مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹ DOI: 10.47176/ijpr.20.4.5121

زوهش فيرب

# مطالعهٔ خواص اپتیکی لایهٔ نازک زیگزاگ آلومینیوم با استفاده از روش ماتریس انتقال

## مريم قلىزاده آرشتى و مهسا فخارپور

گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، تهران، ایران
 ۲. گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد، میبد، ایران

پست الكترونيكي: m.gholizadeh@iausr.ac.ir

(دریافت مقاله: ۵۹/۰۹/۰۵ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۳/۲۳ /۱۳۹۹)

#### چکیدہ

در این مقاله، از روش ماتریس انتقال برای حل مسئلهٔ انتشار نور قطبیدهٔ خطی به منظور مطالعهٔ گذارهای جـذب لایـهٔ نـازک زیگزاگـی آلومینیـوم استفاده شده است. نتایج اپتیکی به دست آمده ناشی از تغییرات زوایای سمتی و تابشی و همچنین طول و تعداد بازوهای مختلف نانوساختار نشان میدهد که وقتی زاویهٔ تابش افزایش مییابد، شدت قلهٔ جذب نور قطبیدهٔ ۶ ثابت باقی میماند، در حالی که شدت قلههای جذب برای نورقطبیـدهٔ P افزایش مییابد، همچنین مشاهده میشود که تغییرات طیفها به ازای زوایای سمتی مختلف برای نورقطبیدهٔ و مخالف یکدیگرند. به علاوه، با تغییر تعداد بازوها از دو به سه، سه به چهار و چهار به پنج بازو، قلههای طیف جذب به ترتیب به سمت طول موجهای بلندتر (آبی) و بلندتر (قرمز) انتقال مییابند. این رفتار برای نانوساختار با طول بازوهای مختلف نیز مشاهده شد.

**واژههای کلیدی**: نانوساختار زیگزاگی آلومینیم، نور قطبیدهٔ خطی، طیف اپتیکی، ماتریس انتقال

#### ۱. مقدمه

مواد فلزی در مقیاس نانو و لایههای کامپوزیت فلز-دی الکتریک به دلیل خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. در این میان، روی لایههای نازک آلومینیوم به دلیل سهولت در تهیه و خواص اپتیکی آنها مطالعات زیادی انجام شده است [۱ و ۲]. آلومینیوم به عنوان فراوان ترین فلز و سومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن و سیلیکن است و رسانندگی لایهٔ نازک آن به مقدار کپهای آن نزدیک است [۳]. این خواص منجر می شود تا لایهٔ نازک

آلومینیوم انتخاب ایده آلی برای جذب و پراکندگی اپتیکی در قطعات اپتوالکترونیک باشد [۴ و ۵]. از آنجا که خواص فیزیکی لایهٔ نازک آلومینیوم به شدت به میکروساختار آن [۶ و ۷] بستگی دارد، می توان با کنترل کردن میکروساختار خواص لایه را تغییر داد [۸–۱۰]. زیاشهابیا و همکارانش [۱۱] خواص پلاسمونی نانومیلههای ۲۰۵۲A@AL را در نور مرئی و فرابنفش مطالعه کردند. آنها تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل نسبت ابعادی، ضخامت و محیطهای مختلف را روی خواص پلاسمونی بررسی کردند.

نوع خاصي از لايههاي نازک به نام لايهٔ نازک متخلخل وجود دارد که معمولاً با روش لایهنشانی خراشی' (GLAD) یا لايەنشانى مايل<sup>۲</sup> (OAD) ساختە مىشود. لايەھاى نازك متخلخل با نانوساختار کنترل شده و ریخت شناسی های لایهٔ ستونى مختلف به دليل اثر سايهافكنى، خواص ناهمسانگردى دارند [۱۲ و ۱۳]. به عبارتی، هنگام لایهنشانی بعضی هستهها مانع شار بخار فرودی به هستههای مجاور و رشد آنها میشوند. در نتیجه، در مدت زمان کافی، هستهها و ستونهای کوچکتر می توانند به طور کامل در سایه قرار گیرند و رشد آنها متوقف شود. در این فرایند، ستونهای زیادی از بین میروند و این در تمام مدت رشد لاية GLAD ادامه مى يابد. سرانجام تنها هستههایی با ارتفاع بیشتر قادر به رشد خواهند بود، طوری که شيب ستونها به سمت منبع بخار ميل پيدا ميكند. بنابراين، لايهٔ نازک ناهمسانگرد و ناهمگن تهیه می شود. این اثر موجب می شود تا خواص لایهٔ نازک در راستای عمود و موازی با لایه يكسان نباشد. ناهمسانگردي اين لايهها باعث ايجاد خواص ناهمسانگردی در تنش دوشکستی اپتیکی [۱۴] و پذیرفتاری مغناطیسی [۱۵] میشود. درجهٔ ناهمسانگردی به شدت به نوع ماده و شرایط لایهنشانی مانند زاویهٔ لایهنشانی [۱۶] بستگی دارد. لايه های نازک دارای ناهمسانگردی اپتيکی، کاربردهای مختلفی از قبیل صفحات کاهش سرعت اپتیکی [۱۷]، پوشش های ضدبازتاب ناهمسانگرد [۱۸] بازتاب کنندههای چند جهتی دو شکستی [۱۹]، کریستالهای با گاف فوتونیک سه بعدی [۲۰]، قطبشگرهای لایه نازک دوشکستی [۲۱]، فیلترهای اپتیکی جدید [۱۴]، آینههای انتخابی قطبشی و فیلترهای تداخلي [۲۲] دارند. لايههاي نازک متخلخل را مي توان با اشکال هندسی مختلف شامل مارپیچ، زیگزاگ، نانوگلها و غیره تهیه کرد. رهچمنی و همکارانش لایههای نازک سولفید روی با شکل زیگزاگی به روش لایهنشانی خراشی تهیه کردند و ضریب شکست و جذب آن را به دست آوردند [۲۳]. آنها همچنین در مقالهای دیگر خواص اپتیکی ناهمسانگرد لایههای زیگزاگ سولفید روی را با زوایای رشد مختلف برای نور قطبیدهٔ s و p

