

تولید نور ابرپایستار با پهنای وسیع در ناحیه مادون قرمز در تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد

خلاصه

مقدمه: امروزه، منابع نور ابرپایستار کاربردهای متنوعی در تکنولوژی و پزشکی به دست آورده‌اند به‌ویژه هنگامی که این منابع شامل ناحیه 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 استفاده 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 شدت میدان الکترومغناطیسی عبوری از آن‌ها باید به اندازه کافی بالا باشد. 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: برهمکنش 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 ابرپایستار که از برهمکنش پدیده‌های غیرخطی و پاشنده ایجاد شده است با معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته توصیف می‌شود. در این مقاله فرآیند تولید نور ابرپایستار در تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد هنگامی که پالس لیزر با توان قله بالا به آن وارد می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از معادلات ماکسول در نظریه کلاسیکی امواج الکترومغناطیسی، معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم‌یافته به دست می‌آید. برای بررسی فرآیند تولید نور ابرپایستار توسط تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد، این معادله که فرآیند تولید ابرپایستار را توضیح می‌دهد به صورت عددی با الگوریتم رونگ-کوتای مرتبه چهارم حل می‌شود.

یافته‌ها: طیف ابرپایستار خروجی برای طول ۵ و ۲۰ سانتی‌متر از تار ویندمیل تک کریستال سافایر تک مد شبیه‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهند که طیف نور ابرپایستار تولیدشده در مقایسه با یک مورد مشابه برای تار معمولی تک کریستال سافایر تا دو برابر می‌شود. ضمناً

ابوالفضل صفایی^۱
محمد آقا بلوری زاده^۲

۱. دانشجوی دکتری فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
۲. استناد تمام فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

طیف خروجی ایجاد شده شامل شانه‌های فرکانسی نزدیک به هم در محدوده وسیعی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که طیف ابرپایستار ایجاد شده به‌طور کامل ناحیه مادون قرمز نزدیک را پوشش می‌دهد و بخشی از ناحیه مرئی و ناحیه 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 مشخصه تار ویندمیل، در این مقاله اساس کار برای شبیه‌سازی تولید طیف نور ابرپایستار در این تار حل عددی معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته بود. در حل عددی هر معادله دیفرانسیل باید الگوریتمی انتخاب شود که جواب به‌دست آمده پایدار، دقیق و همگرا باشد. نشان داده شد که الگوریتم رونگ- کوتای مرتبه چهار برای حل معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته مناسب است. با استفاده از این الگوریتم، طیف خروجی از تار ویندمیل برای دو طول منتخب شبیه‌سازی شد. همچنین نتایج به‌دست آمده برای تار ویندمیل با نتایجی که برای تار نوری معمولی وجود دارد، مقایسه گردید

نتیجه‌گیری: نشان داده شد که طیف ابرپایستار شبیه‌سازی شده در این تحقیق، به دلیل هندسه خاص و ویژگی‌های اپتیکی تار ویندمیل تک کریستال سافایر دارای پهنای فرکانسی بسیار گسترده به‌ویژه در ناحیه مادون قرمز است. با استفاده از فیلترهای مناسب می‌توان فرکانس مورد نیاز را از دیگر فرکانس‌ها برای کاربردهای مختلف جداسازی کرد. درحالی‌که از یک لیزر استفاده می‌شود گستره وسیعی از فرکانس‌ها در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. بنابراین این منبع نور مادون قرمز برخی از درمان‌های پزشکی و همچنین طیف‌نگاری در ناحیه مادون قرمز را تسهیل می‌کند و شانه‌های فرکانسی ایجاد شده در آن اندازه‌گیری فرکانس نوری در محدوده مادون قرمز را توسعه می‌دهد.

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

نویسنده مسئول: محمدآقا بلوری زاده، تلفن: ۰۹۱۳۱۴۱۰۵۸۰
پست الکترونیک: mabolori@uk.ac.ir

مقدمه

مطالعات بر روی فرآیند تولید نور ابرپایستار از دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و از آنجایی که این فرآیند مکانسیم 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 جامعه علمی عرضه شده‌اند [۵].

منبع نور ابرپایستار کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های طیف‌نگاری، مخابرات، فشردگی پالس، طراحی منابع لیزری قابل تنظیم فوق سریع از نوع فمتوثانیه و یا علم اندازه‌گیری نوری دارد. در علم اندازه‌گیری نوری با استفاده از نوری مرجع با فرکانس کالیبره شده، فاصله فرکانسی بین نور مرجع و نور مجهول را با استفاده از شانه‌های فرکانسی که در

با اختراع لیزر، مبحث اپتیک غیرخطی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفت و نقش بسیار زیادی نه تنها در توسعه علم اپتیک بلکه در علوم بین رشته‌ای داشته است [۱]. پهن‌شدگی طیفی و تولید مؤلفه‌های فرکانسی جدید، از ویژگی‌های ذاتی اپتیک غیرخطی می‌باشد [۲]. از دهه 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^۱ شناخته می‌شود [۴].

