

# طراحی سوئیچ تمام نوری با استفاده از آثار غیرخطی در تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری

امیر کوثری<sup>۱</sup>، وحید احمدی<sup>۲</sup> و غفار درویش<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، kousari@bojnourdiau.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه مهندسی الکترونیک، v\_ahmadi@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، darvish\_gh@srbiau.ac.ir

چکیده - در این مقاله نتایج حاصل از شبیه‌سازی تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری ارائه شده است. این نتایج برای تشدیدگر پیچهای متشکل از ۲ دور یکنواخت و با فرض این‌که نور ورودی، به صورت موج پیوسته اعمال شود، بدست آمده‌اند. در ابتدا با صرف نظر از آثار غیرخطی، شبیه‌سازی به کمک روش عددی رانگ-کوتای مرتبه ۴ انجام شده و در طیف خروجی بدست آمده از میکروپیچ، آثار تشدیدگری مشاهده شده است. سپس شبیه‌سازی این ساختار با در نظر گرفتن اثر غیرخطی شامل SPM و XPM و با اعمال توان مناسب نور ورودی تکرار شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که این آثار، چگونه باعث جابجایی و تغییر طیف خروجی میکروپیچ می‌شوند. در نهایت با استفاده از اثر تشدیدگری و اثر غیرخطی SPM، عمل کلیدزنی در میکروپیچ شبیه‌سازی شده است. کلید واژه- تشدیدگر پیچهای، میکروتار نوری، آثار غیر خطی، کلید نوری.

ای نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۲-۱۴]. اهمیت آثار غیرخطی در این نوع از تشدیدگرها از آنجا ناشی می‌شود که سطح مقطع میکروتار بسیار کوچک بوده و میدان‌های محو شونده قدرتمندی مخصوصاً در حالت‌های تشدید در آن به وجود می‌آیند. در سال‌های اخیر کاربردهای بسیاری از خواص غیرخطی میکروتار نوری از جمله تولید طیف ابرپیوستار (supercontinuum) [۱۵]، تغییر شکل پالس [۱۶]، تولید هارمونیک دوم [۱۷، ۱۸] و تولید هارمونیک سوم [۱۹، ۲۰] ارائه شده است.

در این مقاله، ابتدا تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری مدل-سازي شده و سپس با استفاده از روابط حاصل از آن، شبیه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی در دو بخش جداگانه، شامل آثار خطی و غیر خطی انجام پذیرفته و در نهایت یک کلید نوری به عنوان کاربردی از آثار غیرخطی در تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری طراحی می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی

ساده‌ترین حالت میکرو تشدیدگر پیچهای که فقط از ۲ دور تشکیل شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل  $S$  طول هر دور (محیط میکروپیچ)،  $s$  مختصات در امتداد محور تار،  $(x, y)$  مختصات در امتداد عمود بر محور تار و  $p(s)$  فاصله بین دورها است. با در نظر گرفتن  $s_1$  به عنوان نقطه شروع هر دو دور، مسیر هر یک از دورها، با استفاده از رابطه

$$S_1 < S < S_1 + S$$

مشخص می‌شود.

## ۱- مقدمه

میکروتار نوری در واقع یک تار نوری بوده که قطر آن کوچکتر یا در حدود طول موج نور منتشر شونده در آن است. خواص جالب و متعدد میکروتار باعث شده‌اند که به عنوان یک عنصر مناسب در ساخت انواع تشدیدگرهای نوری مورد استفاده قرار گیرد. برخی از این خواص عبارتند از: هزینه ساخت کم، تلفات ناچیز، انعطاف‌پذیری و میدان‌های محوشونده بزرگ. به دلیل این خواص جالب، میکروتار نوری در بسیاری از افزارها و سامانه‌های نوری از جمله سنسورها [۱]، فیلترها [۲]، لیزرها [۳] و تقویت کننده‌ها [۴] مورد استفاده قرار گرفته است.

