

## مطالعه خواص اپتیکی لایه نازک زیگزاگ آلومینیوم با استفاده از روش ماتریس انتقال

مریم قلی‌زاده آرشتی<sup>۱</sup> و مهسا فخارپور<sup>۲</sup>

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

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳)

### چکیده

در این مقاله، از روش ماتریس انتقال برای حل مسئله انتشار نور قطبیده خطی به منظور مطالعه گذارهای جذب لایه نازک زیگزاگی آلومینیوم 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 زاویه تابش افزایش می‌یابد، شدت قله جذب نور قطبیده S ثابت باقی می‌ماند، در حالی که شدت قله‌های جذب برای نور قطبیده P افزایش می‌یابد، همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات طیف‌ها به ازای زوایای سمتی مختلف برای نور قطبیده p و s 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 (قرمز)، کوتاه‌تر (آبی) و بلندتر (قرمز) انتقال می‌یابند. این رفتار برای نانوساختار با طول بازوهای مختلف نیز مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: نانوساختار زیگزاگی آلومینیوم، نور قطبیده خطی، طیف اپتیکی، ماتریس انتقال

### ۱. مقدمه

آلومینیوم انتخاب ایده‌آلی برای جذب و پراکندگی اپتیکی در قطعات اپتوالکترونیک باشد [۴ و ۵]. از آنجا که خواص فیزیکی لایه نازک آلومینیوم به شدت به میکروساختار آن [۶ و ۷] بستگی دارد، می‌توان با کنترل کردن میکروساختار خواص لایه را تغییر داد [۸-۱۰]. زیاشهابیا و همکارانش [۱۱] خواص پلاسمونی نانومیله‌های  $Al_2O_3@Al$  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.

مواد فلزی در مقیاس نانو و لایه‌های کامپوزیت فلز-دی‌الکتریک 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 فراوان‌ترین فلز و سومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن و سیلیکن است و رسانندگی لایه نازک آن به مقدار کپه‌ای آن نزدیک است [۳]. این خواص منجر می‌شود تا لایه نازک

در زاویه تابش  $0^\circ$  و  $70^\circ$  درجه مطالعه کردند [۲۴]. لیدتکه و همکارانش لایه‌های نازک ستونی آلومینیوم و فلزات دیگر را به روش لایه‌نشانی زاویه‌مایل تهیه کردند و تخلخل آنها را برای زوایای رشد مختلف به دست آوردند [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 قطبیده  $s$  و  $p$  به صورت تئوری و تجربی مطالعه کردند.

لایه‌های نازک با خواص ساختاری و فیلتر کردن بسامد در بسامدهای مختلف با روش‌های مختلفی تولید شده است [۲۸-۲۹]. بازتاب براگ نیز یک روش برای تولید مؤلفه‌های اپتیکی با خواص قابل کنترل است [۳۰ و ۳۱]. همچنین جهت مطالعه خواص اپتیکی روش‌های مختلفی از جمله ماتریس انتقال وجود دارد [۳۲ و ۳۳]. خواص اپتیکی لایه‌های نازک ناهمسانگرد با ریخت شناسی مختلف را می‌توان با روش ماتریس انتقال مطالعه کرد. فرمول بروگمن برای همگن‌سازی محیط کامپوزیت 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 (خلاً) است [۳۵]. کسر ماده و تخلخل، جهت محلی ماده و ضخامت لایه، پارامترهای اصلی در روش همگن‌سازی است. دو پارامتر اول در تعریف گذردهی الکتریکی محلی و پارامتر بعدی در طیف اپتیکی اهمیت دارد. از آنجا که میدان الکتریکی داخل محیط کامپوزیت ناهمسانگرد افت می‌کند و قسمت حقیقی نرده‌ای‌های گذردهی فلزات بالا است، بنابراین محاسبه دامنه‌های بازتاب و عبور حتی در لایه ضخیم نیز مشکل است. در این موارد پیشنهاد می‌شود که ابتدا محیط ناهمسانگرد به صورت نیم 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.

نوع خاصی از لایه‌های نازک به نام لایه نازک متخلخل وجود دارد که معمولاً با روش لایه‌نشانی خراشی<sup>۱</sup> (GLAD) یا لایه‌نشانی مایل<sup>۲</sup> (OAD) ساخته می‌شود. لایه‌های نازک متخلخل با نانوساختار کنترل شده و ریخت شناسی‌های لایه ستونی مختلف به دلیل اثر سایه‌افکنی، خواص ناهمسانگردی 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 می‌توانند 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 لایه GLAD ادامه می‌یابد. سرانجام تنها هسته‌هایی با ارتفاع بیشتر قادر به رشد خواهند بود، طوری که شیب ستون‌ها به سمت منبع بخار میل پیدا می‌کند. بنابراین، لایه نازک ناهمسانگرد و ناهمگن تهیه می‌شود. این اثر موجب می‌شود تا خواص لایه نازک در راستای عمود و موازی با لایه یکسان نباشد. ناهمسانگردی این لایه‌ها باعث ایجاد خواص ناهمسانگردی در تنش دوشکستی اپتیکی [۱۴] و پذیرفتاری مغناطیسی [۱۵] می‌شود. درجه ناهمسانگردی به شدت به نوع ماده و شرایط لایه‌نشانی مانند زاویه لایه‌نشانی [۱۶] بستگی دارد. لایه‌های نازک دارای ناهمسانگردی اپتیکی، کاربردهای مختلفی از قبیل صفحات کاهش سرعت اپتیکی [۱۷]، پوشش‌های ضدبازتاب ناهمسانگرد [۱۸] بازتاب‌کننده‌های 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 تداخلی [۲۲] دارند. لایه‌های نازک متخلخل را می‌توان با اشکال هندسی مختلف شامل مارپیچ، زیگزاگ، نانوجل‌ها 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 قطبیده  $s$  و  $p$

