

## بهینه‌سازی فیلتر رنگی پلاسمونیک برای حسگر تصویر برداری

کاوه عیوضی<sup>۱</sup>، محمدعظیم کرمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۸/۷/۱۰، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۴)

## چکیده

در این مقاله، فیلتر رنگی پلاسمونیک شیاردار پشت و روی چشم گاوی برای کاربرد در حسگرهای تصویربرداری استاندارد سی‌ماس ارائه شده است. فیلتر پلاسمونیک فیلم نازک ارائه شده از جنس نقره بوده و به کمک بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات با اصلاح پارامترهای دوره تناوب، زمان وظیفه، ضخامت بدنه، ارتفاع لایه شبکه‌ای و قطر روزنه برای تصویربرداری مادون قرمز بهینه‌سازی شده است. این فیلتر پلاسمونیک برای طول موج مرکزی ۸۳۵ nm طراحی شده است که دارای بیشینه بازدهی انتقال نور ۳۶/۸٪ و پهنا در نصف مقدار بیشینه ۱۱۰ nm می‌باشد. از مزیت‌های این فیلتر می‌توان به قابلیت پیاده‌سازی با هزینه پایین، نزدیک بودن به ناحیه حساس به نور، کاهش هم‌شنوایی و عدم استفاده از پلیمرهای حساس به دما که برای کاربردهای با شرایط دمایی سخت مناسب است اشاره کرد. همچنین با تجزیه و تحلیل عملکرد این فیلتر پلاسمونیک و مقایسه آن با فیلترهای نوری دارای طول موج مرکزی مشابه، به بررسی ویژگی پلاسمون سطحی با توزیع شدت میدان الکتریکی محلی پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: فیلتر پلاسمونیک، الگوریتم ازدحام ذرات، تصویر برداری مادون قرمز

## ۱. مقدمه

پیکسل‌ها به زیر  $2 \mu\text{m}$ ، به دلیل هم‌شنوایی دچار کاهش کیفیت می‌شوند [۵].

هم‌شنوایی در حسگرهای تصویربرداری به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: هم‌شنوایی طیفی ناشی از الگو و مواد فیلتر رنگ، هم‌شنوایی الکتریکی ناشی از انتشار حامل‌های اقلیت و هم‌شنوایی اپتیکی که ناشی از پراش، انکسار و بازتاب نور است [۶-۷]. با پیاده‌سازی فیلتر رنگی در لایه‌های نزدیک به فتودیود و با تغییر مواد به کار رفته در آنها می‌توان هم‌شنوایی طیفی و اپتیکی را کاهش داد [۸-۷]. علاوه بر این، فرآیندهای متوالی که برای ساخت این فیلترها مورد استفاده قرار می‌گیرد، سبب بالا رفتن هزینه پیاده‌سازی آن‌ها می‌شود [۹]. لذا برای غلبه بر مشکل هم‌شنوایی و هزینه ساخت بالا، فن‌های جایگزین مانند فیلتر رنگ بلور فوتونی [۱۰-۱۱]، فیلتر رنگ مبتنی بر کاواک فابری پرو با آینه‌های فلزی [۱۲-۱۳] و فیلتر رنگ بر مبنای رزونانس مود هدایت‌شده مطرح شدند [۱۴-۱۵]. ولی کاربرد عملی فیلترهای رنگی نام‌برده به دلیل عملکرد ضعیف و فرآیند ساخت پیچیده محدود شده است [۸]. یک روش جایگزین، استفاده از فیلترهای رنگی پلاسمونیک است که قابلیت تنظیم‌پذیری رنگی بالایی دارند [۱۶]. در این مقاله ابتدا انواع فیلترهای رنگی مرسوم مورد استفاده در حسگرهای تصویر برداری معرفی شده است و سپس با معرفی فیلتر نوری پلاسمونیک شیاردار پشت و روی

برای تصویربرداری به مجموعه‌ای از اجزای اپتیکی، الکترونیک و فیلترها نیاز است که عبارتند از: (۱) مجموعه اپتیکی: شامل لنز و عدسی، (۲) متمایز کننده طول موج فوتون‌ها: شامل فیلترها، (۳) آشکارساز برای تبدیل فوتون به الکترون: شامل فتودیود یا فتوگیت، (۴) مدارهای جانبی که وظیفه خواندن بار تولید شده در هر پیکسل را دارند، (۵) زمان‌سنج، (۶) پردازشگر سیگنال و (۷) مبدل آنالوگ به دیجیتال [۱-۲]. در حسگرهای تصویر برداری، نور برگشتی از اشیاء، در ناحیه تخلیه فتودیود یا فتوگیت تبدیل به الکترون و حفره می‌شود. با جمع‌آوری الکترون‌های تولید شده بر روی خازن خروجی، میزان نور جذب شده در هر پیکسل به دست می‌آید [۱-۲]. جداسازی رنگ‌ها در حسگر تصویر برداری، به وسیله فیلترهای رنگی انجام می‌پذیرد. بنابراین در صورتی که حسگر تصویر برداری، فاقد فیلتر نوری باشد، تصاویر سیاه و سفیدی ثبت می‌شود [۳]. با اضافه کردن فیلتر نوری برای هر پیکسل، مثل فیلتر رنگ بایر، با مشخص کردن میزان رنگ قرمز، سبز و آبی، تصویر رنگی به دست می‌آید [۴]. شایان ذکر است که فیلترهای رنگی مرسوم با رنگ‌دانه‌های پلیمری با کاهش اندازه

\* نویسنده پاسخ‌گو: karami@iust.ac.ir

این گونه فیلترها بر مشکلات مربوط به قرار گرفتن طولانی مدت فیلترهای رنگ مرسوم در معرض نور، غلبه می‌کنند. لازم به ذکر است که پیاده‌سازی این لایه‌های متناوب پیچیدگی‌های زیادی را در ساخت به وجود خواهد آورد [۲۱].