تا کنون سه نوع تشدیدگر با استفاده از میکروتار نوری ساخته شده که عبارتند از: میکرو تشدیدگرهای حلقوی [۵]، گره‌ای [۶] و پیچهای [۱، ۴، ۷-۱۰]. تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری (میکروپیچ) متشکل از میکروتاری است که به دور یک میله دی‌الکتریک (که در این مقاله هوا فرض شده است) با ضریب شکستی کمتر از ضریب شکست میکروتار پیچیده شده باشد. در عمل، برای ساخت این نوع تشدیدگر، میکروتار را به دور یک میله قابل انحلال پیچیده و پس از حل شدن میله، میکروپیچ بدست می‌آید [۱۱]. این تشدیدگر در سال ۲۰۰۴ معرفی شده [۸] و خواص خطی آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چگونگی ساخت این گونه از میکروتشدیدگرها نیز در [۷، ۹] بیان شده است. همچنین برخی از آثار غیرخطی تشدیدگرهای پیچ-

در این معادله  $\lambda$  طول موج سیگنال و  $n_{eff}$  ضریب شکست موثر میکروتار بوده و مقدار آن با توجه به آثار غیر خطی که در ادامه بررسی می‌شوند، تعیین می‌شود.

## ۲-۲- آثار غیر خطی

غیرخطی بودن ضریب شکست ماده باعث ایجاد اثر غیرخطی کر (Kerr) شده و به کمک رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$n_{eff} = n_0 + n'.I \quad (5)$$

در این رابطه  $n_{eff}$  ضریب شکست موثر،  $n_0$  ضریب شکست خطی میکروتار،  $n'$  ضریب شکست غیرخطی ماده با واحد  $m^2/W$  بوده و  $I$  شدت میدان است. ویژگی‌های غیرخطی تار نوری را می‌توان با بکارگیری پارامتر غیرخطی  $\gamma$  توصیف کرد [۲۱]:

$$\gamma = \frac{n'v}{c A_{eff}} = \frac{2\pi n'}{\lambda A_{eff}} \quad (6)$$

در این رابطه  $c$  سرعت نور،  $v$  فرکانس نور و  $A_{eff}$  سطح مقطع موثر مد نور هدایت شده است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$A_{eff} = \pi w^2 = \frac{\pi a^2}{\ln(V)} \quad (7)$$

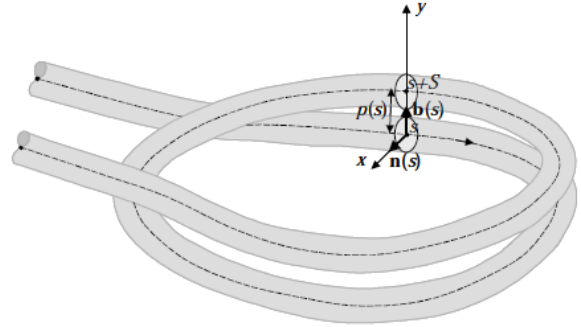
اندازه باریکه نوری،  $a$  شعاع میکروتار و  $V$  پارامتر نرمالیزه فرکانسی (normalized frequency parameter) است که تعیین کننده حداکثر تعداد مدهای قابل انتشار در تار نوری بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8)$$

$k_0$  عدد موج،  $n_1$  و  $n_2$  ضرایب شکست هسته و پوسته تار نوری هستند. به منظور در نظر گرفتن اثرات غیرخطی در میکروپیچه، باید معادلات تزویج ساده شده (۲) را با اضافه کردن جمله غیرخطی اصلاح کنیم. در این صورت روابط تزویج مدی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی برای پیچه‌ای با دو دور، به شکل زیر در خواهند آمد:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(s)}{ds} = ik A_2(s) - \alpha A_1(s) + i\gamma |A_1|^2 A_1 \\ \frac{dA_2(s)}{ds} = ik A_1(s) - \alpha A_2(s) + i\gamma |A_2|^2 A_2 \end{cases} \quad (9)$$

در این معادله جمله  $i\gamma |A|^2 A$  مربوط به اثر غیرخطی مدولاسیون فاز خودی (SPM) است. در صورتی که همراه با سیگنال اصلی، پمپ نیز به داخل میکروپیچه اعمال شود، باید در معادلات اثر غیرخطی مدولاسیون فاز متقابل (XPM) را نیز در نظر گرفت [۲۱]:



شکل ۱- میکرو تشدیدگر پیچه‌ای با دو دور تزویج شدگی

## ۱-۲- معادلات تزویج

معادلات تزویج برای انتشار نور در این میکرو تشدیدگر پیچه‌ای با فرض اعمال موج پیوسته (Continues wave) در ورودی و بدون در نظر گرفتن آثار غیرخطی عبارتند از [۸]:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(s)}{ds} = i(\Delta\beta) A_1(s) + ik A_2(s) - \alpha A_1(s) \\ \frac{dA_2(s)}{ds} = i(\Delta\beta) A_2(s) + ik A_1(s) - \alpha A_2(s) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$$

$A_k$  دامنه پوش میدان الکتریکی با تغییرات آهسته در دور  $k$ ام در فاصله  $s$  از مسیر دور میکروپیچه،  $\beta$  ثابت انتشار نور،  $\alpha$  تلفات و  $\kappa$  ثابت تزویج بین دورهای مجاور است. ثابت تزویج  $\kappa$  به پارامترهایی از قبیل طول موج نور، قطر میکروتار و فاصله بین دورهای مجاور وابسته است [۴، ۸]. در یک میکروپیچه یکنواخت (قطر میکروتار ثابت)، ثابت انتشار تمامی دورهای میکروپیچه برابر بوده و از این رو داریم:  $\Delta\beta = 0$ . بدین ترتیب معادلات تزویج ساده شده بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(s)}{ds} = ik A_2(s) - \alpha A_1(s) \\ \frac{dA_2(s)}{ds} = ik A_1(s) - \alpha A_2(s) \end{cases} \quad (2)$$

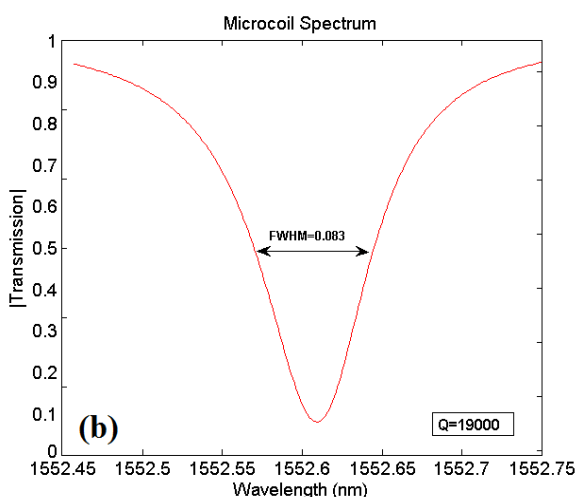
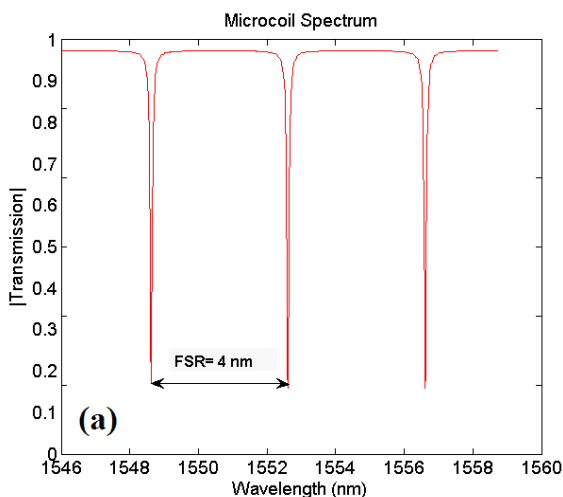
شرایط مرزی برای حل معادله (۲) عبارتند از:

$$\begin{cases} A_1(0) = I_0 \\ A_2(0) = A_1(S).e^{i\beta.S} \end{cases} \quad (3)$$

$I_0$  دامنه نور ورودی به میکروپیچه (ابتدای دور اول) است. به دلیل پیوستگی شدت میدان، دامنه نور در ابتدای دور دوم ( $A_2(0)$ ) برابر با دامنه نور در انتهای دور اول ( $A_1(S)$ ) بوده و فقط فاز آن مقدار متفاوتی دارد. ثابت انتشار که در تعیین این اختلاف فاز نقش دارد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{2\pi.n_{eff}}{\lambda} \quad (4)$$

