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

بررسی تئوری خواص نوری لایه‌های نازک متشکل از نانوتیوب‌ها، در یک ساختار متناوب

امین میر، احمد مشاعی و نادر صبح‌خیز

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده‌ی علوم پایه، بخش فیزیک، گروه فیزیک اتمی و مولکولی، صندوق پستی ۱۷۵-۱۴۱۱۵

چکیده - در این پژوهش خواص نوری لایه‌های نازکی که از مجموعه‌ای از نانوتیوب‌ها تشکیل شده‌اند به‌صورت تئوری مورد بررسی قرارگرفته‌اند. نانوتیوب‌ها در این لایه نازک در یک ساختار متناوب قرار داشته و خواص نوری آن‌ها به ازای تغییرات در جنس مواد و نتیجتا ضریب دی‌الکتریک آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج کارهای انجام شده نشان می‌دهد که در این ساختار ها جذب برای قطبش موازی نور فرودی بیش از جذب برای قطبش عمود است. علاوه بر این ضریب دی‌الکتریک موثر در جهت محورهای اصلی نانوتیوب‌ها کم‌تر از مقدار این ضریب در جهت عمود بر این محور است.

کلید واژه- تئوری ماکسول گارنت، روش ماتریس انتقال، ضریب دی‌الکتریک موثر، همگن‌سازی

A theoretical study of optical properties of thin films composed of periodic nanotube structures

Amin Mir, Ahmad Moshaii, and Nader Sobh khiz

Department of physics, Tarbiat Modares University, P.O Box14115-175, Tehran, Iran moshaii@modares.ac.ir

Abstract: We study theoretically the optical properties of thin films composed of periodic nanotube structures during changes in permittivity of the component materials. After finding the effective permittivity of such structures by Maxwell-Garnet method, the reflection, transmission and absorption of them have been calculated. The results show that in such a periodic structures the absorbance for the parallel polarization is more than the perpendicular polarization. Also we showed that the effective permittivity in direction of the main axes of the nanotubes is less than the perpendicular one.

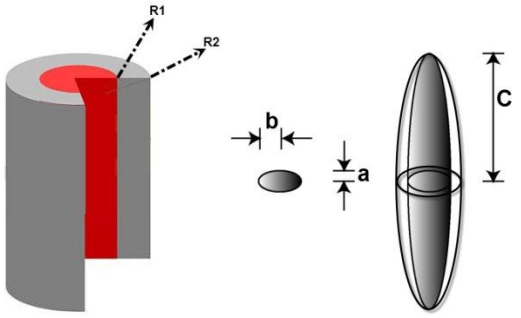
Keywords: Maxwell-Garnet effective medium theory; homogenization; transfer matrix method.

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

۱-مقدمه

تئوری ماکسول گارنت، به محیطی که از اجزا و مواد مختلفی تشکیل شده است یک ضریب دی‌الکتریک موثر نسبت می‌دهد. به عبارتی توسط این تئوری یک محیط ناهمگن را به‌صورت همگن در نظر می‌گیریم. ساده‌ترین مسئله که در این زمینه می‌توان مورد بررسی قرارداد بررسی محیطی است که در آن کره‌ها به‌طور همگن در یک محیط همسانگرد پخش شده‌اند. در این محیط در صورتی که چگالی کره‌ها نسبت به محیط پس‌زمینه کم باشد، کره‌ها را به عنوان محیط میهمان و محیط پس-زمینه را به عنوان محیط میزبان درنظرمی‌گیریم[۱]. تئوری مذکور به حالت‌های پیشرفته‌تر و پیچیده‌تری نیز بسط داده شده‌است که از جمله آن می‌توان به محیط‌های متشکل از بیش از دو ماده[۲]، محیط‌های متشکل از کره-های ناهمگن[۳]، محیط‌های متشکل از بیضی‌گون‌های ناهمگن[۴] و محیط‌های متشکل از نانوسیم‌ها اشاره کرد[۵و۶].

