بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

ماده‌ی مطلقا تاریک با استفاده از آرایه‌ی نانولوله‌های کربنی با چگالی کم

یاسر شمس‌اللهی[۱]، محمدکاظم مروج فرشی[۲] و ابوالفضل چمن‌مطلق[۳]

[۱] دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

[۲] دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

[۳] دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده – به کمک آرایه‌ای مربعی با چگالی کم از نانولوله‌های کربنی چند دیواره برای اولین بار با تقریب بسیار خوبی به جسم سیاه ایده‌آل با جذب ۹۹/۹۹٪ $A\approx$ در گستره‌ی طول موج‌های نور سبز حول λ=۵۳۴ *nm* دست یافتیم. جذب بیش از ۹۹٪ در پهنای باندی ۶۰ نانومتری اطراف نور سبز نیز مشاهده شد. همچنین، جذب بیش از ۸۰٪ در تمام گستره‌ی مرئی، ساختار مذکور برای کاربردهای تبدیل انرژی خورشیدی انتخابی مناسب خواهد بود. ضریب جذب α 1 μm^{-1} نیز به دست آمده که نسبت به گزارش‌های قبلی افزایشی حدود نه مرتبه را نشان می‌دهد.

کلید واژه- جسم سیاه، ضریب جذب، نانولوله‌ی کربنی چنددیواره.

Extremely Dark Material Using Low Density Multi-Walled Carbon Nanotube Array

Yasser Shamsollahi[1], M. K. Moravvej-Farshi[1] and A. Chaman-Motlagh[2]

[1]Faculty of Electrical and Computer Engineering Advanced Devices Simulation Lab, Tarbiat Modares University.

[2]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Department of Electronics, Imam Hossein University.

Abstract- Utilizing a low density square array of multi-walled carbon nanotubes we have demonstrated an almost ideal black body with A≈99.99% in green ranges of about λ=534 nm. Another observation is absorption more than 99% in a bandwidth of 60 nm around green range of visible light. Moreover, absorption more than 80% in whole visible range of light makes this structure a good candidate for solar energy conversion purposes. A high absorption coefficient of α 1 μm^{-1} has been achieved that is an order of magnitude more than the most one reported up to now.

Keywords: black body, absorption coefficient, multi-walled carbon nanotube.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

یک جسم سیاه ایده‌آل جسمی است که تمام رنگ‌های نور تابیده شده به خود از هر جهت و با هر قطبشی را به طور کامل جذب کرده و هیچ مولفه‌ای از نور را بازتابش نکند. در واقع، مفاهیم مربوط به جاذب کامل نور منجر به کشف مفاهیمی چون حفره‌ی جسم سیاه و همچنین، فرمول‌بندی موفق قوانین کیرشهف و قانون بازتابش پلانک در قرن بیستم شد. هرچند پدیده‌ی جسم سیاه در تئوری سال‌هاست که شناخته شده است، اما نشان دادن آن در عمل تا به امروز ممکن نشده است. در حقیقت، نبود ماده‌ای کدر با ضریب شکست کوچک نزدیک به ۱ انجام چنین آزمایشی را به تعویق انداخته است. برای این منظور باید محیطی تلفاتی برای نور ایجاد کنیم که در عین حال ضریب شکستی نزدیک به ۱ داشته باشد تا در مرز مشترک هوا و آن محیط، بازتابش رخ ندهد. به عنوان مثال، گرافیت بخش عمده‌ای از نور مرئی تابشی را به دلیل گذارهای نوری بین باندهای π جذب می‌کند [۱] اما گرافیت نیز در جذب محدودیت داشته و ۵ تا ۱۰٪ از نور تابشی را بازتابش می‌کند. طبق یک محاسبه‌ی تئوری در سال ۹۷ میلادی پیش‌بینی شد که می‌توان به ضریب شکست‌های بسیار کوچکی بین ۱/۰۱ تا ۱/۱۰ توسط آرایه‌ی با چگالی کم از نانولوله‌های کربنی رسید [۲]. آرایه‌های با چگالی کم از نانولوله‌ها علاوه بر این که به دلیل اختلاف ضریب شکست بسیار کمی که با هوا دارند نور را بازتابش نمی‌کنند، بلکه نور ورودی را به شدت جذب می‌کنند و به همین دلیل انتخاب بسیار مناسبی برای ساخت جسم سیاه ایده‌آل به حساب می‌آیند. البته قبلا گزارش شده که ماده‌ی nip تحت تابش عمودی بازتابش کوچکی بین ۰/۱۶ تا ۰/۱۸٪ را نشان می‌دهد. اما همین ماده تحت تابش با زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ای بازتابش بزرگی بین ۴ تا ۵٪ دارد که برای ماده‌ی کاملا تاریک مناسب نیست. در همین راستا در سال ۲۰۰۸ گزارش شد که با آرایه‌هایی از نانولوله‌های کربنی می‌توان به جذب نور بالایی (A>۹۹٪) با ضریب جذب $\alpha = 0.12\ \mu m^{-1}$ دست یافت [۳].