شکل ۲- b یکی از دره‌های طیف عبور میکروپیچ (شکل ۲- a) را با بزرگنمایی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در طول موج تقریباً ۱۵۵۲.۶ نانومتر خروجی میکروپیچ به حداقل مقدار خود می‌رسد. در این حالت نور در داخل میکروپیچ به دام افتاده و نمی‌تواند خارج شود. در واقع در این طول موج، نور به صورت پیاپی بین دوره‌های اول و دوم میکروپیچ در گردش است و در نهایت بر اثر تلفات میکروپیچ، شدت آن کاهش می‌یابد. البته در این حالت که تشدید نامیده می‌شود، به علت تداخل سازنده موج تزویج شده با موج انتشاری در دور مجاور، شدت نور در داخل میکروپیچ به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش شدت نور در داخل میکروپیچ، باعث تشدید اثر غیرخطی کبر شامل SPM و XPM شده که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۲- a) طیف عبور یک میکروپیچ با ۲ دور و (b) بزرگنمایی یکی از دره‌های طیف عبور

به منظور در نظر گرفتن اثر غیر خطی کبر کافیت شدت میدان را با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در طول میکروپیچ داشته و از معادله (۷)، مقدار ضریب شکست موثر را در هر

$$\begin{cases} \frac{dA_{1,s}(s)}{ds} = i\kappa_s A_{2,s}(s) - \alpha A_{1,s}(s) \\ \quad + i\gamma (|A_{1,s}|^2 + 2|A_{1,p}|^2) A_{1,s} \\ \frac{dA_{2,s}(s)}{ds} = i\kappa_s A_{1,s}(s) - \alpha A_{2,s}(s) \\ \quad + i\gamma (|A_{2,s}|^2 + 2|A_{2,p}|^2) A_{2,s} \end{cases} \quad (10)$$

اندیس‌های  $s$  و  $p$  به ترتیب برای امواج سیگنال و پمپ بکار رفته و جمله  $i\gamma 2|A_p|^2 A_s$  مربوط به اثر XPM است.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

ابتدا طیف خروجی میکروپیچ، بدون در نظر گرفتن آثار غیرخطی شبیه‌سازی می‌شود و در ادامه، آثار غیرخطی نیز در نظر گرفته خواهد شد. معادلات تزویج ساده شده (۲) را می‌توان با صرف نظر از تلفات جزئی میکروتار، به روش تحلیلی حل نمود [۸]. اما با اضافه شدن آثار غیرخطی و در نظر گرفتن تلفات، فقط به کمک روش‌های عددی قابل حل هستند. در این مقاله شبیه‌سازی‌ها به کمک الگوریتم رانگ-کوتا (Runge-Kutta) مرتبه چهار انجام شده است. نتایج حاصل از حل معادلات تزویج ساده شده (۲) برای میکروپیچ‌های با ۲ دور یکنواخت بر اساس پارامترهای جدول ۱ در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی طیف عبور

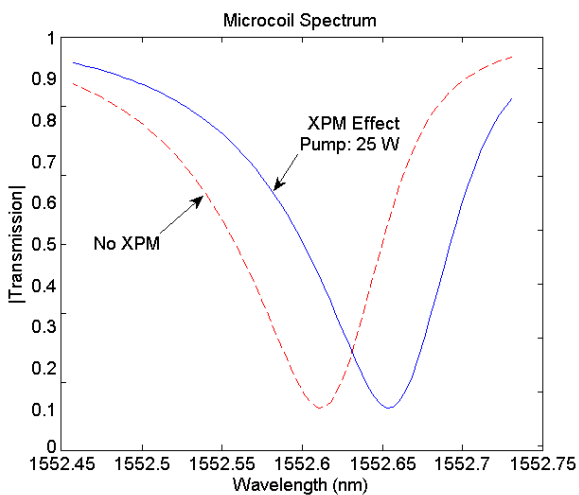
علامت اختصاری	کمیت	مقدار	میکروپیچ
D	قطر میکروتار	۱ $\mu\text{m}$	
$\kappa$	ضریب تزویج بین دو دور مجاور میکروپیچ	$8000 \text{ m}^{-1}$	
$\alpha$	تلفات نور درون میکروتار	$0.07 \text{ cm}^{-1}$	
S	محیط میکرو پیچ (طول یک دور)	$416 \mu\text{m}$	
$\Delta s$	طول هر گام	$0.1 \mu\text{m}$	
$P_{in}$	توان نور ورودی	۲۵ mW	
$n_0$	ضریب شکست خطی میکروتار	۱/۴۵	

