لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۷، دورهٔ ۱۵، شمارهٔ ۱، صفحات: ۱۵-۱۰.

مقاله پژوهشی

تولید نور ابرپایســـتار با پهنای وسیع در ناحیهٔ مادون قرمز در تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد

ابوالفضل صفایی [۱]
محمدآقا بلوری‌زاده [۲]

خلاصه

مقدمه: امروزه، منابع نور ابرپایســـتار کاربردهای متنوعی در تکنولوژی و پزشـــکی به‌دست آورده‌اند به‌ویژه هنگامی‌که این منابع شامل ناحیهٔ مادون قرمز از طیف الکترومغناطیس باشند. معمولاً این منابع برای تشخیص سرطان، بهبود زخم‌ها، سوزاندن بافت‌ها، تحریک عصبی برای درمان و بهبود برخی از بیماری‌ها مورد اســـتفاده قرار می‌گیرند. رفتار غیرخطی در برهمکنش نور با ماده، فیزیک حاکم بر منابع نوری ابرپایستار را توصیف می‌کنند. به‌طور کلی تقریباً تمام مواد قابلیت بروز رفتار غیرخطی را دارند. اما شـــدت میدان الکترومغناطیســـی عبوری از آن‌ها باید به اندازهٔ کافی بالا باشـــد. البته این شدت برای هر ماده متغیر است. بنابراین مبنای نظری فرآیندهایی که در تولید طیف ابرپایستار حضور دارند، با اپتیک غیرخطی بیان می‌شود.

روش بررسی: برهمکنـــش پالس لیزر با دی‌الکتریک (ماده) به‌ویژه پالس‌هایی که فوق کوتاه هستند و توان بالایی دارند، باعث می‌شود خواص غیرخطی و پاسخ تأخیری دی‌الکتریک (ماده) بروز پیدا کنند. طیف ابرپایســـتار که از برهمکنش پدیده‌های غیرخطی و پاشـــنده ایجاد شده اســـت با معادلهٔ شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته توصیف می‌شـــود. در این مقاله فرآیند تولید نور ابرپایســـتار در تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد هنگامی‌که پالس لیزر با توان قلهٔ بالا به آن وارد می‌شـــود، مورد بررســـی قرار می‌گیرد. با استفاده از معادلات ماکسول در نظریهٔ کلاسیکی امواج الکترومغناطیســـی، معادلهٔ غیرخطی شرودینگر تعمیم‌یافته به‌دست می‌آید. برای بررسی فرآیند تولید نور ابرپایستار توسط تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد، این معادله که فرآیند تولید ابرپایستار را توضیح می‌دهد به‌صورت عددی با الگوریتم رونگ- کوتای مرتبهٔ چهارم حل می‌شود.

یافته‌ها: طیف ابرپایستار خروجی برای طول ۵ و ۲۰ سانتی‌متر از تار ویندمیل تک کریستال ســـافایر تک مد شبیه‌سازی‌شده و نتایج نشـــان می‌دهند که طیف نور ابرپایستار تولیدشده در مقایســـه با یک مورد مشابه برای تار معمولی تک کریستال ســـافایر تا دو برابر می‌شود. ضمناً

۱. *دانشـــجوی دکتری فیزیک اتمـــی و مولکولی، دانشکدهٔ علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران*

۲. *اســـتاد تمام فیزیک، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران*

طیف خروجی ایجادشده شامل شانه‌های فرکانسی نزدیک به‌هم در محدودهٔ وسیعی می‌باشد. نتایج نشـــان می‌دهند که طیف ابرپایستار ایجادشده به‌طور کامل ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک را پوشـــش می‌دهد و بخشی از ناحیهٔ مرئی و ناحیهٔ مادون قرمز میانی را دربرمی‌گیرد. همچنین نشان داده شده است که طول تار نوری بر طیف ابرپایستار تولید شده مؤثر است.

