

طراحی یک ساختار فرامواد تخت با ضریب کیفیت بالا برای ایجاد شفافیت القای الکترومغناطیسی

سحر احمدی و علی رضائی لطیفی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

پست الکترونیکی: r_latifi@hormozgan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۸/۱۶)

چکیده

شفافیت القای الکترومغناطیسی یک پدیده اپتیکی است که در آن تأثیر ماده در یک نوار بسامدی خاص بر روی انتشار پرتوی تابش الکترومغناطیسی حذف می‌شود. در این کار، شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک ساختار فرامواد پیشنهادی در ابعاد میلی‌متر و در ناحیه بسامدی گیگاهرتز مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج محاسبات نشان داد که در این ساختار با شکست تقارن هندسی، در بسامدهای معینی شفافیت القایی الکترومغناطیسی با Q عامل بالا و میزان عبور بالا حاصل می‌گردد. مطالعات حساسیت‌سنجی نشان داد که استفاده از فلز نقره در ساختار به میزان قابل توجهی ضریب کیفیت را افزایش می‌دهد به طوری که این کمیت برای طلا و مس ۳۳۸ و ۶۷۷ می‌رسد. به علاوه، با کاهش دما شدت عبور در ساختار افزایش یافته و به حدود قابل قبول ۹۸٪ می‌رسد. این ساختار می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربردهای نور کند باشد و می‌تواند برای تقویت نور در مایکرو ساختارها مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شفافیت القایی الکترومغناطیسی، ضریب کیفیت، شکست تقارن هندسی، نورکند

۱. مقدمه

یافت [۵]. برخی از محققان مانند وفاپور و ذاکری [۶] و نیاکان و همکاران [۷] به بررسی شفافیت القایی در ساختار خود پرداخته و این پدیده را تجزیه و تحلیل نموده‌اند. از مزایای ساختار ارائه شده توسط این محققان نسبت به مطالعات قبلی دستیابی به ضریب عبور و کیفیت بالاتر و همچنین سرعت گروه کندتر می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که عدم تقارن پیش‌نیازی برای EIT است، در غیاب آن تنها یک قله جذب منفرد قابل مشاهده است که به دلیل عدم جفت‌شدگی میان مد روشن و تاریک است [۸-۱] و

شفافیت القایی الکترومغناطیسی^۱ (EIT) یک اثر تداخلی کوانتومی است که در آن جذب نور در یک دستگاه اتمی بر روی ناحیه بسامدی باریکی به شدت کاهش می‌یابد [۱-۳]. این اثر زیربنای ایده‌های جالبی مانند فرایندهای اپتیکی غیرخطی در ترازهای نوری پایین و انتشار نور فوق کند است [۴ و ۵]. اولین آزمایشی که در آن پدیده مورد نظر منجر به تولید نور کند شد، توسط هووا و همکاران ارائه گردید که در آن سرعت نور تا مقدار ۱۷m/s کاهش

۱. Electromagnetically Induced Transparency

در این مقاله شفافیت القایی الکترومغناطیسی را در ساختار پیشنهادی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در بخش بعدی مشخصات ساختار پیشنهادی را معرفی کرده و به اختصار روش انجام کار را شرح می‌دهیم. در بخش ۳ نتایج محاسبات را مورد بحث قرار می‌دهیم و به ویژه جفت‌شدگی میان نور خارجی و مدهای تاریک و روشن، ضریب عبور و عامل کیفیت ساختار و تأثیر جنس فلزات و دما بر پاسخ طیفی ساختار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مشخصات ساختار پیشنهادی و شیوه محاسبات

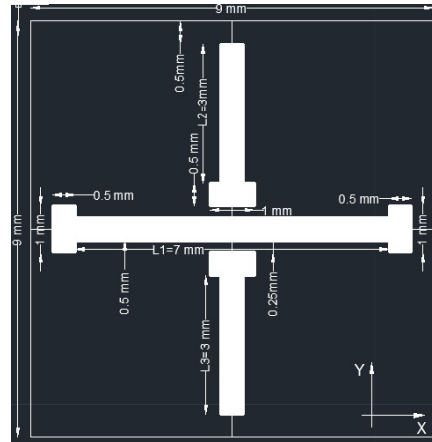
در کار حاضر ساختار فراماده‌ای طراحی کرده‌ایم که، هر سلول واحد آن شکل ۱ از یک نوار فلزی افقی I شکل (آنتن چهار قطبی مد تاریک) و دو نوار فلزی T شکل (آنتن دوقطبی مد روشن) تشکیل شده است (شکل ۲ الف). ضخامت تمامی آنتن‌ها ۰/۰۱ mm است که درون یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت ۰/۲۶۴ mm و ضریب شکست $n=۲/۱۵$ قرار دارد. این ترکیب بر روی لایه دی‌الکتریک دیگری که آن هم دارای ضخامت ۰/۲۶۴ mm و ضریب شکست $n=۱/۵۵$ است قرار دارد (شکل ۲ ب). طول سلول واحد در راستای x و y، ۹ mm و پهنای نوارهای فلزی ۰/۵ mm است. نور به طور عمود بر صفحه نوارها تابش می‌کند و میدان الکتریکی در راستای محور x نوسان می‌کند (شکل ۱).