شکل ۲- a) طیف عبور میکروپیچ را نشان می‌دهد که بر اساس آن، مشخصات محاسبه شده این تشدیدگر عبارتند از:  $FWHM=0.083 \text{ nm}$ ،  $FSR=4 \text{ nm}$  با استفاده از رابطه

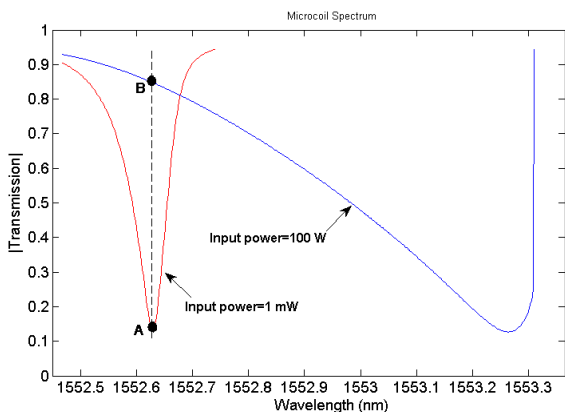
$$Q = \frac{\lambda}{FWHM}$$

ضریب کیفیت  $Q=19000$  بدست خواهد آمد.

توان در شکل ۵ مشاهده کرد. نقطه A طول موج تشدید میکروپیچ به ازای توان ورودی  $P = 1 \text{ mW}$  است، در حالی که نقطه B در همین طول موج اما به ازای توان ورودی  $P = 100 \text{ W}$  بدست آمده است. نقطه A را می‌توان به عنوان "۰" منطقی و نقطه B را به عنوان "۱" منطقی در نظر گرفت. بنابراین اگر طول موج نور ورودی بگونه‌ای تنظیم شود که میکروپیچ در حالت تشدید قرار بگیرد، با تغییر توان نور به مقدار مناسب (برای تحریک اثر غیرخطی SPM)، عمل کلیدزنی (Switching) رخ می‌دهد. به عبارت دیگر در طول موج تشدید میکروپیچ اگر توان نور ورودی کم باشد، ضریب عبور بسیار کم بوده (نزدیک به صفر) و اگر توان نور ورودی بیش از مقدار مشخصی باشد، ضریب عبور نزدیک به مقدار یک است. نمودار تغییرات ضریب عبور میکروپیچ به ازای تغییرات توان نور ورودی در شکل ۶ نشان داده شده و نقاط متناظر A و B نیز در این شکل مشخص شده‌اند.

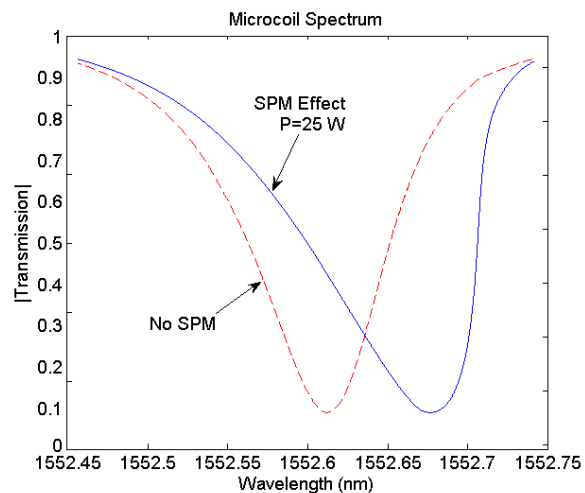


شکل ۴- طیف عبور میکروپیچ در حضور اثر غیرخطی XPM



شکل ۵- جابجایی طیف عبور میکروپیچ با اعمال نور ورودی با ۲ توان مختلف و مشاهده اثر کلیدزنی