۱. Glancing angle deposition

۲. Oblique angle deposition

$$\begin{cases} \underline{s} = -\underline{u}_x \sin \phi + \underline{u}_y \cos \phi, \\ \underline{p}_{\pm} = \mp (\underline{u}_x \cos \phi + \underline{u}_y \sin \phi) \cos \theta + \underline{u}_z \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

پارامترهای  $(a_s, a_p)$ ،  $(r_s, r_p)$  و  $(t_s, t_p)$  به ترتیب اندازه دامنه‌های موج تحت تابشی، انعکاسی و انتقالی با قطبش خطی p و s هستند. فازور میدان مغناطیسی در هر ناحیه با  $\underline{H} = (i\omega\mu_0)^{-1} \nabla \times \underline{E}$  نشان داده می‌شود. در مختصات کاترین داریم:

$$\begin{cases} \underline{r} = x\underline{u}_x + y\underline{u}_y + z\underline{u}_z \\ \underline{k}_s = k_0 (\sin \theta \cos \phi \underline{u}_x + \sin \theta \sin \phi \underline{u}_y + \cos \theta \underline{u}_z) \end{cases} \quad (3)$$

دامنه انتقال و انعکاس با استفاده از پیوستگی مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی و مغناطیسی در مرز نانو ساختار و حل معادله ماتریس انتقال به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} t_s \\ t_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [\underline{K}(\theta, \phi)]^{-1} \cdot [\underline{M}(d, k, \phi)] \cdot [\underline{K}(\theta, \phi)] \cdot \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \\ r_s \\ r_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

جزئیات معادله فوق در مرجع [۲۰] آورده شده است. در این قسمت، لایه نازک زیگزاگی با ضخامت  $d = N t_z$  در نظر گرفته می‌شود که در آن  $t_z$  ضخامت یک بازوی زیگزاگی و  $N$  تعداد بازوها است. ماتریس انتقال لایه نازک ستونی با ضخامت  $t$ ،  $e^{i[\underline{P}]} t$  است. بنابراین، ماتریس انتقال یک نانو ساختار زیگزاگی به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$[\underline{M}]_{zigzag} = [\underline{M}]_N [\underline{M}]_{N-1} \dots [\underline{M}]_2 [\underline{M}]_1, \quad (5)$$

که در آن  $[\underline{M}]_i = e^{i[\underline{P}(\zeta, \chi, \lambda, \theta, \phi)] t}$ ،  $i = 1, 2, \dots, N$  است.  $\zeta$  و  $\chi$  زوایای چرخش بازوها حول محور z و زاویه رشد ستون نسبت به صفحه xy است. در نتیجه با استفاده از ماتریس انتقال در معادله ۵ و جایگذاری  $[\underline{M}(d, k, \phi_{inc})]$  به جای  $[\underline{M}]_{zigzag}$  در معادله ۴، می‌توان دامنه‌های انتقال و انعکاس را محاسبه کرد:

$$\begin{bmatrix} r_s \\ r_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ss} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \end{bmatrix}, \quad (6)$$

و

در این پژوهش انتشار نور قطبیده خطی در لایه نازک زیگزاگی آلومینوم با استفاده از روش ماتریس انتقال مطالعه می‌شود. در ابتدا خواص اپتیکی لایه نازک زیگزاگی آلومینوم به طور شبیه‌سازی شده، بررسی شده و سپس اثرات پارامترهای مختلف از قبیل زاویه نور تابشی، زاویه سمتی، طول و تعداد بازوها روی خواص اپتیکی نانو ساختار مورد مطالعه، بررسی می‌شود.

## ۲. تئوری و مدل‌سازی

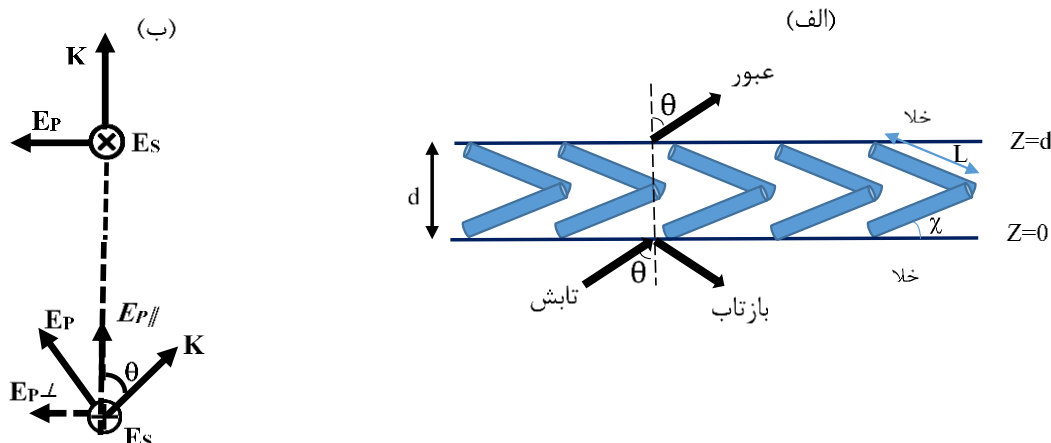
در این قسمت انتشار نور قطبیده خطی در لایه نازک زیگزاگی آلومینوم با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی می‌شود و طیف جذب اپتیکی نمونه‌ها در نور تابشی قطبیده s و p شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی، تأثیر پارامترهای مختلف مثل زاویه نور تابشی، زاویه سمتی، تعداد و طول بازوها روی ویژگی‌های اپتیکی نانو ساختار مورد بحث قرار می‌گیرد.