## ۲-۳. فیلترهای نوری با استفاده از کاواک فابری پرو با آینه‌های فلزی

در این نوع فیلترها، فیلم اکسید دی‌الکتریک که بین فیلم‌های آینه‌ای بازتابنده بالا و پایین قرار گرفته شده است، به‌عنوان کاواک عمل می‌کند و با توجه به تأثیرات مشخصه‌های پراکندگی و ضخامت کاواک، عمل فیلتر کردن صورت می‌گیرد [۱۲]. روش فیلترهای فلز/دی‌الکتریک با استفاده از کاواک فابری پرو برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم تصویربرداری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با تغییر ضخامت دولایه از هفت لایه که در پشت حسگر تصویربرداری تعبیه شده است و با چهار سطح لیتوگرافی نوری ایجاد می‌شود می‌توان به رنگ‌های متفاوت دست یافت [۱۳]. تعداد زیاد لایه‌نشانی و دقت بالای هر لایه‌نشانی که منجر به افزایش هزینه ساخت می‌شود، از ضعف‌های این نوع فیلترها می‌باشد [۱۳].

## ۲-۴. فیلترهای نوری بر مبنای رزونانس مود هدایت شده

فیلترهای ساخته شده از شبکه‌های زیر طول موجی سیلیکونی بر روی زیر لایه کوارتز که بر اساس رزونانس مود هدایت‌شده عمل می‌کنند، به‌عنوان فیلتر نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. به دلیل اینکه ضریب شکست مؤثر لایه شبکه در مقایسه با محیط اطراف بالا است، لایه شبکه به‌عنوان یک موج‌بر صفحه‌ای عمل می‌کند و زمانی که شرایط تطبیق فاز بین نور فرودی و مودهای هدایت‌شده در موج‌بر تامین می‌شود، تشدید مود هدایت‌شده رخ می‌دهد که سبب انتقال نوری قابل توجهی در طول موج رزونانس می‌شود. بدین ترتیب با تنظیم دوره تناوب و عرض لایه شبکه، می‌توان به رنگ‌های مختلف دسترسی پیدا کرد [۲۲-۲۳].

## ۲-۵. فیلترهای نوری پلاسمونیک

مهم‌ترین مسئله در این نوع ساختارها سازوکار تشدید پلاسمون سطحی است به طوری که اگر نور فرودی سبب تحریک پلاسمون سطحی شود، باعث انتقال حداکثر طول موج تابیده شده می‌گردد [۱۶]. با توجه به نظریه شبه استاتیک، رفتار پلاسمون سطحی ساختار نانویی فلزها بر اساس نظریه الکتریکی دایپل مدل می‌شود [۲۴]. علاوه بر این، ما در [۲۵-۲۶] مدلی برای رفتار پلاسمون سطحی ارائه کرده‌ایم. همچنین در [۱۶ و ۲۷-۳۱] برای فیلترهای

چشم گاوی برای کاربرد تصویربرداری مادون قرمز به ارائه نتایج خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است فیلتر ارائه شده برای تصویربرداری مادون قرمز در بازه طول موج ۷۸۵ nm تا ۸۹۵ nm کاربرد دارد که این فیلتر سبب می‌شود نور با طول موج‌های دیگر که باعث به وجود آمدن نویز در تصویر می‌شود، به حسگر الکترونیکی نورانی اصابت ننماید. این بازه از طول موج برای کاربردهای پزشکی و باستان‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

## ۲. فیلترهای نوری متداول حسگرهای تصویر برداری

### ۱-۲. فیلتر رنگ بایر

امروزه متداول‌ترین فیلتر رنگی مرسوم در حسگرهای تصویربرداری استاندارد، فیلتر رنگ بایر می‌باشد. الگوی بایر که به‌عنوان فیلتر رنگ یا الگوی موزاییکی شناخته می‌شود از رنگ‌دانه‌هایی تشکیل شده که در یک آرایه تکراری از قرمز، سبز و آبی قرار گرفته است [۴]. شکل (۱) یک الگوی فیلتر بایر که از رنگ‌های مختلفی تشکیل شده را نمایش می‌دهد که بیان‌گر نمونه برداری ناپیوسته و از دست دادن قسمتی از داده‌ها در پیکسل‌های مجاور است [۳]. با وجود استفاده زیاد از فیلترهای رنگی با الگوی بایر به دلیل استفاده از پلیمرها در این فیلترها، حسگر تصویربرداری ساخته شده از آن‌ها، عملکرد مناسبی تحت شرایط دمایی بالا و یا تحت تابش زیاد ندارند [۱۸-۱۹]. به همین علت گروه‌های تحقیقاتی متعددی به دنبال فیلترهای جایگزین هستند که قابلیت تحمل شرایط تابشی و دمایی سخت را داشته باشند.

G	R	G	R	=	G	G	+	B	B	+	R	R
B	G	B	G		G	G					R	R
G	R	G	R		G	G					R	R
B	G	B	G		G	G		B	B			

شکل (۱): تجزیه الگوی فیلتر رنگی بایر به اجزاء آن [۴].

### ۲-۲. فیلترهای نوری با بلور فوتونی

بلور فوتونی از لایه‌های دی‌الکتریک متناوب با ضریب شکست متفاوت تشکیل شده است که منجر به یک شکاف باند فوتونی می‌شود [۲۰]. این شکاف باند در حقیقت محدوده فرکانسی است که اجازه انتشار نور از ساختار بلور را نمی‌دهد [۱۱-۱۰]. برای ایجاد یک باند برای انتقال در منطقه ممنوعه، نیاز به یک لایه نقص می‌باشد که اساساً یک لایه غیر متناوب است. این لایه را می‌توان با تغییر ضخامت یک لایه از دی‌الکتریک‌های مذکور ایجاد کرد. در این صورت وابسته به ضخامت لایه نقص، طول موجی که باند ممنوعه انتقال می‌دهد متفاوت خواهد بود [۱۱]. علاوه بر این،

مساوی صفر است، طول موجی که بیشینه بازدهی انتقال را دارد به دست می‌آید.

$$\lambda_{\max} = \frac{D}{\sqrt{p^2 + q^2}} \left( \frac{\varepsilon_m \varepsilon_i}{\varepsilon_m + \varepsilon_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

همچنین برای آرایه مثلثی، طول موجی که در آن بیشینه انتقال رخ می‌دهد، از رابطه (۴) به دست می‌آید [۳۶].