بحث: با توجه به پالس لیزر و پارامترهای مشخصهٔ تار ویندمیل، در این مقاله اساس کار برای شبیه‌سازی تولید طیف نور ابرپایستار در این تار حل عددی معادلهٔ غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته بود. در حل عددی هر معادلهٔ دیفرانسیل باید الگوریتمی انتخاب شود که جواب به‌دست آمده پایدار، دقیق و همگرا باشـــد. نشان داده شد که الگوریتم رونگ- کوتای مرتبهٔ چهار برای حل معادلهٔ غیرخطی شـــرودینگر تعمیم‌یافته مناسب اســـت. با استفاده از این الگوریتم، طیف خروجی از تار ویندمیل برای دو طول منتخب شبیه‌ســـازی شـــد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده برای تار ویندمیل با نتایجی که برای تار نوری معمولی وجود دارد، مقایسه گردید

نتیجه‌گیری: نشـــان داده شد که طیف ابرپایســـتار شبیه‌سازی‌شده در این تحقیق، به‌دلیل هندســـهٔ خاص و ویژگی‌های اپتیکی تار ویندمیل تک کریستال سافایر دارای پهنای فرکانسی بســـیار گســـترده به‌ویژه در ناحیهٔ مادون قرمز است. با اســـتفاده از فیلترهای مناسب می‌توان فرکانـــس مورد نیاز را از دیگر فرکانس‌ها برای کاربردهای مختلف جداســـازی کرد. درحالی‌که از یک لیزر اســـتفاده می‌شود گسترهٔ وســـیعی از فرکانس‌ها در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. بنابراین این منبع نور مادون قرمز برخی از درمان‌های پزشکی و همچنین طیف‌نگاری در ناحیهٔ مادون قرمز را تسهیل می‌کند و شانه‌های فرکانسی ایجادشده در آن اندازه‌گیری فرکانس نوری در محدودهٔ مادون قرمز را توسعه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نور ابرپایستار، تار ویندمیل، اپتیک غیرخطی، منبع نور مادون قرمز

نویسندهٔ مسئول: محمدآقا بلوری‌زاده، تلفن: ۰۹۱۳۱۴۱۰۵۸۰
پست الکترونیک: mabolori@uk.ac.ir

مقدمه

با اختراع لیزر، مبحث اپتیک غیرخطی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفت و نقش بسیار زیادی نـــه تنهـــا در توسعهٔ علم اپتیک بلکـــه در علوم بین رشـــته‌ای داشته است[۱]. پهن‌شدگی طیفی و تولید مؤلفه‌های فرکانسی جدید، از ویژگی‌های ذاتی اپتیک غیرخطی می‌باشد[۲]. از دههٔ ۱۹۶۰ به بعد، مطالعات گسترده‌ای بر روی این موضوع صورت گرفته است تا بتوان از آن در پیشبرد زمینه‌های علمی مختلف استفاده کرد[۳]. فرآیند ویژه‌ای که در آن پالس لیزر ورودی با پهنای کم به یک محیط، دستخوش پهن‌شدگی طیفی غیرخطی می‌شود تا به‌طور طیفی یک خروجی با پهنای گسترده را ایجاد کند، به‌عنوان تولید نور ابرپایستار[1] شناخته می‌شود[۴].

مطالعات برروی فرآیند تولید نور ابرپایســـتار از دههٔ ۱۹۷۰ آغاز شـــد و از آنجایی‌که این فرآیند مکانســـیم پیچیده‌ای دارد، محققان زیادی روی هر کدام از پدیده‌های فیزیکی مؤثر در تولید نور ابرپایستار تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند[۵]. سرانجام در قرن حاضر، منابع نوری ابرپایستار به‌طور عملی به جامعهٔ علمی عرضه شده‌اند[۵].

منبع نور ابر پایســـتار کاربردهای گســـترده‌ای در زمینه‌های طیف‌نگاری، مخابرات، فشـــردگی پالس، طراحی منابع لیزری قابل تنظیم فوق سریع از نـــوع فمتوثانیه و یا علـــم اندازه‌گیری نـــوری دارد. در علم اندازه‌گیری نوری با اســـتفاده از نوری مرجع با فرکانس کالیبره‌شده، فاصلهٔ فرکانسی بین نور مرجع و نور مجهول را با اســـتفاده از شـــانه‌های فرکانسی که در