در زاویهٔ تابش و ۷۰ درجه مطالعه کردند [۲۴]. لیدتکه و همکارانش لایههای نازک ستونی آلومینیوم و فلزات دیگر را به روش لایهنشانی زاویهٔ مایل تهیه کردند و تخلخل آنها را برای زوایای رشد مختلف به دست آورند [۲۵]. همچنین سوالونی [۲۶] و بابایی [۲۷] لایههای نازک مارپیچی زیگزاگی نقره را به روش لایهنشانی مایل تهیه کردند و خواص اپتیکی آنها را برای هر دو نور قطبیدهٔ s و q به صورت تئوری و تجربی مطالعه کردند.

لایههای نازک با خواص ساختاری و فیلتر کردن بسامد در بسامدهای مختلف با روش های مختلفی تولید شده است [۲۸-۲۹]. بازتاب براگ نیز یک روش برای تولید مؤلفههای اپتیکی با خواص قابل كنترل است [۳۰ و ۳۱]. همچنين جهت مطالعهٔ خواص اپتیکی روشهای مختلفی از جمله ماتریس انتقال وجود دارد [۳۳ و ۳۳]. خواص اپتیکی لایههای نازک ناهمسانگرد با ريخت شناسي مختلف را مي توان با روش ماتريس انتقال مطالعه کرد. فرمول بروگمن برای همگن سازی محیط کامیوزیت این لایهها استفاده میشود و خواص موثر دیالکتریک لایه با استفاده از آن به دست میآید [۳۴]. این لایهها، کامپوزیتی از دو ماده فلز و تخلخل (خلأ) است [۳۵]. كسر ماده و تخلخل، جهت محلی ماده و ضخامت لایه، پارامترهای اصلی در روش همگن سازی است. دو پارامتر اول در تعریف گذردهی الکتریکی محلی و پارامتر بعدی در طیف اپتیکی اهمیت دارد. از أنجا كه ميدان الكتريكي داخل محيط كامپوزيت ناهمسانگرد افت میکند و قسمت حقیقی نردهای های گذردهی فلزات بالا است، بنابراین محاسبهٔ دامنه های بازتاب و عبور حتی در لایهٔ ضخیم نیز مشکل است. در این موارد پیشنهاد می شود که ابتدا محيط ناهمسانگرد به صورت نيم فضا در نظر گرفته شود، سپس بازتاب این نیم فضا برای تابش عمود به دست آورده شود [۲۰].

مطالعات زیادی روی خواص اپتیکی لایههای نازک آلومینیوم انجام شده است [۴ و ۵]. اما تاکنون تحقیقاتی روی خواص اپتیکی لایههای مذکور با ریخت شناسی زیگزاگی صورت نگرفته است.

<sup>1.</sup> Glancing angle deposition

۲. Oblique angle deposition

 $\int s = -u \sin \phi + u \cos \phi$ .

$$\begin{cases} \underline{s} = -\underline{u}_x \sin\phi + \underline{u}_y \cos\phi, \\ \underline{p}_{\pm} = \mp (\underline{u}_x \cos\phi + \underline{u}_y \sin\phi) \cos\theta + \underline{u}_z \sin\theta, \end{cases}$$
(7)

پارامترهای  $(a_s, a_p)$ ،  $(r_s, r_p)$ و  $(r_s, r_p)$  به ترتیب اندازهٔ دامنههای موج تخت تابشی، انعکاسی و انتقالی با قطبش خطی p و s هستند. فازور میدان مغناطیسی در هر ناحیه با  $\underline{H} = (i\omega\mu_s)^{-1} \nabla \times \underline{E}$  نشان داده می شود. در مختصات کاتزین داریم:

 $\begin{cases} \underline{r} = x\underline{u}_x + y\underline{u}_y + z\underline{u}_z \\ \underline{k}_z = k_s \left( \sin\theta\cos\phi\underline{u}_x + \sin\theta\sin\phi\underline{u}_y + \cos\theta\underline{u}_z \right), \end{cases} (\mathfrak{P}) \\ \text{constants} \\ \text{co$ 

$$\begin{bmatrix} t_{s} \\ t_{p} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{K}(\theta, \phi) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{M}(d, k, \phi] \cdot \begin{bmatrix} \underline{K}(\theta, \phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{s} \\ a_{p} \\ r_{s} \\ r_{p} \end{bmatrix}, \quad (\texttt{\texttt{f}})$$

