 و ضریب غیرخطی $10^{-16} m^2 / W$ است.



شکل ۲. ساختار اصلی پیشنهادی برای طراحی افزاره‌های منطقی

مجموع با مقیاس بزرگ وجود دارد. اول اینکه جهت کاهش توان مورد نیاز، یک اتصال بهبود داده شد ضروری می‌باشد. دوم اینکه برای کاهش اثرات نویز و همچنین کاهش توان مورد نیاز برای عملییت سویچینگ به یک آشکار ساز آستانه دقیق نیاز است. در آخر یک مکانیزم دقیق و کارا برای جابجایی مقدار سطح آستانه به مقادیر مختلف در آشکار ساز آستانه برای طراحی توابع مختلف نیاز است.

جدول ۱. جدول درستی دوازده منطقی AND دو ورودی

x	y	$\sum in$	AND(x,y)
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	2	1

$t=1.5$

جدول ۲. جدول درستی دوازده منطقی OR دو ورودی

x	y	$\sum in$	OR(x,y)
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	2	1

$t=0.5$

جدول ۳. جدول درستی دوازده منطقی AND سه ورودی

$\sum in$	AND(x, y, z)
0	0
1	0
2	0
3	1

$t=2.5$

۳- ساختار پیشنهادی

ساختار اصلی برای طراحی ادوات منطقی بر مبنای منطق آستانه پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. این ساختار یک شبکه مربعی بلور فوتونی دوبعدی میله‌های سیلیکون در هوا می‌باشد. ضریب شکست ماده سیلیکون مورد استفاده در شبیه‌سازی ساختار برای طول موج‌های اطراف ۱۵۵۰ نانومتر برابر 3.46 می‌باشد که یک گاف فوتونی قابل توجه ارائه می‌دهد و همچنین شعاع میله‌ها برابر $0.2a$ می‌باشد. برای محاسبه گاف

⁵ Hysteresis loop

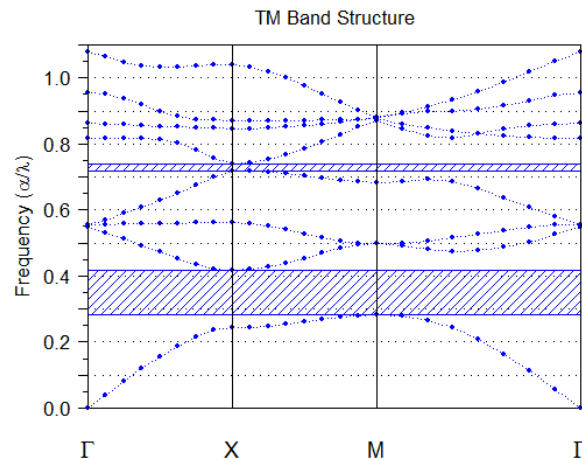
می کند و باعث شیفت فرکانسی مشخصه انتقال آن می شود. به این صورت که با اعمال شدت نور بیشتر، فرکانس تشدید به سمت چپ جابجا می شود و این رفتار اساس پدیده پایاری دوسویه می باشد که برای طراحی آشکار ساز آستانه ضروری است. برای این منظور فرکانس نور تابشی را برابر با فرکانس تشدید در نظر می گیریم. وقتی که شدت نور تابشی کم باشد نور در تشدیدگر تزویج می شود و به خروجی ۲ منتقل می شود و با افزایش شدت نور سیگنال ورودی، مشخصه انتقال به سمت چپ جابجا می شود. بنابراین مقداری از نور ورودی از موج بر ورودی عبور می کند و به خروجی می رسد. نسبت انتقال سویچ در مقابل توان ورودی در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش شدت نور سیگنال ورودی، نسبت انتقال به سرعت افزایش پیدا می کند. بنابراین رفتار آشکار ساز آستانه با استفاده از این ساختار می تواند ایجاد شود.

۴- طراحی آشکار ساز آستانه

بلورهای فوتونی بعنوان یک ساختار مناسب برای طراحی مدارات مجتمع تمام نوری مطرح هستند. در این قسمت یه مکانیزم کارا برای طراحی یک واحد آشکار ساز آستانه معرفی شده است. در اینجا تعداد دو عدد از تشدیدگرهای معرفی شده در قسمت قبل بصورت آبشاری پشت سر هم قرار داده شده اند که در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش شدت نور، ضریب شکست ماده غیرخطی تغییر می کند و فرکانس تشدید تشدیدگر جابجا می شود. افزایش شدت نور ورودی باعث جابجا شدن فرکانس تشدید تشدیدگر اول به سمت چپ می شود و بنابراین مقداری از نور ورودی از موج بر ورودی عبور خواهد کرد. اما تشدیدگر دوم جلوی عبور نور جهت رسیدن به خروجی را سد می کند. بنابراین شدت نوری بیشتری برای عبور نور از تشدیدگر بعدی نیاز است و از این رو با استفاده از این ساختار مقدار سطح توان آستانه به سمت بالا جابجا می شود (شکل ۷). شبیه سازی ها با روش تفاضل محدود در حوزه زمان دوبعدی انجام شده است. قرار دادن نواحی تشدیدگر حلقوی بصورت آبشاری نه تنها باعث جابجایی سطح توان آستانه به مقادیر بزرگتر مناسب برای سویچ می شود بلکه باعث ایجاد شیب تند در انتقال از مقدار کم به زیاد نیز می شود که در نتیجه کارایی آشکار ساز آستانه نیز بهبود