1. Supercontinuum Generation

فرآیند ابرپایستار ایجاد می‌شوند، اندازه‌گیری می‌کنند[۶]. اما این منبع نور جدید (نور ابر پایستار) کاربردهای میان‌رشته‌ای وسیعی به‌ویژه در پزشکی و بیوفوتونیک دارد[۵و۷]. از این کاربردها می‌توان به توموگرافی همدوس اپتیکی که توانایی عکسبرداری سه‌بعدی با قدرت تفکیک بالا را از داخل موادی مانند بافت‌های زیستی فراهم می‌کند[۸]، و یا جایگزینی منابع نور ابرپایستار به‌جای منابع نوری لامپی برای اندازه‌گیری‌های نسبت سیگنال به نویز بالاتر در محدودهٔ طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک اشاره کرد[۹]. همچنین این منابع می‌توانند جایگزین لیزرهای گازی و حالت جامد در ابزارهایی نظیر فلورومتر، میکروسکوپ و سیتومتر شوند که منجر به کاهش قیمت، کارآیی بیشتر، اندازهٔ کوچک‌تر و پیچیدگی بسیار پایین تر می‌شوند[۱۰]. در پزشکی نیز منابع نوری ابرپایستار بسته به گسترهٔ فرکانسی‌شان برای تشخیص سرطان، بهبود زخم، سوزاندن بافت، تحریک عصبی برای درمان و بهبود برخی از بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷و۱۳-۱۱].

امروزه، به‌دلیل پیشرفت تکنولوژی، قابلیت مهندسی مشخصه‌های اپتیکی (ضرایب پاشندگی و پارامتر غیرخطی) تارهای نوری وجود دارد[۱۴]، بنابراین از تار نوری به‌عنوان محیط مناسب برای تولید نور ابرپایستار استفاده می‌شود. با توجه به مشخصه-های اپتیکی تار نوری و پالس لیزر ورودی، میزان پهن‌شدگی و شدت فرکانس‌های تولیدشده در طیف خروجی مشخص می-شود. اخیراً تار نوری جدیدی طراحی و ساخته شده است که علی‌رغم اینکه دارای مغزی بزرگ می‌باشد به‌صورت تک مد عمل می‌کند[۱۵]. نام این تار نوری برگرفته از هندسه‌اش، شکل ۱، که شبیه آسیاب بادی (ویندمیل[۲]) است، می‌باشد و از تک کریستال سافایر ساخته شده است. با توجه به رابطهٔ پاشندگی و سایر ویژگی‌های اپتیکی (برای مثال داشتن پارامتر غیرخطی مناسب) برای تک کریستال سافایر[۱۶و۱۷] و مشخصه‌های ساختاری مطرح‌شده برای آن[۱۵]، از این تار نوری می‌توان به-عنوان محیطی برای تولید ابرپایستار توان بالا در محدودهٔ مادون قرمز استفاده کرد که می‌تواند کاربردهای متنوعی داشته باشد.

تئوری و روش بررسی

در نظریهٔ کلاسیکی امواج الکترومغناطیسی، معادلهٔ موج که از معادلات ماکسول[۳] به‌دست می‌آید، توصیف‌کنندهٔ برهمکنش موج الکترومغناطیسی با محیط انتشار است. قسمت عرضی معادله موج مدهای انتشاری در محیط را مشخص می‌کند و قسمت طولی معادلهٔ موج انتشار موج در محیط را توضیح می‌دهد. قسمت طولی معادلهٔ موج در تقریب پوش کند تغییر[۳] معادلهٔ غیرخطی شرودینگر تعمیم‌یافته[۵] نامیده می‌شود. این معادله که معادلهٔ حاکم‌بر فرآیند تولید نور ابرپایستار می‌باشد، به‌صورت:

$$\frac{\partial A(z,T)}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A(z,T)-\sum_{k\geq 2}\frac{(i)^{k+1}}{k!}\beta_k\frac{\partial^k A(z,T)}{\partial T^k}= \quad (1)$$

$$i\gamma\left(1+\frac{1}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}\right)\left(A(z,T)\int_{-\infty}^{\infty}R(T')\left|A(z,T-T')\right|^2 dT'\right)$$

می‌باشد که در آن $A(z,T)$، ω_0، β_k، γ و α به‌ترتیب دامنهٔ پالس لیزر، فرکانس مرکزی پالس ورودی، پاشندگی مرتبهٔ kام، پارامتر غیرخطی و ضریب تضعیف تار نوری هستند. تابع $R(T)$ به‌صورت:

$$R(T)=(1-f_R)\delta(T)+f_R h_R(T) \quad (2)$$

می‌باشد که $0\leq f_R\leq 1$ توزیع ساختاری از پاسخ رامان تأخیری ماده نسبت به قطبش غیرخطی است. همچنین $\delta(T)$، تابع دلتای دیراک می باشد و تابع $h_R(T)$، پاسخ رامان محیط است که معمولاً به‌صورت:

$$h_R(T)=\frac{\tau_1^2+\tau_2^2}{\tau_1\tau_2^2}\exp\left(-\frac{T}{\tau_2}\right)\sin\left(\frac{T}{\tau_1}\right)\Theta(T) \quad (3)$$