جزئیات معادلهٔ فوق در مرجع [۲۰] آورده شده است. در این قسمت، لایهٔ نازک زیگزاگی با ضخامت  $d = N t_z$  در نظر گرفته می شود که در آن  $t_z$  ضخامت یک بازوی زیگزاگی و N تعداد بازوها است. ماتریس انتقال لایهٔ نازک ستونی با ضخامت  $t_z$   $t_z$  است. بنابراین، ماتریس انتقال یک نانوساختار زیگزاگی به صورت زیر تعریف می شود [۲۷]:

$$\left[\underline{\underline{M}}\right]_{zigzag} = \left[\underline{\underline{M}}\right]_{N} \left[\underline{\underline{M}}\right]_{N-1} \cdots \left[\underline{\underline{M}}\right]_{r} \left[\underline{\underline{M}}\right]_{l}, \qquad (\Delta)$$

که در آن  $[\underline{\underline{M}}]_{i} = e^{i[\underline{\underline{P}}(\varsigma,\chi,\lambda,\theta,\phi]^{\dagger}]}$  است. کر و  $\chi$  زوایای چرخش بازوها حول محور z و زاویهٔ رشد ستون نسبت به صفحهٔ xy است. در نتیجه با استفاده از ماتریس انتقال در معادلهٔ ۵ و جایگذاری  $[\underline{\underline{M}}(d,k,\phi_{inc})]$  به جای  $\sum_{zigzag}$ محاسبه کرد:

$$\begin{bmatrix} r_s \\ r_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \end{bmatrix},$$
(9)

و

در این پژوهش انتشار نور قطبیدهٔ خطی در لایه نازک زیگزاگی آلومینیوم با استفاده از روش ماتریس انتقال مطالعه میشود. درابتدا خواص اپتیکی لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینوم به طور شبیهسازی شده، بررسی شده و سپس اثرات پارامترهای مختلف از قبیل زاویهٔ نور تابشی، زاویهٔ سمتی، طول و تعداد بازوها روی خواص اپتیکی نانوساختار مورد مطالعه، بررسی میشود.

۲. تئوری و مدلسازی

در این قسمت انتشار نور قطبیدهٔ خطی در لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینیم با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی میشود و طیف جذب اپتیکی نمونهها در نور تابشی قطبیده s و p شبیهسازی میشود. در این شبیهسازی، تأثیر پارامترهای مختلف مثل زاویهٔ نور تابشی، زاویهٔ سمتی، تعداد و طول بازوها روی ویژگیهای اپتیکی نانوساختار مورد بحث قرار می گیرد.

در مدل سازی ماتریس انتقال، وابستگی زمانی به صورت تابع در مدل سازی ماتریس انتقال، وابستگی زمانی به صورت تابع نمایی  $e^{iot}$  در نظر گرفته می شود که در آن ۵ بسامد زاویه ای است. همچنین عدد موج، طول موج و امپدانس ذاتی به ترتیب با می  $\eta_0 = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$  و  $\eta_0 = \lambda = r\pi/k$  ،  $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  نشان داده می شوند که در آنها  $\sigma^3$  و  $\eta_0$  گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ هستند. در تمامی روابط، بردارها با یک زیرخط و دیادیکها با دو زیرخط نشان داده شده اند. طبق شکل ۱، مدل سازی در ناحیهٔ  $b \ge z \ge \circ$  انجام می شود که به وسیلهٔ لایهٔ نازک زیگزاگی اشغال شده است و فضای  $v \ge z$ 

فرض کنید که ساختار تحت تابش موج تخت با زاویهٔ θ نسبت به محور z و زاویهٔ φ نسبت به محور x در صفحهٔ xy قرار گیرد. فازورهای میدان الکتریکی انتقالی، انعکاسی و تابشی با روابط زیر داده می شوند [۲۰]:

 $\begin{cases} \underline{E}_{inc} = (a_s \underline{s} + a_p \underline{p}_{+})e^{ik_z \cos\theta} exp(i(kx\cos\phi + ky\sin\phi)) & z \leq \circ \\ \underline{E}_{ref} = (r_s \underline{s} + r_p \underline{p}_{-})e^{-ik_z \cos\theta} exp(i(kx\cos\phi + ky\sin\phi)) & z \leq \circ \\ \underline{E}_{tr} = (t_s \underline{s} + t_p \underline{p}_{+})e^{ik_z (z-L)\cos\theta} exp(i(kx\cos\phi + ky\sin\phi)) & z \geq d, \end{cases}$ 

در معادلات فوق، مؤلفههای قطبش s و p با استفاده از بردارهای یکه در مختصات کارتزین به صورت زیرند:



**شکل ۱**. (الف) طرحوارهای از نانوساختار زیگزاگی آلومینیوم، L و d طول بازو و ضخامت لایهٔ نازک هستند و (ب) جهت گیریهای مربوط به نور تابشی و مؤلفههای عمودی و موازی میدان الکتریکی قطبش p نسبت به محور Z.

$$\begin{bmatrix} t_s \\ t_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{ss} & t_{sp} \\ t_{ps} & t_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \end{bmatrix},$$
 (V)