برای تعیین ضرایب عبور و بازتاب باید معادلات ماکسول برای ساختار مورد نظر حل شوند. برای این منظور از نرم‌افزار CST استفاده می‌شود. این نرم‌افزار شکل انتگرالی معادلات ماکسول را با روش FIT حل می‌کند. فلزهای مورد استفاده در این ساختار از جنس نقره است. ضرایب گذردهی و نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر فلز-دی‌الکتریک ساختار به ترتیب با استفاده از مدل درود و لورنتز مطابق با روابط زیر محاسبه شده‌اند

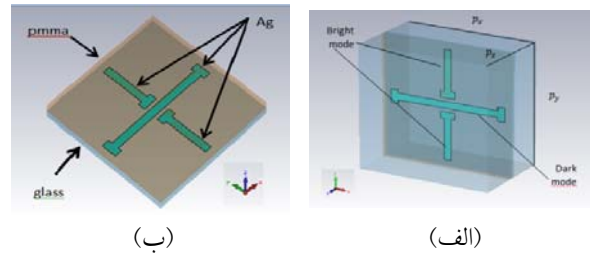
$$\epsilon_{eff}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\gamma_c)}, \quad (1)$$

$$\mu_{eff}(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{\omega_s^2(\mu_s - \mu_{\infty})}{\omega_s^2 + i\delta\omega - \omega^2}, \quad (2)$$

که در آن ϵ_{∞} گذردهی در بسامد بی نهایت، ω_p بسامد



شکل ۱. مشخصات هندسی یاخته واحد دو بعدی.



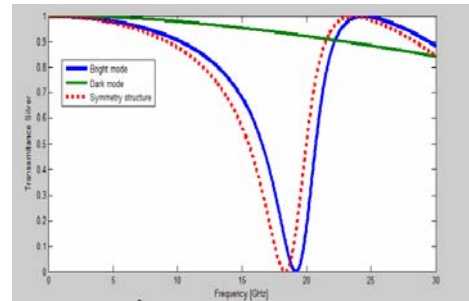
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) یاخته واحد سه بعدی فراماده.

جفت‌شدگی در صورتی قابل دسترسی است که تقارن ساختار شکسته باشد. امروزه پدیده EIT بیشتر در فرامواد استفاده می‌شود، چون کنترل آن به سادگی با تغییر هندسه دستگاه و قطبش نور امکان‌پذیر است و مانند قبل نیازی به استفاده از دو لیزر متفاوت نیست و می‌توان حالت کلاسیکی دستگاه را مورد بررسی قرار داد. در پدیده EIT یاخته واحد متامتریال از آنتن‌های دوقطبی و چهارقطبی تشکیل شده است. مد روشن آنتن دوقطبی به طور قوی با نور تابشی خارجی جفت شده اما به دلیل اتلاف‌های زیاد ناشی از میرایی تابشی دارای عامل کیفیت پایینی است، اما مد تاریک آنتن چهارقطبی نمی‌تواند مستقیماً با نور تابشی خارجی جفت شود. بنابراین دارای اتلاف پایین‌تر و ضریب کیفیت بالاتری است. زمانی که مد تاریک و روشن در فاصله کمی از یکدیگر قرار بگیرند مد تاریک به طور غیرمستقیم توسط مد روشن برانگیخته می‌شود و EIT نتیجه تداخل ویرانگر این دو مد می‌باشد [۱۱ و ۱۲].

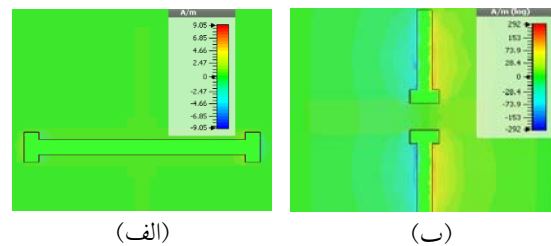
فضای آزاد جفت می‌شوند (شکل‌های ۳ و ۴ (ب)). بنابراین آنتن L_1 مد تاریک و آنتن‌های L_2 و L_3 مد روشن ساختار هستند. مد روشن به دلیل اتلاف تابشی زیاد ناشی از میدان تابشی دارای عامل کیفیت پایینی است که به دلیل افت ناشی از دو قطبی‌های الکتریکی ایجاد شده در طول دو آنتن فلزی L_2 و L_3 است. در حقیقت میدان الکتریکی که در راستای محور x می‌باشد دو قطبی‌های یکسان و هم‌جهتی را در دو نوار فلزی مد روشن ایجاد می‌کند، زیرا تحت تأثیر موج تابشی، جریان‌ها در دو نوار به طور متقارن برانگیخته می‌شوند و هیچ اختلاف فازی میان آنها وجود ندارد؛ و به دلیل این که میدان مغناطیسی نیز در صفحه نوارها قرار دارد امکان ایجاد تحریک مد تاریک به وسیله میدان مغناطیسی وجود ندارد. بنابراین به دلیل تقارن ساختار که در شکل‌های ۱ و ۳ مشاهده می‌شود، مد تاریک آنتن L_1 نمی‌تواند مستقیماً با نور خارجی جفت شود، پس دارای یک پاسخ طیفی ضعیف در مقایسه با مد روشن بوده و در نتیجه اتلاف پایین‌تر و ضریب کیفیت بالاتری دارد.