1. Supercontinuum Generation

معادله که معادله حاکم بر فرآیند تولید نور ابرپایستار می باشد، به صورت:

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

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

می باشد که در آن $A(z, T)$ ، ω ، β_k ، γ و α به ترتیب دامنه پالس لیزر، فرکانس مرکزی پالس ورودی، پاشندگی مرتبه k ام، پارامتر غیرخطی و ضریب تضعیف تار نوری هستند. تابع $R(T)$ به صورت:

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

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

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

نوشته می شود و آثاری نظیر خود جابه جایی فرکانسی سالیتون رامن را توصیف می کند. در رابطه (۳)، $\Theta(T)$ تابع پله هویساید می باشد و پارامترهای τ_1 و τ_2 به گونه ای انتخاب می شوند که نمودار طیفی بهره رامن تطبیق خوبی با طیف بهره رامن واقعی، که به صورت تجربی اندازه گیری می شود، داشته باشد. مدوله سازی فاز خودی، مدوله سازی فاز عرضی، مخلوط کردن چهار موج، شکافتن سالیتون^۴، پراکندگی رامن القایی و خود سراسیبی عمده ترین پدیده های غیرخطی هستند که در فرآیند تولید نور ابرپایستار نقش اساسی دارند با معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته قابل توصیف می باشند. اگر $f_R = 0$ فرض شود، رابطه (۱) به صورت:

(۴)

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

حاصل می شود که فقط پدیده های غیرخطی مدوله سازی فاز خودی، مدوله سازی فاز عرضی و مخلوط کردن چهار موج را توصیف می کند. اما همیشه f_R غیر صفر است. زیرا پاسخ محیط به پالس ورودی آنی نیست هر چند در بعضی مواقع می توان آن را آنی در نظر گرفت. مقدار قابل توجه f_R برای پالس های ورودی خیلی کوتاه و همچنین وجود مشتق مرتبه اول زمانی در سمت راست رابطه (۱) باعث می شود که این رابطه پدیده های غیرخطی خود سراسیبی و پراکندگی رامن برانگیخته را نیز توصیف نماید.

فرآیند ابرپایستار ایجاد می شوند، اندازه گیری می کنند [۶]. اما این منبع نور جدید (نور ابر پایستار) کاربردهای میان رشته ای وسیعی به ویژه در پزشکی و بیوفوتونیک دارد [۷ و ۵]. از این کاربردها می توان به توموگرافی همودس اپتیکی که توانایی عکسبرداری سه بعدی با قدرت تفکیک بالا را از داخل موادی مانند بافت های زیستی فراهم می کند [۸]، و یا جایگزینی منابع نور ابرپایستار به جای منابع نوری لامپی برای اندازه گیری های نسبت سیگنال به نویز بالاتر در محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک اشاره کرد [۹]. همچنین این منابع می توانند جایگزین لیزرهای گازی و حالت جامد در ابزارهایی نظیر فلورومتر، میکروسکوپ و سیتومتر شوند که منجر به کاهش قیمت، کارایی بیشتر، اندازه کوچک تر و پیچیدگی بسیار پایین تر می شوند [۱۰]. در پزشکی نیز منابع نوری ابرپایستار بسته به گستره فرکانسی شان برای تشخیص سرطان، بهبود زخم، سوزاندن بافت، تحریک عصبی برای درمان و بهبود برخی از بیماری ها مورد استفاده قرار می گیرند [۱۱-۱۳ و ۷].

امروزه، به دلیل پیشرفت تکنولوژی، قابلیت مهندسی مشخصه های اپتیکی (ضرایب پاشندگی و پارامتر غیرخطی) تارهای نوری وجود دارد [۱۴]، بنابراین از تار نوری به عنوان محیط مناسب برای تولید نور ابرپایستار استفاده می شود. با توجه به مشخصه های اپتیکی تار نوری و پالس لیزر ورودی، میزان پهن شدگی و شدت فرکانس های تولید شده در طیف خروجی مشخص می شود. اخیراً تار نوری جدیدی طراحی و ساخته شده است که علی رغم اینکه دارای مغزی بزرگ می باشد به صورت تک مد عمل می کند [۱۵]. نام این تار نوری برگرفته از هندسه اش، شکل ۱، که شبیه آسیاب بادی (ویندمیل^۲) است، می باشد و از تک کریستال سافایر ساخته شده است. با توجه به رابطه پاشندگی و سایر ویژگی های اپتیکی (برای مثال داشتن پارامتر غیرخطی مناسب) برای تک کریستال سافایر [۱۶ و ۱۷] و مشخصه های ساختاری مطرح شده برای آن [۱۵]، از این تار نوری می توان به عنوان محیطی برای تولید ابرپایستار توان بالا در محدوده مادون قرمز استفاده کرد که می تواند کاربردهای متنوعی داشته باشد.