نوشته می‌شود و آثاری نظیر خود جابه‌جایی فرکانسی سالیتون رامان را توصیف می‌کند. در رابطهٔ (۳)، $\Theta(T)$ تابع پلهٔ هویساید می‌باشد و پارمترهای τ_1 و τ_2 به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نمودار طیفی بهرهٔ رامان تطبیق خوبی با طیف بهرهٔ رامان واقعی، که به‌صورت تجربی اندازه گیری می‌شود، داشته باشد. مدوله‌سازی فاز خودی، مدوله‌سازی فاز عرضی، مخلوط کردن چهار موج، شکافتن سالیتون[۴]، پراکندگی رامان القایی و خود سراشیبی عمده‌ترین پدیده‌های غیرخطی هستند که در فرآیند تولید نور ابرپایستار نقش اساسی دارند با معادلهٔ غیرخطی شرودینگر تعمیم‌یافته قابل توصیف می‌باشند. اگر $f_R=0$ فرض شود، رابطهٔ (۱) به‌صورت:

(۴)

$$\frac{\partial A(z,T)}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A(z,T)-\sum_{k\geq 2}\frac{(i)^{k+1}}{k!}\beta_k\frac{\partial^k A(z,T)}{\partial T^k}=i\gamma A(z,T)\left|A(z,T)\right|^2$$

حاصل می‌شود که فقط پدیدهای غیرخطی مدوله‌سازی فاز خودی، مدوله سازی فاز عرضی و مخلوط کردن چهار موج را توصیف می‌کند. اما همیشه f_R غیر صفر است. زیرا پاسخ محیط به پالس ورودی آنی نیست هرچند در بعضی مواقع می‌توان آن را آنی درنظر گرفت. مقدار قابل توجه f_R برای پالس‌های ورودی خیلی کوتاه و همچنین وجود مشتق مرتبهٔ اول زمانی در سمت راست رابطهٔ(۱) باعث می‌شود که این رابطه پدیده‌های غیرخطی خود سراشیبی و پراکندگی رامان برانگیخته را نیز توصیف نماید.

2. Windmill

3. Maxwell

4. Soliton

یافته‌ها

برای اینکه بتوان نتایج شبیه‌سازی طیف نور ابرپایستار برای تار ویندمیل تک کریستال سافایر را با نتایج به‌دست‌آمده در منابع [۱۶و۱۷] برای تار معمولی تک کریستال سافایر مقایسه کرد، ضرورت دارد که پارامترهای پالس ورودی (پهنای پالس، توان قله و طول موج مرکزی) را یکسان درنظر گرفت. روش‌های عددی مختلفی برای حل معادلهٔ شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته (۱) وجود دارد[۳]. در این مقاله، از روش رونگ کوتای[۱۸] مرتبهٔ ۴ برای حل معادلهٔ (۱) استفاده شده است و پارامترهای به‌کار گرفته‌شده در این شبیه‌سازی نیز در جدول (۱) آورده شده‌اند.

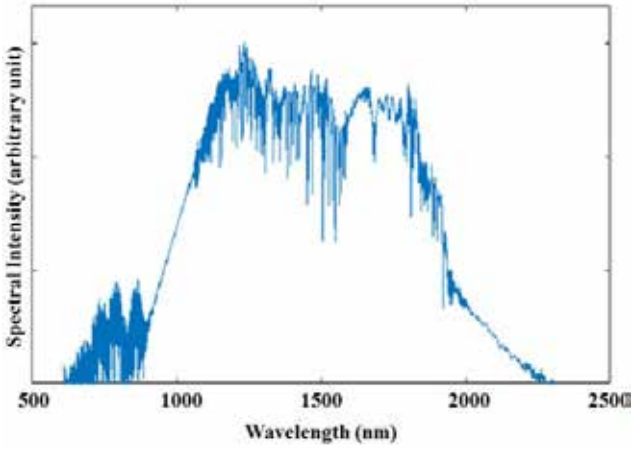
شکل(۲) نتیجه شبیه‌سازی معادلهٔ شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته(۱) برای تاری به طول ۵ سانتی‌متر است. نتایج شکل(۲) نشان می‌دهد که طیف نور ابرپایستار تولیدشده برای تار ویندمیل تک کریستال سافایر نسبت به طیف نور ابرپایستار در تار معمولی تک کریستال سافایر پهن‌تر (تقریبا ۲ برابر) است. در این نتایج، گسترهٔ طیف نور ابرپایستار خروجی برای طول موج مرکزی پالس ورودی ۱۲۹۰ نانومتر، از ۶۰۰ تا ۲۳۰۰ نانومتر به‌دست می‌آید. درحالی‌که گسترهٔ طیف خروجی از تار معمولی تک‌کریستال سافایر ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر است[۱۶]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر از تار ویندمیل تک کریستال سافایر به‌جای تار معمولی به‌عنوان محیطی برای تولید نور ابرپایستار مورد استفاده قرار گیرد، طول‌موج‌های بسیار بیشتری تولید می‌شوند.

