

ساخت یک لیزر ایتربیومی دو طول موجی تنظیم پذیر، با استفاده از یک AWG به عنوان گزینشگر طول موجی

محمد رضا عبدالحسینی مقدم^{۱*}

چکیده:

در این مقاله ساخت یک لیزر دو طول موجی ایتربیومی فیبری تک مد با قابلیت گزینش پذیری یا تولید دو قله هم شدت در ناحیه طول موجی یک میکرون با کمترین فاصله طول موجی ۰/۵۳ و بیشترین فاصله ۱۲/۲ nm گزارش شده است. یک توری موجبر آرایه ای (AWG) به همراه یک گزینشگر کانال اپتیکی (OCS) در چینش ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت تا سازوکار گزینشگری را برای ۲۳ حالت مختلف از تنظیم پذیری طول موجی به عهده گیرد. یک توان اپتیکی خروجی ۲ dBm - با یک نسبت فرونشانی طیفی در مدهای جانبی از مرتبه ۶۲ dB پایداری چینش پیشنهادی را بخاطر کوچکی تغییرات تا ۰/۲۲ db به اثبات می رساند.

واژه‌های کلیدی: لیزرهای فیبری ایتربیومی دو طول موجی، توری موجبر آرایه ای، فاصله طول موجی.

۱. مقدمه

روش های زیادی برای تولید همزمان چند طول موج لیزری از یک چینش اپتیکی بکارگرفته شده است که تنوعی از کاربردهای جدید را نظیر حسگری نوری، مشخصه‌یابی جز های فوتونیک و ساخت چشمه های مورد نیاز برای سامانه های همتافگری مخابراتی با خود به ارمغان داشته است. ملاحظاتی چون حساسیت محیطی، عملکرد این لیزرها را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد.

لیزرهای فیبری دارای آستانه پایین، ناحیه طول موجی تنظیم پذیر گسترده، بازدهی بالا و قابلیت مدیریت حرارتی آسان می باشند. جزیهای اپتیکی در این لیزرها با اجزاء اپتیکی موجود در سامانه های مخابرات نوری سازگار هستند. گسترش روزافزون این لیزرها منجر به تولید لیزرهای فیبری چند طول موجی شده است.

همواره سعی می شود در خروجی اسپلاتور، مشخصه SNR یا در میان چند طول موج، نسبت فرونشانی مد

(۱) استادیار، پژوهشگر لیزر و اپتیک، تهران انتهای خیابان کارگر شمالی (صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵)
mrammoghaddam@gmail.com

دو نوع قطبش تند و کند پیش می رود، جورشدهگی فاز نوع اول و دوم برای موج های عادی و غیر عادی بوجود می آید. با تعیین طول موج دمش و تغییر طول موج تپ در یک بازه محدود، می توان تابش THz در طول موج مناسب را به ازای زاویه جورشدهگی فاز ویژه ای تولید کرد. برای بلور DAST تنها جورشدهگی فاز از نوع دوم $oo-e$ رخ می دهد. که مقایسه آن در سه ناحیه طول موجی دمش ۱۰۶۴ و ۸۵۰ و ۷۸۰ nm هنگامی که طول موج تپ ۱۰ nm تغییر می کند نشان داده می شود که اگر از ناحیه طول موجی دمش نزدیک ۱۰۶۴ nm استفاده شود، ضریب بهره بلور و محدوده تولید امواج THz از طول موجهای دیگر بیشتر است.

کنترل روی دو خط طول موجی در این ناحیه به طرق مختلف انجام پذیرفته است: برای مثال برای YDF^۲ با روش های سوزکنی قطبشی^۳ [۱۲] و برای بهره ی Nd:YLF با به کارگیری چینش هایی حاوی دو بلور [۱۳]. معمولاً این کنترل، برای نواحی طول موجی مخبراتی، از طریق فیلترها، روشهای اتلافی همسان ساز [۱۰]، فیبرهای با هسته بیضی گون و توری های پراش براگ فیبری چند مدی، صورت می گیرد [۱۱]. در این مقاله از یک فیبر پر بازده فعال YDF [۱۲]، یک توری موجبری آرائیده^۴ و یک گزینشگر کانال نوری، برای تولید همزمان دو طول موج لیزری استفاده شده است.

