

نانوساختارهای ضدبازتاب طراحی شده بر اساس ساختار چشم حشرات

مهشید صمدی دارافشانی، اکبر اسحاقی*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

چکیده

با توجه به محدودیت‌های روش‌های بر پایه پوشش‌دهی، جهت ضدبازتاب کردن سطوح در برخی از کاربردها از روش‌های بر پایه اصلاح‌سازی سطح استفاده می‌شود. ایده این روش‌ها از ساختار قرنیه چشم حشرات گرفته شده است و ساختارهای تهیه شده با استفاده از این روش‌ها موسوم به ساختارهای چشم حشره هستند. در این روش‌ها سطح با استفاده از یک‌سری برآمدگی به گونه‌ای اصلاح می‌شود که ضریب شکست در فصل مشترک زیرلایه و محیط اطراف به صورت تدریجی تغییر می‌کند و این امر موجب سرکوب بازتاب‌های سطحی می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این روش‌ها، امکان دستیابی به بازتاب‌های بسیار کم (چند دهم درصد) و عبور بسیار بالا (بیش از ۹۱ درصد) در محدوده گسترده‌ای از طیف نوری برای تابش‌هایی با جهت‌گیری‌های مختلف می‌باشد. از طرف دیگر خواص اپتیکی این ساختارها تنظیم‌پذیر با پارامترهای هندسی ساختار می‌باشند. مجموعه این خواص کم‌نظیر، موجب کاربرد گسترده این ساختارها در بسیاری از تجهیزات شده است. در این مقاله به معرفی روش‌های اصلاح‌سازی سطح، بیان اصول اپتیکی و کاربردهای این روش‌ها پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: نانوساختارهای ضدبازتاب، ساختار چشم حشره، اصلاح‌سازی سطح، ضریب شکست.

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از فناوری‌ها، پدیده بازتاب نور از فصل مشترک‌ها به عنوان یک مشکل اساسی و همچنین مهم‌ترین عامل موثر بر بازده و نحوه عملکرد تجهیزات مطرح شده است. از جمله این تجهیزات می‌توان به سلول‌های خورشیدی، شیشه‌های عینک، صفحات نمایشگر موجود در تلفن‌های همراه، تلویزیون‌ها و دوربین‌ها و بسیاری از تجهیزات اوپتوالکترونیک دیگر اشاره کرد. در کلیه این تجهیزات کاهش بازتاب‌های سطحی موجب بهبود عملکرد تجهیز می‌شود به طوری که در سلول‌های خورشیدی شاهد افزایش چشمگیر بازده تولید انرژی الکتریکی و در صفحات نمایشگر و شیشه‌های عینک شاهد امکان مشاهده تصاویر با کیفیت خوب در محیط‌های پر نور و دید بهتر خواهیم بود [۱]. تاکنون تلاش‌های بسیاری جهت طراحی و ساخت سطوح ضدبازتاب انجام گرفته است. متداول‌ترین این روش‌ها شامل روش زبرسازی سطح در اندازه میکرونی، روش‌های بر پایه پوشش‌دهی و روش‌های بر پایه اصلاح سطح می‌باشند. در این میان، روش‌های بر پایه پوشش‌دهی و همچنین روش‌های بر پایه اصلاح سطح پرکاربردتر هستند [۲ و ۳]. اساس روش‌های بر پایه پوشش‌دهی، رسوب یک یا چند لایه پوشش با ضریب شکست و ضخامت معین است در حالی که در روش‌های بر پایه اصلاح‌سازی سطح از هیچ گونه پوششی استفاده نمی‌شود و اساس آن‌ها ایجاد یک سری برآمدگی‌ها با الگوهایی مشخص بر روی سطح می‌باشد [۲]. در رابطه با روش‌های بر پایه پوشش‌دهی، برخی عوامل استفاده از این روش‌ها را محدود ساخته‌اند. این محدودیت‌ها موجب گسترش روش‌های نوین بر پایه اصلاح سطح و افزایش کاربرد آن‌ها شده است. در این مقاله ابتدا به صورت مختصر به روش‌های بر پایه پوشش‌دهی پرداخته شده است. پس از آن در ادامه به بیان روش‌های اصلاح‌سازی سطح و چگونگی ضدبازتاب کردن سطوح با استفاده از این روش‌ها پرداخته شده است. در این قسمت به معرفی ساختارهای چشم حشره مصنوعی، بیان اصول اپتیکی این، کاربرد و همچنین روش‌های ساخت این ساختارها پرداخته شده است.