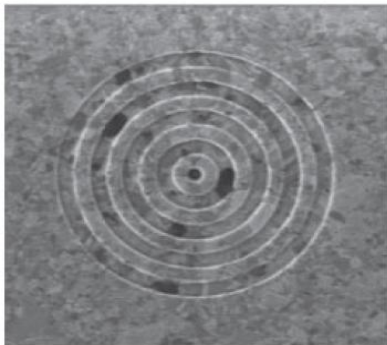
$$\lambda_{\max} = \frac{D}{\sqrt{\frac{4}{3}(p^2 + pq + q^2)}} \left( \frac{\varepsilon_m \varepsilon_i}{\varepsilon_m + \varepsilon_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

بنابراین، نور فرودی با پلاسمون سطح تزویج می‌شود و با تغییر دادن پارامترهای نانو حفره‌ها باعث تنظیم کردن طول موج رزونانس می‌شود و فیلتر کردن نور را امکان‌پذیر می‌سازد. این موضوع، هزینه ساخت و هم‌شنوایی را کاهش می‌دهد و چون فیلترهای پلاسمونیک می‌توانند در لایه‌های فلزی نزدیک سطح فتودیود قرار گیرند، نزدیکی فیلتر به بخش حساس به نور در پیاده‌سازی مدار مجتمع، سبب بالا رفتن بازدهی کوانتومی (نسبت تعداد الکترون تولیدشده در پیکسل به فوتون تابیده‌شده) می‌شود [۳۸].

### ۳. معرفی ساختار و صحت‌سنجی شبیه‌سازی

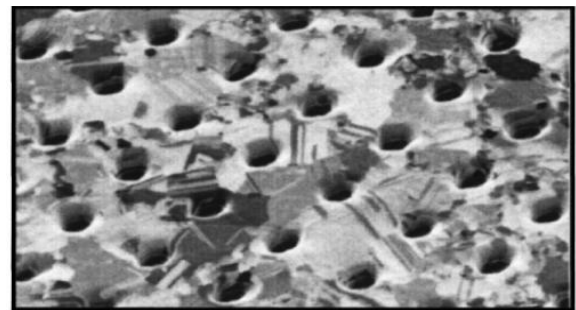
#### ۳-۱. ساختار پلاسمونیک

به لطف فناوری‌های نانو ساختاری پیشرفته، امکان اصلاح خواص اپتیکی روزه واحد از طریق ایجاد تغییرات در پیرامون روزه به وجود آمده است. این قبیل تغییرات موجب افزایش بازدهی انتقال نور می‌شود. وقتی یک روزه واحد در محاصره شیارهای دوار، مانند شکل (۳) قرار می‌گیرد، ساختار متناوب آن، سبب تزویج نور فرودی به پلاسمون سطحی در یک طول موج معین می‌شود [۳۷]. در نتیجه میدان الکترومغناطیسی در سطح بالای روزه شدید می‌شود که این منجر به بازدهی انتقال بسیار بالای نور و ایجاد یک طیف کاملاً مجزا می‌شود [۳۹].



شکل (۳): تصویر پرتوی یونی متمرکز شده از ساختار چشم‌گاو با روزه استوانه‌ای [۳۷].

پلاسمونیک نوری، مدلی برای بردار موج پلاسمون سطحی از حل معادلات ماکسول تحت شرایط مرزی ارائه شده است. مدل‌های مذکور، طول موجی را که سبب بیشینه بازدهی انتقال می‌شود، به پارامترهایی مانند ثابت دی‌الکتریک فلز، ثابت دی‌الکتریک محیط پیرامون و دوره‌ی تناوب وابسته می‌کنند. در حالی که سایر مشخصات فیلترهای نوری مانند ضخامت بدنه، ارتفاع لایه شبکه‌ای و قطر روزه در رابطه طول موجی که سبب بیشینه بازدهی انتقال می‌شود گنجانده نشده است. اثر این پارامترها بر روی بیشینه بازدهی انتقال به صورت تجربی در [۳۲-۳۳] و به صورت شبیه‌سازی در [۳۴ و ۳۶] نشان داده شده است. در شکل (۲) یک آرایه مربعی از حفره‌های دایره‌ای با قطر  $d$  و دوره تناوب  $D$  نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۲): تصویر پرتوی یونی متمرکز شده از آرایه دوبعدی حفره‌ها در فیلم نقره‌ای [۱۶].

از حل معادلات ماکسول تحت شرایط مرزی، تشدید پلاسمون سطحی در طرفین فیلم فلزی در صورتی اتفاق می‌افتد که اختلاف بردار موج نور  $k_0$  و بردار موج پلاسمون سطحی  $k_{sp}$  بر روی ساختار متناوب، جبران شود. در این صورت طیف تحریک پلاسمون سطحی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۶ و ۲۸].

$$k_{sp} = k_0 \sin \theta_0 \pm p \frac{2\pi}{D} u_x \pm q \frac{2\pi}{D} u_y \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\theta_0$  زاویه نور فرودی،  $u_x$  و  $u_y$  بردارهای شبکه‌بندی در طرفین فیلم فلزی است. هم‌چنین  $p$  و  $q$  اعداد صحیحی هستند که جهت انتشار پلاسمون سطحی را مشخص می‌کنند. با حل معادلات ماکسول تحت شرایط مرزی بردار موج پلاسمون سطحی از رابطه (۲) به دست می‌آید [۳۷].

$$k_{sp} = 2\pi / \lambda \left( \frac{\varepsilon_m \varepsilon_i}{\varepsilon_m + \varepsilon_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

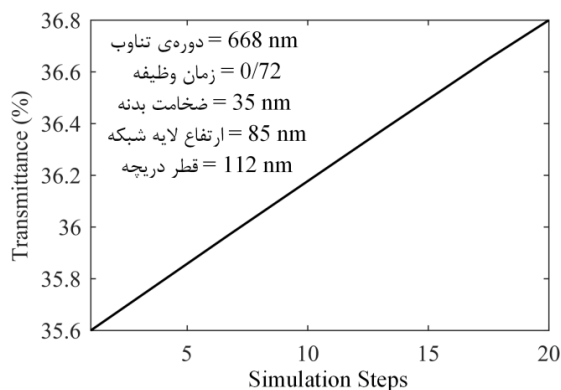
که در آن،  $\lambda$  طول موج نور فرودی،  $\varepsilon_m$  ثابت دی‌الکتریک فلز و  $\varepsilon_i$  ثابت دی‌الکتریک محیط اطراف است. بردار پلاسمون سطحی مطرح شده در رابطه (۲) دارای قسمت حقیقی و موهومی می‌باشد که با مساوی قرار دادن اندازه بردار پلاسمون سطحی در روابط (۱) و (۲)، و با توجه به این که در برخورد عمودی، زاویه نور فرودی