چهار ضریب انتقالی  $t_{xy}$  و انعکاسی  $r_{xy}$  برای محاسبهٔ انعکاس  $\left| r_{sp} = \left| t_{sp} \right|^2$  و انتقال  $\left| t_{sp} \right| = T_{sp}$ استفاده می شوند. در صورتی که یک لایهٔ نازک تضعیف کنندهٔ امواج باشد، طبق قانون پایستگی انرژی نامعادلهٔ زیر برقرار است :

$$\begin{cases} R_{ss} + R_{ps} + T_{ss} + T_{ps} < 1 \\ R_{pp} + R_{sp} + T_{pp} + T_{sp} < 1' \end{cases}$$
 (A)

جذب اپتیکی برای قطبش خطی s و p را میتوان به صورت زیر تعریف کرد:

$$A_{i} = 1 - \sum_{j=s,p} R_{ji} + T_{ji} , i = s, p,$$
 (9)

در این مدلسازی برای یافتن ویژگیهای اپتیکی نانوساختار زیگزاگی آلومینیم، نردهایهای گذردهی الکتریکی نانوساختار آلومینیم (کامپوزیت آلومینیم و حفره) با استفاده از رابطهٔ بروگمن محاسبه میشود [۳۴]. این کمیات به پارامترهای مختلفی از قبیل هندسظ ساختار، کسر حجمی آلومینیم، طول موج خلأ و ضریب شکست وابسته است. به علاوه، در این ساختار، هر ستون به صورت رشتهای از بیضیگونهای بلند در نظر گرفته میشود که برهمکنش الکتریکی این بیضیگونها ناچیز فرض میشود [۳۴].

(۱۰) 
$$I = \left(\frac{b}{a}\right)_{AI} = \left(\frac{b}{a}\right)_{AI} = IA\left(\frac{c}{a}\right)_{Void} = IA\left(\frac{c}{a}\right)_{Void}$$
  
که در آن A و P به ترتیب نصف قطر کوچک و نصف قطر  
بزرگ بیضیگون هستند [۳۳] برای همگنسازی از ضریب  
شکست تجربی کپهای آلومینیم استفاده شده است [۳۷].  
شکست تجربی کپهای آلومینیم استفاده شده است [۳۷].  
همچنین اثرات پراکندگی و انتشار تابع دیالکتریک نیز در نظر  
گرفته می شود [۳۸]. برای ایجاد نانوساختارهای متخلخل، زاویهٔ  
شار تابشی بزرگتر از ۵۵۵ در نظر گرفته می شود. در آن  
صورت طبق قانون تیت [۳۹]، زاویهٔ رشد ستونها ۲۰۳ به دست  
می آید. با توجه به زاویهٔ رشد ستونهای محاسبه شده و چگالی  
لایهٔ نازک یکنواخت  $0$  و چگالی لایهٔ متخلخل  $Q$  طبق رابطهٔ  
محاسبات، کسر حجمی تخلخل لایهٔ نازک آلومینیم ۷/۰ و زاویهٔ  
محاسبات، کسر حجمی تخلخل لایهٔ نازک آلومینیم ۷/۰ و زاویهٔ

<sup>1.</sup> Co-remittances



p-polarization



**شکل ۲**. طیفهای عبور Tss. pp و بازتاب Rss. pp همقطبش و طیف جذبی برای لایهٔ زیگزاگ آلومینیم با دو بازو و طول ۳۰ nm در زاویهٔ سمتی °= ¢ و زوایای نور تابشی °۶ , °° , ۳۰ , °= ط برای هر دو قطبش s و p.

### s-polarization

p-polarization



**شکل ۳.** طیفهای عبور T<sub>ps, sp</sub> و بازتاب R<sub>ps, sp</sub> قطبش متقاطع برای لایهٔ زیگزاگ آلومینیم با دو بازو و طول ۳۰ nm در زاویهٔ سمتی <sup>°</sup> =  $\phi$ و زوایای نور تابشی <sup>°,</sup> ۶ , <sup>°,</sup> ۳ , <sup>°,</sup> =  $\theta$ برای هر دو قطبش s و p.

یکسان تابش و عبور T<sub>ss</sub>) و قطبش متقاطع<sup>۱</sup> (با قطبشهای متفاوت تابش و بازتاب ,R<sub>ps</sub> و قطبش،های متفاوت تابش و عبور (T<sub>ps</sub>, T<sub>sp</sub>) لایهٔ زیگزاگ آلومینیم دارای دو بازو هر یک به طول nm ، در زاویهٔ سمتی  $\circ = \phi$  و زوایای نور تابشی *e = °, ۳° ، ۶۰° و ع*برای هر دو قطبش s و p رسم شده است. از آنجا که وقتی بردار موج تابشی با صفحهٔ مشخص ریخت شناسی همسان باشد، واقطبیدگی نمی تواند رخ دهد [۴۰]، با مقایسهٔ دو شکل ۲ و ۳ مشاهده می شود که طیف های بازتاب و عبور متقاطع در مقایسه با طیفهای بازتاب و عبور همقطبش بسیار کوچک بوده و قابل صرفنظر است. با توجه به شکل ۲، در طیفهای بازتاب هم قطبش میتوان به وضوح مشاهده کرد که ترتیب براگ و نواحی جذب برای زوایای تابش°۰، °۳۰ و °۶۰ برای قطبش p مخالف یکدیگر است (به عبارتی وقتی جذب بیشینه میشود، ناحیهٔ براگ کمینه میشود و بالعکس). این رفتار را نیز میتوان برای قطبش s، اما با وضوح کمتر مشاهده کرد. قلهٔ براگ به دوره تناوب ساختار، ضریب شکست محیط و زاویهٔ نور تابشی بستگی دارد [۴۱]. این رفتار در لایهٔ نازک همسانگرد رخ نمیدهد. همچنین با توجه به شکل ۲ واضح است که، شدت قلهٔ بازتاب (عبور) ۴۱۳nm در قطبش s با افزایش heta از  $^\circ$  تا  $^{\circ\circ}$  به دلیل برهمکنش بیشتر میدان الکتریکی E<sub>s</sub> نور تابشی با سطح، افزایش (کاهش) مییابد. این در حالی است که شدت قلههای بازتاب (عبور) در قطبش p با افزایش زاویهٔ تابشی به دلیل افزایش جذب، کاهش (افزایش) يافته است.