در این مقاله، همان‌طوری که در ادامه خواهیم دید برای آرایه‌ی منظم از نانولوله‌های کربنی با چگالی کم به جذب بالای ۹۹٪ می‌رسیم که در قله به ۹۹/۹۹٪ می‌رسد. همچنین، ضریب جذب ساختار پیشنهادی در این مقاله برابر $\alpha \approx 1\ \mu m^{-1}$ که حدود نه مرتبه نسبت به گزارش مرجع [۳] بهبود نشان می‌دهد. این باعث می‌شود که ضخامت لازم برای جذب یک‌سان در ساختار پیش‌نهادی ما نه مرتبه نسبت به [۳] کم‌تر شود.

جسم سیاه می‌تواند کاربردهای وسیعی از ساخت سلول‌های خورشیدی با بازده بالا که گستره‌ی وسیع‌تری از نور خورشید را جذب می‌کنند [۴] تا آشکارسازهای نوری پایروالکتریک [۵] داشته باشد.

با توجه به این که ساخت آرایه‌هایی منظم از نانولوله‌های کربنی چند دیواره عموما نیاز به آرایه‌هایی منظم از کاتالیست نیکل دارد، برای ثابت شبکه‌های چندصد نانومتر به بالا روش ساده، سریع و ارزان قیمت لیتوگرافی با نانوکره‌های پلی‌مری وجود دارد که در مقایسه با لیتوگرافی‌های با باریکه‌ی الکترونی و فرابنفش عمیق بسیار کارآمدترند و در ابعاد نسبتا وسیعی قابل اجرا می‌باشند. از این‌رو امروزه ساخت چنین آرایه‌هایی برای کاربردهای مختلف به سادگی و با قیمت ارزان قابل انجام است.

در ادامه، با استفاده از تابع گذردهی نانولوله‌های کربنی چنددیواره برای امواج با قطبش الکتریکی (TM) برای آرایه‌ی دو بعدی مربعی از نانولوله‌ها که قبلا رفتار بلور فوتونی آن‌ها را مورد بررسی قرار داده بودیم [۶] به جذب بالای ۹۹٪ می‌رسیم.

