

فرامواد الکترومغناطیسی

چکیده

این مقاله مروری بر فرامواد الکترومغناطیسی بر اساس این ایده دارد که مواد کامپوزیتی وجود دارد که خواص آن‌ها بستگی به نوع و ابعاد عناصر ساختاری علاوه بر ابعاد سلول واحد دارد. از بزرگی عناصر ساختاری، تنها گذردهی منفی و تراوایی بسیار بالا در دامنه

فرکانس مایکروویو و رادیویی انتخاب شدند. روش تعیین پارامترهای ساختاری فرامواد بر اساس پارامترهای S یا انتقال و ضرایب بازتاب ارایه می شود. به علاوه برخی کاربردهای فرامواد توصیف می شوند، توجه زیادی بر لنزهای کامل و ساختارهای جدید یعنی رول سوییس مخروطی، ساعت های الکترومغناطیسی و حسگرها برای ارزیابی غیر مخرب مواد شده است. با توجه به این که تفکیک پذیری مکانی این حسگرها را می توان به طور قابل توجهی در مقایسه با حسگرهای کلاسیک بهبود بخشید، لنزهای فرامواد برای دست ورزی امواج محو شونده مورد استفاده قرار داد.

یکی از ابعاد قابل ملاحظه توسعه تمدن بشری، قصد و نیت او برای ساختن چیزی است که در محیط اطراف وجود نداشته است (1). در امتداد افراد سعی می کردند تا اشیای پیرامون خود را مرتب کنند. سپس آنها شروع به تغییر شکل و ساختمان اشیا کرده و آن ها را به چندین بخش تقسیم کردند و سپس انواع مختلف را با هم ترکیب کرده و انسان توانست به ساختن اشیای جدید نائل آید. مواد مفیدی شروع به استخراج از منابع طبیعی شده و پیچیدگی روش ها با هدف کسب موادی با خواص خاص افزایش پیدا کرد. سپس مواد به دلیل توسعه روش های دست ورزی در سطوح مولکولی و اتمی سنتز شدند. به علاوه، خواص منحصر به فرد مواد را می توان

با دست ورزی ساختارهای خاص، و کامپوزیت‌های مختلف تولید کرد.

به هر حال، هر ماده یک کامپوزیت است حتی اگر تک تک اجزای آن اتم‌ها و مولکول‌ها باشند (2). از این روی این تنها گام برای جایگزینی اتم‌های مفهوم اصلی با ساختارهایی بروی بزرگ مقیاس و تبدیل مواد به فرامواد می‌باشد.

فرامواد به صورت آرایشی از عناصر ساختار مصنوعی برای دستیابی به خواص مناسب و غیرطبیعی محسوب می‌شوند. بررسی دقیق فرایند اصطلاح‌شناسی در (3) نشان داده شده است.

در بیشتر موارد، فرامواد متشکل از یک شبکه دوره ای از عناصر و یا مجموعه ای از عناصر می باشند که شباهت زیادی به بلور ها دارد که در شکل 1 نیز نشان داده شده است. عناصر ساختاری فرامواد موسوم به فراتم و فرامولکول ها می باشند. از طریق فرامواد ارایه شده در شکل 1، به شناسایی مش های سیم، همناگر های حلقه تقسیم کننده، رول مخروطی سوییس، رول سوییس، را می توان شناسایی کرد که توسعه این قطب جذاب امکان ایجاد عناصر سازنده دیگر را می دهد.

یک ماده بی شکل از آرایش تصادفی و نامنظم عناصر ساختاری مصنوعی وجود دارد. ما باید ساختار های دوره ای تعریف شده

توسط سلول واحد از ابعاد مشخص a در نظر بگیریم که توسط (2) تعریف می شود:

$$a \ll \lambda$$

که λ طول موج امواج الکترومغناطیسی برخوردی می باشد.