قسمت از میکروپیچ محاسبه کنیم. با در نظر گرفتن  $n_0 = 1.45$  برای میکروتار سیلیکایی در حدود طول موج  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  و همچنین  $n_2 = 2.7 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2 / \text{W}$  به عنوان ضریب شکست غیرخطی، پارامتر غیرخطی  $\gamma$  طبق معادله (۵) محاسبه می‌شود. به منظور بررسی اثر غیرخطی SPM در میکروپیچ، معادلات تزویج شده (۸) طبق همان پارامترهای جدول ۱ و با مقدار  $\gamma = 0.15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  و توان نور ورودی  $P = 25 \text{ W}$  شبیه‌سازی شده و نتیجه آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جابجایی قرمز طیف به دلیل اثر غیرخطی SPM رخ داده و به دلیل وجود شدت میدان قابل ملاحظه در طول موج تشدید (۱۵۵۲.۶ نانومتر) و طول موج‌های مجاور آن، این اثر غیرخطی نیز با شدت بیشتری در آن ناحیه از طیف ظاهر شده است.

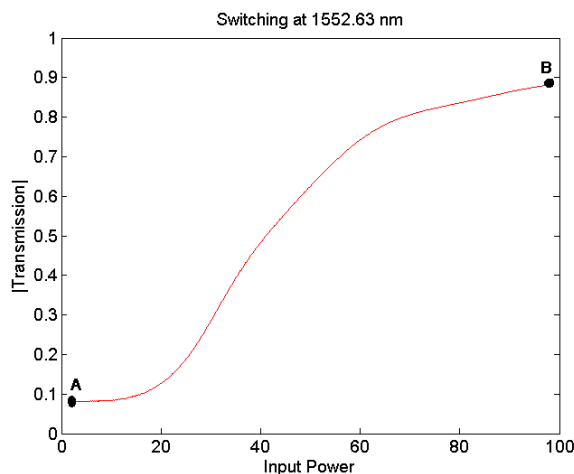


شکل ۳- طیف عبور میکروپیچ در حضور اثر غیرخطی SPM

شبیه‌سازی اثر غیرخطی XPM در میکروپیچ نیز به کمک معادلات تزویج (۱۰) و با اعمال پمپ نوری با توان ۲۵ وات انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی، توان ورودی سیگنال ۲۵ میلی‌وات بوده که قادر به ایجاد اثر غیرخطی SPM نیست. شکل ۴ جابجایی قرمز طیف میکروپیچ را به دلیل اثر XPM نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، این جابجایی قرمز در سراسر طیف میکروپیچ به صورت یکنواخت رخ داده است. جابجایی یکنواخت طیف حاصل از اثر XPM به این علت است که شدت نور پمپ در تمامی طول موج‌های سیگنال مقداری ثابت بوده و در نتیجه تغییر مقدار ضریب شکست نیز ثابت است.

اثر تشدیدگری میکروپیچ باعث می‌شود که در بعضی طول موج‌ها (طول موج‌های تشدید و پیرامون آن) شدت نور عبوری به شدت کاهش یابد. از طرفی طیف خروجی میکروپیچ را می‌توان به کمک آثار غیرخطی جابجا نمود. نمونه‌ای از این جابجایی