های جانبی (SMSR) به بهترین نحو کنترل شود. با این وجود اخیراً تمرکز ویژه ای بر روی ساخت و توسعه لیزرهای فیبری دو طول موجی مشاهده شده است [۱]، [۲]. این چشمه های نوری برای تولید تپ های نوری تغییر شکل ناپذیر سالیوتونی (با نرخ بالای انتقال داده)، تولید فوتونیکی حامل های ریز موجی و ساخت فیلترهای فوتونیکی ریز موجی، بسیار مناسب اند [۳]، [۴]. با ظهور فناوری و کاربرد چشمه های تراهرتز، رهیافتهای مختلفی در خصوص تولید این چشمه ها مورد کاوش قرار گرفت [۵] که یکی از این رهیافت ها، دستیابی به دو طول موج همزمان هم شدت در ناحیه یک میکرون و به کارگیری بلورهای غیرخطی برای تولید فرکانس های مختلف در حوزه تراهرتز است [۶]، [۷].

امواج تراهرتز (معمولاً) به امواج الکترو مغناطیسی گفته می شود که فرکانس آنها بین یک دهم تا ده تراهرتز و به عبارت دیگر طول موج آنها بین ۳۰ تا ۳۰۰۰ میکرون باشد [۸]، [۹]. در ناحیه یک میکرون علاقه به ایجاد دو طول موج لیزری قابل تنظیم از کاربردهای بسیار آن در این حوزه ناشی می شود. یک فاصله طول موجی از مرتبه ۶ نانومتر در یک لیزر دو طول موجی، قابلیت تولید امواج ۱/۶۴ تراهرتز را از بلور GaSe، برمبنای DFG^۱ بین این دو طول موج فراهم می کند. DAST یک بلور دیگر آلی دو محوری بدون تقارن مرکزی، مناسب برای تولید امواج THz است که دارای ضریب دی الکتریک کم و ضریب غیرخطی بزرگ در مقایسه با بلورهای غیرآلی نظیر ZnGeP₂ و InP و LiNbO₃ است. چون در یک بلور بدون تقارن مرکزی، موج با

2 Ytterbium Doped Fiber

3 Polarization hole burning

4 Arrayed waveguide gratings

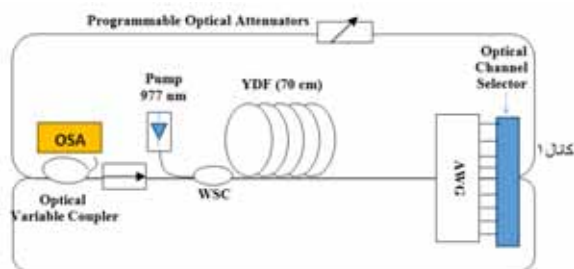
1 Difference frequency generation

۲. چنش آزمایشگاهی

برای تولید همزمان دو طول موج لیزری در ^۱ DWFL، از یک AWG (۲۴ کاناله) به همراه یک گزینشگر قابل تنظیم و یک فیبر فعال استفاده شده است. این فیبر فعال در دو تشدیدگر حلقوی بطور مشترک حضور خواهد داشت که طول موج کاری هر حلقه و فاصله آنها از یکدیگر توسط این دو جز کلیدی قابل تنظیم خواهد بود. توان دمشی از طریق یک ^۲ WSC مناسب (۱۰۵۰/۹۸۰) به هسته فیبر فعال منتقل می شود.