نمودارهای ۱> Rss و Rpp در شکل ۲، نشان میدهد که نور تابشی ۶ و p داخل لایهٔ نازک زیگزاگ تضعیف میشوند، و از آنجا که ۱> Rss+Rps+Tss+Tps و ۱> Rss+Rps+Tss+Tps هستند، لایهٔ نازک به طورکامل یک پراکنندهساز است و این از اصل پایستگی انرژی ناشی میشود. قلههای به وجود آمده در طیف جذبی شکل ۲، به برهمکنش میدان الکتریکی نور تابشی با بازوهای ساختار مربوط میشود. اگر میدان الکتریکی نور تابشی در همان جهت بازو باشد،

1. Cross -remittances

قوی ترین برهم کنش رخ می دهد و اگر میدان الکتریکی بر بازو عمود باشد، ضعیف ترین برهم کنش رخ می دهد [۲۷]. همچنین مکان قله در طیف جذب به اندازه، شعاع بازو و تخلخل ساختار بستگی دارد [۲۷]. در شکل ۲، سه قلهٔ جذب در طول موجهای ۳۳ متگی دارد [۲۷]. در شکل ۲، سه قلهٔ جذب در طول موجهای ۱۳۵ مرته متاهد و ۲۳۵ برای قطبش q و یک قله جذب در ۱۹۸ برای قطبش ۶ در زوایای تابش<sup>0</sup>، <sup>0</sup> ۳<sup>0</sup> و <sup>0</sup> ۶ مشاهده می شود. از آنجا که مؤلفهٔ میدان الکتریکی  $z_s$  روی سطح قرار دارد، با افزایش زاویهٔ نور تابشی تغییری در آن ایجاد نمی شود. بنابراین، شدت قلهٔ جذب قطبش ۶ یکسان باقی می ماند. در حالی که شدت قلهٔ جذب برای قطبش q با افزایش زاویهٔ نور تابشی، افزایش می یابد. زیرا طول مؤثر بازوها در راستای میدان الکتریکی افزایش می یابد و زاویهٔ بین محور بازوها و میدان الکتریکی تابشی کاهش می یابد [۲۲].

## ۲.۳ اثر زاویهٔ سمتی روی خواص اپتیکی لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینیم

در شکل ۴. ب و ج، طیف جذب به دست آمده برای لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینیم دارای دو بازو با طول *nm* ۳۰ ، تحت نور تابشی  $^{\circ} = heta$  و در زوایای سمتی مختلف سم شده  $p = e^{\circ}, re^{\circ}, se^{\circ}, e^{\circ}$  برای هر دو قطبش  $s = \phi^{\circ}, re^{\circ}, re^{\circ}$ است. مکان قلههای جذب برای هر دو قطبش s و p در زوایای سمتی مختلف، ترتیب مخالفی دارند. تغییر طیف برای زوایای سمتی مختلف به نقطهٔ شروع اندازهگیری اپتیکی بستگی دارد. قلهها در زاویهٔ سمتی  $\circ = \phi$  و  $\circ = \phi = \phi$  برای قطبش p و در زوایای سمتی  $^{\circ} = \phi_{e}$  و  $^{\circ} = \phi_{r,e}$ برای قطبش s افزایش داشتهاند. به عبارتی در نور قطبیدهٔ ۵، رفتار طیف برای زوایای سمتی  $\phi = r_{\circ}^{\circ}$  و  $\phi = \phi = \phi$  و در نور قطبیدهٔ p رفتار طیف برای زاویهٔ سمتی <sup>°</sup>= *¢* و <sup>°</sup> *× = ¢* تقریباً مشابه یکدیگر هستند. در نور قطبیدهٔ s شدت طیف برای قلههای با طول موجهای  $\phi = \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}$  و ۸۳۷ مه ترتيب به صورت  $\overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}, \overset{\circ}{\circ}$ طيفها مخالف يكديگر است. در تمام طيفها دو قلهٔ جذب پهن مشاهده میشود. قلهٔ ایجاد شده در طولموج کمتر را مد



**شکل ۴**. طیف جذب برای لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینیم با دو بازو با طولهای ۳۰ nm در زاویه نور تابشی <sup>°</sup> = θ و در زوایای سمتی مختلف °٫۹۰, °٫۶ , °٫٫۰° = ¢ برای هر دو قطبش s و p.