* نویسنده مسئول: eshaghi.akbar@gmail.com

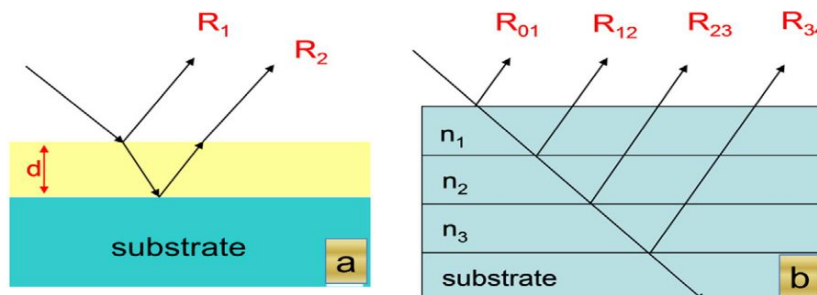
۲- روش‌های بر پایه پوشش‌دهی

در این روش‌ها معمولاً از یک یا چند لایه پوشش با مقادیر ضریب شکست (در محدوده ضریب شکست محیط اطراف و زیرلایه) و ضخامت‌های معین استفاده می‌شود به طوری که با عبور از هوا به سمت زیرلایه، ضریب شکست به صورت تدریجی تغییر می‌کند. مطابق با شکل ۱ پوشش‌های ضد بازتاب به صورت تک‌لایه یا چندلایه هستند [۴]. اساس کاهش بازتاب در این پوشش‌ها، پدیده تداخل ویرانگر در فصل مشترک لایه‌های مختلف است. بنابراین مهم‌ترین عوامل موثر بر کاهش بازتاب در این پوشش‌ها نوع ماده پوشش، ضریب شکست آن و همچنین ضخامت لایه پوشش می‌باشد به طوری که با تعیین حد بهینه هر کدام از این پارامترها شرایط برای دستیابی به کم‌ترین بازتاب و بیش‌ترین میزان عبور فراهم می‌شود [۶ - ۴]. در شکل ۱ طرحواره‌ای از پوشش‌های تک‌لایه و چندلایه نشان داده شده است. در ساده‌ترین حالت، کاهش بازتاب توسط یک پوشش هموزن تک‌لایه (شکل ۱-۱) انجام می‌گیرد. طبق بررسی‌های به عمل آمده، شرط لازم برای دستیابی به عبور بیشینه و بازتاب کمینه توسط این پوشش‌ها عبارت است از:

$$n_c = (n_s \cdot n_a)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$d = \frac{\lambda}{4n_c} \quad (2)$$

در این رابطه، λ طول موج اشعه تابیده شده، n_s ضریب شکست زیرلایه، n_a ضریب شکست هوا، n_c ضریب شکست پوشش و d ضخامت آن می‌باشد. پوشش‌های تک‌لایه، صرفاً قادر به کاهش بازتاب در یک طول موج مشخص می‌باشند. این امر کاربرد این پوشش‌ها را در مواردی که نیازمند خواص ضد بازتابی در یک محدوده گسترده از طول موج‌ها هستند، محدود می‌کند. به همین منظور پوشش‌های ضد بازتاب چندلایه طراحی شده‌اند [۶ و ۹].

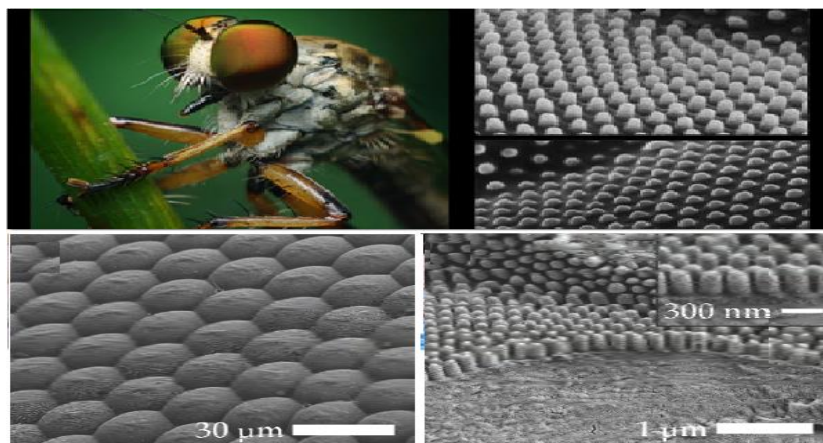


شکل ۱- شماتیک پوشش‌های تک‌لایه و چندلایه و بازتاب‌های انجام گرفته از فصل مشترک لایه‌های مختلف [۴].

در پوشش‌های چندلایه از ۲ یا چند لایه پوشش استفاده می‌شود. در این پوشش‌ها افزایش تعداد لایه‌های پوشش موجب افزایش تعداد فصل مشترک‌های مخرب و در نتیجه کاهش بازتاب در یک محدوده گسترده‌تر از طیف نور می‌شود. با این وجود محدوده کاهش بازتاب نور در این پوشش‌ها خیلی وسیع نیست و بازتاب صرفاً در یک محدوده کوچک از طیف نور کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده است که پوشش‌ها فقط برای محدود کردن بازتاب در یک طول موج مشخص و یا یک محدوده کوچک از طیف نور و برای زوایای تابش نزدیک به عمود مناسب می‌باشند. علاوه بر این به واسطه ضریب انبساط حرارتی متفاوت لایه‌های مختلف، پوشش‌ها اغلب دارای چسبندگی و طول عمر پایین هستند. مجموعه این عوامل استفاده از پوشش‌ها را در برخی کاربردها محدود می‌کند. به منظور رفع این مشکلات اغلب روش‌های جدید بر پایه اصلاح‌سازی سطح استفاده می‌شود [۱].