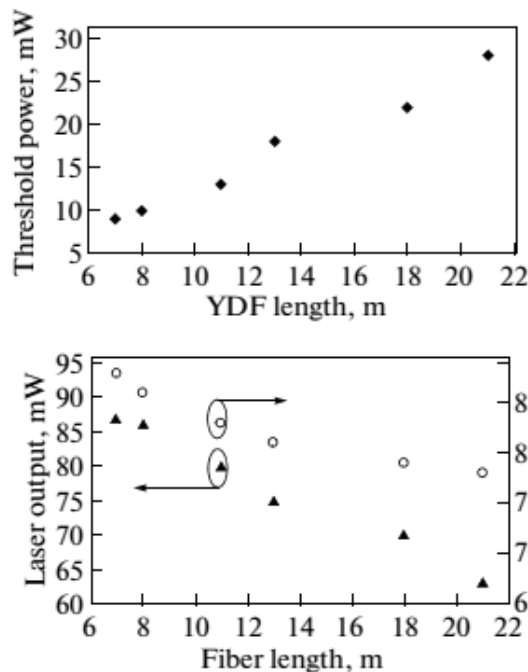
از کوپلرهای تقسیم کننده توان برای بازخورد قسمتی از بیم لیزری و استخراج آن از حلقه تشدیدگری، استفاده شده است. درصد جفت شدگی در این کوپلر قابل انتخاب بوده و مشخصه های اپتیکی بیم خروجی از طریق آن توسط یک توان سنج و یک آنالیزور طیفی OSA با قدرت تفکیک 0.15 nm قابل اندازه گیری است. با افزایش اتلاف در سامانه، درصد بازخورد به ورودی WSC افزایش می یابد. برای هم شدت سازی دو پیک طول موجی و جلوگیری از غلبه یک طول موج بر دیگری، از یک تضعیفگر قابل تغییر ^۳ POA می توان در یکی از حلقه ها استفاده نمود. حین آزمایش مشخص شد که با انتخاب درصد بازخورد مناسب، بدون این جز اپتیکی نیز می توان به این هدف دست یافت. نتایج نسبتاً قابل قبول، با یک درصد بازخورد ۵۰٪ تحقق این ادعا را امکان پذیر نشان می دهد. تغییر فاصله بین دو کانال نوری با انتخاب یک طول موج از ۲۳ کانال خروجی AWG و ثابت نگاه داشتن یک طول

موج (خروجی از کانال ۱)، می تواند حاصل شود. کانال ۱ دارای طول موج مرکزی $1026/40 \text{ nm}$ انتخاب گردیده و گزینشگر کانال نوری مورد استفاده ^۴ OCS، به کمک موتورها گرداننده، زمان انتخاب بین ۲۳ کانال AWG و ارتباط با POA را به 500 میلی ثانیه کاهش می دهد. فاصله بین کانالی 0.53 nm معادل 70 GHz ، طول موجهای کانالهای بعدی را از $1026/90$ تا $1038/60 \text{ nm}$ تغییر می دهد. YDF بکار رفته دارای درصد وزنی 0.8 از Yb_2O_3 ، $1/8$ از Al_2O_3 و 23 درصد از GeO_2 بوده که بخاطر توزیع مناسب ژرمانیم و ایتریبوم در آن، کانال های خروجی مشخصه های SNR خوبی را از خود نشان می دهند. به عبارت دیگر، مشخصه نسبت تپ به نویز در آنها بسیار بالا می باشد [۱۴]. از یک ایزولاتور برای ۱- بهبود مشخصه های خروجی و ۲- چرخش اجباری در یک جهت ترجیحی در دو کاواک، استفاده شده است. استفاده از دو انتخابگر OCS در چینش، ممکن است طول موج مرجع را نیز قابل تغییر سازد. آرایش اپتیکی مورد استفاده، به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایش شماتیک DWFL

حداکثر توان لیزر دیود مورد استفاده در این طرح 110 mW در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. بالا) توان دمشی آستانه برای طول های مختلف، پایین) شیب بازدهی و در نهایت توان خروجی برای بیشینه توان دمش

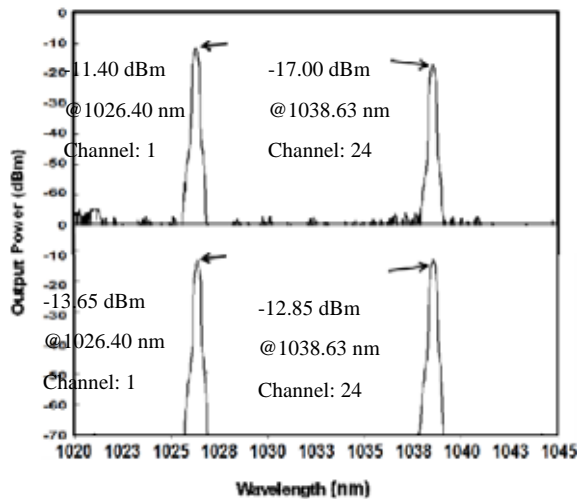
در یک طرح حلقوی، طول بهینه مورد نیاز کمتر از ۷ m پیش بینی می شود. داده های تجربی این حد و بستگی این طول را به درصد جفت شدگی، مورد تایید قرار می دهد. بعد از افزودن جزیهای اپتیکی و کامل کردن چینش شکل ۱، دقت و تفیک پذیری طول موجی در OSA به بالاترین حد خود تنظیم می گردد.