عرضی و قلهٔ ایجاد شده در طول موج بزرگتر را مد طولی مینامند. جابه جایی این قله ها به شعاع و طول بازوها بستگی دارد.

در زاویهٔ تابش  $\circ = \theta$  با تغییر زاویهٔ سمتی می توان اطلاعاتی راجع به ریخت شناسی سطح نانوساختار شامل ناهمسانگردی نیز به دست آورد. مطابق شکل ۴، در  $\circ = \phi$ میدان الکتریکی نور تابشی با قطبش q در راستای قطر بازوی دوم و در  $\circ = \phi$  در راستای قطر بازوی اول قرار می گیرد (زاویهٔ رشد نانومیله  $\circ = \phi$  و بنابراین زاویهٔ بین دو میله  $\circ = \phi$ است). بنابراین، طیفهای جذب آنها تقریباً یکسان خواهد بود. در  $\circ = \phi e$  و  $\circ = \phi$  بردار میدان الکتریکی نور تابشی با قطبش q از سطح مقطع نانومیله ادور شده است، بنابراین طیف جذب در قلهها کاهش یافته است. به همین ترتیب به دلیل عمود بودن میدان الکتریکی دو قطبش z و q ، رفتار طیف مخالف یکدیگر است. بنابراین ساختار در زوایای سمتی مشخصی تقارن سمتی خواهد داشت.

۳.۳. اثر تعداد و طول بازوها روی خواص اپتیکی لایهٔ نازک زیگزاگی آلومینیم طرحوارهٔ ساختار زیگزاگی و جهتهای قطبش نور تابشی، همچنین تجزیهٔ میدان الکتریکی قطبش q با تغییر جهت میدان الکتریکی در شکل ۱، نشان داده شده است. همان طور که در

شکل ۱. ب و در مرجع [۴۳] آمده است، وقتی نور تابشی در یک زاویهٔ مشخص در راستای محور z با ساختار زیگزاگی برهمکنش میکند، میدان الکتریکی به دو مؤلفه تجزیه می شود: میدان الکتریکی موازی با محور ساختار در راستای محور z، میدان الکتریکی موازی با محور ساختار در راستای محور z، محور  $E_{PI}$  و میدان الکتریکی عمود بر محور ساختار (عمود بر محور z) محور  $E_{P\perp}$  (z) محور شاختار زیگزاگی I در نظر گرفته شده است.

طرحوارهای از لایهٔ نازک زیگزاگی با تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو با طول ثابت *L* و زاویهٔ رشد *x* ثابت در شکل ۵ نشان داده شده است. طيف جذب براي  $\theta = \theta \in \phi$  براي لایهٔ نازک زیگزاگی با طولهای nm ۱۲۰، ۶۰ و ۳۰ = *ا* و همچنین تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو به دست آمده و در شکل ۶، رسم شده است. در لایهٔ نازک زیگزاگی با طول بازوی l = ۳۰ nm سه قلهٔ ۲۲۷ ۵۴۰ و ۳۲۶ مشاهده می شود l = ۳۰ (قطبش p) و با افزایش تعداد بازو به ۳ بازو، قلهها به جز ۳۲۶ nm به سمت طول موج های قرمز انتقال یافته است و سپس با افزایش تعداد بازو به ۴ بازو، انتقال به سمت طول موجهای آبی و در نهایت با افزایش بازو به ۵ بازو انتقال قلهها به سمت طول موجهای قرمز را خواهیم داشت. این رفتار برای نانوساختار زیگزاگی با طول ۶۰*nm و* ۱۲۰ نیز مشاهده می شود. با افزایش تعداد بازو از ۲ به ۳ بازو و از ۴ به ۵ بازو، طول بازوی مؤثر که در راستای میدان الکتریکی قرار میگیرد به اندازهٔ lcosθ افزایش یافته است. بنابراین، قلهها به سمت طول



شکل ۵. طرحوارهٔ لایهٔ نازک زیگزاگی با تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو با طول ثابت L و زاویهٔ رشد **x** ثابت

موجهای قرمز انتقال مییابند و با افزایش تعداد بازو از ۳ به ۴ بازو، طول مؤثر بازو به اندازه *lcosθ* کاهش یافته است بنابراین، قلهها به سمت طول موجهای آبی انتقال مییابند.

با کاهش زاویهٔ بین بازو و میدان الکتریکی، طول بازوهای مؤثر در راستای میدان الکتریکی افزایش یافته و در نتیجه قلهها به سمت طول موجهای قرمز انتقال مییابد و بالعکس.

در لایهٔ زیگزاگی با ۲ بازو، بازوی اول زاویهٔ <sup>۵</sup>۳۰ و بازوی دوم زاویهٔ ۱۵۰<sup>۵</sup> با میدان الکتریکی می سازد. با افزایش تعداد بازو به ۳ بازو، بازوی اول و سوم زاویهٔ <sup>۵</sup>۳۰ و بازوی دوم زاویهٔ <sup>۱۵۰</sup>۵ با میدان الکتریکی می سازد. بنابراین، تعداد (طول) در راستای میدان افزایش می یابد و بنابراین، طیف به سمت طول موجهای قرمز انتقال می یابد.