شکل(۳) نشان می‌دهد که اگر طول ۲۰ سانتی‌متر از تار ویندمیل برای تولید نور ابرپایستار به‌کار گرفته شود، در طیف خروجی پهن‌شدگی بسیار گسترده‌ای ایجاد خواهد شد. طول موج‌های تولیدشدهٔ ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک طیف امواج الکترومغناطیس به‌طور کامل دربرمی‌گیرند

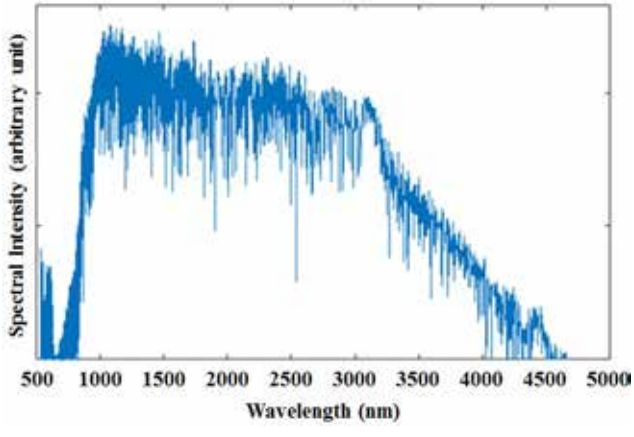
جدول۱: پارامترهای تار ویندمیل و پالس لیزر ورودی برای شبیه‌سازی طیف خروجی

Parameter	Description	Value
α	Linear Loss Coefficient	0 dB / m
τ_1	Raman Parameter	182 fs
τ_2	Raman Parameter	20 fs
f_R	Raman Delayed Coefficient	0.25
γ	Nonlinear Parameter	$9.1\times10^{-4}\ W^{-1}m^{-1}$
λ_0	Reference (Center) Wavelength	1290 nm
β_2	Second-order Dispersion Coefficient	$-92.4\times10^{-3}\ ps^2/m$
β_3	Third-order Dispersion Coefficient	$-1.5\times10^{-3}\ ps^3/m$
P_0	Peak Power	8.035×10^5 W
T_0	Duration of Input Pulse	150 fs

و همچنین بخشی از ناحیهٔ مرئی و ناحیهٔ مادون قرمز میانی را شامل می‌شوند. دلیل این پهن‌شدگی گسترده به طراحی خاص و ویژگی‌های اپتیکی تار ویندمیل تک کریستال سافایر برمی‌گردد و نشان می‌دهد که پاشندگی مربوط به ساختار این تار نوری سهم قابل توجهی در طیف خروجی از آن را دارد. همچنین فرکانس‌های تولیدشده چنان به هم نزدیک هستند که شانه‌های فرکانسی[۱۹] بسیار نزدیک به‌همی را در ناحیهٔ فرکانسی گسترده شکل می‌دهند که کاربردهای مختلفی به‌ویژه در علم اندازه‌گیری فرکانس نوری دارد. لازم به ذکر است که تغییر در طیف نور ابرپایستار به‌دست‌آمده از تار ویندمیل نسبت به طیف به‌دست آمده از تار معمولی فقط شامل طول موج (فرکانس) نیست بلکه شدت پالس خروجی نیز در هر طول موج (فرکانس) متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر نسبت به قبل، شدت برای بعضی از طول‌موج‌ها افزایش و برای بعضی دیگر کاهش پیدا می‌کند.