۳- روش‌های بر پایه اصلاح‌سازی سطح

در رابطه با پوشش‌های تک‌لایه و چندلایه، تغییرات ناگهانی ضریب شکست در فصل مشترک لایه‌های مختلف همواره باعث مقداری بازتاب می‌شود. به همین دلیل در روش‌های بر پایه پوشش‌دهی امکان حذف بازتاب‌ها تا مقادیر بسیار کم وجود ندارد. بنابراین سرکوب تقریباً کامل بازتاب نور مستلزم حذف این فصل مشترک‌ها و ایجاد تغییرات کاملاً تدریجی ضریب شکست در فصل مشترک زیرلایه و محیط اطراف آن می‌باشد [۹ - ۸]. بر این اساس به منظور دستیابی به خواص ضدبازتابی مطلوب‌تر، از روش‌های بر پایه اصلاح‌سازی سطح استفاده شده است. ایده ضدبازتاب کردن سطوح با استفاده از این روش‌ها برگرفته از ساختار قرنیه چشم حشرات است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داده است که سطح قرنیه چشم برخی از حشرات کاملاً صیقلی بوده و نور را به طور کامل از سطح خود بازتاب می‌کند. این در حالی است که چشم برخی دیگر از حشرات هیچ‌گونه بازتابی از سطح خود ندارند. مطابق با شکل ۲ بررسی‌های میکروسکوپی ساختار چشم این نوع حشرات نشان‌دهنده حضور نانو ساختارهایی ویژه حاوی یک سری آرایه‌های تناوبی از برآمدگی‌ها بر سطح چشم آن‌ها بوده است [۱۱]. این برآمدگی‌ها که دارای ابعادی کوچک‌تر از طول موج نور مرئی هستند، به‌عنوان یک مرز پیوسته بین هوا و سطح چشم حشره عمل می‌کنند و موجب تغییرات تدریجی ضریب شکست در فصل مشترک هوا-سطح چشم حشره می‌شوند. بر همین اساس این برآمدگی‌ها عامل اصلی سرکوب بازتاب فرنل معرفی شده‌اند. وجود این ساختارها با رفتار ضدبازتابی ویژه بر سطح چشم حشرات اولین بار در سال ۱۹۶۷ توسط برنهارد[†] کشف شد [۴ و ۱۰].



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از ساختار چشم حشره، متشکل از برآمدگی‌های نانومتری با اشکال کاسه‌ای، استوانه‌ای و مخروطی [۱]. در روش‌های نوین بر پایه اصلاح‌سازی سطح، از ساختارهایی مشابه با ساختارهای چشم حشره جهت ضدبازتاب کردن سطوح استفاده می‌شود. این ساختارها تحت عنوان ساختارهای چشم حشره[‡] نام‌گذاری شده‌اند. در این روش-ها معمولاً از هیچ ماده‌ای به‌عنوان پوشش استفاده نمی‌شود و دستیابی به خواص ضدبازتابی ویژه فقط بر اساس کنترل هندسه سطوح ایجاد الگوهای با ابعاد و اشکال مناسب انجام می‌شود [۷]. حذف فصل مشترک‌های نوری غیر پیوسته و همچنین تغییرات تدریجی ضریب شکست در این ساختارها، مهم‌ترین عامل سرکوب بازتاب در این سطوح است. در شکل ۳-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک ساختار چشم حشره مصنوعی اعمال شده بر سطح سیلیکون نشان داده شده است [۱۱]. در این تصویر سه ناحیه مجزا مشاهده شده است. ناحیه‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به هوا و زیرلایه بوده و هر دو دارای ضرایب شکست ثابتی می‌باشند. ناحیه ۳ در ناحیه‌ای بین پایه جسم و هوا قرار گرفته است و مربوط به قسمت ساختار یافته (قسمت اصلاح شده) می‌باشد. در این قسمت، ضریب شکست مقدار ثابتی ندارد. در شکل ۵-ب طرحواره‌ای از این ناحیه (قسمت ساختار یافته) نشان داده شده

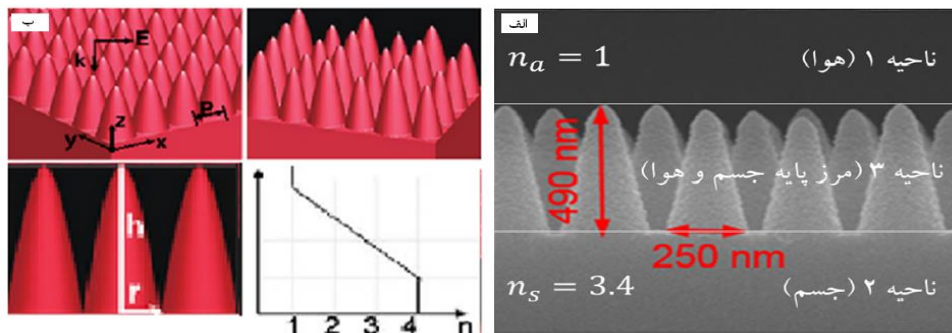
[†]Bernhard

[‡] Moth Eye

است [۱۱]. مطابق با این شکل‌ها، ساختاری کامپوزیتی حاوی یک سری برآمدگی‌ها و برجستگی‌ها در فصل مشترک هوا-زیرلایه مشاهده شده است. در این ساختار کامپوزیتی که مخلوطی از هوا و ماده زیرلایه است، با حرکت از سمت هوا به زیرلایه در راستای محور Z (در راستای ارتفاع برآمدگی‌ها) به مرور ضخامت این برآمدگی‌ها بیشتر و کسر حجمی هوای موجود در ساختار کم‌تر می‌شود. بنابراین از بالا به پایین در راستای ارتفاع برآمدگی‌ها دانسیته ساختار افزایش می‌یابد تا اینکه در نهایت دانسیته برابر با دانسیته زیرلایه می‌شود. از طرفی در این ساختارها، مقدار ضریب شکست وابسته به مقدار ضریب شکست هوا، زیرلایه و کسر حجمی هر کدام از آن‌ها می‌باشد. بنابراین در راستای ارتفاع این ساختارها با تغییر تدریجی دانسیته ماده، ضریب شکست نیز به صورت تدریجی تغییر می‌کند. بر این اساس در این ساختارها فصل مشترک مشخصی که در آن ضریب شکست به صورت ناگهانی تغییر کند وجود ندارد. این امر اصلی‌ترین دلیل کاهش بازتاب در این ساختارها می‌باشد [۱۲]. بر این اساس مقدار ضریب شکست در این ساختارها، مقداری متغیر و وابسته به ارتفاع می‌باشد. مقدار ضریب شکست در ارتفاع‌های مختلف برآمدگی‌ها مطابق با رابطه ۳ به دست می‌آید [۱۳].