- [4] Arjmand, M., V. Ahmadi, and M. Karimi, *Wavelength-Selective Optical Amplifier Based on Microfiber Coil Resonators*. Lightwave Technology, Journal of, 2012. **30**(16): p. 2596-2602.
- [5] Sumetsky, M., et al., *The Microfiber Loop Resonator: Theory, Experiment, and Application*. Journal of Lightwave Technology, 2006. **24**(1): p. 242.
- [6] Xiao, L. and T.A. Birks, *High finesse microfiber knot resonators made from double-ended tapered fibers*. Optics Letters, 2011. **36**(7): p. 1098-1100.
- [7] Fei, X. and G. Brambilla, *Manufacture of 3-D Microfiber Coil Resonators*. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007. **19**(19): p. 1481-1483.
- [8] Sumetsky, M., *Optical fiber microcoil resonators*. Optics Express, 2004. **12**(10): p. 2303-2316.
- [9] Sumetsky, M., *Basic Elements for Microfiber Photonics: Micro/Nanofibers and Microfiber Coil Resonators*. Journal of Lightwave Technology, 2008. **26**(1): p. 21-27.
- [10] Tsung-Han, S. and L.A. Wang, *A Two-Layer Microcoil Resonator With Very High Quality Factor*. Photonics Technology Letters, IEEE, 2014. **26**(6): p. 535-537.
- [11] Brambilla, G., et al., *Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications*. Advances in Optics and Photonics, 2009. **1**(1): p. 107-161.
- [12] Broderick, N.G., *Optical snakes and ladders: dispersion and nonlinearity in microcoil resonators*. Opt Express, 2008. **16**(20): p. 16247-54.
- [13] Broderick, N.G.R. and T.T. Ng, *Theoretical Study of Noise Reduction of NRZ Signals Using Nonlinear Broken Microcoil Resonators*. Photonics Technology Letters, IEEE, 2009. **21**(7): p. 444-446.
- [14] Lee, T., N.G.R. Broderick, and G. Brambilla, *Nonlinear polarisation effects in optical microcoil resonators with fibre twist and birefringence*. Optics Communications, 2012. **285**(23): p. 4670-4676.
- [15] Leon-Saval, S., et al., *Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides*. Optics Express, 2004. **12**(13): p. 2864-2869.
- [16] Coillet, A., G. Vienne, and P. Grelu, *Potentialities of glass air-clad micro- and nanofibers for nonlinear optics*. Journal of the Optical Society of America B, 2010. **27**(3): p. 394-401.
- [17] Lægsgaard, J., *Theory of surface second-harmonic generation in silica nanowires*. Journal of the Optical Society of America B, 2010. **27**(7): p. 1317-1324.
- [18] Richard, S., *Second-harmonic generation in tapered optical fibers*. Journal of the Optical Society of America B, 2010. **27**(8): p. 1504-1512.
- [19] Lee, T., N.G.R. Broderick, and G. Brambilla, *Resonantly enhanced third harmonic generation in microfiber loop resonators*. Journal of the Optical Society of America B, 2013. **30**(3): p. 505-511.
- [20] Lee, T., et al., *Broadband third harmonic generation in tapered silica fibres*. Optics Express, 2012. **20**(8): p. 8503-8511.
- [21] Agrawal, G.P., *Nonlinear Fiber Optics*. 2007, Boston: Academic Press.



شکل ۶- تغییرات ضریب عبور میکروپیچ به حساب توان نور ورودی

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج حاصل از شبیه سازی یک تشدیدگر پیچهای میکروتار نوری شامل ۲ دور یکنواخت ارائه شده است. ابتدا با صرف نظر از آثار غیرخطی، شبیه سازی به کمک روش عددی رانگ- کوتای مرتبه ۴ انجام شده و طیف خروجی بدست آمده از میکروپیچ، نشان دهنده اثر تشدیدگری این قطعه نوری است. سپس شبیه سازی با در نظر گرفتن اثر غیرخطی کبر شامل SPM و XPM و اعمال ورودی با توان نوری مناسب تکرار شد و نتایج بدست آمده نشان داد که این آثار چگونه می توانند باعث جابجایی و تغییر طیف عبور میکروپیچ شوند. در نهایت با استفاده از اثر تشدیدگری و اثر غیرخطی SPM، عمل کلیدزنی در میکروپیچ شبیه سازی شد. کلیه شبیه سازی ها با فرض اعمال امواج پیوسته برای نورهای پمپ و سیگنال انجام شده اند، بنابراین نمی توان در مورد حالت گذرا و سرعت کلیدزنی میکروپیچ بحث کرد. هر چند به نظر می رسد به علت آنی (لحظه ای) بودن اثر غیرخطی کبر، سرعت کلید نوری شبیه سازی شده بسیار زیاد باشد. به منظور شبیه سازی حالت گذرای میکروپیچ، نیاز به حل معادله شرودینگر غیرخطی (nonlinear schrodinger) بوده که در حال حاضر در دست تحقیق و انجام است.

#### مراجع

- [1] Scheuer, J. and M. Sumetsky, *Optical-fiber microcoil waveguides and resonators and their applications for interferometry and sensing*. Laser & Photonics Reviews, 2011. **5**(4): p. 465-478.
- [2] Chen, Z., et al., *Optically tunable microfiber-knot resonator*. Optics Express, 2011. **19**(15): p. 14217-14222.
- [3] Fan, W., et al., *Narrow linewidth single frequency microfiber laser*. Optics Letters, 2012. **37**(20): p. 4323-4325.