در مدل‌سازی ماتریس انتقال، وابستگی زمانی به صورت تابع نمایی  $e^{i\omega t}$  در نظر گرفته می‌شود که در آن  $\omega$  بسامد زاویه‌ای است. همچنین عدد موج، طول موج و امپدانس ذاتی به ترتیب با  $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ،  $\lambda = 2\pi/k$  و  $\eta_0 = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$  نشان داده می‌شوند که در آنها  $\epsilon_0$  و  $\mu_0$  گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ هستند. در تمامی روابط، بردارها با یک زیرخط و دیادیک‌ها با دو زیرخط نشان داده شده‌اند. طبق شکل ۱، مدل‌سازی در ناحیه  $0 \leq z \leq d$  انجام می‌شود که به وسیله لایه نازک زیگزاگی اشغال شده است و فضای  $z \leq 0$  و  $z \geq d$  ناحیه خلأ هستند.

فرض کنید که ساختار تحت تابش موج تحت زاویه  $\theta$  نسبت به محور z و زاویه  $\phi$  نسبت به محور x در صفحه xy قرار گیرد. فازورهای میدان الکتریکی انتقالی، انعکاسی و تابشی با روابط زیر داده می‌شوند [۲۰]:

$$\begin{cases} \underline{E}_{inc} = (a_s \underline{s} + a_p \underline{p}_+) e^{ik_z \cos \theta} \exp(i(kx \cos \phi + ky \sin \phi)) & z \leq 0 \\ \underline{E}_{ref} = (r_s \underline{s} + r_p \underline{p}_-) e^{-ik_z \cos \theta} \exp(i(kx \cos \phi + ky \sin \phi)) & z \leq 0 \\ \underline{E}_{tr} = (t_s \underline{s} + t_p \underline{p}_+) e^{ik_z(z-L) \cos \theta} \exp(i(kx \cos \phi + ky \sin \phi)) & z \geq d, \end{cases} \quad (1)$$

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



شکل ۱. (الف) طرحواره‌ای از نانو ساختار زیگزاگی آلومینیوم،  $L$  و  $d$  طول بازو و ضخامت لایه نازک هستند و (ب) جهت‌گیری‌های مربوط به نور تابشی و مؤلفه‌های عمودی و موازی میدان الکتریکی قطبش  $p$  نسبت به محور  $Z$ .

$$\left(\frac{c}{a}\right)_{Al} = \left(\frac{c}{a}\right)_{void} = 1, \quad \left(\frac{b}{a}\right)_{Al} = \left(\frac{b}{a}\right)_{void} = 1, \quad (10)$$

که در آن  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب نصف قطر کوچک و نصف قطر بزرگ بیضیگون هستند [۳۶] برای همگن‌سازی از ضریب شکست تجربی کپه‌ای آلومینیم استفاده شده است [۳۷]. همچنین اثرات پراکندگی و انتشار تابع دی‌الکتریک نیز در نظر گرفته می‌شود [۳۸]. برای ایجاد نانو ساختارهای متخلخل، زاویه شار تابشی بزرگ‌تر از  $85^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. در آن صورت طبق قانون تیت [۳۹]، زاویه رشد ستون‌ها  $32^\circ$  به دست می‌آید. با توجه به زاویه رشد ستون‌های محاسبه شده و چگالی لایه نازک یکنواخت  $\rho_0$  و چگالی لایه متخلخل  $\rho$  طبق رابطه  $\rho = \rho_0 \frac{\gamma \cos \alpha}{1 + \cos \alpha}$ ، تخلخل  $7\%$  به دست می‌آید. در این محاسبات، کسر حجمی تخلخل لایه نازک آلومینیم  $7\%$  و زاویه رشد ستون‌ها  $30^\circ$  درجه انتخاب شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. اثر زاویه نور تابشی روی خواص اپتیکی لایه نازک

#### زیگزاگی آلومینیم

در شکل‌های ۲ و ۳ طیف‌های عبور و بازتاب هم‌قطبش<sup>۱</sup> (با قطبش‌های یکسان تابش و بازتاب  $R_{ss}$ ،  $R_{pp}$  و قطبش‌های

$$\begin{bmatrix} t_s \\ t_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{ss} & t_{sp} \\ t_{ps} & t_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_s \\ a_p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

چهار ضریب انتقالی  $t_{xy}$  و انعکاسی  $r_{xy}$  برای محاسبه انعکاس  $R_{sp} = |r_{sp}|^2$  و انتقال  $T_{sp} = |t_{sp}|^2$  استفاده می‌شوند. در صورتی که یک لایه نازک تضعیف‌کننده امواج باشد، طبق قانون پایستگی انرژی نامعادله زیر برقرار است:

$$\begin{cases} R_{ss} + R_{ps} + T_{ss} + T_{ps} < 1 \\ R_{pp} + R_{sp} + T_{pp} + T_{sp} < 1 \end{cases} \quad (8)$$