### ۳-۲. بهینه‌سازی

پارامترهای فیلتر شیاردار پشت و روی چشم گاوی که توسط الگوریتم ازدحام ذرات در طول موج مرکزی ۸۳۵ nm بهینه‌سازی می‌شود عبارتند از: دوره تناوب، زمان وظیفه، ضخامت بدنه، ارتفاع لایه شبکه‌ای و قطر روزنه. برای بهینه‌سازی فیلتر نوری پلاسمونیک در طول موج مرکزی ۸۳۵ nm لازم است که سیستم به صورت خودکار توسط الگوریتم بهینه‌سازی کنترل شود. در الگوریتم ازدحام ذرات، با ترکیب همزمان شبیه‌سازی‌های لازم برای بهینه‌سازی دوره تناوب، زمان وظیفه، ضخامت بدنه، ارتفاع لایه شبکه‌ای و قطر روزنه، بازدهی انتقال نور محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از مقایسه مقدار بازدهی انتقال نور برای هر پارامتر در مقدار فعلی و بهترین مقداری که داشته است، بیشینه بازدهی انتقال نور انتخاب می‌شود تا اینکه هر یک از متغیرها بهینه شوند. در هر بهینه‌سازی برای افزایش دقت، ۲۰ مرحله شبیه‌سازی انجام شده است. با اجرای آخرین مرحله بهینه‌سازی طبق شکل (۶) مقدار بهینه دوره تناوب، زمان وظیفه، ضخامت بدنه، ارتفاع لایه شبکه‌ای و قطر ناحیه عبور به ترتیب به مقادیر ۶۶۸ nm، ۰/۷۲، ۳۵ nm، ۸۵ nm و ۱۱۲ nm می‌رسد که میزان بهبود حاصل شده برای بازدهی انتقال نور ۳۶/۸ درصد است. افزایش بازدهی انتقال نور، سبب افزایش تعداد فوتون رسیده به هر پیکسل می‌شود. در نتیجه طبق رابطه (۵) نسبت سیگنال به نویز افزایش می‌یابد. بنابراین، نویز ناشی از عدم یکنواختی نور کاهش می‌یابد [۲].

$$SNR = 10 \log \sqrt{N_{sig}} \text{ db} \quad (5)$$

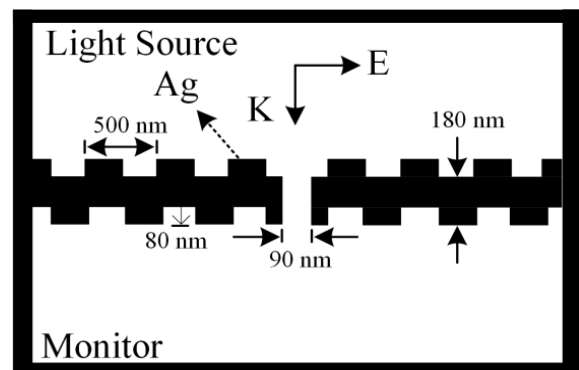
که در این رابطه، N تعداد فوتون سیگنال می‌باشد.



شکل (۶): طیف انتقال در هر مرحله از شبیه‌سازی برای مقادیر بهینه‌سازی شده.

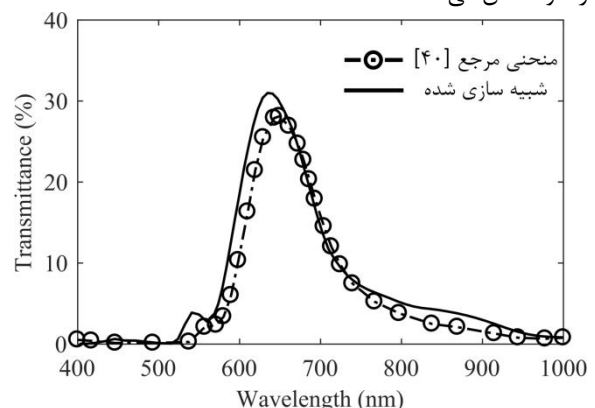
فیلتر بهینه‌سازی شده در شکل (۷) نشان داده شده است. فرآیند ساخت فیلتر نوری پلاسمونیک، با توجه به فرآیند ساخت آرایه‌ای از نانو حفره‌ها در [۳۳-۳۴] و فیلترهای نوری شیاردار پشت و روی چشم گاوی در [۳۲ و ۴۰] پیشنهاد شده است. ابتدا

با ایجاد شیارهای دوار پیرامون روزنه، در طرفین فیلم فلزی، فیلتر نوری شیاردار پشت و روی چشم گاوی حاصل می‌شود که نور بیرون آمده از روزنه با ساختار دوره‌ای سطح خروجی تزویج می‌شود و امکان ایجاد یک پرتو تابشی باریک به وجود می‌آید که همگرایی آن کمتر از چند درجه خواهد بود. شکل (۴) تصویر برش مقطعی از فیلتر شیاردار پشت و روی چشم گاوی در مرجع [۴۰] که از فیلم نازک نقره‌ای با روزنه زیر طول موجی واحد ساخته شده را نشان می‌دهد که برای تولید رنگ قرمز بهینه‌سازی شده است.



شکل (۴): تصویر برش مقطعی شیارهای متناوب.

برای صحت‌سنجی عملکرد فیلتر پلاسمونیک شیاردار پشت و روی چشم گاوی، تأثیر ضخامت لایه فلز و ویژگی‌های پراکندگی آن، از روش تفاضل محدود در زمان، در نرم افزار لومریکال استفاده شده است [۴۱]. تفاضل محدود در زمان، روشی عددی بر پایه‌ی استفاده از تفاضل‌های متناهی در زمان و مکان می‌باشد [۴۲]. این روش برای حل معادلات الکترومغناطیسی ماکسول در حوزه‌ی زمان و مکان بکار برده می‌شود [۴۳]. روش تفاضل‌های متناهی در زمان از شیوه‌ی تقریب تفاضل مرکزی برای گسسته سازی معادلات کرل ماکسول در حوزه‌های زمانی و مکانی استفاده می‌کند که با استفاده از روش مذکور طیف انتقال این فیلتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی، بازدهی انتقال مشابه ۲۸ درصدی با مرجع [۴۰] را در طول موج ۶۵۰ nm از خود نشان می‌دهد.