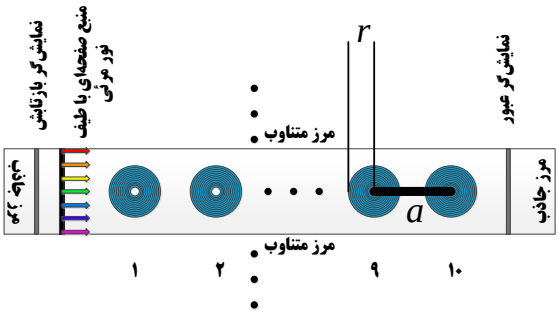
۲- طراحی پارامترهای ساختار

همان‌طوری که در بخش قبل ذکر شد، برای داشتن جسم سیاه باید محیطی داشته باشیم تا حداکثر جذب را در گستره‌ی نور مرئی داشته باشد و از طرفی، ضریب شکست آن برای این طول موج‌ها نزدیک به ۱ باشد تا کم‌ترین بازتابش را شاهد باشیم. با توجه به شکل ۷ از [۶] مشاهده می‌شود که برای ثابت شبکه‌های بزرگ در آرایه‌ی نانولوله‌های کربنی پراکنش براگ به فرکانس‌های پایین منتقل شده به طوری که با مشاهده‌ی شکل ۱a از همان مرجع و با انتخاب ثابت شبکه‌ی به قدر کافی بزرگ، به فرکانس‌های پایین‌تر از قله‌ی مربوط به گذار شبه‌فلزی اول در ۱۰۰۰ تراهرتز می‌رسیم. در این گستره‌ی فرکانسی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

قسمت موهومی گذردهی که متناسب با ضریب جذب ماده است مقدار بسیار زیادی بین ۶ تا ۷ دارد که برای منظور ما مناسب است. همان‌طوری که در ادامه خواهیم دید، از جفت شدگی شدید بین پراکنش براگ و نور تابشی به ساختار و تداخل مناسب آن‌ها، ضریب جذب برای یک گستره از طول موج‌های نزدیک به ثابت شبکه به شدت افزایش یافته و نور در این گستره به سرعت جذب می‌شود.

با انتخاب ثابت شبکه‌ی ۵۰۰ نانومتر که در میانه‌ی طول موج‌های مرئی است و با تغییر نسبت پر شدگی به دنبال حالت بهینه می‌رویم:



شکل۱: آرایه‌ی مربعی با چگالی کم از نانولوله‌های کربنی چند دیواره شامل ۱۰ ستون، صفحه‌ی ورودی با پیکان‌های رنگی معرف طیف نور مرئی، نمایش‌گرهای بازتابش و عبور و شرایط مرزی.

شکل۱ آرایه‌ای مربعی با چگالی کم از نانولوله‌های کربنی چند دیواره را نشان می‌دهد. با انتخاب ثابت شبکه‌ی ۵۰۰ نانومتری و چیدن فقط ۱۰ ستون از نانولوله‌ها که ضخامت فیلمی برابر ۵ میکرون دارد به شبیه‌سازی و محاسبه‌ی جذب ساختار با استفاده از بسته‌ی Optiwave می‌پردازیم.

۳- شبیه‌سازی

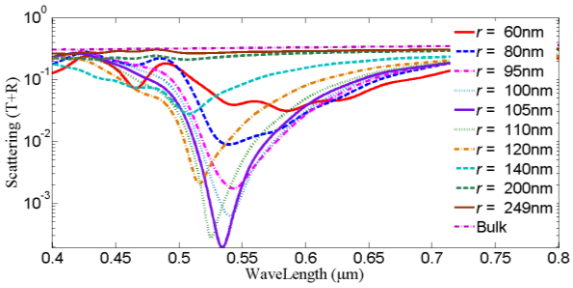
در شکل۱ منطقه‌ی شبیه‌سازی که با مستطیل خاکستری نشان داده شده را در نظر می‌گیریم که در آن، نمای از بالای ۱۰ ستون از نانولوله‌های چند دیواره را مشاهده می‌کنیم. به منظور جلوگیری از بازتابش از مرزها، لبه‌های ابتدایی و انتهایی منطقه‌ی شبیه‌سازی را با ۱۵ لایه‌ی جاذب پوشانده‌ایم. همچنین برای بررسی مقدار ضخامت لازم فیلم برای جذب نور و ضریب جذب، ساختار را به کمک شرط مرزی بلاخ به صورت جانبی تا بی‌نهایت به صورت متناوب در نظر گرفته‌ایم. خط توپر مشکی‌رنگ صفحه‌ی ورودی را نشان می‌دهد که پیکان‌های رنگی شامل طیف نور مرئی از آن خارج می‌شوند. البته نور خارج شونده نور سفید است و صرفا جهت نمایش مولفه‌های فرکانسی، به صورت رنگی نشانه‌گذاری شده است. خطوط خاکستری نزدیک به مرزهای ابتدایی و انتهایی نیز به ترتیب نمایش‌گرهایی جهت اندازه‌گیری مقدار نور بازتابیده شده و عبوری از ساختاراند. a و r نیز به ترتیب تناوب مکانی (ثابت شبکه) و شعاع سطح مقطع نانولوله‌های کربنی هستند. با اندازه‌گیری عبور (T) و بازتابش (R) به صورت نرمالیزه شده به منبع ورودی می‌توان طبق رابطه‌ی زیر مقدار جذب (A) را محاسبه کرد:

$$T+R+A=1 \qquad (۱)$$

این رابطه بیان‌گر آن است که از کل نور ورودی به ساختار مقداری در مرز ورودی بازتابش می‌شود، مقداری در امتداد ساختار جذب می‌شود و در نهایت مقداری از نور امکان عبور می‌یابد.

۴- نتایج و بحث

همان‌طوری که در بخش قبل گفتیم، با انتخاب تناوب شبکه‌ی a=۵۰۰nm تلاش می‌کنیم با تغییر چگالی محیط (شعاع نانولوله‌ها) به حد اکثر جذب برسیم.

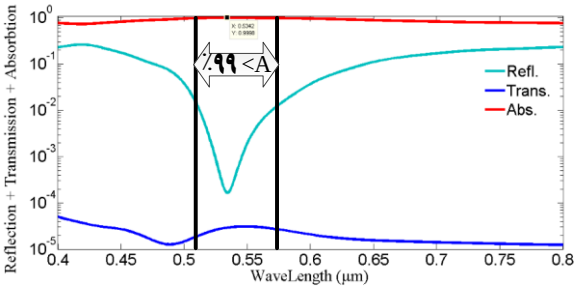


شکل۲: پراکنش ساختار (S) که برابر است با عبور + بازتابش بر حسب طول موج نور فرودی برای شعاع‌های مختلف در شکل۱.

شکل ۲ پارامتر پراکنش (S) ساختار نشان داده شده در شکل ۱ را بر حسب طول موج و برای r های مختلف نشان می‌دهد. به منظور نشان دادن اثر چیدمان و ابعاد ساختار، پراکنش را برای یک فیلم توپر با ضخامت ۵ μm نیز در شکل نشان داده‌ایم. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع از r =۶۰nm مقدار S برای طول موج‌های میانی کاهش می‌یابد و در r =۱۰۵nm به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن با افزایش شعاع دوباره S افزایش

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

می‌یابد. هرچند انتظار داریم با افزایش چگالی نانولوله‌ها به عنوان تنها جاذب‌های نور در محیط، همواره مقدار A افزایش یافته و در نتیجه S کاهش یابد اما نتایج جالب شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند برای نسبت پرشدگی محیط مقدار بهینه‌ای برابر ٪ ۱۳/۸= ff وجود دارد. مشاهده می‌شود که با چیدمان و ابعاد مناسب و در نتیجه، جفت شدگی که بین نور ورودی و پراکنش براگ اتفاق می‌افتد می‌توان برای چنین چگالی کمی از ماده به جذب نزدیک به ایده‌آل مربوط به جسم سیاه دست یافت. در واقع، کاهش چگالی محیط موجب کاهش ضریب شکست موثر محیط و نزدیک شدن آن به ضریب شکست هوا و در نتیجه بروز کم‌ترین بازتابش از مرز مشترک ساختار با هوا می‌شود.



شکل۳: نمایه‌های بازتابش، عبور و جذب بر حسب طول موج برای ساختار شکل ۱ با نسبت پرشدگی حدود ۱۴٪. جذب بیش از ۹۹٪ در گستره‌ی طول موج‌های ۵۱۱ تا ۵۷۰ نانومتر (تقریبا تمام گستره‌ی طول موج‌های رنگ سبز).