دامنه کاربرد این تئوری مربوط به طول موج‌هایی است که نسبت به ابعاد ساختار مورد نظر حداقل به اندازه ۶ برابر بزرگ‌تر باشند. از جمله استفاده‌های این تئوری می‌توان به کاربرد آن در نسبت دادن ضریب دی‌الکتریک موثر برای محیط‌هایی متشکل از برف، یخ و گردوغبار موجود در طبیعت گرفته تا نانوساختارها اشاره کرد و از این منظر کاربردهای متفاوت و جالبی دارد. ضریب دی‌الکتریک موثر به پارامترهای متفاوتی از جمله: شکل هندسی مواد تشکیل دهنده، ضریب دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده و نسبت حجمی که مواد در کل ساختار اشغال می‌کنند بستگی دارد. در ساختاری که از نانوستون‌ها تشکیل شده است، با یک تقریب مناسب، هریک از این ستون‌ها را می-توان به‌صورت یک بیضی‌گون بسیار کشیده در نظر گرفت.



شکل ۱: استوانه‌های لایه‌ای که آن‌ها را به‌صورت تقریبی می‌توان مانند بیضی‌گون‌های لایه‌ای در نظرگرفت.

در این مقاله ما نانوتیوب‌ها را به‌طور تقریبی به‌صورت بیضی‌گون‌های لایه‌ای مطابق آنچه در شکل۳ نشان داده شده است در نظر می‌گیریم که به صورت همگن در محیط پخش شده‌اند. و از این طریق ضریب دی‌الکتریک موثر محیط را به‌دست آورده و سپس خواص نوری لایه مورد نظر یعنی بازتاب، عبور و جذب را محاسبه می‌کنیم.

۲-بحث نظری

در ابتدا رابطه ماکسول گارنت را برای بیضی‌گون‌هایی که از دو لایه تشکیل شده‌اند به‌دست می‌آوریم. این بیضی-گون‌های لایه‌ای به‌صورت متناوب همان‌طور که در شکل۲مشاهده می‌شود، محیط میزبان را پرکرده‌اند. این محیط ناهمسانگرد بوده و ضریب دی‌الکتریک موثر آن در هریک از جهت‌های دستگاه مختصات دکارتی متفاوت است به همین دلیل باید آن را بصورت ماتریسی نمایش داد. هریک از مولفه‌های قطر اصلی این ماتریس را می‌توان به‌صورت زیر نوشت.

$$\frac{\varepsilon_{eff}^{i}-\varepsilon_e}{\varepsilon_{eff}^{i}+(\frac{1}{N_1^i}-1)\varepsilon_e}=f\,\frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_e)+(\varepsilon_e+(\frac{1}{N_1^i}-1)\varepsilon_1\frac{\frac{V_2}{V_1}(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}{\varepsilon_2+(\frac{1}{N_2^i}-1)\varepsilon_1}}{(\varepsilon_1+(\frac{1}{N_1^i}-1)\varepsilon_e)+(\frac{1}{N_1^i}-1)(\varepsilon_1-\varepsilon_e)\frac{\frac{V_2}{V_1}(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}{\varepsilon_2+(\frac{1}{N_2^i}-1)\varepsilon_1}} \qquad (۱)$$

دیگر مولفه‌های این ماتریس صفر هستند. در این رابطه ε_{eff}^{i} نشان‌دهنده ضریب دی‌الکتریک موثر در هریک از جهت‌های i یعنی x,y یا z می‌باشد. ε_eضریب دی-الکتریک محیط پس‌زمینه و ضریب دی‌الکتریک موثر بیضی‌گون درونی و بیرونی به‌ترتیب با ε_1و ε_2 نشان داده شده‌اند. N_1^i و N_2^i نشان‌دهنده ضریب واقطبش بیضی‌گون‌های درونی و بیرونی در جهت i یعنی x,y یا z هستند. پارامتر f نسبت حجم استوانه‌ها به حجم یک سلول واحد را بیان می‌کند و V_1 و V_2 نشان‌دهنده حجم استوانه‌های درونی و بیرونی هستند.