بنابراین برای مشاهده پدیده EIT و تحریک مد تاریک، مبادرت به شکست تقارن می‌شود. برای انجام این امر، در این حالت طول میله $L_2 = 2.5 \text{ mm}$ انتخاب شده است. شکل ۵ جریان‌های سطحی برانگیخته را در قله انتقال ω_0 و دو بسامد دیگر نزدیک EIT، $\omega_0 \pm \Delta\omega$ نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود جریان‌های سطحی برانگیخته رفتار متفاوتی را در سه بسامد مختلف نشان می‌دهند. مطابق انتظار مد روشن باید در برانگیختگی خارجی پایدار باشد، زیرا می‌تواند مستقیماً توسط میدان خارجی برانگیخته شود [۱۳]. همان‌گونه که در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است دو آنتن T شکل L_2 و L_3 جریان‌های سطحی مدوری را از چپ به راست در هر سه بسامد ω_0 و $\omega_0 \pm \Delta\omega$ نشان می‌دهند که شرایط بیان شده در بالا را تأمین می‌کند.

اکنون باید برای مشاهده پدیده شفافیت القایی، مد تاریک ساختار (آنتن L_1) برانگیخته شود. برای حصول این امر همان گونه که در شکل ۵ (ب) به روشنی مشاهده می‌شود ترکیبی از مد روشن و تاریک در یک حالت غیرمتقارن $L_2 = 2.5 \text{ mm}$ کنار



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی با خط آبی، سبز و نقطه چین به ترتیب بیانگر نتایج شبیه‌سازی شده طیف عبور حالت مد روشن، مد تاریک و حالت متقارن ساختار می‌باشد.



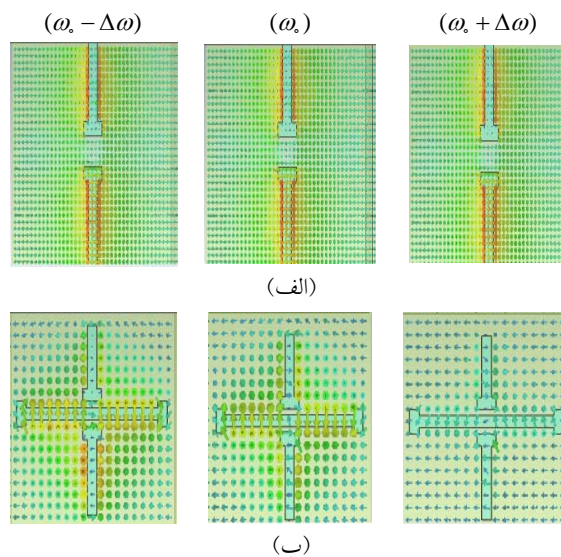
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مؤلفه Z توزیع میدان مغناطیسی (الف) مد تاریک (ب) مد روشن.

پلاسمای الکتریکی، γ بسامد برخورد، ω_p بسامد تشدید، μ_0 نفوذپذیری در بسامد بی نهایت، μ_0 نفوذپذیری سکون و δ عامل میرایی می‌باشد. متغیرهای فوق توسط مدل CST واسنجی می‌شوند. سپس با محاسبه پارامتر S برای سلول واحد، بهینه‌سازی انجام می‌شود.

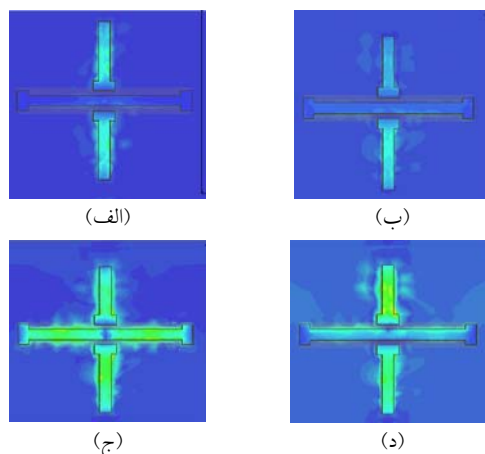
۳. نتایج محاسبات

۳.۱. برانگیختگی مد تاریک توسط مد روشن

همان‌گونه که در پاسخ طیفی شکل ۳ و ۴ (الف) مشاهده می‌شود محاسبات نشان داد که وقتی آنتن L_1 در معرض نور فرودی خارجی قرار می‌گیرد جفت‌شدگی قوی با میدان خارجی وجود ندارد و هنگام روبرو شدن با نور خارجی غیرفعال است. اما زمانی که آنتن‌های L_2 و L_3 در معرض نور تابش شده قرار می‌گیرند، تشدید در طیف انتقال مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد این دو آنتن به شکل مستقیم و قوی با نور تابش شده از