شکل ۳ نمایه‌های بازتابش، عبور و جذب را برای ساختار ۱۰ستونی شکل ۱ و با شعاع نانولوله‌های برابر ۱۰۵ نانومتر نشان می‌دهد. به منظور نمایش بهتر مقادیر بسیار کم عبور و همچنین مشاهده‌ی بهتر کاهش شدید بازتابش در طول موج‌های میانی، محور عمودی به صورت لگاریتمی رسم شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود هرچند طبق انتظاری که از ماده‌ای گرافیتی مانند نانولوله‌های کربنی چند دیواره داریم مقدار جذب در تمامی طول موج‌های گستره‌ی مرئی زیاد است، اما در برخی از طول موج‌ها مقدار جذب به صورت شگفت‌انگیزی افزایش می‌یابد به طوری که در محدوده‌ی طول موج‌های $511 < \lambda < 570$ نانومتر بیش از ۹۹٪ نور تابشی جذب شده و اطراف ۵۳۴ nm به ۹۹/۹۹٪ هم می‌رسد که طبق اطلاعات ما تا کنون گزارش نشده است. ضریب جذب α برای چنین ساختاری نیز طبق قانون بیر-لامبرت:

$$I(x) = I_0\, e^{-\alpha x} \qquad (۲)$$

و در گستره‌ی طول موج‌های با جذب بیش از ۹۹ درصد تقریبا برابر $\alpha \square 1\ \mu m^{-1}$ است (در ۵ میکرومتر بیش از ۹۹٪ نور جذب شده است و با توجه به تابع نمایی، در ۱ میکرومتر شدت نور به $1/e$ مقدار اولیه‌اش می‌رسد) که در آن $I(x)$ شدت نور پس از طی طول x از ساختار، I_0 شدت نور در لبه‌ی جلویی و درون ساختار و e عدد نپر است. این مقدار ضریب جذب تقریبا نه مرتبه از بالاترین ضریب جذبی که تاکنون گزارش شده یعنی $\alpha \square 0.12\ \mu m^{-1}$ مربوط به [۳] است بیش‌تر است.

۵- نتیجه‌گیری

به کمک آرایه‌ای مربعی از نانولوله‌های کربنی چند دیواره در هوا و با نسبت پرشدگی کوچک ۱۴٪ توانستیم به جذب بالای ۹۹٪ در یک پهنای باند ۶۰ نانومتری حول طول موج نور سبز دست پیدا کنیم. مقدار جذب در قله‌ی خود در λ=۵۳۴ nm به A≈٪۹۹/۹۹ می‌رسد. همچنین در λ=۵۳۴ nm به R≈$۱۰^{-۴}$ می‌رسیم که در اکثر کاربردها قابل اغماض است. مقدار عبور نیز در همه جا بسیار کوچک و کم‌تر از $۱۰^{-۴}$ است و در قله‌ی خود در طول موج λ=۵۳۴ nm از ۳×۱۰^{-۵} فراتر نمی‌رود. در نهایت، ضریب جذب بزرگ $\alpha \square 1\ \mu m^{-1}$ دستاورد دیگر این تحقیق است.

مراجع

[1] E. A. Taft and H. R. Philipp, "Optical Properties of Graphite," *Physical Review*, vol. 138, pp. A197-A202, 1965.

[2] F. J. García-Vidal, J. M. Pitarke, and J. B. Pendry, "Effective Medium Theory of the Optical Properties of Aligned Carbon Nanotubes," *Physical Review Letters*, vol. 78, pp. 4289-4292, 1997.

[3] Z.-P. Yang, L. Ci, J. A. Bur, S.-Y. Lin, and P. M. Ajayan, "Experimental Observation of an Extremely Dark Material Made By a Low-Density Nanotube Array," *Nano Letters*, vol. 8, pp. 446-451, 2008/02.

[4] C. G. Granqvist, "Solar Energy Materials," *Advanced Materials*, vol. 15, pp. 1789-1803, 2003.

[5] X. J. Wang, J. D. Flicker, B. J. Lee, W. J. Ready, and Z. M. Zhang, "Visible and near-infrared radiative properties of vertically aligned multi-walled carbon nanotubes," *Nanotechnology*, vol. 20, p. 215704, 2009.

[6] Y. Shamsollahi, M. Ebnali Heidari and M. K. Moravvej-Farshi, "Photonic crystals Based on Periodic Arrays of MWCNTs: Modeling and Simulation" *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 1946-1953, 2013.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]