پس از یافتن ضریب دی‌الکتریک موثر این محیط مرکب از مواد مختلف، برای یافتن پاسخ این لایه نازک به یک موج تخت فازورهای امواج فرودی، بازتاب شده و عبوری را به-ترتیب به‌صورت زیر درنظر می‌گیریم[۷].

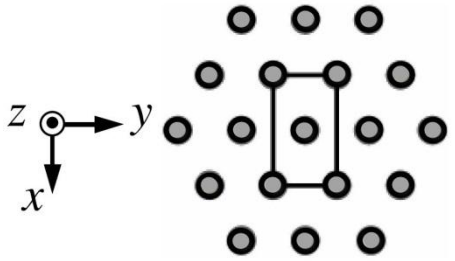
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{inc}(z) &= (a_s\mathbf{s}+a_p\mathbf{p}_+)e^{ik_0 z\cos\theta} && z\le 0 \\ \mathbf{E}_{ref}(z) &= (r_s\mathbf{s}+r_p\mathbf{p}_-)e^{-ik_0 z\cos\theta} && z\le 0 \\ \mathbf{E}_{tr}(z) &= (t_s\mathbf{s}+t_p\mathbf{p}_+)e^{ik_0(z-L)\cos(\theta)} && z\ge L \end{aligned} \qquad (۲)$$

لایه‌نازک در $0 \le z \le L$ قرارگرفته‌است. محورهای مختصات و ساختار متناوب در شکل۲ نشان داده شده‌اند. θ زاویه بین بردار انتشار و جهت مثبت محور zاست. و زاویه ψ نشان‌دهنده زاویه‌ای است که سایه بردار انتشار برروی صفحه $x-y$ با محور x می‌سازد. (a_s, a_p)، (r_s, r_p) و (t_s, t_p) دامنه امواج فرودی، بازتاب شده و عبوری با قطبش s و p هستند. این بردارها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند[۷].

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= -\mathbf{u}_x \sin\psi + \mathbf{u}_y \cos\psi \\ \mathbf{p}\pm &= \mp(\mathbf{u}_x \cos\psi + \mathbf{u}_y \sin\psi)\cos\theta + \mathbf{u}_z \sin\theta \end{aligned} \qquad (۳)$$

و بردارهای یکه‌ی عمود و موازی نور با قطبش خطی هستند. با قراردادن این فازورها در معادلات ماکسول بدون چشمه که دارای کرل هستند و استفاده از شرایط مرزی در $z=0$ و $z=L$ برای امواج فرودی، بازتابی و عبوری می‌توانیم ضرایب بازتاب و عبور را به روش ماتریس انتقال از طریق حل معادلات ماکسول در نرم‌افزار Mathemathica بدست آوریم.



شکل ۲: نانوتیوب‌ها در یک ساختار متناوب و سلول واحد این ساختار، محور اصلی استوانه‌ها در جهت z است.

۳-نتایج و جمع‌بندی

برای به‌دست آوردن ضریب دی‌الکتریک موثر، موادی با ضرایب دی‌الکتریک مختلف را بررسی کرده‌ایم. نتایج این محاسبات در جدول۱ ارائه شده‌اند. در این محاسبات پارامترهای بیضی‌گون‌های درونی و بیرونی به ترتیب با نسبت‌های $(c_1/a_1)=20$، $(c_2/a_2)=14$ و $(b_1/a_1)=(b_2/a_2)=1$ در نظرگرفته شده‌اند. در این روابط همان‌طور که در شکل۱ نیز دیده می‌شود c,b و a نصف قطرهای اصلی بیضی‌گون‌ها هستند. ضخامت لایه نازک ۲۰۰۰ نانومتر و ثابت‌های شبکه نیز ۱۰۰ و ۵۹ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی نیز به ترتیب ۱۴ و ۲۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این مقادیر نتیجتا f و V_2/V_1 به‌ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۴۲ به‌دست می‌آیند. ایجاد تغییرات در **f** در واقع به معنای ایجاد تغییرات در سلول واحد است. افزایش میزان **f** به معنای کاهش فاصله بین نانوتیوب‌ها و کاهش میزان **f** به معنای افزایش این فاصله است. طیف جذب برای نور طبیعی به‌صورت $A=(A_p+A_s)/2$ به دست می‌آید که همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود بر حسب تابعی از θ رسم شده اند. لازم به ذکر است که در این رابطه $A_i = 1-\sum_{j=s,p} R_{ji} + T_{ji}$ است. که در آن $i=s,p$، نشان‌دهنده مولفه‌های قطبش خطی است.