$$n_{\text{eff}}(h) = n_n \times \frac{A_n(h)}{A_{\text{base}}} + n_{\text{air}} \times \frac{A_{\text{base}} - A_n(h)}{A_{\text{base}}} \quad (3)$$

در این رابطه $n_{\text{eff}}(h)$ ضریب شکست موثر است که تابعی از ارتفاع می‌باشد. $A_n(h)$ و A_{base} نیز به ترتیب مساحت نوک برآمدگی در ارتفاع h و مساحت پایه برآمدگی می‌باشد. n_n ، n_{air} نیز به ترتیب ضریب شکست هوا و زیرلایه می‌باشند [۱۳].

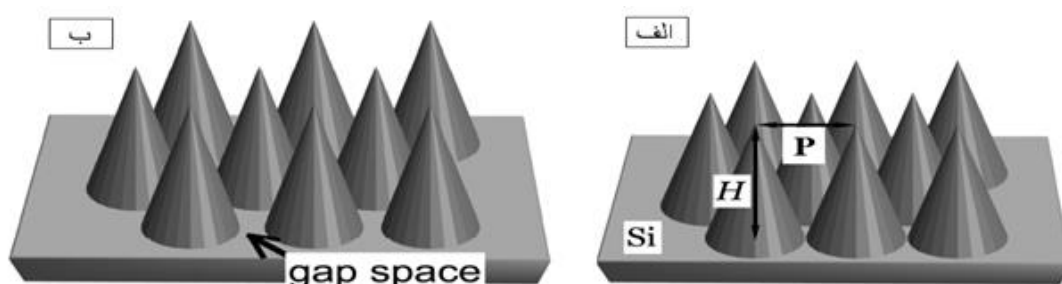


شکل ۳- نمایشی از ساختارهای چشم حشره و چگونگی تغییرات ضریب شکست در راستای ارتفاع ساختار [۱۱].

علاوه بر تغییرات تدریجی ضریب شکست، تابش و بازتاب‌های پی‌درپی پرتوها در بین برآمدگی‌ها نیز موجب حبس شدن پرتوها و ممانعت از بازتاب‌های سطحی آن‌ها می‌شود به طوری که در طی این فرآیند، عمده پرتوهای تابیده شده، از سطح عبور می‌کنند و تنها بخش کوچکی از پرتوها امکان بازتاب از سطح را پیدا می‌کنند. در نهایت کلیه این عوامل موجب کاهش بازتاب در این ساختارها تا مقادیر بسیار کم (در حد چند دهم درصد) می‌شود. علاوه بر این، این برآمدگی‌ها به واسطه دارا بودن ابعادی کوچک‌تر از طول موج پرتو فرودی، موجب کاهش میزان پراکنش نور از سطح و در نتیجه افزایش میزان عبور نیز می‌شوند. بنابراین می‌توان این گونه بیان کرد که کاهش میزان بازتاب به-همراه کاهش جذب اتلافی و در نتیجه افزایش میزان عبور از مهم‌ترین ویژگی‌های این ساختارها می‌باشند. قابل ذکر است که این الگوها علاوه بر کاهش انعکاس نور از سطح و افزایش میزان عبور، ویژگی‌های جالب دیگری نظیر خاصیت آب‌گریزی نیز به سطح می‌دهند [۸ و ۱۴].

۳-۱- پارامترهای موثر بر عملکرد ساختارهای چشم حشره مصنوعی

طبق بررسی‌های به عمل آمده مشاهده شده است که نحوه عملکرد و خواص اپتیکی ساختارهای چشم حشره (میزان بازتاب، جذب و عبور نور)، تحت تاثیر برخی پارامترهای هندسی ساختار نظیر ارتفاع موثر ساختار (H)، گام[§] یا فاصله تناوبی بین برآمدگی‌ها (P)، دانسیته ساختار یا چگالی انباشت^{**} و همچنین شکل و حالت برآمدگی‌های موجود در این ساختارها می‌باشد [۱۵]. مطابق با شکل ۴-الف ارتفاع موثر همان ارتفاع برآمدگی‌ها است و گام نیز به فاصله بین دو قله گفته می‌شود. دانسیته ساختار نیز مطابق با شکل ۴-ب وابسته به اندازه فضاهای خالی و فاصله بین برآمدگی‌ها است. به منظور طراحی بهینه ساختارهای چشم حشره، مطالعات گسترده‌ای جهت بررسی وابستگی رفتار اپتیکی این ساختارها به پارامترهای هندسی انجام شده است.



شکل ۴- طرحواره‌ای از برآمدگی‌های موجود بر ساختارهای چشم حشره (الف) نمایش ارتفاع موثر و گام در ساختار چشم حشره (ب) نمایش فاصله و فضاهای خالی بین برآمدگی‌ها (عامل تعیین کننده دانسیته ساختار) [۱۵].

