

## کوک پذیری فاصله کانونی تراجت فوتونی با استفاده از شبه فلز دیراک در محدوده

### فرکانسی تراهرتز

بابک یحیی پور، بهروز رضائی

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

### چکیده

در این مقاله کوک پذیری فاصله کانونی تراجت فوتونی با استفاده از روش *FDTD* با قدرت تفکیک بالا مورد بررسی قرار گرفته است. تراجت فوتونی در قسمت سایه میله دی الکتریک استوانه ای پوشیده شده با شبه فلز دیراک، که تحت تابش یک موج تخت در محدوده فرکانسی تراهرتز قرار می گیرد، ایجاد می شود. کوک پذیری تراجت فوتونی می تواند از اعمال یک میدان الکتریکی خارجی به شبه فلز دیراک که منجر به تغییر انرژی فرمی یا ضریب شکست آن می شود، حاصل شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که فاصله کانونی تراجت فوتونی طراحی شده وابستگی قابل ملاحظه ای به انرژی فرمی شبه فلز دیراک دارد.

### مقدمه

نانوجت های فوتونی از برخورد موج تخت به میکرو- استوانه یا کره های دی الکتریک با شعاع و ضریب شکست بهینه حاصل می شوند که اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط گروه تافلو گزارش گردید [۱]. نانوجت فوتونی یک پرتو الکترومغناطیس است که در قسمت سایه میکرواستوانه یا میکروکره دی الکتریک با قطر بزرگتر از طول موج فرودی ایجاد می شود و دارای خصوصیات نوری منحصربفردی از قبیل: (۱) غیرمیرا و دارای طول انتشار بیش از دو برابر طول موج فرودی (۲) پهنای کوچک تر از حد پراش کلاسیکی (۳) شدت بسیار بالا و بیش از شدت موج فرودی است [۲]. اخیراً تراجت های فوتونی در محدوده فرکانسی تراهرتز مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. هدف از مطالعه این ساختار ها افزایش پیشرفت تکنولوژی تراهرتز به منظور کاربرد در زمینه های مختلف زیست شناسی، پزشکی، مخابرات و طیف سنجی می باشد. در این مقاله یک استوانه دی الکتریک را که نیمه چپ آن بوسیله شبه فلز دیراک پوشیده شده است، در نظر گرفته و تحت تابش موج تخت قرار می دهیم. با انتخاب مناسب پارامترهای هندسی و فیزیکی مواد تشکیل دهنده این ساختار امکان تشکیل تراجت را مورد مطالعه قرار داده و فاصله کانونی آن را با تغییر ضریب شکست شبه فلز دیراک مورد مطالعه قرار می دهیم. ضریب شکست شبه فلز دیراک می تواند بوسیله یک میدان الکتریکی ساکن خارجی تغییر یابد که این امر از تغییر انرژی فرمی آن ناشی می شود [۴-۵].

تراجت فوتونی مورد مطالعه در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است که از میله دی الکتریک استوانه ای با ضریب شکست  $n_1$  و شعاع  $R$  در زمینه هوا،  $n_2=1$ ، تشکیل یافته و نیمه چپ آن توسط شبه فلز دیراک با ضخامت  $d_{DS}$  پوشیده شده است. تابع دی الکتریک شبه فلز دیراک از رابطه زیر حاصل می شود [۵]:

$$\epsilon_{DS}(\omega) = \epsilon_b + i \frac{\sigma_{DS}}{\omega \epsilon_0} \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon_b$  ثابت دی الکتریک موثر زمینه [۴] و  $\epsilon_0$  گذردهی خلا است.  $\sigma_{DS}$  رسانندگی نوری شبه فلز دیراک است و بصورت زیر تعریف می شود [۵]:

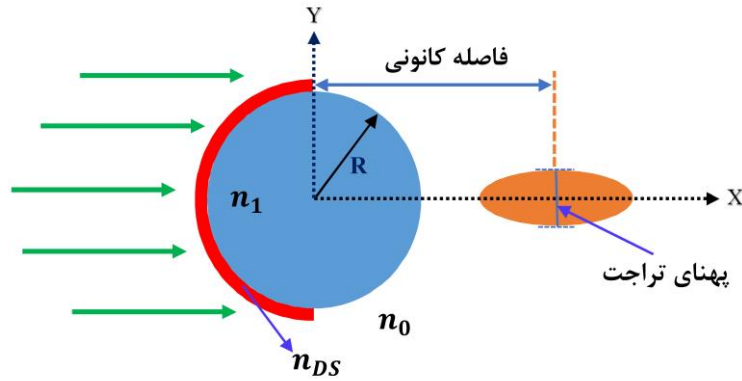
(۲)