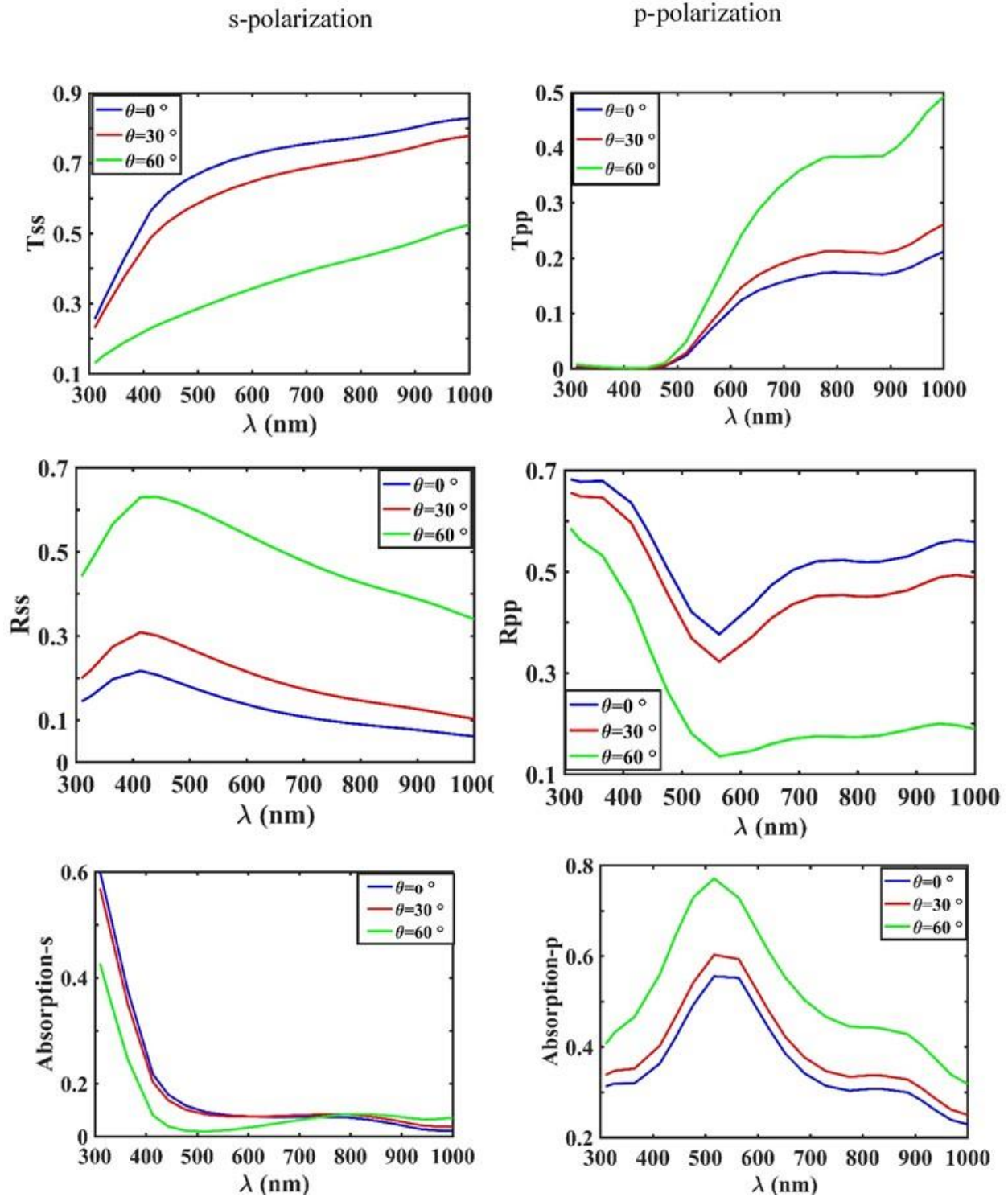
جذب اپتیکی برای قطبش خطی  $s$  و  $p$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

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

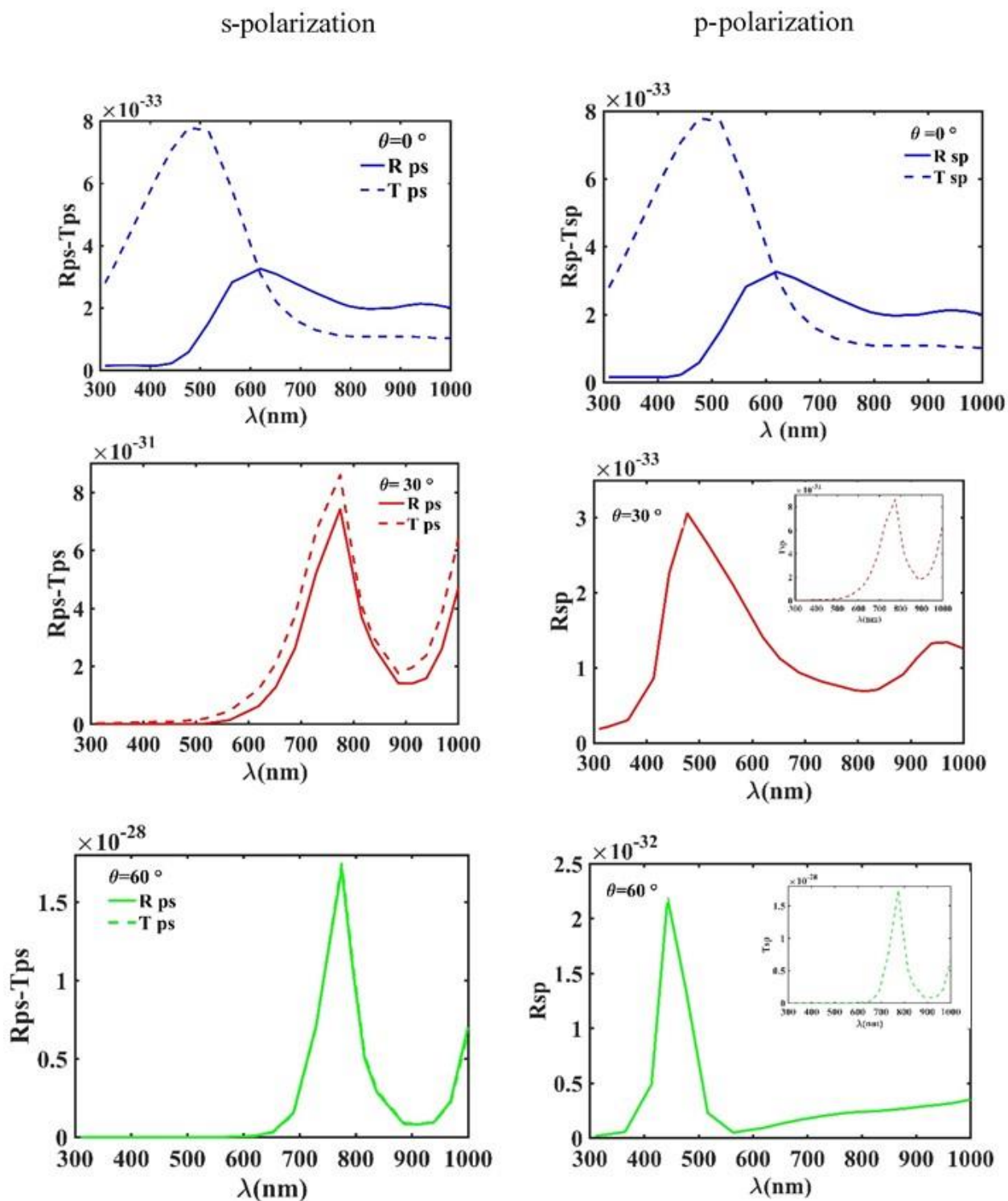
در این مدل‌سازی برای یافتن ویژگی‌های اپتیکی نانو ساختار زیگزاگی آلومینیم، نرده‌ای‌های گذردهی الکتریکی نانو ساختار آلومینیم (کامپوزیت آلومینیم و حفره) با استفاده از رابطه بروگمن محاسبه می‌شود [۳۴]. این کمیات به پارامترهای مختلفی از قبیل هندسظ ساختار، کسر حجمی آلومینیم، طول موج خلأ و ضریب شکست وابسته است. 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].