تفاوت های مشاهده شده در شدت قله دو کانال (یا دو طول موج انتخاب شده)، نه تنها ناشی از اتلاف وابسته به طول موج قطعات برای کانال های مختلف است، بلکه به منحنی طیفی بهره و یا طیف ASE و مکانیزم پهن شدگی وابسته است. همچنین یادآوری می شود که در فیبرهای با آلایندهگی بالا، مؤلفه های طیفی واقع در طول موجهای کوتاه تر، ضعیف تر نمایان می شوند. تفسیر این نتیجه با توجه به اینکه در طول موجهای

۳. تحلیل نتایج تجربی

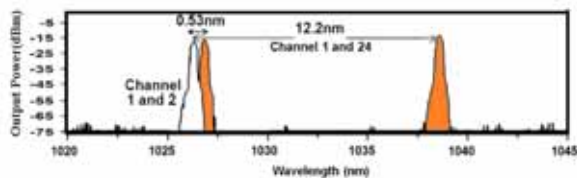
برای درک بهتر فرآیند تولید دو طول موج، ابتدا داده های مربوط به ASE، آستانه لیزری برای کارکرد در یک طول موج، بازدهی (شیب)، توان خروجی برای مقادیر مختلفی از طول فیبر، طول موج کاری و طول موج دمش با یکدیگر مقایسه گردید. طول موجی که در آن قله گسیل خود به خودی واقع شده است، ممکن است، به عنوان طول موج پر بازده لیزری در نظر گرفته شود. ولی (زیر ۱۰۴۰ nm) در طول موجهایی که YDF به صورت سه تراز می کند این اصل قابل بکارگیری نیست. زیرا توان ASE تولیدی در این حالت، مانند سامانه های چهار تراز مستقیماً به بهره مرتبط نمی شود. در واقع گسیل خودبخودی فقط به سطح مقطع گسیل بستگی دارد ولی بهره به سطح مقطع جذب نیز وابسته است.

برای محیط های بهره طویل از میان دو قله مورد مشاهده در طیف، قله غالب ASE در طول موجهای بالاتر واقع می شود که افزایش طول تنها توزیع توانی را اطراف آن متمرکزتر خواهد ساخت. مقادیر تجربی نشان داد که بازدهی (شیب) با این فیبر در یک تشدیدگر خطی برای طول موج لیزری ۱۰۲۸ nm، طول موج دمشی ۹۷۷ nm و ۷ متر از فیبر فعال، بیشینه و نزدیک ۸۸٪ است. شکل ۲ رفتار لیزری این فیبر را در یک چینش خطی، تا بیشینه توان دمشی ۱۱۰ mW نشان می دهد.



شکل ۳. بالا) مقایسه بین یک چینش فاقد POA، پایین) یک چینش دارای آن

این گام می تواند با انتخاب یک توری موجبر آرایه ای با فاصله بین کانالی کوچکتر، (مثلاً ۲۵ GHz) بازهم کوچکتر شود. برای کانال ثابت ۱ طیف خروجی لیزر برای دو فاصله بین کانالی ۰/۵۳ nm و ۱۲/۲ nm، در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده است.



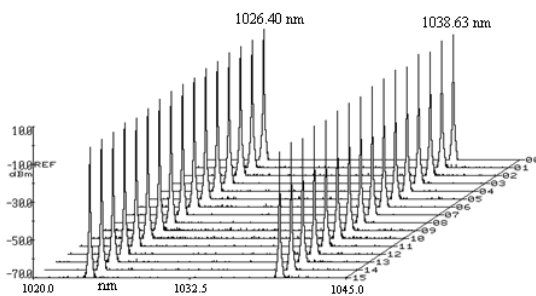
شکل ۴. مقایسه طیف خروجی لیزر DWFL برای دو فاصله بین کانالی ۰/۵۳ nm و ۱۲/۲ nm

پایداری این لیزر با مقایسه مشخصه $SMSR^1$ در خروجی آن و همچنین توان قله در ۲۴ کانال، مورد ارزیابی قرار گرفت. یک SMSR بالاتر از ۵۸ dB برای همه کانال ها اندازه گیری شد که بین طول موج های مختلف، تغییرات کوچکی در حد ۴ dB قابل مشاهده