تئوری و روش بررسی

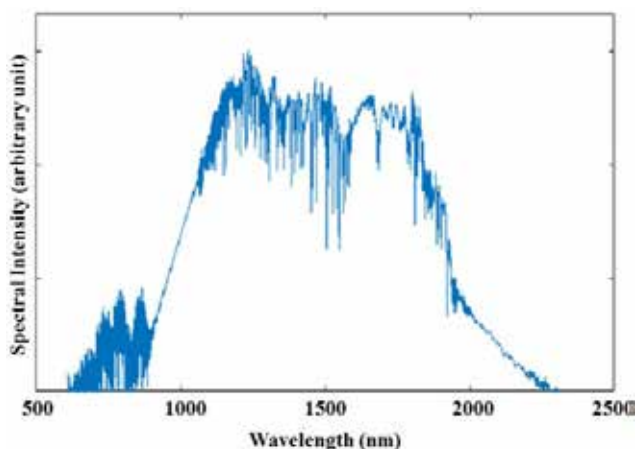
در نظریه کلاسیکی امواج الکترومغناطیسی، معادله موج که از معادلات ماکسول^۳ به دست می آید، توصیف کننده برهمکنش موج الکترومغناطیسی با محیط انتشار است. قسمت عرضی معادله موج مدهای انتشاری در محیط را مشخص می کند و قسمت طولی معادله موج انتشار موج در محیط را توضیح می دهد. قسمت طولی معادله موج در تقریب پوش کند تغییر [۳] معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته [۵] نامیده می شود. این

2. Windmill

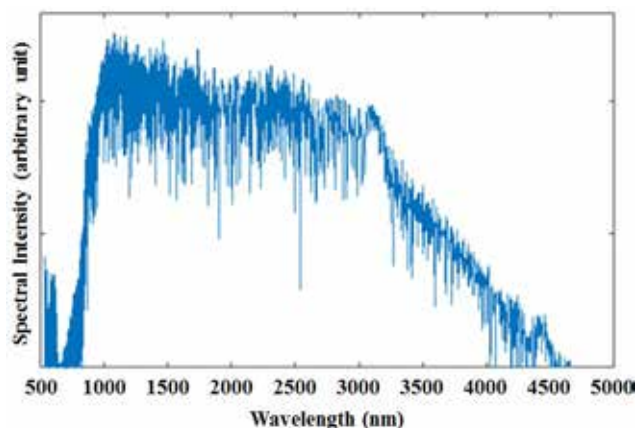
3. Maxwell

یافته‌ها

و همچنین بخشی از ناحیه مرئی و ناحیه 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 به همی را در ناحیه 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 به‌دست‌آمده 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.



شکل ۲: طول موج‌های تولیدشده (طیف نور ابرپایستار) در خروجی تار ویندمیل تک کریستال سافایر به طول ۵ سانتی‌متر



شکل ۳: طول موج‌های تولیدشده (طیف نور ابرپایستار) در خروجی تار ویندمیل تک کریستال سافایر به طول ۲۰ سانتی‌متر

برای اینکه بتوان نتایج شبیه‌سازی طیف نور ابرپایستار برای تار ویندمیل تک کریستال سافایر را با نتایج به‌دست‌آمده در منابع [۱۷، ۱۶] برای تار معمولی تک کریستال سافایر مقایسه کرد، ضرورت دارد که پارامترهای پالس ورودی (پهنای پالس، توان قله و طول موج مرکزی) را یکسان در نظر گرفت. روش‌های عددی مختلفی برای حل معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته (۱) وجود دارد [۳]. در این مقاله، از روش رونگ کوتای [۱۸] مرتبه ۴ برای حل معادله (۱) استفاده شده است و پارامترهای به‌کار گرفته‌شده در این شبیه‌سازی نیز در جدول (۱) آورده شده‌اند.