برای عامل‌های شکل ستون در محاسبات داریم:

۱. Co-remittances



شکل ۲. طیف‌های عبور  $T_{ss, pp}$  و بازتاب  $R_{ss, pp}$  هم‌قطبش و طیف جذبی برای لایه زیگزاگ آلومینیم با دو بازو و طول  $30 \text{ nm}$  در زاویه سمتی  $\phi = 0^\circ$  و زوایای نور تابشی  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  برای هر دو قطبش  $s$  و  $p$ .



شکل ۳. طیف‌های عبور  $T_{ps, sp}$  و بازتاب  $R_{ps, sp}$  قطبش متقاطع برای لایه زیگزاگ آلومینیم با دو بازو و طول  $30 \text{ nm}$  در زاویه سمتی  $\phi = 0^\circ$  و زوایای نور تابشی  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  برای هر دو قطبش s و p.

قوی‌ترین برهم‌کنش رخ می‌دهد و اگر میدان الکتریکی بر بازو عمود باشد، ضعیف‌ترین برهم‌کنش رخ می‌دهد [۲۷]. همچنین مکان قله در طیف جذب به اندازه، شعاع بازو و تخلخل ساختار بستگی دارد [۲۷]. در شکل ۲، سه قله جذب در طول موج‌های  $326 \text{ nm}$ ،  $530 \sim$  و  $837 \text{ nm}$  برای قطبش  $p$  و یک قله جذب در  $810 \text{ nm}$  برای قطبش  $s$  در زوایای تابش  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  مشاهده می‌شود. از آنجا که مؤلفه میدان الکتریکی  $E_s$  روی سطح قرار دارد، با افزایش زاویه نور تابشی تغییری در آن ایجاد نمی‌شود. بنابراین، شدت قله جذب قطبش  $s$  یکسان باقی می‌ماند. در حالی که شدت قله‌های جذب برای قطبش  $p$  با افزایش زاویه نور تابشی، افزایش می‌یابد. زیرا طول مؤثر بازوها در راستای میدان الکتریکی افزایش می‌یابد و زاویه بین محور بازوها و میدان الکتریکی تابشی کاهش می‌یابد [۴۲].

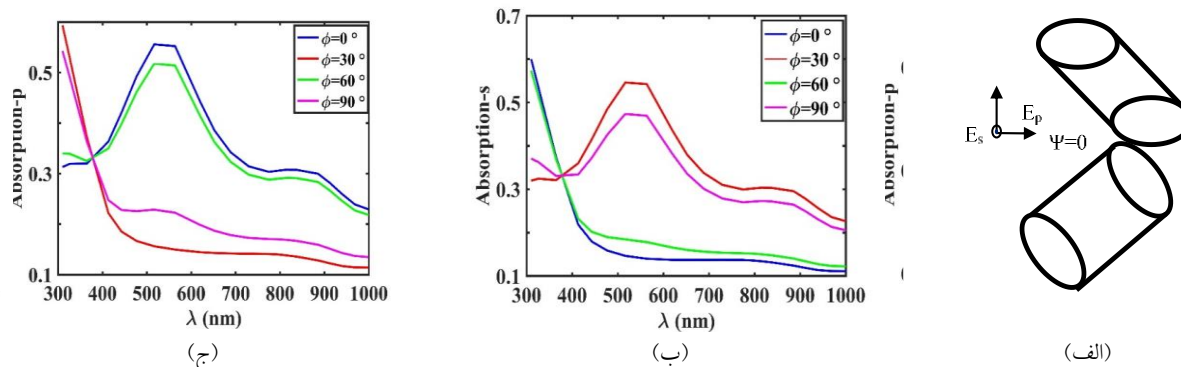
### ۲.۳. اثر زاویه سمتی روی خواص اپتیکی لایه نازک زیگزاگی آلومینیم