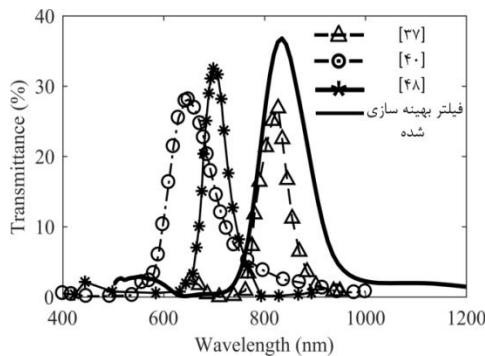


شکل (۵): طیف انتقال ساختار مرجع [۴۰] و شبیه‌سازی مقاله حاضر.

دارد. در این مقاله برای دست‌یابی به بیشینه بازدهی انتقال نور، قطبش نور در مد TM و زاویه نور فرودی مساوی با صفر در نظر گرفته شده است.

$$\eta_b = 64(kr)^4 / 27\pi^2 \quad (۶)$$

در این رابطه،  $k = (\frac{r}{\lambda})^4$ ،  $k$  بردار موج نور،  $\lambda$  طول موج و  $r$  شعاع روزه است. در شکل (۸)، مقایسه‌ای بین طیف انتقال فیلترهای شبیه‌سازی شده در [۳۷] و [۴۰] و [۴۸] و فیلتر شیاردار پشت و روی چشم گاوی پیشنهاد شده در این مقاله که به ترتیب برای طول موج مرکزی ۷۰۰ nm، ۶۵۰ nm، ۸۲۰ nm و ۸۳۵ nm بهینه‌سازی شده‌اند، صورت گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر پیشنهاد شده بیشینه بازدهی انتقال نور را در طول موج مرکزی و بیشترین پهنا در نصف مقدار بیشینه را دارد.



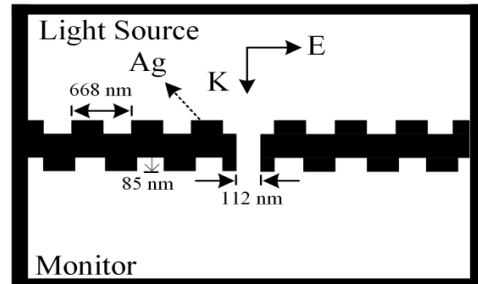
شکل (۸): مقایسه بازدهی طیف انتقال بین ساختارهای مختلف.

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین بیشینه بازدهی انتقال نور و پهنا در نصف مقدار بیشینه فیلتر پیشنهادی و فیلترهای تجربی ساخته شده در [۳۳] و [۴۰] ارائه شده است. در این جدول اختلاف بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی به دلیل نقص‌های فرآیند ساخت، مانند: زبری سطوح لایه نشانی شده، شکل روزه و اندازه روزه‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر پیشنهاد شده بیشترین انتقال را در طول موج مرکزی دارد.

جدول (۱): مقایسه بازدهی طیف‌های انتقال بین ساختارهای مختلف.

فیلتر نوری	طول موج مرکزی	بیشینه انتقال	پهنا در نصف مقدار بیشینه
شبیه‌سازی [۳۳]	۶۲۰ nm	۳۲ %	۸۰ nm
تجربی [۳۳]	۶۴۵ nm	۲۲/۹ %	> ۶۰۰ nm
شبیه‌سازی [۴۰]	۶۵۰ nm	۲۸ %	۱۰۰ nm
تجربی [۴۰]	۶۰۰ nm	۷ %	۹۰ nm
فیلتر پیشنهاد شده	۸۳۵ nm	۳۶/۸ %	۱۱۰ nm

الگوی فلز نقره با استفاده از فرآیند تبخیر در خلا، بر روی بستر شیشه‌ای ایجاد می‌شود. سپس، از پرتو یونی متمرکز شده برای ایجاد روزه استفاده می‌شود. در نهایت برای ایجاد شیارهای دوار متناوب، تکنیک لیتوگرافی با پرتو الکترونی به کار گرفته می‌شود.



شکل (۷): تصویر برش مقطعی شیارهای متناوب در فیلتر بهینه‌سازی شده.

بنابراین، در مقایسه با فرآیند ساخت فیلترهای نوری مانند فیلتر رنگ بلور فوتونی، فیلتر رنگ مبتنی بر کاواک فابری پرو با آینه‌های فلزی و فیلتر رنگ بر مبنای رزونانس مود هدایت‌شده از فرآیند ساخت ساده‌تری برخوردار است [۹]. لازم به ذکر است که در [۴۴] برای افزایش بازدهی انتقال نور یک لایه اکسید  $SiO_2$  بر روی فیلم فلزی، لایه‌نشانی می‌شود. جنس فیلترهای رنگی پلاسمونیک، از فلز است. بنابراین، در برابر شرایط دمایی بالا و یا تابش زیاد نسبت به فیلتر رنگ بایر که از رنگدانه‌های پلیمری تشکیل شده است مقاوم بوده و دچار تداخل رنگی نمی‌شود. در نتیجه هم‌شنوایی طیفی ناشی از فیلتر رنگ کاهش می‌یابد. همچنین فیلترهای رنگی پلاسمونیک می‌توانند در لایه‌های فلزی نزدیک سطح فتودیود قرار گیرند. بنابراین، هم‌شنوایی اپتیکی نیز کاهش می‌یابد.