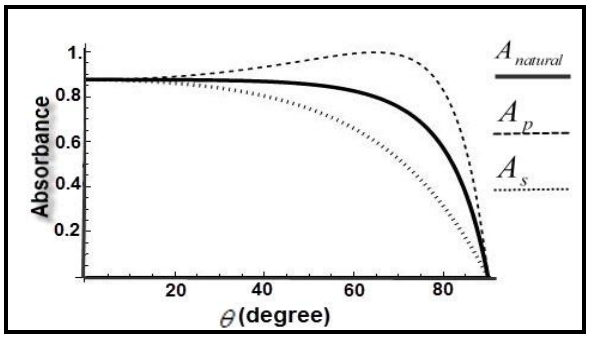
جدول ۱: ضریب دی‌الکتریک محاسبه شده برای ساختار مورد نظر

شماره	ضریب دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده			ضریب دی الکتریک موثر	
	ε_e	ε_2	ε_1	$\varepsilon_{eff,s}$	$\varepsilon_{eff,p}$
1	2.1+ i	8.41	1	3.95+ 1.03i	3.44+ 0.7i
2	2.1+ i	8.41	2.1+ i	4.11+ 1.04i	3.46+ 0.7i
3	1.76	8.41	1.76	3.50	3.19
4	1.	8.41	.21+ .1i	2.7- 0.03i	2.5+ 0.001i
5	2.13	2+ i	1.	2.5+ 0.04i	2.01+ 0.2i

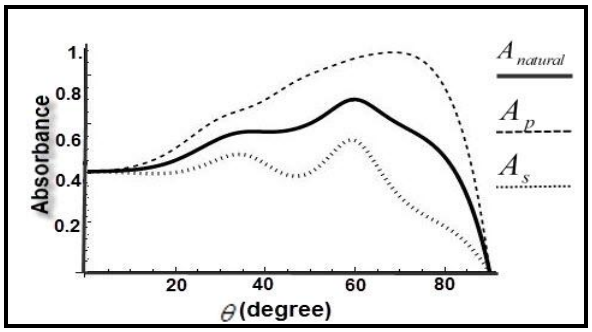
در حالت اول، استوانه ها، دی‌الکتریک بوده و ضریب دی-الکتریک محیط میزبان دارای قسمت موهومی است به عبارتی در این محیط اتلاف صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک موثر در حالت عمودی در تمامی حالت‌ها بیش از مقدار مربوط به آن در حالت موازی است و این نشان‌دهنده اثر اتلافی بیشتر نور در این راستا است. علاوه بر این جذب نور با قطبیدگی p در تمامی حالت‌ها بیش از جذب مربوط به قطبش s است. در حالتی که استوانه بیرونی اثر اتلافی دارد علامت قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک موثر منفی است. در حالت سوم ضریب دی‌الکتریک هیچ یک از محیط‌ها قسمت موهومی یا اثر اتلافی ندارد. به همین

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

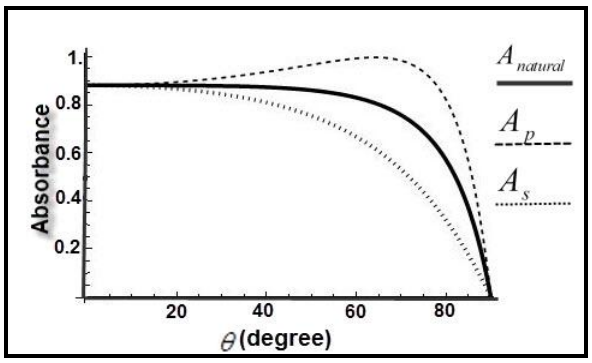
دلیل ضریب دی‌التریک موثرمحیط نیز اثر اتلافی نداشته و