با افزایش تعداد بازو به ۴ بازو، بازوهای اول و سوم زاویهٔ ۳۰۰ و بازوهای دوم و چهارم زاویهٔ ۱۵۰۵ با میدان الکتریکی میسازند. بنابراین، زاویهٔ مؤثری که بازوها با میدان الکتریکی میسازند، کاهش مییابد و در نتیجه طیف به سمت طول موجهای آبی انتقال مییابد.

با افزایش تعداد بازو به ۵ بازو، بازوی اول، سوم و پنجم زاویهٔ ۳۰<sup>°</sup> و بازوی دوم و چهارم زاویهٔ <sup>°۱</sup>۵۰ با میدان الکتریکی میسازند. بنابراین، زاویه مؤثری که بازوها با میدان الکتریکی میسازند افزایش مییابد و طیف به سمت طول موجهای قرمز انتقال مییابد.

### ۴. نتيجه گيرې

در اين مقال، قطبش نور قطبيدهٔ خطي در لايهٔ نازک

زیگزاگی آلومینیم با استفاده از روش شبیهسازی ماتریس انتقال مطالعه شد. در این مطالعه، اثر نور تابشی تحت زوایای تابشی و سمتی مختلف، تعداد و طول مختلف بازو بررسی شد. نتایج مدلسازی اپتیکی انجام شده، نشان داد که برای قطبش p، سه قلهٔ جذبی در طول موج های ۳۲۶ نیانومتر، ۵۳۰ نیانومتر و ۸۳۷ نیانومتر و برای قطـبش s، یـک قلـهٔ جـذبی در طـول مـوج ۸۱۰ نـانومتر در زوايای نور تابشی  $\theta = e^{\circ}, Te^{\circ}, Se^{\circ}$  وجود دارد. هرچه زاویهٔ نور تابشی افزایش یابد، شدت قلهٔ جذبی قطبش s تغییر نمی کند، در حالی که شدت قلههای جذب در قطبش p افزایش پیدا میکند، که ناشی از این حقیقت است که بازوهای مؤثر بلندتری در جهت میدان الکتریکی نور تابشی قرار دارند و یا ایـن کـه زاویـهٔ بـین بـازو و میـدان الکتریکی کاهش یافته است. تغییرات طیفهای به دست آمـده بـرای زوایـای سـمتی \ \$ مختلـف نشـان داد كـه نتـایج قطبش s، برای زاویهٔ تابشی صفر درجه، شدت قلهها در طول موج های ۵۳۰ نانومتر و ۸۳۷ نانومتر به ترتیب برای p است. در حالی که برای قطبش  $\phi = \phi^{\circ}, \sigma^{\circ}, \sigma^{\circ}$ ترتيب به صورت  $^{\circ}, \mathcal{E}^{\circ}, \mathcal{E}^{\circ}$  است که مخالف قط بش s است و دلیل آن این است که میدان های الکتریکے ہے دو قطـبش s وp در یےک صےفحہ و عمـود بـر محرر ساختار است. همچنين در قطبش p، براي لايه نازک زیگزاگی آلـومینیم بـا طـول بـازوی nm ۳۰ الـ سـه قلـهٔ ۸۳۷ nm و ۹۲۶ و ۳۲۶ مشاهده می شود، وقتی تعداد قله ها از ۲ به ۳، ۳ به ۴ و ۴ به ۵ افزایش می یابد، به جز قله



زاویهٔ سمتی و تابشی °۰ و هر دو قطبش خطی s و p.

نویسندگان بر خود لازم میدانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت مالی و دیگر حمایت های دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، تهران، ایران، در انجام این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب با عنوان "تهیه لایه نازک آلومینیم با مورفولوژی زیگزاگی با روش لایه نشانی PVD

تشكر و قدرداني

۳۲۶ نانومتر، قلهها به ترتیب به سمت طول موجهای بلندتر، کوتاهتر و بلندتر جابهجا میشوند. این رفتار را نیز میتوان برای نانوساختارهای زیگزاگی با طولهای ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر نیز مشاهده کرد. همچنین میتوان نتایج مشابهی برای نانوساختارهای زیگزاگی آلومینیم با دو تا پنج بازو در طولهای ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر برای قطبش s نیز به دست آورد.

و بررسی خواص نانوساختاری آن "و با شرماره قرارداد ، ۸۲۳/۱۳۹۷/۱۹۹۲۰، اعلام کنند.

23.S Z Rahchamani, H R Gholipour Dizjani, M H Ehsani, Applied Surface Science 356 (2015) 1096.

- 24. S Z Rahchamani, H R Gholipour Dizjani, and M H Ehsani, Bull. Mater. Sci. (2016).
- 25. Susann Liedtke, Christoph Grüner, W Jürgen, Beilstein J. Nanotechnol. 9 (2018) 954.
- 26. H. Savaloni, A. Esfandiar, Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 9425.
- 27. F Babaei, J. Mod. Opt. 60 (2013) 1370.
- 28. P Vukusic, R Kelly and I Hooper, J R Soc. Interface, 6 (2009) S193.
- 29.S A Jewell, P Vukusic and N W Roberts, N. J. Physics 9 (2007) 99.
- 30. M Born, E Wolf, "Principles of Optics", Cambridge University Press, Cambridge (1999).
- 31. A Thelen, J. Opt. Soc Am. 53 (1963) 1266.
- 32. M Hoseini Farzad, N yazdanpanah, Iran. J. Phys. Res. 9, 4 (2009) 349.