کوتاه تر سطح مقطع جذب بزرگتر از سطح مقطع گسیل است بدست می آید. بویژه آنکه افزایش غلظت موجب تشدید این اختلاف خواهد شد. نسبت شدت قله ها، به خودی خود برای کانال های مختلف یکسان نیست. هم خط سازی شدت ها با انتخاب مناسب ۱- مکان قطعات، ۲-میزان تضعیف POA، و ۳- درصد بازخورد، امکان پذیر است. نتایج بدست آمده در بهترین شرایط گزارش شده است. هرچه بهره برای کانال انتخابی در حلقه پایین، بیشتر شود تضعیف و اتلاف کمتری در کانال ۱ یا حلقه بالایی (۱۰۲۶/۴ nm) مورد نیاز است. برای اینکه اختلاف شدت حاصل از دو کانال، به کمتر از ۱ dB کاهش یابد در برخی حالات نیاز است که تضعیف تا ۴/۰۵ dB تحمیل گردد.

تنظیم دقیق میزان تضعیف به معنی هم شدت سازی دقیقتر دو قله خواهد بود. می توان مشاهده کرد که نزدیک ترین فاصله طول موجی ۰/۵۳ nm و بیشترین آن ۱۲/۲۰ nm است. سطح توان خروجی اندازه گیری شده در شکل ۳ با تغییر توان دمش می تواند تغییر و یا ثابت نگاه داشته شود. بخاطر مشخصه بین کانالی ۷۰ GHz در توری موجبر آرایه ای مورد استفاده، تغییر کانال، فاصله طول موجی را مضر بی از ۰/۵۳ nm تغییر می دهد.

¹ Side Mode Suppression Ratio



شکل ۶. پایداری زمانی لیزر طی ۸۰ دقیقه، برای فاصله بین

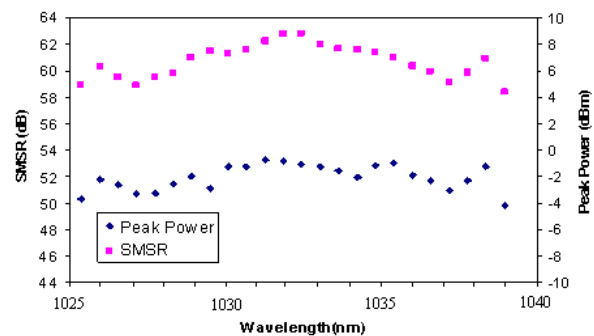
کانالی ۱۲٫۲ nm

به منظور تامین توانهای مورد نیاز برای کاربردهای ترهترتز، از تقویتگرهای نوری دو غلافی فیبری، در بیرون کاواک می توان استفاده نمود. ضمن اینکه حذف اتصالات موقت و جوش فیبرها به یکدیگر می تواند-۱- توان قله ها، ۲-پایداری، ۳-بازدهی، آستانه و کلیه مشخصه های خروجی لیزر را ارتقا دهد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله مشخصه های یک لیزر ایتربیومی دو طول موجی (با قابلیت تنظیم در یک چینش دو حلقه ای) مورد بررسی قرار گرفت. با کنترل اتلاف در یک یا دو حلقه، تولید دو قله هم شدت در ناحیه یک میکرون با کمترین فاصله طول موجی ۰/۵۳ nm و بیشترین فاصله ۱۲/۲ nm گزارش شد. کنترل رقابت بین طول موجها و هم سطح سازی توانی آنها با بکارگیری AWG و تغییر مقادیر تضعیف در یک جز اپتیکی برنامه پذیر، انجام پذیرفت. SMSR در این چینش با استفاده از یک توری پراش موجبری آرائیده تا مقدار ۶۲ dB، بهبود و نوسان توان خروجی با زمان، برای یک فاصله بین کانالی دلخواه، تا ۰/۲۲ dB کاهش یافت.

است. با این حال مقدار متوسط این کمیت در نمودار شکل ۵، ۶۰/۵۱ dB قابل تخمین است. بیشینه SMSR قابل حصول با این طرح، به ۶۲ dB می رسد. در شکل ۵، توان قله خروجی با الگوی مشابه ای از تغییرات، همچنین نمایش داده شده است که بین کانال های مختلف تقریباً ثابت و درحد ۴- تا ۱- dBm نگاه داشته می شود.