نمودار مشخصه انتقال موج بر خروجی با اعمال روش شبیه سازی DFT محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده است. فرکانس $0.350(a/\lambda)$ را بعنوان فرکانس سیگنال ورودی در نظر گرفته شده است که همانطور که مشخص است در این فرکانس، میزان انتقال توان به خروجی ۱ کمترین مقدار و خروجی ۲ بیشترین مقدار را دارند.

شبیه سازی ها با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان انجام شده است و ناحیه شبیه سازی توسط یک ناحیه PML^۶ با ضخامت a' احاطه شده است تا نور تابشی را جذب کند و همچنین مقاومت ثابت برای موج داشته باشد و از بازتاب های ناخواسته اجتناب شود. a' مقدار ثابت شبکه و برابر 539 نانومتر می باشد و همچنین اندازه مش در شبکه بلور فوتونی برای شبیه سازی $a/20$ در نظر گرفته شده است.



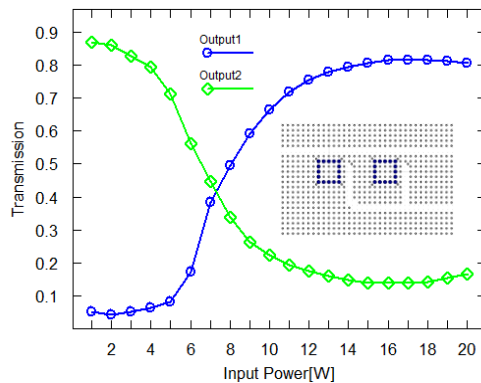
شکل ۳. ساختار باند یک شبکه بلور فوتونی دوبعدی میله های سیلیکون در هوا

آشکار ساز آستانه یک عنصر اساسی در طراحی دروازه ها و توابع منطقی می باشد که توسط روش منطق آستانه پیاده سازی می شوند. عملکرد دقیق توابع منطقی تا حد زیادی به کارایی آشکار ساز آستانه وابسته است. ماده غیرخطی در ناحیه تشدیدگر حلقوی با افزایش شدت نور منتشر شده ضریب شکست آن تغییر

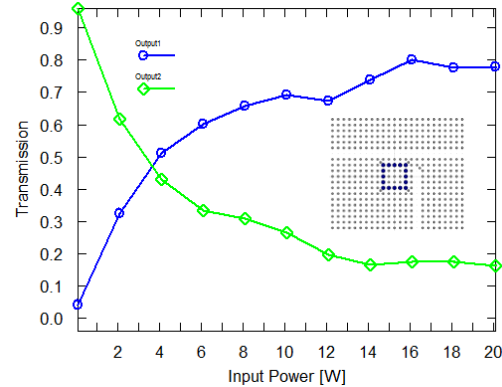
⁶ Perfectly Matched Layer

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

می‌یابد.



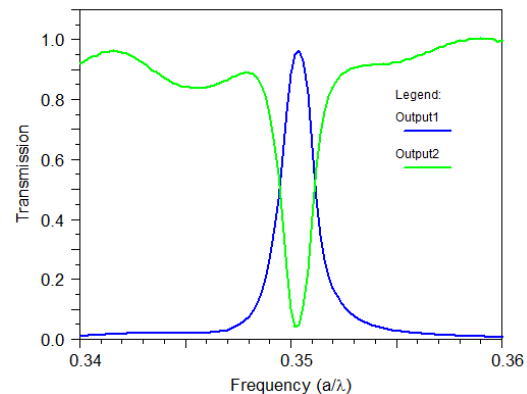
شکل ۷. نمودار مشخصه نسبت انتقال در مقابل توان ورودی برای آشکار ساز آستانه طراحی شده در شکل ۶