شکل (۲) نتیجه شبیه‌سازی معادله 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 (تقریباً ۲ برابر) است. در این نتایج، گستره طیف نور ابرپایستار خروجی برای طول موج مرکزی پالس ورودی ۱۲۹۰ نانومتر، از ۶۰۰ تا ۲۳۰۰ نانومتر به‌دست می‌آید. در حالی که گستره طیف خروجی از تار معمولی تک کریستال 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 تولیدشده ناحیه مادون قرمز نزدیک طیف امواج الکترومغناطیس به‌طور کامل در برمی‌گیرند

جدول ۱: 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	$9.1 \times 10^{-4} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$
λ_0	Reference (Center) Wavelength	1290 nm
β_2	Second-order Dispersion Coefficient	$-92.4 \times 10^{-3} \text{ ps}^2 / \text{m}$
β_3	Third-order Dispersion Coefficient	$-1.5 \times 10^{-3} \text{ ps}^3 / \text{m}$
P_0	Peak Power	$8.035 \times 10^5 \text{ W}$
T_0	Duration of Input Pulse	150 fs

بحث و نتیجه‌گیری

که تار ویندمیل می‌تواند عامل توسعه منابع نور ابرپایستار باشد. زیرا به کمک تار ویندمیل طول موج‌های پیوسته‌ای با به‌کارگیری یک منبع نوری ایجاد خواهد شد. این مطلب گستره طول موجی بیشتری را در اختیار محققان و کاربران آن قرار می‌دهد و بنابراین کارایی 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 استفاده از منابع نوری ابرپایستار و توری‌های توری (نظیر توری براگ) می‌توان از یک پالس نوری دامنه 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.

در این مقاله با توجه به اهمیت منابع نوری ابرپایستار که کاربردهای متنوعی در شاخه‌های مختلف علم و به‌صورت تجاری در صنعت و پزشکی دارد، به بررسی طیف نور ابرپایستار خروجی از تار نوری ویندمیل تک کریستال سافایر که اخیراً ساخته شده است، پرداخته شد. این تار نوری به دلیل طراحی ویژه‌اش، مشخصه‌های اپتیکی منحصر به فردی را دارا می‌باشد. برای به‌دست آوردن طیف نور ابرپایستار خروجی از این تار نوری، معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته که معادله حاکم بر فرآیند ابرپایستار می‌باشد با به‌کارگیری روش رنگ-کوتای مرتبه ۴ [۱۸] حل شد. نتایج نشان می‌دهند که پهن شدن طیف نور ابرپایستار شبیه‌سازی شده در طول ۵ سانتی‌متر از تار نوری ویندمیل تک کریستال سافایر در مقایسه با طیف به‌دست آمده از تار معمولی تک کریستال سافایر [۱۶ و ۱۷] با به‌کارگیری منبع لیزر یکسان تقریباً دو برابر است. اگر طول تار نوری ویندمیل ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، پهنای طیف نور ابرپایستار تولید شده بسیار وسیع خواهد بود که بخشی از ناحیه مرئی تا بخشی از ناحیه مادون قرمز میانی را دربرمی‌گیرد. با استفاده از توری براگ (یا فیلترهای مناسب دیگر) می‌توان فرکانس مورد نیاز را از دیگر فرکانس‌ها جدا کرد. ناحیه طیفی تولید شده علاوه بر کاربرد در صنعت، در پزشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مثال طول موج‌های در حدود ۱۰۰۰ نانومتر برای چشم‌پزشکی و پوست‌شناسی و طول موج‌های حدود ۱۳۰۰ نانومتر برای دندان‌پزشکی به دلیل اینکه تصویربرداری توموگرافی همدوس اپتیکی با پاشندگی کم، عمق نفوذ و حساسیت بالا را فراهم می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]. همچنین ناحیه ۱۳۰۰ تا ۱۵۵۰ نانومتر به دلیل عمق نفوذ بالا برای توموگرافی همدوس اپتیکی از بافت‌های زیستی مناسب هستند [۱۲]. در تشخیص سلول‌های سرطانی از سلول‌های سالم از نواحی فرکانسی ۱۲۲۶ تا ۱۲۵۱ نانومتر و ۱۲۸۸ تا ۱۳۷۰ نانومتر استفاده می‌شود [۱۳]. همان‌طور که مشخص است، طیف نور ابرپایستار تولید شده (شکل ۳) این طول موج‌ها را شامل می‌شود. در اینجا فقط کاربرد چند طول موج از این طیف بیان شد.

همان‌طور که در بخش یافته‌ها بیان شد، شانه‌های فرکانسی تولید شده در طیف خروجی تار ویندمیل نسبت به تار معمولی گستره طول موجی وسیع‌تری را شامل می‌شود. همچنین فاصله بین دندان‌های طول موجی نسبت به قبل نزدیک‌تر به هم هستند. از آنجاکه شانه‌های فرکانسی کاربردهای مختلفی دارند و به اختصار می‌توان کاربرد آن‌ها در علم اندازه‌گیری فرکانس نوری، ساعت اتمی نوری و طیف‌نگاری را نام برد، پس دو نتیجه گسترده‌تری طول موج (فرکانس) طیف ابرپایستار تار ویندمیل و شانه‌های طول موجی (فرکانسی) ایجاد شده نشان از کاربرد منبع نور ابرپایستار توسط تار ویندمیل را دارد.

به‌طور کلی با توجه به طیف ابرپایستار به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت

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, Brantly 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.