در شکل ۴. ب و ج، طیف جذب به دست آمده برای لایه نازک زیگزاگی آلومینیم دارای دو بازو با طول  $30 \text{ nm}$ ، تحت نور تابشی  $\theta = 0^\circ$  و در زوایای سمتی مختلف  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $60^\circ$ ،  $90^\circ$  برای هر دو قطبش  $s$  و  $p$  رسم شده 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 نقطه شروع اندازه‌گیری اپتیکی بستگی دارد. قله‌ها در زاویه سمتی  $0^\circ$  و  $60^\circ$  برای قطبش  $p$  و در زوایای سمتی  $30^\circ$  و  $90^\circ$  برای قطبش  $s$  افزایش داشته‌اند. به عبارتی در نور قطبیده  $s$  رفتار طیف برای زوایای سمتی  $30^\circ$  و  $90^\circ$  و در نور قطبیده  $p$  رفتار طیف برای زاویه سمتی  $0^\circ$  و  $60^\circ$  تقریباً مشابه یکدیگر هستند. در نور قطبیده  $s$  شدت طیف برای قله‌های با طول موج‌های  $837 \text{ nm}$  و  $530 \sim$  به ترتیب به صورت  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $0^\circ$  طیف‌ها مخالف یکدیگر است. در تمام طیف‌ها دو قله جذب پهن مشاهده می‌شود. قله ایجاد شده در طول موج کمتر را مد

یکسان تابش و عبور  $(T_{pp}, T_{ss})$  و قطبش متقاطع<sup>۱</sup> (با قطبش‌های متفاوت تابش و بازتاب  $R_{sp}, R_{ps}$  و قطبش‌های متفاوت تابش و عبور  $(T_{ps}, T_{sp})$  لایه زیگزاگ آلومینیم دارای دو بازو هر یک به طول  $30 \text{ nm}$ ، در زاویه سمتی  $\phi = 0^\circ$  و زوایای نور تابشی  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  برای هر دو قطبش  $s$  و  $p$  رسم شده است. از آنجا که وقتی بردار موج تابشی با صفحه مشخص ریخت شناسی همسان باشد، واقییدگی نمی‌تواند رخ دهد [۴۰]، با مقایسه دو شکل ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که طیف‌های 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 هم‌قطبش می‌توان به وضوح مشاهده کرد که ترتیب براگ و نواحی جذب برای زوایای تابش  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  برای قطبش  $p$  مخالف یکدیگر است (به عبارتی وقتی جذب بیشینه می‌شود، ناحیه براگ کمینه می‌شود و بالعکس). این رفتار را نیز می‌توان برای قطبش  $s$ ، اما با وضوح کمتر مشاهده کرد. قله براگ به دوره تناوب ساختار، ضریب شکست محیط و زاویه نور تابشی بستگی دارد [۴۱]. این رفتار در لایه نازک همسانگرد رخ نمی‌دهد. همچنین با توجه به شکل ۲ واضح است که، شدت قله بازتاب (عبور)  $413 \text{ nm}$  در قطبش  $s$  با افزایش  $\theta$  از  $0^\circ$  تا  $60^\circ$  به دلیل برهم‌کنش بیشتر میدان الکتریکی  $E_s$  نور تابشی با سطح، افزایش (کاهش) می‌یابد. این در حالی است که شدت قله‌های بازتاب (عبور) در قطبش  $p$  با افزایش زاویه تابشی به دلیل افزایش جذب، کاهش (افزایش) یافته است.

نمودارهای  $R_{pp}$  و  $R_{ss} < 1$  در شکل ۲، نشان می‌دهد که نور تابشی  $s$  و  $p$  داخل لایه نازک زیگزاگ تضعیف می‌شوند، و از آنجا که  $R_{ss} + R_{ps} + T_{ss} + T_{ps} < 1$  و  $R_{pp} + R_{sp} + T_{pp} + T_{sp} < 1$  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،

۱. Cross -remittances



شکل ۴. طیف جذب برای لایه نازک زیگزاگی آلومینیم با دو بازو با طول‌های ۳۰ nm در زاویه نور تابشی  $\theta = 0^\circ$  و در زوایای سمتی مختلف  $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  برای هر دو قطبش s و p.

شکل ۱. ب و در مرجع [۴۳] آمده است، وقتی نور تابشی در یک زاویه مشخص در راستای محور  $z$  با ساختار زیگزاگی برهم‌کنش می‌کند، میدان الکتریکی به دو مؤلفه تجزیه می‌شود: میدان الکتریکی موازی با محور ساختار در راستای محور  $z$ ،  $E_{p\parallel}$  و میدان الکتریکی عمود بر محور ساختار (عمود بر محور  $z$ )،  $E_{p\perp}$ . طول بازوهای ساختار زیگزاگی  $l$  در نظر گرفته شده است.

طرحواره‌ای از لایه نازک زیگزاگی با تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو با طول ثابت  $L$  و زاویه رشد  $\gamma$  ثابت در شکل ۵ نشان داده شده است. طیف جذب برای  $\theta = 0^\circ$  و  $\phi = 0^\circ$  برای لایه نازک زیگزاگی با طول‌های ۱۲۰، ۶۰ و ۳۰ nm و همچنین تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو به دست آمده و در شکل ۶، رسم شده است. در لایه نازک زیگزاگی با طول بازوی  $l = 30$  nm سه قله ۸۳۷، ۵۴۰ و ۳۲۶ nm مشاهده می‌شود (قطبش  $p$ ) و با افزایش تعداد بازو به ۳ بازو، قله‌ها به جز ۳۲۶ nm به سمت طول‌موج‌های قرمز انتقال یافته است و سپس با افزایش تعداد بازو به ۴ بازو، انتقال به سمت طول‌موج‌های آبی و در نهایت با افزایش بازو به ۵ بازو انتقال قله‌ها به سمت طول‌موج‌های قرمز را خواهیم داشت. این رفتار برای نانساختار زیگزاگی با طول ۶۰ و ۱۲۰ nm نیز مشاهده می‌شود. 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 اندازه  $l \cos \theta$  افزایش یافته است. بنابراین، قله‌ها به سمت طول