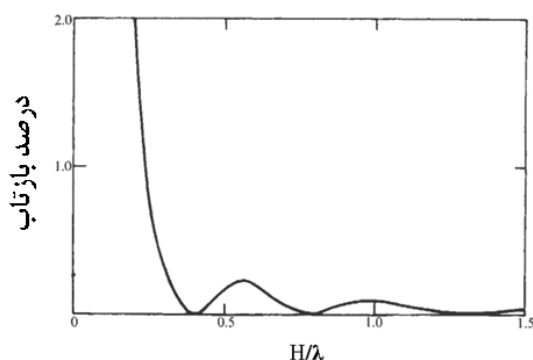
۳-۲- ارتفاع موثر ساختار

ارتفاع موثر ساختار یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر خواص ساختارهای چشم حشره است. بررسی‌ها نشان داده که اندازه بهینه ارتفاع موثر، خود متاثر از اندازه طول موج پرتو ورودی به ساختار است. اولین بار در سال ۱۸۸۰ رایلی به بررسی ارتباط بین طول موج پرتو ورودی به ساختار و اندازه ارتفاع موثر ساختار جهت دستیابی به کم‌ترین بازتاب پرداخت. بررسی‌ها نشان داد که کاهش بازتاب پرتوهای با طول موج‌های بلند، مستلزم افزایش اندازه ارتفاع موثر است [۱۶]. در شکل ۵ نیز تاثیر اندازه ارتفاع موثر بر شدت بازتاب پرتوهای با طول موج‌های مختلف (λ) نشان داده شده است [۱۷]. مطابق با این شکل در مواردی که اندازه H نسبت به λ خیلی کوچک است ($H \ll \lambda$), فصل مشترک بین زیرلایه و هوا به عنوان یک فصل مشترک غیر پیوسته با تغییرات ناگهانی n عمل کرده و در نتیجه این امر بازتاب از سطح زیاد است. با افزایش نسبت H/λ , بازتاب نیز به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد تا اینکه در $H/\lambda = 0.4$ به صفر می‌رسد. بر این اساس مشخص شده است که دستیابی به مقادیر بازتاب کم‌تر از ۱ درصد زمانی امکان‌پذیر است که ارتفاع موثر و طول موج پرتو ورودی به ساختار از نامساوی زیر تبعیت کنند [۱۷].

$$\text{If } \lambda < 3H \rightarrow R < 1 \text{ درصد} \quad (4)$$

[§]Pitch

^{**}Packing Density



شکل ۵- وابستگی شدت بازتاب از ساختارهای چشم حشره به اندازه ارتفاع موثر ساختار [۱۷].

۳-۳- فاصله تناوبی و اندازه گام (P)

اندازه گام یکی از عوامل موثر بر میزان پراکنش و در نتیجه عبور است به طوری که با کاهش اندازه گام میزان پراکنش نور کاهش و عبور افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده است که به منظور دستیابی به کم‌ترین میزان پراکنش و بیشترین عبور رابطه ۵ باید برقرار باشد [۱۵ و ۱۸].

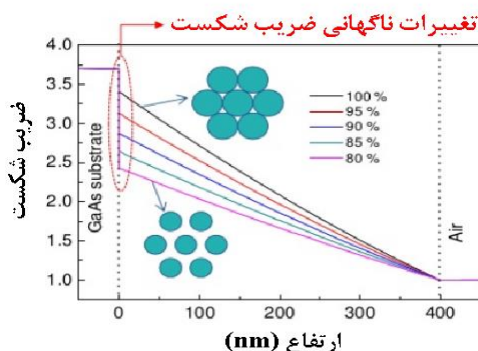
$$\frac{P}{\lambda_{min}} < \frac{1}{n_1 + n_0 \sin \theta_i} \quad (5)$$

در این رابطه λ_{min} کوچکترین طول موج پرتو فرودی به ساختار، θ_i زاویه بین پرتو فرودی و محور عمود بر صفحه ساختار، n_1 و n_0 نیز به ترتیب ضریب شکست هوا و زیرلایه می‌باشند. مطابق با این رابطه مشاهده می‌شود که اندازه بهینه گام جهت دستیابی به کم‌ترین مقدار پراکنش، خود وابسته به زاویه تابش و همچنین اندازه کوتاه‌ترین طول موج ورودی به ساختار می‌باشد. بر این اساس لازمه کاهش پراکنش پرتوهایی با طول موج کم‌تر، کاهش اندازه دوره تناوبی ساختار است. در رابطه با زاویه پرتو برخوردی با بردار نرمال صفحه نیز به طور مشابه مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار این زاویه، اندازه گام نیز باید کاهش یابد [۱۵].

۴-۳- تراکم ساختار

تراکم ساختار به واسطه تاثیر بر چگونگی تغییرات ضریب شکست در فصل مشترک ماده و محیط اطراف، به شدت بر میزان بازتاب‌های سطحی موثر است. در شکل ۶ چگونگی تغییرات ضریب شکست نسبت به اندازه ارتفاع موثر برای ساختارهایی با تراکم‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که در ساختارهای با دانسیته کم، شیب تغییرات ضریب شکست در فصل مشترک زیرلایه-محیط اطراف زیاد است در حالی که با افزایش تراکم ساختار، شیب تغییرات ضریب شکست کم‌تر و در نتیجه ضریب شکست به صورت تدریجی‌تر و با شیب ملایم‌تر تغییر می‌کند که این امر موجب بازتاب‌های کم‌تر در ساختارهای متراکم‌تر می‌شود [۱۶].