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع جریان سطحی برانگیخته در قله عبوری ω_0 و دو بسامد دیگر نزدیک بسامد EIT برابر با $\omega_0 \pm \Delta\omega$ ، (الف) مد روشن و (ب) حالت نامتقارن (شکست) ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میدان مغناطیسی مماسی در صفحه $Z=0$ در حالت (الف) در تقارن هندسی، و در حالت‌های شکست تقارن: (ب) بسامد $\omega_0 - \Delta\omega$ ، (ج) در بسامد تشدید، (د) در بسامد $\omega_0 + \Delta\omega$.

می‌توان این پدیده را به روشی دیگر نیز مورد تحقیق قرار داد. شکل ۶ توزیع میدان مغناطیسی مماسی را نشان می‌دهد. در شکل ۶ (الف) توزیع میدان مغناطیسی مماسی در حالت تقارن هندسی مشاهده می‌شود. همان گونه که انتظار می‌رود برهم‌کنش مد تاریک L_1 با نور تابشی خارجی بسیار ناچیز است و توزیع میدان عمدتاً در نواحی آنتن‌های T شکل L_3 و L_4 که مد روشن هستند متمرکز شده است و نشان دهنده این واقعیت

هم قرار دارند، در این حالت مد تاریک به طور غیرمستقیم توسط مدهای روشن ساختار برانگیخته خواهد شد. با دقت در شکل ۵ (ب) در سه حالت متفاوت درمی‌یابیم در مد تاریک جریان‌های سطحی برانگیخته پس از بسامد EIT تغییر می‌کند، اما تغییری در مدهای روشن ساختار حاصل نمی‌شود، که این نشان از برانگیختگی مد تاریک توسط مدهای روشن ساختار و حصول پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی دارد.

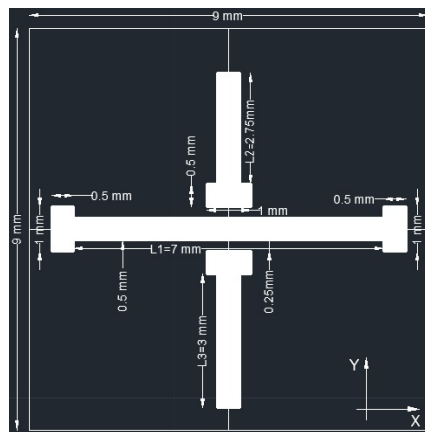
۱۹,۹۳ GHz مشاهده می‌شود. در واقع علت ایجاد این تشدید مربوط به برانگیخته شدن مد تاریک است. این ساختار دارای ضریب عبور بالایی حدود ۹۱٪ و ضریب کیفیتی بسیار خوب در حدود ۱۳۳ می‌باشد. علت کاهش افت (در اینجا انعکاس) و افزایش عبور این است که چون جریان‌های مساوی و در خلاف جهت یکدیگر در دو آنتن عمودی L_2 و L_3 ایجاد می‌شود تداخل میدان‌های الکترومغناطیسی ساطع شده توسط این دو جریان، ویرانگر بوده و در نتیجه پراکندگی کاهش می‌یابد، اما چون آنتن‌های فلزی عمودی L_2 و L_3 در فاصله بسیار کمی از آنتن L_1 قرار دارند، مد تاریک به طور غیرمستقیم به وسیله مد روشن تحریک می‌شود. شفافیت القایی الکترومغناطیسی EIT نتیجه تداخل ویرانگر این دو مد است. برای مشاهده نتایج دیگری از EIT، کاهش طول میله L_2 را ادامه داده و به ازای مقادیر $L_2 = 2.5 \text{ mm}$ و $L_2 = 0.75 \text{ mm}$ به ترتیب در بسامدهای $f_0 = 20 \text{ GHz}$ و $f_0 = 21.2 \text{ GHz}$ ضریب عبور بسیار عالی حدود ۹۸٪ و ۱۰۰٪ حاصل شده است (شکل‌های ۸ (ج) و ۸ (د)).

از دیگر مزایای این ساختار پیشنهادی، دست یافتن به ضریب کیفیتی بسیار عالی اتلاف حداقلی انرژی از طریق شکست تقارن می‌باشد. تلفات انرژی به دو دلیل در ساختار صورت می‌پذیرد:

(۱) میرایی تابشی به دلیل تغییر شکل الکترون‌های سطحی به فوتونها،

(۲) میرایی غیر تابشی به دلیل تلفات ذاتی فلز.