شکل ۴. نمودار نسبت انتقال در مقابل توان ورودی برای ساختار

۵- نتیجه گیری

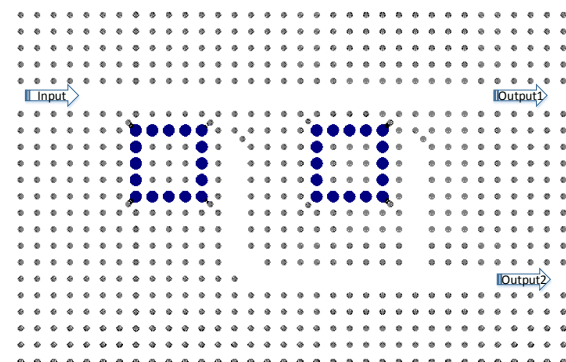
در این مقاله یک روش کلی برای طراحی مدارات تمام نوری بلور فوتونی بر مبنای مفهوم منطق آستانه معرفی شده است. یکی از مولفه‌های اساسی در این روش طراحی، آشکار ساز آستانه می‌باشد که در این مقاله با قرار دادن دو عدد تشدیدگر غیر خطی پشت سر هم به صورت آبشاری طراحی شده است. بیشترین توان مورد نیاز برای عملیات سوئیچینگ ۵ وات می‌باشد و همچنین زمان انتقال در آشکار ساز آستانه پیشنهادی برابر ۳ پیکو ثانیه می‌باشد



شکل ۵. مشخصه انتقال توان به خروجی‌ها برای ساختار پیشنهادی اصلی

مراجع

- [1] Lee, El-Hang. "Micro/nano-scale optical network: A new challenge toward next generation." *Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on*. Vol. 4. IEEE, 2008.
- [2] Robinson, S., and R. Nakkeeran. "A bandpass filter based on 2D circular photonic crystal ring resonator." *Wireless And Optical Communications Networks (WOCN), 2010 Seventh International Conference On*. IEEE, 2010.
- [3] Bchir, Riadh, Afrah Bardaoui, and Hatem Ezzaouia. "Design of silicon-based two-dimensional photonic integrated circuits: XOR gate." *Optoelectronics, IET* 7.1 (2013): 25-29.
- [4] Yang, Yi-Pin, et al. "Binary Operating in All-Optical Logic Gates Based on Photonic Crystals." *2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control*. 2012.



شکل ۶. پیکربندی مناسب برای بدست آوردن مقدار سطح آستانه $P_t = 7/5$ وات با قرار دادن دو عدد از تشدیدگرها پشت سر هم بصورت آبشاری

- [5] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D.,: Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton (1995).
- [6] Noda, Susumu, and Toshihiko Baba, eds. *Roadmap on photonic crystals*. Vol. 1. Springer Science & Business Media, 2003.
- [7] Li, Xiao-qiang, and Yi Xu. "Optical sensing by using photonic crystal based Mach-Zehnder interferometer." *Optics Communications* 301 (2013): 7-11.
- [8] Fasihi, Kiazand, and Shahram Mohammadnejad. "Highly efficient channel-drop filter with a coupled cavity-based wavelength-selective reflection feedback." *Optics express* 17.11 (2009): 8983-8997.
- [9] Shinya, Akihiko, et al. "All-optical flip-flop circuit composed of coupled two-port resonant tunneling filter in two-dimensional photonic crystal slab." *Optics Express* 14.3 (2006): 1230-1235.
- [10] Bao, Junjie, et al. "All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator." *Optics Communications* 329 (2014): 109-112.
- [11] Sukhoivanov, Igor A., and Igor V. Guryev. *Photonic crystals: physics and practical modeling*. Vol. 152. Springer, 2009.
- [12] Johnson, Steven G., et al. "Linear waveguides in photonic-crystal slabs." *Physical Review B* 62.12 (2000): 8212.
- [13] Zhu, Zhi-Hong, et al. "High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals." *Optics Express* 14.5 (2006): 1783-1788.
- [14] Jung, Young Jin, et al. "Reconfigurable all-optical logic AND, NAND, OR, NOR, XOR and XNOR gates implemented by photonic crystal nonlinear cavities." *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*. Optical Society of America, 2009.
- [15] Andalib, P., and N. Granpayeh. "All-optical ultra-compact photonic crystal NOR gate based on nonlinear ring resonators." *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11.8 (2009): 085203.
- [16] Danaie, Mohammad, and Hassan Kaatuzian. "Design and simulation of an all-optical photonic crystal AND gate using nonlinear Kerr effect." *Optical and Quantum Electronics* 44.1-2 (2012): 27-34.
- [17] Bai, Jibo, et al. "Photonic not and nor gates based on a single compact photonic crystal ring resonator." *Applied optics* 48.36 (2009): 6923-6927.
- [18] Prakash, G. Vijaya, et al. "Nonlinear optical properties of silicon nanocrystals grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition." *Journal of applied physics* 91.7 (2002): 4607-4610.
- [19] Koos, C., et al. "Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing." *Optics Express* 15.10 (2007): 5976-5990.