$$\operatorname{Re} \sigma_{DS}(\Omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{g k_F}{24\pi} \Omega G(\Omega/2)$$

$$\operatorname{Im} \sigma_{DS}(\Omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{g k_F}{24\pi^2} \left\{ \frac{4}{\Omega} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{T}{E_F} \right)^2 \right] + 8\Omega \int_0^{\epsilon_c} \left[ \frac{G(\epsilon) - G(\Omega/2)}{\Omega^2 - 4\epsilon^2} \right] \epsilon d\epsilon \right\}$$

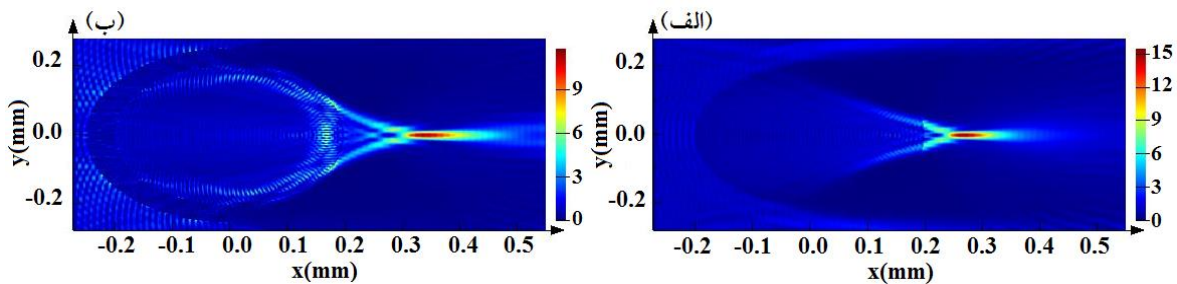
در رابطه فوق  $G(E) = n(-E) - n(E)$ ،  $n(E)$  توزیع فرمی-دیراک،  $\theta$  بار الکترون،  $g$  ضریب تبهگنی،  $k_F$  ممانتوم فرمی،  $\hbar$  ثابت کاهش یافته پلانک،  $\Omega = \hbar\omega/E_F$ ،  $k_F = E_F/\hbar v_F$ ،  $E_F$  انرژی فرمی،  $v_F$  سرعت فرمی،  $\epsilon_c = E_c/E_F$ ،  $\epsilon = E/E_F$  و  $E_c$  انرژی قطع می باشد. فرض می کنیم که راستای محور میله دی الکتریک در امتداد محور  $Z$  و میدان تابشی دارای قطبش الکتریکی (میدان الکتریکی در راستای محور  $Z$ ) است. راستای انتشار مطابق شکل ۱ در راستای محور  $X$  است. برای بررسی پاسخ نوری سیستم مورد مطالعه و امکان تشکیل تراجت، انتشار نور را با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان<sup>۱</sup> (FDTD) با قدرت تفکیک بالا شبیه سازی می کنیم [۶] و برای این منظور از نرم افزار لومریکال استفاده می کنیم. در این مطالعه بجای اعمال ولتاژ خارجی به شبه فلز دیراک، که منجر به تغییر انرژی فرمی آن می شود، انرژی فرمی را در شبیه سازی تغییر می دهیم. در نتیجه مطابق روابط (۱) و (۲) ضریب شکست شبه فلز دیراک می تواند با تغییر انرژی فرمی آن تغییر یابد. استوانه دی الکتریک از جنس ماده پلی اتیلن *PTFE* با شعاع  $R = 200 \mu m$  و ضریب شکست  $n = 1/44$  در محدوده فرکانسی تراهرتز می باشد [۷] و مطابق شکل ۱ نیمه چپ آن با شبه فلز دیراک به عنوان ماده ای با ضریب شکست کوک پذیر به منظور کنترل فاصله کانونی تراجت فوتونی پوشانده شده است. شبه فلز دیراک در این مقاله شبه بلور *AiCuFe* انتخاب شده است و پارامترهای فیزیکی مربوط به آن و همچنین کلیه پارامترهای مورد نیاز در این تحقیق عبارتند از:  $\epsilon_b = 1$ ،  $g = 40$ ،  $\epsilon_c = 3$ ،  $v_F = 1.0^7 m/s$  و  $T = 10 K$ ،  $d_{DS} = 50 \mu m$  [۵].