در این ساختار برای مشاهده EIT به روشی دیگر و همچنین برای داشتن ضریب کیفیتی بالا، همزمان طول دو آنتن فلزی L_2 و L_3 کاهش داده شده است ($L_2 = L_3 = 2.75 \text{ mm}$) و $L_2 = L_3 = 2.5 \text{ mm}$ (شکل ۹). در این حالت با توجه به شکل ۱۰ و با استفاده از رابطه $\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ در برنامه متلب، ضریب کیفیت بسیار بالایی حدود ۶۷۷ حاصل شده است، و به این ترتیب این ساختار توانسته است تلفات انرژی را به حداقل ممکن برساند. در رابطه بالا Q ضریب کیفیت، f_0 بسامد تشدید و Δf پهنای



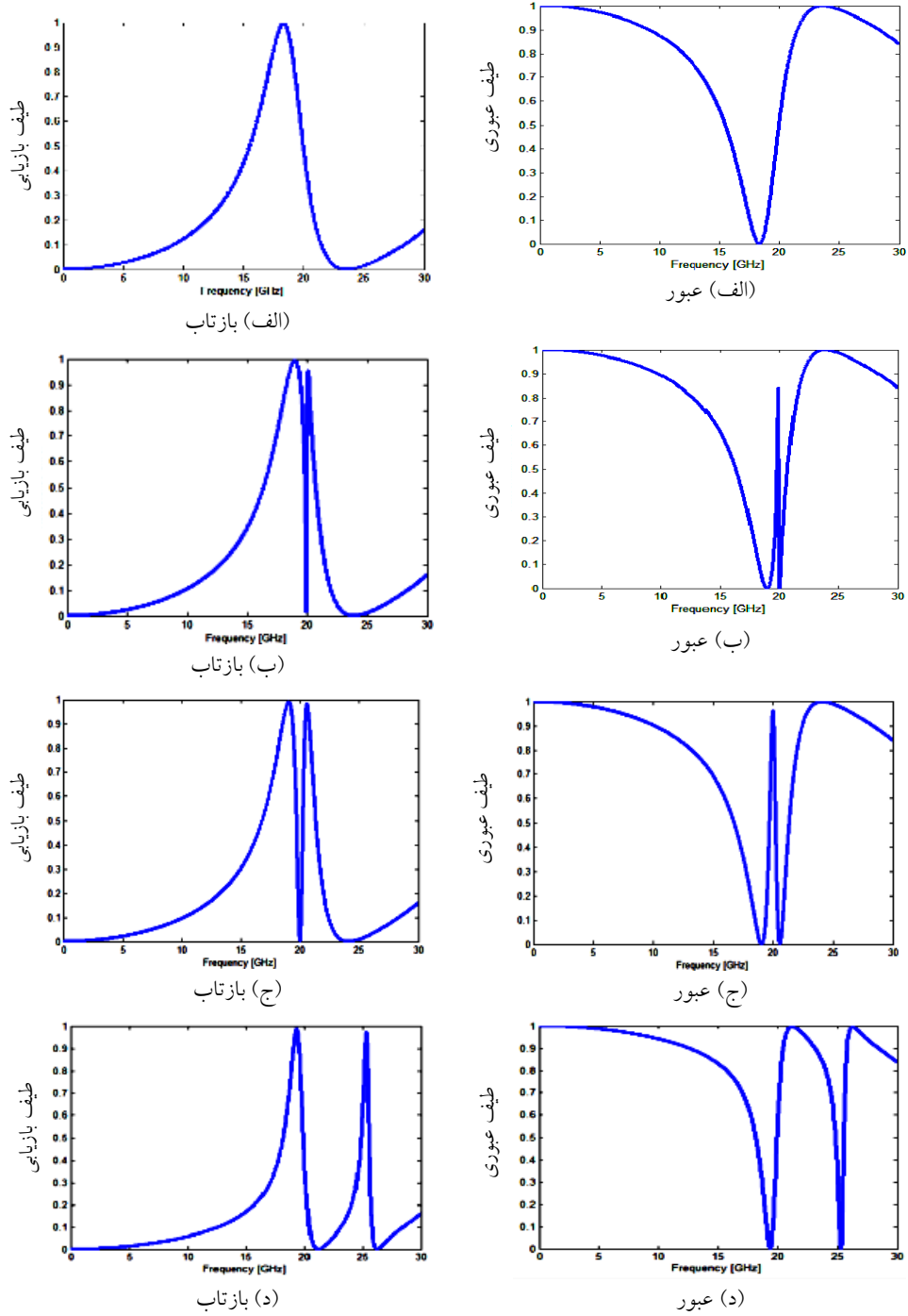
شکل ۷. شکل ساختار در حالت تغییر طول $L_2 = 2.75 \text{ mm}$.