شکل۲: طول موج‌های تولیدشده (طیف نور ابرپایستار) در خروجی تار ویندمیل تک کریستال سافایر به طول ۵ سانتی‌متر



شکل۳: طول موج‌های تولیدشده (طیف نور ابرپایستار) در خروجی تار ویندمیل تک کریستال سافایر به طول ۲۰ سانتی‌متر

بحث و نتیجه‌گیری

در ایـــن مقاله با توجه به اهمیت منابع نوری ابرپایســـتار که کاربردهای متنوعی در شاخه‌های مختلف علم و به‌صورت تجاری در صنعت و پزشکی دارد، به بررســـی طیف نور ابرپایســـتار خروجی از تار نوری ویندمیل تک کریستال سافایر که اخیراً ســـاخته شده است، پرداخته‌شد. این تار نوری به‌دلیل طراحی ویژه‌اش، مشـــخصه‌های اپتیکـــی منحصربه‌فردی را دارا می‌باشـــد. برای به‌دســـت آوردن طیف نور ابرپایســـتار خروجی از این تار نوری، معادلهٔ شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته که معادلهٔ حاکم بر فرآیند ابرپایســـتار می‌باشـــد با به‌کارگیری روش رونگ-کوتـــای مرتبهٔ ۴ [۱۸] حل شـــد. نتایج نشان می‌دهند که پهن شـــدگی در طیف نور ابرپایستار شبیه‌سازی‌شده در طول ۵ سانتی‌متر از تار نوری ویندمیل تک کریستال ســـافایر در مقایســـه با طیف به‌دســـت‌آمده از تار معمولی تک کریستال سافایر[۱۶و۱۷] با به‌کارگیری منبع لیزر یکسان تقریباً دو برابر است. اگر طول تار نوری ویندمیل ۲۰ ســـانتی‌متر درنظر گرفته شود، پهنای طیف نور ابرپایستار تولیدشده بسیار وسیع خواهد بود که بخشی از ناحیهٔ مرئی تا بخشـــی از ناحیهٔ مادون قرمز میانی را دربرمی‌گیرد. با استفاده از توری براگ (یا فیلترهای مناســـب دیگر) می‌توان فرکانس مورد نیاز را از دیگر فرکانس‌هـــا جدا کرد. ناحیهٔ طیفی تولیدشـــده علاوه‌بر کاربرد در صنعت، در پزشـــکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار اســـت. برای مثال طول‌موج‌های در حدود ۱۰۰۰ نانومتر برای چشم‌پزشـــکی و پوست‌شناسی و طول موج های حدود ۱۳۰۰ نانومتر برای دندان‌پزشکی به‌دلیل اینکه تصویربرداری توموگرافی همدوس اپتیکی با پاشندگی کم، عمق نفوذ و حساسیت بالا را فراهم می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱۱]. همچنین ناحیهٔ ۱۳۰۰ تـــا ۱۵۵۰ نانومتر به‌دلیل عمق نفوذ بالا برای توموگرافی همدوس اپتیکی از بافت‌های زیستی مناسب هستند[۱۲]. در تشخیص سلول‌های سرطانی از ســـلول‌های سالم از نواحی فرکانســـی ۱۲۲۶ تا ۱۲۵۱ نانومتر و ۱۲۸۸ تا ۱۳۷۰ نانومتر استفاده می‌شود[۱۳]. همان‌طورکه مشخص است، طیف نور ابر پایســـتار تولیدشـــده (شـــکل۳) این طول‌موج‌ها را شامل می‌شود. دراینجا فقط کاربرد چند طول موج از این طیف بیان شد.

همان‌طورکه در بخش یافته‌ها بیان شـــد، شانه‌های فرکانسی تولیدشده در طیف خروجی تار ویندمیل نســـبت به تار معمولی گسترهٔ طول‌موجی وسیع‌تری را شامل می‌شود. همچنین فاصلهٔ بین دندانه‌های طول موجی نســـبت به قبل نزدیک‌تر به‌هم هســـتند. ازآنجاکه شـــانه‌های فرکانسی کاربردهای مختلفی دارند و به اختصار می‌توان کاربرد آن‌ها در علم اندازه گیری فرکانس نوری، ســـاعت اتمی نوری و طیف‌نـــگاری را نام برد، پس دو نتیجهٔ گســـتردگی طول موج (فرکانس) طیف ابرپایستار تار ویندمیل و شانه‌های طول موجی (فرکانســـی) ایجادشده نشان از کاربرد منبع نور ابرپایستار توسط تار ویندمیل را دارد.