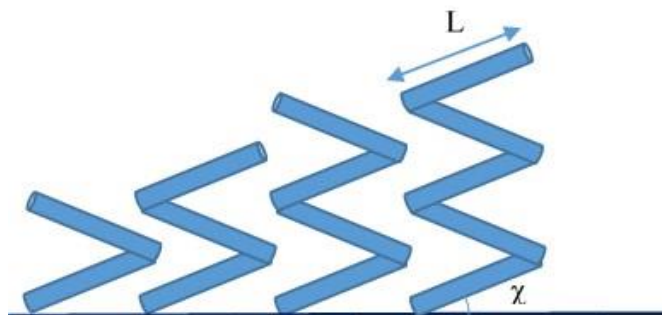
عرضی و قله ایجاد شده در طول‌موج بزرگ‌تر را مد طولی می‌نامند. جابه‌جایی این قله‌ها به شعاع و طول بازوها بستگی دارد.

در زاویه تابش  $\theta = 0^\circ$  با تغییر زاویه سمتی می‌توان اطلاعاتی راجع به ریخت شناسی سطح نانساختار شامل ناهمسانگردی نیز به دست آورد. مطابق شکل ۴، در  $\phi = 0^\circ$  میدان الکتریکی نور تابشی با قطبش  $p$  در راستای قطر بازوی دوم و در  $\phi = 60^\circ$  در راستای قطر بازوی اول قرار می‌گیرد (زاویه رشد نانومیله  $30^\circ$  و بنابراین زاویه بین دو میله  $60^\circ$  است). بنابراین، طیف‌های جذب آنها تقریباً یکسان خواهد بود. در  $\phi = 30^\circ$  و  $\phi = 90^\circ$  بردار میدان الکتریکی نور تابشی با قطبش  $p$  از سطح مقطع نانومیله‌ها دور شده است، بنابراین طیف جذب در قله‌ها کاهش یافته است. به همین ترتیب به دلیل عمود بودن میدان الکتریکی دو قطبش  $s$  و  $p$ ، رفتار طیف‌ها مخالف یکدیگر است. بنابراین ساختار در زوایای سمتی مشخصی تقارن سمتی خواهد داشت.

### ۳.۳ اثر تعداد و طول بازوها روی خواص اپتیکی لایه نازک زیگزاگی آلومینیم

طرحواره ساختار زیگزاگی و جهت‌های قطبش نور تابشی، همچنین تجزیه میدان الکتریکی قطبش  $p$  با تغییر جهت میدان الکتریکی در شکل ۱، نشان داده شده است. همان‌طور که در





شکل ۵. طرحواره لایه نازک زیگزاگی با تعداد بازوهای مختلف ۲ تا ۵ بازو با طول ثابت  $L$  و زاویه رشد  $\alpha$  ثابت

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 قله جذبی در طول موج های ۳۲۶ نانومتر، ۵۳۰ نانومتر و ۸۳۷ نانومتر و برای قطبش  $s$ ، یک قله جذبی در طول موج ۸۱۰ نانومتر در زوایای نور تابشی  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  وجود دارد. هرچه زاویه نور تابشی افزایش یابد، شدت قله جذبی قطبش  $s$  تغییر نمی‌کند، 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 این که زاویه بین بازو و میدان الکتریکی کاهش یافته است. تغییرات طیف‌های به دست آمده برای زوایای سمتی  $\phi$  مختلف نشان داد که نتایج قطبش  $s$ ، برای زاویه تابشی صفر درجه، شدت قله‌ها در طول موج های ۵۳۰ نانومتر و ۸۳۷ نانومتر به ترتیب برای  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  است. در حالی که برای قطبش  $p$  ترتیب به صورت  $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 30^\circ$  است که مخالف قطبش  $s$  است و دلیل آن این است که میدان‌های الکتریکی هر دو قطبش  $s$  و  $p$  در یک صفحه و عمود بر محور ساختار است. همچنین در قطبش  $p$ ، برای لایه نازک زیگزاگی آلومینیم با طول بازوی  $l = 30 \text{ nm}$  سه قله ۸۳۷، ۵۴۰ و ۳۲۶ مشاهده می‌شود، وقتی تعداد قله‌ها از ۲ به ۳، ۳ به ۴ و ۴ به ۵ افزایش می‌یابد، به جز قله

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

با کاهش زاویه 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.