است که در حالت تقارن هندسی فقط برهم‌کنش مد روشن با نور خارجی قوی است. شکل‌های ۶ (ب) تا ۶ (د) توزیع میدان مغناطیسی را در حالت شکست تقارن نشان می‌دهد. شکل ۶ (ب) در بسامد $\omega_0 - \Delta\omega$ است. در این حالت $L_2 = 2.5 \text{ mm}$ و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط، همچنان برهم‌کنش مد روشن با میدان خارجی، قوی و برهم‌کنش مد تاریک با میدان خارجی، ناچیز است. ولی در شکل ۶ (ج) در بسامد EIT (ω_0) مد تاریک آنتن L_1 نیز به طور غیرمستقیم توسط مدهای روشن تحریک شده است و در بسامد $\omega_0 + \Delta\omega$ در شکل ۶ (د) نیز این امر با شدتی کمتر ادامه دارد. به روشنی مشاهده می‌شود که مد تاریک در این پدیده به طور غیرمستقیم توسط مد روشن تحریک و پدیده EIT حاصل شده است.

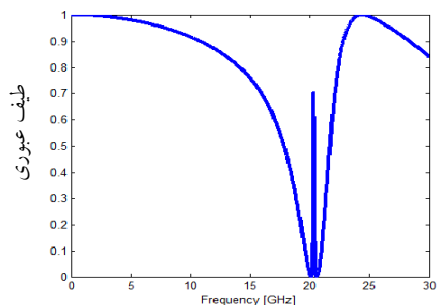
۲.۳. مشاهده ساختار با ضریب عبور و کیفیت بالا

به طور کلی شکست تقارن در ساختار، یک شرط لازم برای ایجاد پدیده EIT است لذا در این کار همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، طول نوار فلزی L_2 به 2.75 mm کاهش داده شده و سپس طیف عبوری و بازتاب در این حالت بررسی می‌شود (شکل ۸).

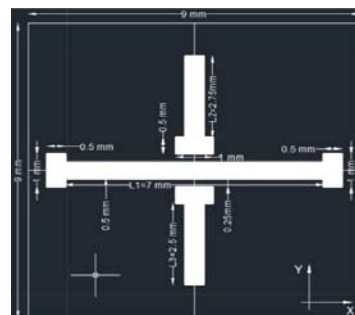
همان‌گونه که در شکل ۸ (ب) مشاهده می‌شود، طیف عبور ساختار کاملاً متفاوت با حالت ۸ (الف) که ساختار را در حالت تقارن نشان می‌دهد، است، و یک عبور حول تشدید مرکزی



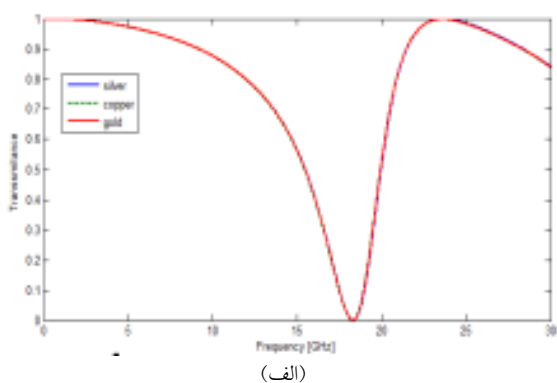
شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف عبوری و بازتاب ساختار، (الف) حالت متقارن، (ب) به ازای $L_p = 2.75$ mm، (ج) $L_p = 2.5$ mm، (د) $L_p = 3.25$ mm.



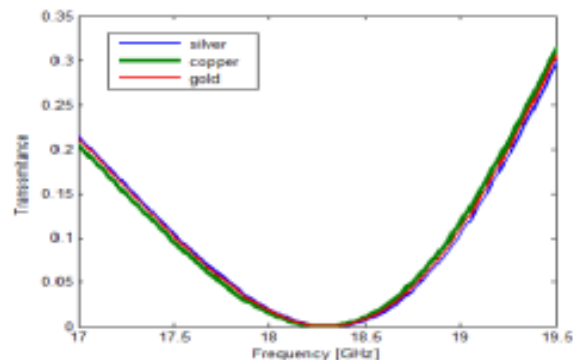
شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف عبوری ساختار پیشنهادی به ازای تغییر طول همزمان $L_p = 2.75$ mm و $L_s = 2.5$ mm.



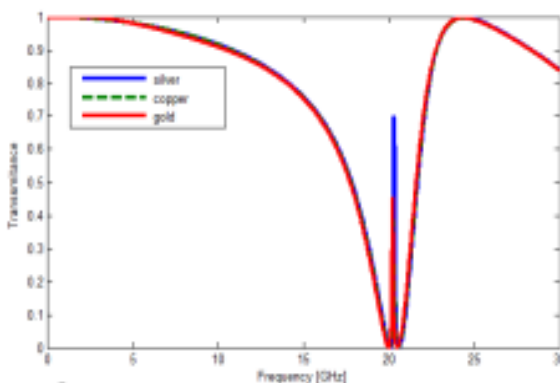
شکل ۹. ساختار فراماده پیشنهادی به ازای تغییر طول $L_p = 2.75$ mm و $L_s = 2.5$ mm.