به‌طورکلی با توجه به طیف ابرپیوستار به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که تار ویندمیل می‌تواند عامل توســـعهٔ منابع نور ابرپایستار باشد. زیرا به کمک تار ویندمیل طول‌موج‌های پیوسته‌ای با به‌کارگیری یک منبع نوری ایجاد خواهد شـــد. این مطلب گســـترهٔ طول موجی بیشتری را در اختیار محققـــان و کاربران آن قرار می‌دهد و بنابرایـــن کارآیی بالاتری را ایجاد خواهد کرد. عدم وجود منبع نوری ابرپایستار برای کاربردهای مختلف نور در صنعت و پزشکی به‌کارگیری طیف وسیعی از لیزرها را می‌طلبد. امروزه با اســـتفاده از منابع نوری ابرپایستار و توری‌های تاری (نظیر توری براگ) می‌توان از یک پالس نوری دامنهٔ وسیعی از طول موج‌ها را ایجاد نمود و به انتخاب به‌کار گرفت. اما با در دست نبودن منبع نوری ابرپایستار ضرورت دارد برای هر کاربرد از یک نوع منبع نوری لیزر استفاده کرد.

References:

1. Saleh BEA, Teich MC. Fundamentals of photonics, 2nd ed., Wiley: New York, 2007.

2. Safaei A, Bassi, Bolorizadeh MA. Quantum treatment of field propagation in a fiber near zero dispersion wavelength. J Opt 2018; 20: 055402.

3. Agrawal GP. Fiber optic communication systems, 4th ed., Wiley: New York, 2007.

4. Dudley GM, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. Rev Mod Phys 2006; 78: 1135.

5. Dudley GM, Taylor JR. Supercontinuum generation in optical fibers, Cambridge University Press: New York, 2010.

6. Udem T, Reichert J, Holzwarth R, Hansch TW. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser. Opt Lett 1999; 24: 881.

7. Shi L, Alfano R. Future supercontinuum microscope for medical and biological applications. Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO): Applications and Technology 2017; 14-7.

8. Fujimoto G. Optical coherence tomography for ultrahigh resolution in vivo imaging, Nat Biotechnol 2003; 21: 1361.

9. Kaminski CF, Watt RS, Elder AD, Frank JH, Hult J. Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy. Appl Phys B 2008; 92: 367-78.

10. Wildanger D, Rittweger E, Kastrup L, Hell SW. STED microscopy with a supercontinuum laser source. Opt Express 2008; 16: 9614-21.

11. Begum F, Namihira Y, Kaijage SF, Kinjo T. Broadband supercontinuum spectrum generated highly nonlinear photonic crystal fiber applicable to medical and optical communication systems. Japanese J App Phys 2011; 50: 0925021-6.

12. Hossain MA, Namihira Y, Razzak SMA. Supercontinuum generation at 1.55 μm using highly nonlinear photonic crystal fiber for telecommunication and medical applications. Opt Rev 2012; 19: 315-9.

13. Akbari H, Uto K, Kosuji Y, Kojima K, Tanaka N. Cancer detection using infrared hyperspectral imaging. Cancer Sci 2011; 102: 852-7.

14. Russell P. Photonic crystal fibers. Science 2003; 299: 358-62.

15. Cheng Y. Design and analysis of large-core single-mode windmill single crystal sapphire optical fiber. Opt Eng 2016; 55: 066101.

16. Kim JH, Chen MK, Yang CE, Lee J, Yin S, Ruffin P, Edwards E, Brantly C, Luo C. Broadband IR supercontinuum generation using single crystal sapphire fibers. Opt Express 2008; 16: 4085-93.

17. Yin S, Zhan C, An JW, Lee J, Ruffin P, Edwards E, Brantley C, Luo C. Supercontinuum generation in single crystal sapphire fibers. Opt Commun 2008; 281: 1113-7.

18. Liu C, Wu H, Feng L, Yang A. Parallel fourth-order Runge-Kutta method to solve differential equations. In: Liu B, Chai C (eds) Information Computing and Applications. ICICA 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 7030. Springer: Berlin.

19. Pu M, Ottaviano L, Senenova E, Yvind K. Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator. Optica 2016; 3: 823-8.