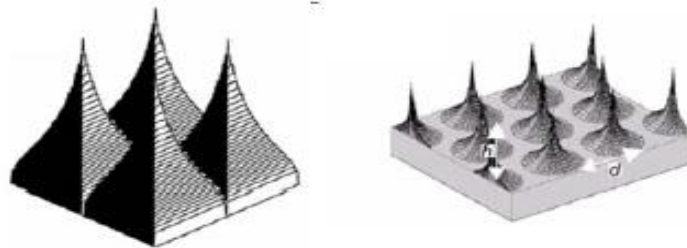
دانسیته ساختار



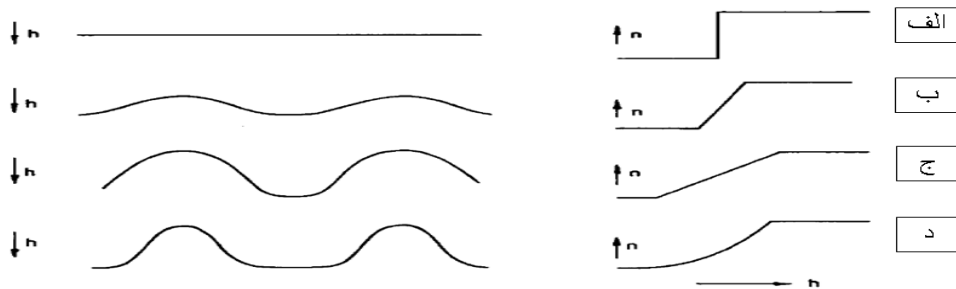
شکل ۶- چگونگی تغییرات ضریب شکست در راستای ضخامت ساختار و وابستگی آن به دانسیته ساختار [۱۹].

۳-۵- شکل و حالت برآمدگی‌ها

به واسطه تاثیر شکل برآمدگی‌ها بر نحوه تغییرات ضریب شکست و در نتیجه خواص اپتیکی ساختارهای چشم حشره، تعیین شکل مناسب برای برآمدگی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. مطابق با شکل ۷ برآمدگی‌ها اغلب دارای اشکالی نظیر ستونی، هرمی، مخروطی، گوسی و یا غیره هستند [۷]. نحوه تغییرات ضریب شکست در سطوحی حاوی برآمدگی‌ها با اشکال گوناگون متفاوت است. در شکل ۸ نیز طرحواره‌ای از برآمدگی‌های مختلف به همراه نمودار تغییرات ضریب شکست بر حسب ارتفاع موثر آن‌ها رسم شده است [۱۸]. سطوح عاری از برآمدگی دارای تغییرات ناگهانی ضریب شکست و در نتیجه بازتاب بالا هستند در حالی که در سطوح حاوی برآمدگی، تغییرات ضریب شکست تدریجی است. طبق بررسی‌های به عمل آمده، هرچه برآمدگی‌ها پهن‌تر و دارای ارتفاع موثر بالاتر باشند، شیب تغییرات ضریب شکست در آن‌ها کم‌تر خواهد بود. برآمدگی‌ها باید تا حد امکان به صورت تدریجی پهن شوند. زیرا در این صورت تغییرات دانسیته و در نتیجه تغییرات ضریب شکست نیز تدریجی خواهد شد.



شکل ۷- تصاویری از برآمدگی‌ها با شکل و طرح نامناسب [۲۰].



شکل ۸- نمایش برجستگی‌ها با اشکال مختلف و نحوه تغییر ضریب شکست در راستای ارتفاع برآمدگی‌ها [۱۸].

بنابراین چه گفته شد، به طور کلی کاهش شیب تغییرات ضریب شکست در این ساختارها مستلزم اعمال برآمدگی‌ها با ابعاد و اشکال مشخص می‌باشد به طوری که به منظور کاهش پراکنش پرتوها با طول موج‌های کوتاه و همچنین کاهش بازتاب پرتوها با طول موج‌های بلند، باید فاصله تناوبی برآمدگی‌ها تا حد امکان کم‌تر و ارتفاع موثر آن‌ها تا حد امکان بیش‌تر باشد.

۳-۶- کاربرد ساختارهای چشم حشره

ساختارهای چشم حشره مصنوعی به واسطه خواص اپتیکی مطلوب در طیف گسترده‌ای از پرتوهای نور، در بسیاری از تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین کاربردهای این ساختارها می‌توان به استفاده از آن‌ها در سلول‌های خورشیدی، شیشه‌های عینک، لنزهای شیشه‌ای، تجهیزات پزشکی و صفحات نمایشگر اشاره کرد. سلول‌های خورشیدی از جمله تجهیزات فتوولتائیک هستند که فوتون‌های نور خورشید را جذب و آن را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. مهم‌ترین ماده قابل کاربرد جهت ساخت این تجهیزات سیلیکون است. این ماده به واسطه ضریب شکست بالایی که دارد، تقریباً ۳۰ درصد از پرتوهای تابش شده را از سطح خود بازتاب می‌کند و موجب