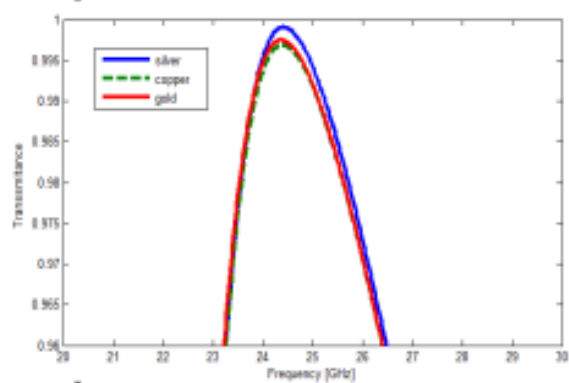
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف عبوری فلزات نقره، طلا، مس، (الف) در حالت متقارن، (ب) بزرگ‌نمایی طیف عبوری فلزات در حالت متقارن، (ج) طیف عبور در حالت نامتقارن، (د) بزرگ‌نمایی طیف عبوری فلزات در حالت نامتقارن.

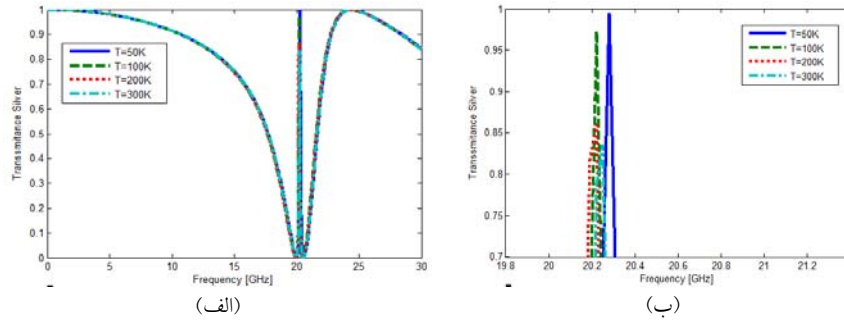
ماکرو پیشنهادی، در کاربرد حسگری در حالت کاهش طول همزمان $L_p = 2.75$ mm و $L_s = 2.5$ mm بررسی شده است. همان گونه که نمودارهای عبور شکل ۱۱ (الف) و (ب) نشان می‌دهد، رفتار تشدید در پاسخ‌های طیفی شبیه‌سازی شده در حالت تقارن هندسی در فلزات نقره، طلا و مس تقریباً مشابه است،

کامل در نصف بیشینه بسامد تشدید است.

۳.۳. مقایسه تأثیر جنس فلزات و تغییر دما

۳.۳.۱. بررسی اثر تأثیر فلزات بر پاسخ EIT ساختار

در این بخش از کار، تأثیرات فلزات مختلف بر حساسیت ساختار



شکل ۱۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) طیف عبوری اثر دما بر ساختار نقره در حالت $L_3 = 2,5 \text{ mm}$ و $L_4 = 2,75 \text{ mm}$ ، (ب) بزرگ‌نمایی طیف عبوری اثر دما بر ساختار نقره در حالت $L_3 = 2,5 \text{ mm}$ و $L_4 = 2,75 \text{ mm}$.

اهمی فلزات در دمای پایین‌تر، کمتر است. برای بررسی اثر دما در حالت شکست تقارن، طول میله‌های $L_4 = 2,75 \text{ mm}$ و $L_3 = 2,5 \text{ mm}$ انتخاب شده و بقیه ابعاد ثابت می‌باشند. در شکل ۱۲ رسانایی نقره در چهار دمای مختلف 50 K ، 100 K ، 200 K و 300 K در شبیه‌سازی به کار برده شده و نتایج آن نشان داده شده است.

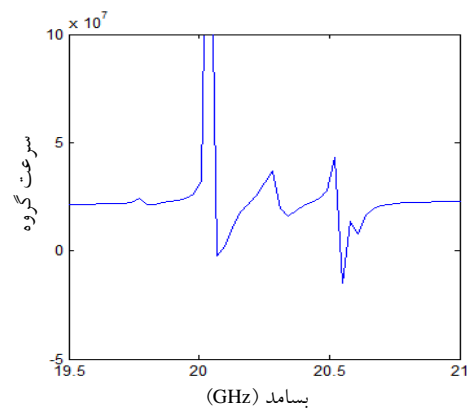
همان گونه که مشاهده می‌شود پاسخ طیفی ساختار برای دماهای 200 K و 300 K بسیار نزدیک به هم است، اما به ازای دمای 100 K شدت عبور 90% و به ازای دمای 50 K عبور بسیار خوب 98% در بسامد تشدید مشاهده می‌شود.

۳.۳.۳. سرعت گروه

یکی از ویژگی‌های ساختار فراماده پیشنهادی دارا بودن قابلیت کاهش سرعت گروه است. برای تحقق این امر طول نوار $L_4 = 2,75 \text{ mm}$ و $L_3 = 2,5 \text{ mm}$ انتخاب شده است. همان گونه که در نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با کمک گرفتن از

$$\text{رابطه } v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (c \text{ سرعت نور در خلأ، } n \text{ ضریب}$$

شکست محیط انتشار نور و ω بسامد نور است) و با دادن اطلاعات به برنامه متلب نوشته شده در این خصوص، سرعت نور به مقدار قابل توجه $3,7 \times 10^7 \text{ m/s}$ در محدوده بسامد تشدید، کاهش یافته است که از این امر می‌توان در سوئیچ‌های نوری [۱۴] که توسط نور کند کنترل می‌شوند و یا تولید



شکل ۱۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار سرعت گروه بر حسب بسامد.