شکل ۳: نمودار طیف جذب برای نور با قطبش S، p و نور طبیعی برحسب زاویه فرود برای حالت اول



شکل ۴: نمودار طیف جذب برای نور با قطبش S، p و نور طبیعی برحسب زاویه فرود برای حالت چهارم



شکل ۵: نمودار طیف جذب برای نور با قطبش S، p و نور طبیعی برحسب زاویه فرود برای حالت دوم

جذبی در لایه صورت نمی‌گیرد. همان‌طور که انتظار داریم در زوایای نزدیک به قائم با افزایش زاویه، جذب کاهش پیدا می‌کند تا جایی که در زاویه قائمه هیچ جذبی صورت نمی‌گیرد. در حالت چهارم استوانه داخلی فلزی بوده و اثراتلافی دارد. جذب بیشینه در این حالت در زاویه‌ای نزدیک به ۶۰ درجه رخ می‌دهد و این ساختار در زوایای نزدیک به ۷۵ درجه مانند یک قطبش‌گر عمل می‌کند چرا که جذب قطبش موازی ۱ است یا به عبارتی در این زاویه نور با قطبش موازی به طور کامل جذب می‌شود. همه این مطالب نشان می‌دهند که ایجاد تغییرات در مواد سازنده لایه‌های نازک می‌توانند خواص لایه را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر دهند و می‌توان خواص دلخواه را با انتخاب مواد مناسب پیش‌بینی کرده و به‌دست آورد.

۴-نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که در ساختاری که از نانوتیوب‌های متناوب تشکیل شده است ضریب دی‌الکتریک موثر در جهت عمود بر محور اصلی استوانه‌ها همواره بیش از مقدار این ضریب در جهت موازی محور اصلی نانوتیوب‌هاست. طیف جذب این ساختارها حاکی از جذب بیشتر قطبش موازی نسبت به قطبش عمود نور است. این لایه‌ها در برخی زوایای خاص با جذب کامل یک قطبش نور می‌توانند مانند که قطبش‌گر عمل کنند. علاوه بر این می‌توان مشاهده نمود که طیف جذب برای لایه نازکی با ضخامت معین که در معرض موجی با طول موج مشخص قرارگرفته است به زاویه فرود وابسته است و در زوایای بزرگ هنگامی که این زاویه به سمت زاویه قائمه میل می‌کند جذب در آن کاهش پیدا می‌کند تا جایی که به صفر می‌رسد.

مراجع

[1] A.Sihvola, *Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients*. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, **1**(4) (2000) 393-415.

[2] A.Sihvola, and I.V. Lindell, *Polarizability and Effective Permittivity of Layered and Continuously Inhomogeneous Dielectric Spheres.* **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, **3**(1) (1989) 37-60.

[3] A.Sihvola, and I.V. Lindell, *Polarizability and Effective Permittivity of Layered and Continuously Inhomogeneous Dielectric Ellipsoids*. Journal of **Electromagnetic Waves and Applications**,. **4**(1) (1990) 1-26.

[4] G.B.Yongmin Liu1, Xiang Zhang, *All-angle negative refraction and imaging in a bulk medium made of metallic nanowires in the visible region*. **Optics Express** 16(20) (2008)15439-15448.

[5] F.Chiadini, and A. Lakhtakia, *Design of wideband circular-polarization filters made of chiral sculptured thin films.* **Microwave and Optical Technology Letters**, **42**(2) (2004) 135-138.

[6] A.Lakhtakia, *Stepwise chirping of chiral sculptured thin films for Bragg bandwidth enhancement*. **Microwave and Optical Technology Letters 28**(5) (2001) 323-326.

[7] F.Babaei, and M. Omidi, *Characteristics of Plasmonic at a Metal/Chiral Sculptured Thin Film Interface.* ***Plasmonics***, **8**(2) (2013) 1051-1057.

[8] F.Babaei, and A. Azarian, *Surface plasmon resonance of two-segmented Au—Cu nanowires in polycarbonate template*. **Optics Communications**, **306**(0) (2013) 150-153.

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