۳۲. م حسینی فزراد و ن یزدان پناه، مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، . TF9 (1TAA) F .9

- 33. S Roshanentezar, A Rahmatnezamabad, H Afkhami, and B Rahmatnezamabad, Iran. J. Phys. Res. 14, 2 (2014)139.
- ٣٣. ص روشن انتظار، ع رحمت نظام آباد، ح افخمي و ب رحمت نظام آباد، مجلع پژوهش فیزیک ایران، ۱۴، ۲

.189 (1898)

- 34. J A Sherwin, A Lakhtakia, B Michel, Opt. Commun. 178 (2000) 267.
- 35. A Lakhtakia, Mod Simul. Mater. Sci. Eng. 8 (2000) 677.
- 36. J A Sherwin, A Lakhtakia, and I J Hodgkinson, Opt. Commun 209 (2002) 369.
- 37. E D Palik, "Handbook of optical constants of solids". Academic press, NewYork (1985).
- 38. F Babaei, J. Mod. Opt. 58 (2011) 1292.
- 39. R N Tait, T Smy, M J Brett, Thin Solid Films. 226 (1993) 196.
- 40. B Dick, M J Brett, T Smy, and J Vac. Sci Technol B *Microelectronics* and Nanometer **Structures** Processing, Measurement, and Phenomena 21 (2003) 21.
- 41. S V Kesapragada, P Victor, O Nalamasu, D Gall, Nano Lett 6 (2006) 854.
- 42. F Babaei, H Savaloni, J. Mod. Opt. 55 (2008) 1845.
- 43. H Savaloni, F Haydari-Nasab, and M Malmir, Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 9044.

- مراجع
- 1. S B Mansoor and B S Yilbas, Opt. Laser Technol 101 (2018) 107.
- 2. G Beck and S Funk, Surf. Coat. Technol 206 (2012) 2371.
- 3. M L Green, R A Levy, R G Nuzzo, and E Coleman, Thin Solid Films 114 (1984) 367.
- 4. D Vandembroucq, A Tarrats, J J Greffet, S Roux, and F Plouraboué, Opt. Commun 187 (2001) 289.
- 5. C H Cheung, A B Djuriši'c, C Y Kwong, H L Tam, K W Cheah, Z T Liu, W K Chan, P C Chui, J Chan, A D Raki'c, Opt. Commun 248 (2005) 287.
- 6. D Nieto, F Cambronero, M T F Arias, N Farid, and G M O'Conno, Optics and Lasers in Engineering 88 (2017) 233.
- 7. G S Rohrer, X Liu, J Liu, A Darbal, M N Kelly, X Chen, M A Berkson, N T Nuhfer, K R Coffey, and K Barmak, J. Mater. Sci 52 (2017) 9819.
- 8. X Yu-Qing, L Xing-Cun, C Qiang, L Wen-Wen, Z Qiao, S Li-Jun, L Zhong-Wei, W Zheng-Duo, and Y Li-Zhen, Chin. Phys. B 21 (2012) 78.
- 9. C S Oh, J S Bae, S H Choa, H J Lee, "Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics", Alexandroupolis, Greece, 1-6 July; Springer, Berlin, Germany (2007).
- 10.G Kaune, E Metwalli, R Meier, V Körstgens, K Schlage, S Couet, R Röhlsberger, S V Roth, and P Müller-Buschbaum, ACS. Appl. Mater. Interfaces. 3 (2011) 1055.
- 11. A Ziashahabi and R Poursalehi, Materials Science 11 (2015) 743
- 12. D Vick, T Smy, and M J Brett, J. Mater. Res 17 (2002) 2904.
- 13. D Vick, L J Friedrich, S K Dew, M J Brett, K Robbie, M Seto et al, Thin Solid Films 88 (1999)339.
- 14. I J Hodgkinson and P W Wilson, CRC Crit. Rev. Solid State Mater. Sci 15 (1988) 27.
- 15. H van Kranenburg, J C Lodder, Y Maeda, L Toth and J A Pompa, IEEE Trans. Magn 26 (1999) 1620.
- 16. K Robbie, PhD Thesis, Alberta: University of Alberta (1998).
- 17. T Motohiro and Y Taga, Appl. Opt 28 (1989) 2466.
- 18. J Q Xi, M F Schubert, J K Kim, E F Schubert, M F Chen, S Y Lin et al, Nat. Photon. 1 (2007)176.
- 19. K Kaminska and K Robbie, Appl. Opt. 43 (2004) 1570.
- 20. A Lakhtakia and R Messier, Sculptured thin films: nanoengineered morphology and optics (SPIE press, Vol. 122, USA, 2005) Section 9.3.
- 21. I J Hodgkinson and Q H Wu, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 1794.
- 22. A J McPhun, Q H Wu and I J Hodgkinson, Electron. Lett. 34 (1998) 360.