کاهش بازده تجهیز می‌شود. به منظور رفع این مشکل و بهبود بازده سلول‌های خورشیدی معمولاً از فیلم‌های سیلیکون نیتريد استفاده می‌شود. این پوشش‌ها تنها قادر به کاهش بازتاب در یک طول موج مشخص هستند. این در حالی است که استفاده از ساختارهای چشم حشره در سلول‌های خورشیدی، منجر به کاهش بازتاب همراه با افزایش عبور در طیف گسترده‌ای از پرتوهای نور و در نتیجه افزایش راندمان سلول خورشیدی شده است [۲۱]. صفحات نمایشگر تلویزیون‌ها، تلفن‌های همراه و بسیاری از وسایل دیگر اغلب از جنس مواد پلیمری ساخته می‌شوند. بازتاب‌های صورت گرفته از سطح این مواد به شدت موجب کاهش کیفیت و کانتراست تصاویر موجود در این صفحات و در نتیجه عدم امکان مشاهده تصاویر در محیط‌های پر نور می‌شود. در تحقیقات اخیر، استفاده از ساختارهای چشم حشره مصنوعی در این سطوح نشان‌دهنده کاهش چشمگیر بازتاب‌ها و افزایش کیفیت تصاویر مشاهده شده در این سطوح بوده است [۲۲]. از دیگر کاربردهای این ساختارها، اعمال آن‌ها بر سطح شیشه‌ها است. در رابطه با شیشه عینک یا شیشه اتومبیل‌ها نیز بازتاب‌های سطحی موجب ایجاد درخشندگی در سطح شیشه و در نتیجه کاهش میزان دید از پشت شیشه می‌شود. استفاده از این ساختارها در سطح شیشه‌ها نیز موجب کاهش درخشندگی سطح شیشه و بهبود دید افراد از پشت شیشه‌ها شده است [۲۳]. در تحقیقات اخیر، ساختارهای چشم حشره به عنوان یک روش موثر بر کاهش بازتاب بر سطح داشبورد اتومبیل‌ها نیز اعمال شده‌اند. سطح داشبورد اتومبیل‌ها معمولاً توسط مواد پلیمری پوشش داده شده است. بازتاب‌های صورت گرفته از این سطوح پلیمری مهم‌ترین عامل موثر بر دید چشم راننده و در نتیجه مهم‌ترین عامل موثر بر تصادفات است. اعمال ساختارهای چشم حشره بر این سطوح نشان‌دهنده کاهش چشمگیر بازتاب‌های صورت گرفته از سطح بوده است [۲۴].

۳-۷- تولید ساختارهای چشم حشره

در حوزه فناوری نانو روش‌های مختلفی جهت تولید ساختارهای چشم حشره وجود دارد. از جمله متداول‌ترین روش‌ها می‌توان به روش‌های لیتوگرافی که از جمله روش‌های بالا به پایین است اشاره کرد. در این روش‌ها طرح یا الگوی مورد نظر به صورت مستقیم (روش‌های ردیفی) و یا به صورت غیر مستقیم و با استفاده از ماسک یا قالب‌هایی حاوی الگوهای مشخص بر سطح مورد نظر اعمال می‌شود. در روش‌های غیر مستقیم متناسب با روش مورد استفاده، سطح زیرلایه توسط یک ماده حساس به نور، باریکه الکترونی و مواردی از این قبیل پوشش داده شده و سپس الگوی مورد نظر توسط یک ماسک که حاوی الگوهای مورد نظر است بر سطح ماده حساس، حک می‌شود. پس از آن با استفاده از عملیات اچینگ، طرح مورد نظر به زیرلایه منتقل می‌شود. روش‌های ماسک‌دار به واسطه استفاده از ماسک، در مقایسه با روش‌های بدون ماسک اغلب دارای بازده تولید بالا و اما دقت پایین هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به لیتوگرافی نوری اشاره کرد. در رابطه با روش‌های بدون ماسک نیز در ابتدا سطح مورد نظر توسط یک ماده حساس مناسب پوشش داده شده و سپس الگوی مورد نظر با استفاده از روبش سطح توسط یک پروب یا باریکه مناسب، بر سطح حکاکی می‌شود. پس از آن در مرحله اچینگ، طرح مورد نظر بر سطح زیرلایه حکاکی می‌شود. از جمله روش‌های مستقیم می‌توان به لیتوگرافی باریکه الکترونی یا لیتوگرافی اشعه ایکس اشاره کرد. قابل ذکر است که روش‌های لیتوگرافی اغلب پر هزینه و پیچیده هستند [۲۵]. علی‌رغم روش‌های معمول لیتوگرافی، لیتوگرافی نانو چاپ روشی نوین، کم‌هزینه و ساده می‌باشد که امروزه به واسطه دقت بالا به شدت مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به واسطه استفاده از قالب‌های حاوی طرح مورد نظر، بازده تولید بالایی دارد. از طرفی عدم استفاده از سیستم‌های تابشی پیچیده دقت این روش‌ها را نیز بالا برده است. این روش از جمله پرکاربردترین روش‌های لیتوگرافی جهت ساخت ساختارهای چشم حشره محسوب می‌شود [۲۶ و ۲۷].

۴- نتیجه گیری

باتوجه به مطالعات انجام گرفته می‌توان ساختارهای چشم حشره را ساختارهایی ضدبازتاب با مجموعه خواصی بهتر از پوشش‌های تک‌لایه یا چندلایه در نظر گرفت. مهم‌ترین مزایای این ساختارهای ضدبازتاب نسبت به پوشش‌ها عبارتند از:

- امکان دستیابی به بازتاب‌های بسیار کم و عبور بسیار بالا در محدوده گسترده‌ای از طیف نوری برای تابش-هایی با جهت‌گیری‌های مختلف وجود دارد.
- مشکل چسبندگی به زیرلایه وجود ندارد.
- خواص اپتیکی با پارامترهای هندسی ساختار نظیر اندازه ارتفاع موثر، گام، تراکم ساختار و شکل برآمدگی‌ها قابل تنظیم است.
- قابلیت اعمال این ساختارها بر سطح مواد با جنس‌های مختلف و در نتیجه کاربرد گسترده این نانو ساختارها در بسیاری از تجهیزات وجود دارد.