با این توضیح که با توجه به شکل ۱۱ (ج) و (د) که در حالت کاهش طول همزمان مدهای روشن، رسم شده است، در مس نسبت به طلا و نقره کمترین شدت عبور را داریم و ضریب کیفیت در طلا و مس حدود 338 اما در نقره 677 می‌باشد. از آنجایی که نوار عبور و بسامد تشدید این سه فلز در محدوده ریزموج قرار دارد، ماکرو ساختار پیشنهادی می‌تواند برای کاربردهای آشکارسازی در ناحیه مایکروویو مورد استفاده قرار گیرد.

۳.۳.۲. بررسی اثر دما بر پاسخ EIT ساختار

می‌دانیم دما بر رسانایی فلزات تأثیر مستقیم دارد. در واقع با کاهش دما، رسانایی ویژه فلزات افزایش می‌یابد و بنابراین افت

کاملاً شفاف ایجاد می‌شود و ضریب عبور به 100% می‌رسد. همچنین نشان داده شد هنگامی که طول نوارهای فلزی L_p و L_r همزمان کاهش می‌یابد، علاوه بر شدت عبور خوب، یک عامل بسیار بزرگ حدود 677 حاصل می‌شود که نشان می‌دهد این ساختار در این ناحیه طول موجی، از عامل Q بسیار عالی برخوردار است. به علاوه بررسی‌هایمان نشان داد که با تغییر دما، بسامد تشدید تغییر چندانی نمی‌کند اما شدت عبور افزایش یافته و به حدود 98% می‌رسد. ماکروساختار پیشنهادی می‌تواند در کاربرد آشکارسازی مولکول‌هایی که مد ارتعاشی آنها در ناحیه ریزموج می‌باشد مورد استفاده قرار گیرد. با داشتن نوار عبور تیز و عامل Q بالا در پدیده EIT می‌توان شاهد کاهش سرعت گروه و کند شدن نور به مقدار قابل توجه $10^7 \times 3.7$ m/s بود. از این ویژگی ساختار می‌توان برای ذخیره اطلاعات و ارتباطات نوری بهره برد.

تداخل سنج‌هایی با حساسیت خیلی بالاتر به تغییر بسامد استفاده کرد.

۴. نتیجه‌گیری

در این کار شفافیت القایی الکترومغناطیسی EIT در ساختار فراماده تخت متقارن و غیرمتقارن پیشنهادی به تفصیل بررسی شد. طیف‌های عبور بر اساس برهم‌کنش‌های مد تاریک و روشن مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد هنگامی که تقارن هندسی ساختار شکسته شود و طول میله L_p به 2.75 mm برسد در بسامد 19.93 GHz ضریب عبوری حدود 91% و ضریب کیفیتی حدود 133 حاصل می‌گردد. سپس هنگامی که طول میله را باز هم کاهش دهیم در $L_p = 2.5$ mm و بسامد 20 GHz ضریب عبور به 98% می‌رسد. با کاهش بیشتر طول میله $L_p = 0.75$ مشاهده می‌شود که در بسامد 21.2 GHz یک پنجره

مراجع

1. K J A I Boller and S E Harris, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 2593.
2. S E Harris, *Phys. Today* **50** (1997) 36.
3. M A I Fleischhauer and J P Marangos, *Rev. Mod. Phys.* **77** (2005) 633.
4. S E Harris, and L V Hau, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 4611.
5. L V Hau, S E Harris, Z Dutton, and C H Behroozi, 1999. *Nature* **397** (1999) 6720, 594.
6. Z Vafapour and A Zakery, *Plasmonics* **11**, 2 (2016) 609.
7. N Niakan, M Askari, and A Zakery, *Journal of the Optical Society of America B* **29**, 9 (2012) 2329.
8. N Liu, L Langguth, T Weiss, J Kastel, M
9. R Singh, C Rockstuhl, F Lederer, and W L Zhang, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 085111.
10. F Hao, Y Sonnefraud, P V Dorpe, S A Maier, N J Halas, and P Nordlander, *Nano Lett.* **8** (2008) 3983.
11. P Tassin, L Zhang, T Koschny, E N Economou, and C M Soukoulis, *Optics Express* **17** (2009) 5595.
12. L Zhang, P Tassin, T Koschny, C Kurter, S M Anlage, and C M Soukoulis, *Applied Physics Letters* **97** (2009) 241904.
13. S R S Han, L Cong, and H Yang, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 3 (2015) 035104.
14. B S Ham, *Phys. Rev. A* **78** (2008) 011808.