شکل ۵. SMSR و توان قله برای کانال های مختلف در بیشینه توان دمشی

برای بیشینه توان دمش، میانگین توان خروجی بین کلیه حالات، ۲- dBm بدست خواهد آمد. همچنین داده های تجربی نشان می دهد که نوسان توان خروجی با زمان، برای یک فاصله بین کانالی دلخواه، از ۰/۲۲ dB تجاوز نمی کند.

شکل ۶ پایداری مشخصه های خروجی را طی زمان نشان می دهد. این شکل، ۱۶ اندازه گیری متوالی از طیف خروجی را با فاصله زمانی ۵ دقیقه، به نمایش گذاشته است.

مراجع

- [1] Zhen L., Jun Z., Bing H., Hou-Kang L., Chi L., Yun-Rong W., Jing-Xing D., Qi-Hong L., *Controllable Dual-Wavelength Fiber Laser*, Chinese Physics Letters, Vol. 29, No. 7, 2012, p.074203.
- [2] Moore P. J., Chaboyer Z. J., Das G., *Tunable Dual-Wavelength Fiber Laser*, Optical Fiber Technology, Vol. 15, No. 4, 2009, pp. 377-379.
- [3] Pan C.-L., Wang C.-L., *A Novel Tunable Dual-Wavelength External-Cavity Laser Diode Array and Its Applications*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 28, No. 10, 1996, pp. 1239-1257.
- [4] Zhu T., Zhang B., Shi L., Huang S., Deng M., Liu J., Li X., *Tunable Dual-Wavelength Fiber Laser With Ultra-Narrow Linewidth Based on Rayleigh Backscattering*, Optics Express, Vol. 24, No. 2, 2016, pp. 1324-1330.
- [5] Shumyatsky P., Alfano R. R., *Terahertz Sources*, Journal of Biomedical Optics, Vol. 16, No. 3, 2011, pp. 033001-033001.
- [6] Taniuchi T., Okada S., Nakanish H., *Widely-Tunable THz-Wave Generation in 2-20 THz Range From DAST Crystal by Nonlinear Difference Frequency Mixing*, Electronics Letters, Vol. 40, No. 1, 2004, pp. 60-62.
- [7] Kawase K., Hatanaka T., Takahashi H., Nakamura K., Taniuchi T., Ito H., *Tunable Terahertz-Wave Generation From DAST Crystal by Dual Signal-Wave Parametric Oscillation of Periodically Poled Lithium Niobate*, Optics Letters, Vol. 25, No. 23, 2004, pp. 1714-1716.
- [8] Zhao P., Ragam S., Ding Y. J., Zotova I. B., *Terahertz Intracavity Generation From Output Coupler Consisting of Stacked Gap Plates*, Applied Physics Letters, Vol. 101, No. 2, 2012, p. 021107.
- [9] Ferguson B., Zhang X.-C., *Materials for Terahertz Science and Technology*, Nature Materials, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 26-33.
- [10] Zhao J., Liao T., Zhang C., Zhang R., Miao C., Li H., Tong Z., *Switchable Linear Cavity Dual-Wavelength Fiber Laser With Equalized Output by Optimizing Intracavity Loss*, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 124, No. 12, 2013, pp. 1092-1094.
- [11] Feng X., Liu Y., Fu S., Yuan S., Dong X., *Switchable Dual-Wavelength Ytterbium-Doped Fiber Laser Based on a Few-Mode Fiber Grating*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 3, 2004, pp. 762-764.
- [12] Tu C., Guo W., Li Y., Zhang S., Zhu H., Lu F., *Multiwavelength Yb-Doped Fiber Ring Laser Based on a Mach-Zehnder Interferometer*, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 50, No. 3, 2008, pp. 723-725.
- [13] Reimann K., *Table-Top Sources of Ultrashort Thz Pulses*, Reports on Progress in Physics, Vol. 70, No. 10, 2007, p. 1597.
- [14] Harun S., Paul M. C., Moghaddam M. R. A., Das S., Sen R., Dhar A., Pal M., Bhadra S. K., Ahmad H., *Efficient Diode Pumped Ytterbium-Doped Fibre Laser*, Electronics letters, Vol. 46, No. 1, 2010, pp. 68-69.