فیلتر نوری پلاسمونیک بهینه‌سازی شده برای مادون قرمز نزدیک در بازه طول موجی ۷۸۵ nm تا ۸۹۵ nm با توجه به شکل (۸) در طول موج ۸۳۵ nm، دارای بیشینه انتقال ۳۶/۸ درصد می‌باشد. در [۳۰] و [۴۵-۴۷] تحقیقاتی بر روی نظریه انتقال نور از فیلم فلزی با روزه نازک صورت گرفته است. آنها گزارش کرده‌اند قطبش TM سبب تحریک پلاسمون سطحی و افزایش بازدهی انتقال نور می‌شود. همچنین بازدهی انتقال نور ( $\eta_b$ ) و بردار موج پلاسمون سطحی به ترتیب با روابط (۱) و (۶) بیان می‌شود [۳۷]. طبق رابطه (۱)،  $k_{sp}$  زمانی بیشترین مقدار را دارد که زاویه نور فرودی ( $\theta_0$ ) مساوی با صفر باشد که با توجه به رابطه (۶) سبب افزایش بازدهی انتقال نور می‌شود. علاوه بر این، طیف انتقال نور بر حسب زوایای مختلف نور فرودی برای بیشینه طول موج عبوری از فیلتر شیاردار پشت و روی چشم گاوی در [۳۲]، گزارش شده است که زاویه نور فرودی صفر درجه بیشترین بازدهی انتقال نور را

جدول (۲): مقایسه بین فیلترهای نوری مختلف.

فیلتر نوری	طول موج مرکزی (nm)	بیشینه انتقال (درصد)	پهنا در نصف مقدار بیشینه (nm)
ساختار [۵۰]	۸۸۵	۷۴٪	۱۲۵
ساختار [۴۹]	۸۹۰	۶۳٪	۱۰
فیلتر بهینه‌سازی شده	۸۳۵	۳۶/۸٪	۱۱۰

## ۵. نتیجه‌گیری

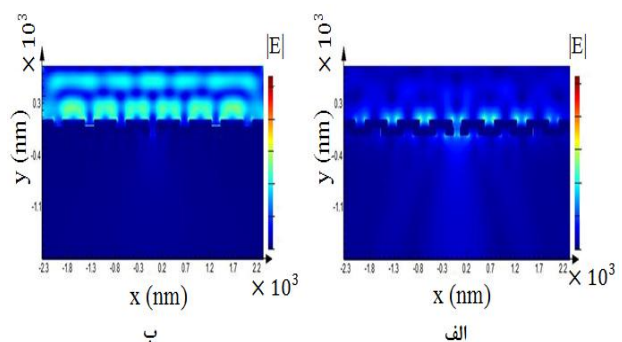
در این مقاله فیلتر نوری جدیدی ارائه شد که می‌تواند بر مشکلاتی از قبیل هم‌شنوایی، هزینه‌ساخت بالا، عملکرد در شرایط نوری شدید و دمای بالا غلبه کند. علاوه بر این، می‌توان آن‌ها را در لایه‌های نزدیک به فتودیود ساخت. از این‌رو، فیلتر شیاردار پشت و روی چشم گاوی برای تصویربرداری مادون‌قرمز با طول‌موج مرکزی ۸۳۵ nm توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌سازی شده است.

## ۶. مراجع

- [1] E. R. Fossum, "CMOS Image Sensors: Electronic Camera on a Chip," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 44, No. 10, pp. 1689-1698, 1997.
- [2] T. Kuroda, "Essential Principles Of Image Sensors"; CRC press: Boca Raton, FL, 2014.
- [3] P. M. Hubel, J. Liu, R. J. Guttsch, "Spatial Frequency Response of Color Image Sensors: Bayer Color Filters And Foveon X3," Proc. SPIE, Vol. 5301, No. 1, pp. 402-407, 2004.
- [4] P. A. Chermkhin, V. V. Lesnichii, N. V. Petrov, "Use of Spectral Characteristics of DSLR Cameras with Bayer Filter Sensors," Journal of Physics: Conference Series. 2014, 012021-5.
- [5] T. H. Hsu, Y. K. Fang, C. Y. Lin, S. F. Chen, C. S. Lin, D. N. Yang, S. G. Wu, C. S. Wang, "Light Guide for Pixel Crosstalk Improvement in Deep Submicron CMOS Image Sensor," IEEE Electron Device Lett., Vol. 25, No. 1, pp. 22-24, 2004.
- [6] A. Tournier, F. Leverd, L. Favennec, C. Perrot, L. Pinzelli, D. Jeanjean, F. Hirigoyen, L. Grant "Pixel-to-Pixel Isolation by Deep Trench Technology: Application to CMOS Image Sensor," In Proc. of the Int. conf on Image Sens, Vol. 5, No. 1, pp. 5-8, 2011.
- [7] C. H. Koo, H. K. Kim, K. H. Paik, Y. K. Park, C. R. Moon, S. H. Lee, J. T. Kong, "Improvement of Crosstalk on 5M CMOS Image Sensor with 1.7x1.7µm 2 Pixels," Ultrafast Phenom. Semicond. Nanostructure Mater. Semicond. Photodetectors IV, Vol. 6471, No. 1, pp. 6471151-8, 2007.
- [8] Q. Chen, D. Das, D. Chitnis, K. Walls, T.D. Drysdale, S. Collins, D.R.S. Cumming, "A CMOS Image Sensor Integrated with Plasmonic Colour Filters," Plasmonics, Vol. 7, No. 4, pp. 695-699, 2012.
- [9] T. W. Martin and W. A. Light, "Fabrication and Performance of Color Filter Arrays for Solid- State Imagers," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 2, No. 25, pp. 97-101, 1978.
- [10] M. S. Mirotznik, "Photonic Crystal Filters for Multi-Band Optical Filtering on a Monolithic Substrate," J. Nanophotonics, Vol. 3, No. 1, pp. 031506, 2009.

در ساختار چشم‌گاوی ارائه‌شده در این بررسی، نوعی تشدید درک بهتری از مفهوم رزونانس پلاسمون سطحی به‌وجود آید، توجه خود را به میدان الکتریکی معطوف می‌کنیم، که افزایش میدان الکتریکی در طرفین ساختار به معنای رزونانس پلاسمون سطحی شدیدتر است. در این ساختار بهینه‌سازی شده همانطوریکه در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود برای طول‌موج ۸۳۵ nm افزایش در میدان الکتریکی به‌دست آمده که سبب انتقال بیشتر شده است. انتقال بیشینه در طول‌موج ۸۳۵ nm، متناظر با توزیع میدان الکتریکی محلی قوی در سطح بالا و پایین روزنه است. درحالی‌که برای انتقال نزدیک به صفر در طول‌موج ۷۰۰ nm، با توجه به شکل (۹-ب) توزیع میدان الکتریکی محلی فقط در سطح بالای روزنه وجود دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در سطح خروجی لایه، یک جابه‌جایی فاز ذاتی  $\pi/2$  از تابش پلاریتون پلاسمون سطحی حاصل می‌شود و منتهی به پیدایش یک کمینه در انتقال، در طول‌موج‌های متناظر با بردار معکوس شبکه آرایه می‌شود.