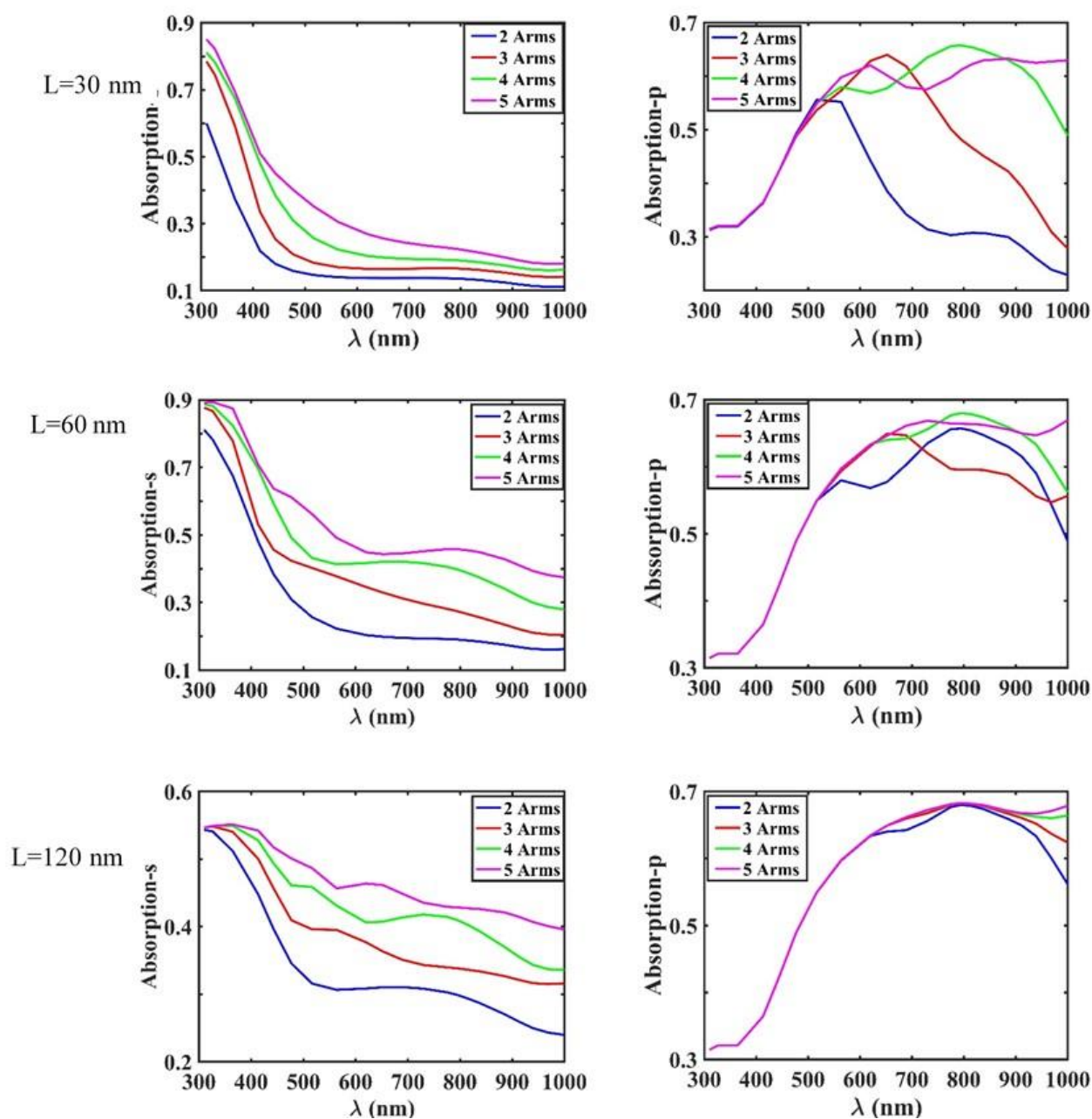
در لایه زیگزاگی با ۲ بازو، بازوی اول زاویه  $30^\circ$  و بازوی دوم زاویه  $150^\circ$  با میدان الکتریکی می‌سازد. با افزایش تعداد بازو به ۳ بازو، بازوی اول و سوم زاویه  $30^\circ$  و بازوی دوم زاویه  $150^\circ$  با میدان الکتریکی می‌سازد. بنابراین، تعداد (طول) در راستای میدان افزایش می‌یابد و بنابراین، طیف به سمت طول موج‌های قرمز انتقال می‌یابد.

با افزایش تعداد بازو به ۴ بازو، بازوهای اول و سوم زاویه  $30^\circ$  و بازوهای دوم و چهارم زاویه  $150^\circ$  با میدان الکتریکی می‌سازند. بنابراین، زاویه 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 زاویه  $30^\circ$  و بازوی دوم و چهارم زاویه  $150^\circ$  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. نتیجه گیری

در این مقاله، قطبش نور قطبیده خطی در لایه نازک



شکل ۶. طیف جذبی لایه نازک زیگزاگی آلومینیم با طول های مختلف ۳۰ nm، ۶۰ nm و ۱۲۰ nm و تعداد بازوهای مختلف (۲ تا ۵) برای زاویه سمتی و تابشی  $0^\circ$  و هر دو قطبش خطی s و p.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت مالی و دیگر حمایت‌های 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

۳۲۶ نانومتر، قله‌ها به ترتیب به سمت طول موج‌های بلندتر، کوتاه‌تر و بلندتر جابه‌جا می‌شوند. این رفتار را نیز می‌توان برای نانو ساختارهای زیگزاگی با طول‌های ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر نیز مشاهده کرد. همچنین می‌توان نتایج مشابهی برای نانو ساختارهای 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 شماره قرارداد

۰۸۲۳/۱۳۹۷/۱۹۹۲۰، اعلام کنند.

## مراجع

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. Esfandiari, *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 فرزاد و ن یزدان پناه، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۹، ۴ (۱۳۸۸) ۳۴۹.
33. S Roshanentezar, A Rahmatnezamabad, H Afkhami, and B Rahmatnezamabad, *Iran. J. Phys. Res.* **14**, 2 (2014) 139.
۳۳. ص روشن انتظار، ع رحمت نظام آباد، ح افخمی و ب رحمت نظام آباد، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۴، ۲ (۱۳۹۳) ۱۳۹.
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, New York (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.
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 Djurišić, C Y Kwong, H L Tam, K W Cheah, Z T Liu, W K Chan, P C Chui, J Chan, A D Rakić, *Opt. Commun* **248** (2005) 287.
6. D Nieto, F Cambronerero, 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 Röhlberger, 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.