<sup>۱</sup>Finite-difference time-domain



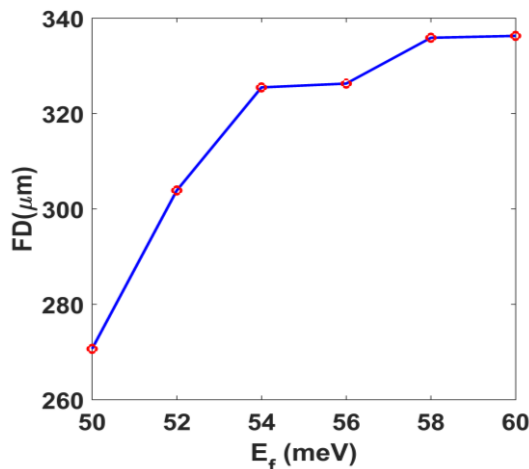
شکل ۱- ساختار شماتیکی تراجت فوتونی با لایه پوشش شبه فلز دیراک

یک موج تخت با فرکانس  $f=14\text{ THz}$  به ساختار مورد مطالعه فرود می آید. محاسبات انجام یافته بازای پارامترهای فوق و انرژیهای فرمی  $E_F=50\text{ meV}$  و  $E_F=60\text{ meV}$  به ترتیب در شکلهای ۲(الف) و ۲(ب) نشان داده شده است. نتایج شبیه سازیها نشان می دهد که فاصله کانونی تراجت فوتونی تشکیل شده به ازای انرژیهای فرمی فوق به ترتیب برابر  $FD=270\text{ }\mu\text{m}$  و  $FD=336\text{ }\mu\text{m}$  است و کوک پذیری قابل ملاحظه ای را با جابجایی  $66\text{ }\mu\text{m}$  نشان می دهد.



شکل ۲: تراجت فوتونی تشکیل شده بازای انرژی فرمی (الف)  $E_F=50\text{ meV}$  و (ب)  $E_F=60\text{ meV}$ .

در ادامه به منظور بررسی بیشتر موضوع، تغییرات فاصله کانونی تراجت فوتونی تشکیل شده را بر حسب انرژی فرمی لایه پوششی شبه فلز دیراک مطالعه می کنیم. نتایج حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش انرژی فرمی یا ضریب شکست شبه فلز دیراک فاصله کانونی تراجت فوتونی افزایش می یابد.



شکل ۳: تغییرات فاصله کانونی تراجت فوتونی بر حسب انرژی فرمی لایه پوششی شبه فلز دیراک.

## نتیجه گیری

نتایج محاسبات نشان داد که انرژی فرمی لایه پوششی شبه فلز دیراک می تواند نقش مهمی در کنترل تراجت فوتونی مورد مطالعه داشته باشد. ملاحظه شد که فاصله کانونی تراجت فوتونی شدیداً به انرژی فرمی یا عبارتی ضریب شکست شبه فلز دیراک وابسته است و با افزایش انرژی فرمی جابجایی قابل ملاحظه ای را نشان می دهد. این نتایج می تواند در تصویر برداری نانوذرات و حسگرهای نانو کاربرد داشته باشد.

## مرجع ها

- [1] Z. G. Chen, A. Taflove, V. Backman; "Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique"; *Opt. Express* **12** (2004) 1214-1220.
- [2] S. C. Kong, A. V. Sahakian, A. Heifetz, A. Taflove, V. Backman; "Photonic Nanojets"; *J. Comput. Theor. Nanosci* **6** (2009) 1979-1992.
- [3] V. Pacheco-Peña, M. Beruete, I. V. Minin, and O. V. Minin; "Terajets produced by dielectric cuboids"; *Appl. Phys. Lett.* **105** (2014) 084102.
- [4] O. V. Kotov and Yu. E. Lozovik; "Dielectric response and novel electromagnetic modes in three-dimensional Dirac semimetal films"; *Phys. Rev. B* **93** (2016) 235417.
- [5] H. Chen, H. Zhang, M. Liu, Y. Zhao, X. Guo, and Y. Zhang; "Realization of tunable plasmon-induced transparency by bright-bright mode coupling in Dirac semimetals"; *Optical Materials Express* **7** (2017) 3397-3407.
- [6] A. Taflove and S. Hagness; "*Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*"; Artech, Boston, MA (2000).
- [7] A. L. S. Cruza, C. M. B. Cordeiro and Marcos A. R. Franco; "Enhanced Terahertz transmission through 3D non-spherical terajets"; *24<sup>th</sup> International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS)* 9634, p. 963412 (2015).