فیلتر نوری بهینه‌سازی شده، از لحاظ بیشینه بازدهی انتقال و پهنا در نصف مقدار بیشینه، با فیلترهای نوری دیگر که طول‌موج مرکزی نزدیک به ۸۳۵ nm دارند مقایسه شده است. داده‌های جدول (۲) از روی منحنی طیف انتقال مربوط به فیلتر نوری ساختار مرجع [۴۹] که یک فیلتر بلور فوتونی و ساختار مرجع [۵۰] یک فیلتر بر پایه فلزادی‌الکترونیک می‌باشد، استخراج شده است.



شکل (۹): (الف) توزیع شدت میدان محلی قوی در سطح بالا و پایین روزنه در طول‌موج ۸۳۵ nm (ب) توزیع شدت میدان محلی فقط در سطح بالای روزنه در طول‌موج ۷۰۰ nm.

طبق جدول ساختار بلور فوتونی، پهنا در نصف مقدار بیشینه بهتر و ساختار فلزادی‌الکترونیک، بیشینه انتقال بالاتری دارد. اما با این‌وجود فیلترهای پلاسمونیک به دلیل فرایند ساخت ساده‌تر و قابلیت تنظیم رنگ بالا، هزینه پیاده‌سازی بسیار کمتری دارند.

- surface polaritonic crystals,” *J. Microsc.*, Vol. 210, No. 3, pp. 344–349, 2003.
- [28] L. Salomon, F. Grillot, A. V. Zayats, F. De. Fornel, “Near-Field Distribution of Optical Transmission of Periodic Subwavelength Holes in a Metal Film,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, No. 6, pp. 1110–1113, 2001.
- [29] W. C. Liu, D. P. Tsai, “Optical Tunneling Effect of Surface Plasmon Polaritons and Localized Surface Plasmon Resonance,” *Phys. Rev. B*, Vol. 65, No. 15, pp. 1–6, 2002.
- [30] P. C. Li, Y. Zhao, A. Alu, E. T. Yu, “Experimental Realization and Modeling of a Subwavelength Frequency-Selective Plasmonic Metasurface,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 99, No. 22, pp. 221106, 2011.
- [31] A. Degiron, H. J. Lezec, W. L. Barnes, T. W. Ebbesen, “Effects of Hole Depth on Enhanced Light Transmission Through Subwavelength Hole Arrays,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, No. 23, pp. 4327–4329, 2002.
- [32] H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, T. W. Ebbesen “Beaming Light from a Subwavelength Aperture,” *Science.*, Vol. 297, No. 5582, pp. 820–822, 2002.
- [33] Y. S. Do, J. H. Park, B. Y. Hwang, S. M. Lee, B. K. Ju, and K. C. Choi, “Color Filters: Plasmonic Color Filter and Its Fabrication for Large-Area Applications,” *Adv. Opt. Mater.*, Vol. 1, No. 2, pp. 109–109, 2013.
- [34] S. Yokogawa, S. P. Burgos, H. A. Atwater, “Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications,” *Nano letters*, Vol. 12, No. 8, pp.4349-4354, 2012.
- [35] T. Xu, H. Shi, Y. K. Wu, L. J. Guo, “Structural Colors: from Plasmonic to Carbon Nanostructures,” *Small*, Vol. 7, No. 22, pp. 3128–3136, 2011.
- [36] G. et al., Y. Zhao, A. J. Danner, Y.J. Liu, “Reflective Plasmonic Color Filters Based on Lithographically Patterned Silver Nanorod Arrays. *Nanoscale*,” *Nanoscale*, Vol. 5, No. 14, pp. 6243-6248, 2014.
- [37] C. Genet, T. W. Ebbesen, “Light in Tiny Holes,” *Nature Journals*, Vol. 445, No. 7123, pp. 39–46, 2007.
- [38] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, J. Salvi, “Review of CMOS Image Sensors,” *Microelectronics journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 433–451, 2006.
- [39] W.L. Barnes, A. Dereux, T.W. Ebbesen, “Surface Plasmon Subwavelength Optics,” *nature*, Vol. 424, No. 6950, pp. 824-830, 2003.
- [40] A. Miyamichi, , K. Yasutomi, “Optical Color Filter Based on Surface Plasmon Resonance Using Corrugated Metallic Thin Film for Image Sensor,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 98, No. 9, pp. 19–20, 2011.
- [41] N. Methods, “FDTD Solutions Numerical Methods,” pp. 1–33, 2012.
- [42] K. S. Yee, J. S. Chen, “The Finite-Difference Time-Domain (FDTD) and the Finite-Volume Time-Domain Methods in solving Maxwell’s equations,” *IEEE Trans.*, Vol. 45, No. 3, pp. 354–363, 1997.
- [43] S. D. Gedney, “Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics,” *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-250, 2011.
- [44] Q. Chen, D. Chitnis, K. Walls, T. D. Drysdale, S. Collins, D. R. S. Cumming, “CMOS Photodetectors Integrated With Plasmonic Color Filters,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 24, No. 3, pp. 197–199, 2012.
- [11] P. Crystal, C. Filter, Y. Inaba, M. Kasano, K. Tanaka, and T. Yamaguchi, “Degradation-Free MOS Image Sensor With,” *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 27, No. 6, pp. 457–459, 2006.
- [12] Y. T. Yoon, S. S. Lee, “Transmission Type Color Filter Incorporating a Silver Film Based Etalon,” *Opt. Express*, Vol. 18, No. 5, pp. 5344–5349, 2010.
- [13] L. Frey, P. Parrein, J. Raby, C. Pellé, D. Héruault, M. Marty, J. Michailos, “Color Filters Including Infrared Cut-Off Integrated on CMOS Image Sensor,” *Opt. Express*, Vol. 19, No. 14, pp. 13073, 2011.
- [14] Y. T. Yoon, H. S. Lee, S. S. Lee, S. H. Kim, J. D. Park, K. D. Lee, “Color Filter Incorporating a Subwavelength Patterned Grating in Poly Silicon,” *Opt. Express*, Vol. 16, No. 4, pp. 2374–80, 2008.
- [15] Y. Kanamori, M. Shimono, K. Hane, “Fabrication of Transmission Color Filters Using Silicon Subwavelength Gratings on Quartz Substrates,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 20, pp. 2126–2128, 2006.
- [16] H. Ghaemi, T. Thio, D. Grupp, T. Ebbesen, “Surface Plasmons Enhance Optical Transmission Through Subwavelength Holes,” *Phys. Rev. B*, Vol. 58, No. 11, pp. 6779–6782, 1998.
- [17] G. Verhoeven, “Imaging The Invisible Using Modified Digital Still Cameras For Straightforward and Low-Cost Archaeological Near-Infrared Photography,” *J. Archaeol. Sci.*, Vol. 35, No. 12, pp. 3087–3100, 2008.
- [18] B. Schwarz, G. Ritt, M. Körber, and B. Eberle, “Laser-Induced Damage Threshold of Camera Sensors and Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems,” *Electro-Optical Infrared Syst. Technol. Appl. XIII*, Vol. 9987, No. 3, pp. 99870D, 2016.
- [19] E. I. L. Jull, H. F. Gleeson, “Tuneable and Switchable Liquid Crystal Laser Protection System,” *Appl. Opt.*, Vol. 56, No. 29, pp. 8061-8066, 2017.
- [20] A. S. Faraji, V. Ahmadi, “Enhanced Raman Amplification in Hybrid Photonic Crystal Based Waveguide Structure by Using Optofluidic Materials” *Journal of App. Elect* Vol. 4, No. 3, pp. 57-64, 2016. (in Persian)
- [21] S. Pimenta, S. Cardoso, A. Miranda, P. De Beule, E. M. S. Castanheira, G. Minas, “Design and Fabrication of  $\text{SiO}_2/\text{Tio}_2$  and  $\text{Mgo}/\text{Tio}_2$  Based High Selective Optical Filters for Diffuse Reflectance and Fluorescence Signals Extraction,” *Biomed. Opt. Express*, Vol. 6, No. 8, pp. 3084, 2015.
- [22] M. J. Uddin, R. Magnusson, “Efficient Guided-Mode-Resonant Tunable Color Filters,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 24, No. 17, pp. 1552–1554, 2012.
- [23] K. Kintaka, T. Majima, J. Inoue, K. Hatanaka, J. Nishii, S. Ura, “Cavity-Resonator-Integrated Guided-Mode Resonance Filter for Aperture Miniaturization,” *Opt. Express*, Vol. 20, No. 2, pp. 1444, 2012.
- [24] L. Novotny, B. Hecht “Principles of Nano-Optics.”; Cambridge university press, 2012.
- [25] S. M. R. Safaee, M. Janipour, M. A. Karami, “Modeling and Analysis of Optical Properties of a Gold Nanoring Based on Electric and Magnetic Dipoles,” *Appl. Opt.*, Vol. 54, No. 28, pp. 8313, 2015.
- [26] M. Janipour, M. A. Karami, R. Sofiani, F. H. Kashani, “A Novel Adjustable Plasmonic Filter Realization by Split Mode Ring Resonators,” *J. Electromagn. Anal. Appl.*, Vol. 05, No. 12, pp. 405–414, 2013.
- [27] A. V. Zayats, L. Salomon, F. De. Fornel, “How light gets through periodically nanostructured metal films: A role of