مراجع

- [1]. T. Lohmueller, R. Brunner and J. Spatz, Biomimetics, learning from nature, In Tech, University Campus 2010.
- [2]. K. S. Han, J. H. Shin and H. Lee, Enhanced transmittance of glass plates for solar cell using nano-imprint lithography, *Solar Energy Materials & Solar cells* 94 (2010) 583-587.
- [3]. H.F.W. Dekkers, F. Duerinckx, J. Szlufcik and J. Nijs, Silicon surface texturing by reactive ion etching, *Opto-Electronics Review* 8(4) (2000) 311-316.
- [4]. L. Yao and J. He, Recent progress in antireflection and self-cleaning technology-from surface engineering to functional surfaces, *Progress in Materials Science* 61 (2014) 94-143.
- [5]. مظفری‌نیا، ر.، مواد اپتیکی، فراوری محلولی، خواص و کاربردها، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۳.
- [6]. M. Schossig, Bio and nano packaging techniques for electron devices, Springer, Technisch Universität Dresden, Germany, 2012.
- [7]. S. Chattopadhyay, Y. F. Huang, Y. J. Jen, A. Ganguly, K. H. Chen and L. C. Chen, Anti-reflecting and photonic nanostructures, *Materials Science and Engineering* 69 (2010) 1-35.
- [8]. U. Schulz, Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers, *APpl. Opt* 45 (2006) 1628-1618.
- [9]. E. Spiller, I. Haller, R. Feder, J. E. E. Baglin and W. N. Hammer, Graded-index AR surfaces produced by ion implantation on plastic materials, *Applied Optics* 19 (1980) 3222-3226.
- [10]. C. G. Bernhard, Structural functional adaptation in a visual system, *Endeavour* 26 (1967) 79-84.
- [11]. Y. M. Song and Y. T. Lee, Antireflective nanostructures for high-efficiency optical devices, *Newsroom* (2010) 1-2.
- [12]. J. A. Watson, S. Myhra and G. S. Watson, Tunable natural nano-arrays: controlling surface properties and light reflectance, *Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology*, International Society for Optics and Photonics, Australia, 11 December (2005) 60371D-60371D-9.
- [13]. R. Dewan, S. Fischer, V. B. Meyer-Rochow, Y. Ozdemir, S. Hamraz and D. Knipp, Studying nanostructured nipple arrays of moth eye facets helps to design better thin film solar cells, *Bioinspiration and Biomimetics* 7 (2012) 1-8.
- [14]. Y. Li, Y. Kanamori and K. Hane, A new method for fabrication nano-porous aluminum grating array, *Microsyst. Technol* 12 (2004) 272-274.
- [15]. A. Taylor, I. Parkin, N. Noor, C. Tummeltshammer, M. S. Brown and I. Papakonstantinou, A bioinspired solution for spectrally selective thermochromic VO₂ coated intelligent glazing, *Optics Express* 21 (2013) A752-A764.
- [16]. H. Imada, T. Miyata, S. Sako and et al. Fabrication and tolerances of moth-eye structures for perfect antireflection in the mid-infrared wavelength region, *SPIE Astronomical Telescopes+*

Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, Netherlands, 13 September (2012) 84502F-9.

[17]. P. B. Clapham and M. C. Hutley, Reduction of lens reflexion by the “Moth Eye” principle, *Nature* 244 (1973) 281-282.

[18]. S. J. Wilson and M. C. Hutley, The optical properties of moth eye antireflection surfaces, *Journal of Modern Optics* 29 (1982) 993-1009.

[19]. Slideshare, Biomimetics: compound eyes, access Date, <http://www.slideshare.net>, Last modified: 2015.

[20]. L. Shen, H. Du, J. Yang and Z. Ma, Optimized broad band and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with moth-eye structures by low cost replica molding, *Applied Surface Science* 325 (2015) 100-104.

[21]. B. G. Prevo, E. W. Hon and O. D. Velev, Assembly and characterization of colloid-based antireflective coatings on multicrystalline silicon solar cells, *Journal of Materials Chemistry* 17 (2007) 791-799.

[22]. M. Foley. Technical advances in microstructured plastic optics for display applications, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Wiley Online Library, May (1999) 1106-1109.

[23]. Wikipedia, Anti-reflective coating, <https://en.wikipedia.org/>, Last modified: May 20 2015.

[24]. B. D. Macleod and D. S. Hobbs, Low cost anti-reflection technology for automobile displays, *Journal of the Society for Information Display*, Automotive Display Conference, Automotive Display Conference, October (2004) 1-6.

[25]. Iust, <http://www.iust.ac.ir/files/nanoptronics/pages/seminars/pps/lithography.pptx>, Last modified: 1393.

[26]. H. Schiff, Nanoimprint lithography: an old story in modern times? a review, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 26 (2008) 458-482.

[27]. H. Lan and Y. Ding, Nanoimprint lithography, *Lithography Rijeka: InTech* (2010) 457-494.