- [48] E. Laux, C. Genet, T. Skauli, and T. W. Ebbesen, "Plasmonic Photon Sorters for Spectral and Polarimetric Imaging," *Nat. Photonics*, Vol. 2, No. 3, pp. 161–164, 2008.
- [49] W. Nakagawa, P. Sun, C. Chen, Y. Fainman, "Wide-Field-of-View Narrow-Band Spectral Filters Based on Photonic Crystal Nanocavities," *Optics Letters*, Vol. 27, No. 3, pp. 191–193, 2002.
- [50] D. Zhao, H. Gong, Y. Yang, Q. Li, "Realization of an Extraordinary Transmission Window for a Seamless Ag Film Based On Metal-Insulator-Metal Structures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, No. 20, pp. 1–6, 2013.
- [45] J. A. Porto, J. B. Pendry, "Transmission Resonances on Metallic Gratings with Very Narrow Slits." *Physical review letters*, Vol. 83, No. 14, pp. 2845, 1999.
- [46] L. Martín-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, K. M. Pellerin, T. Thio, J. B. Pendry, T. W. Ebbesen, "Theory of Extraordinary Optical Transmission Through Subwavelength Hole Arrays," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, No. 6, pp. 1114–1117, 2001.
- [47] L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, H. J. Lezec, A. Degiron, T. W. Ebbesen, "Theory of Highly Directional Emission from a Single Subwavelength Aperture Surrounded by Surface Corrugations," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 90, No. 16, pp. 167401., 2003.



## Optimizing Plasmonic Color Filter for Imaging Sensor

**K. Eyvazi, M. A. Karami\***

**Iran University of Science and Technology**

(Received: 02/10/2019, Accepted: 03/02/2020)

### Abstract

*In this paper, a double-side bull's eye plasmonic color filter used in complementary metal oxide semiconductor (CMOS) based standard imaging sensors is presented. The thin-film filter is silver-made and optimized by using a particle swarm algorithm in order to modify the corrugation period, duty cycle, film thickness, grating height and aperture diameter for infrared imaging. The filter is designed for central wavelength 835 nm, having the maximum transmittance of 38.6 % and the full width at half maximum (FWHM) of 110 nm. Inexpensive implementation, proximity to the sensitive region, reduced crosstalk and independence from temperature-sensitive polymers, are some of the advantages of this filter, making it suitable for tough temperature conditions. Moreover, using functional analysis of this plasmonic filter and comparing it to the optical filters with similar central wavelength has led us to the investigation of surface plasmon features under a local electric field intensity distribution.*

**Keywords:** Plasmonic Filter, Particle Swarm Algorithm, Infrared Imaging

---

\* Corresponding author E-mail: karami@iust.ac.ir