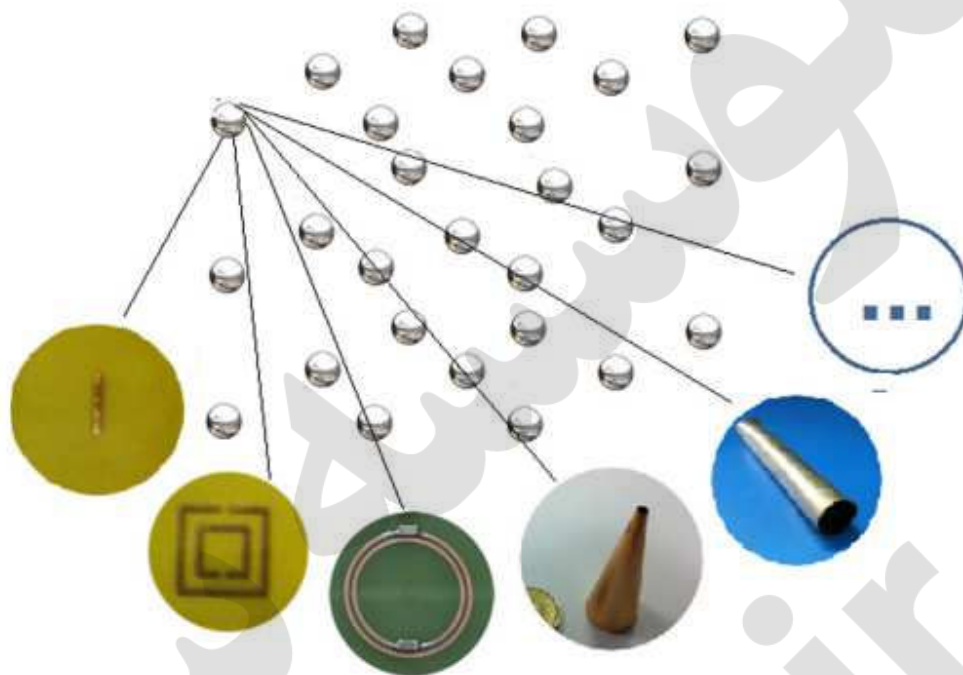
در این محدوده، تراوایی و گذردهی موثر یک مفهوم معتبر می باشد.

فرا مواد دارای کاربرد های گسترده ای می باشند که شامل تولید لنز های کامل (4-6)، و پوشش های نامرئی (7-8)، آنتن (9-10) و انواع مختلف حسگر ها (11-13) می باشند.

هدف این مقاله مرور حوزه فرامواد الکترومغناطیسی با تاکید پیشرفت در فناوری های سنجش با استفاده از فرامواد می باشد.

2-عناصر ساختاری فرامواد

امروزه، طیف وسیعی از عناصر ساختاری فرامواد شناخته شده هستند که دارای خواص الکترومغناطیسی خاص می باشند. در اصل، عناصر ساختاری فرامواد را می توان به دو مقوله طبقه بندی کرد: مواد با گذردهی دی الکتریک منفی و در دامنه فرکانسی خاص، موادی با گذردهی منفی و یا تراوایی مغناطیسی بالا متشکل از مواد پارامغناطیسی است.



شکل 1: مفهوم فرامواد

1-2 موادی با گذردهی منفی

2.1.1 فلزات و پلاسمون ها در فرکانس های نوری

در فرکانس های نوری، بسیاری از فلزات دارای گذردهی دی الکتریک منفی در صورتی می باشند که الکترون های رسانا در

مواد به صورت آزاد فرض شوند. این رفتار شبه پلاسما است که مسئول گذردهی منفی دی الکتریک در فرکانس های کوچک تر از فرکانس پلاسما می باشد. گذردهی دی الکتریک فلزات به شکل ذیل به دست می آید:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (1)$$

که ω_p فرکانس حجمی، γ ثابت میرایی و ω فرکانس زاویه ای امواج الکترومغناطیسی صفحه ای برخوردی می باشد. فرکانس پلاسما حجمی بستگی به تراکم الکترون n ، وزن الکترون m_e و بار e دارد:

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \quad (2)$$

این تئوری دراد برای خصوصیات انتشار پلاسما است (14). معادله انتشار شکل ذیل را می دهد:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (3)$$

و در

شکل 2 نشان داده شده است.

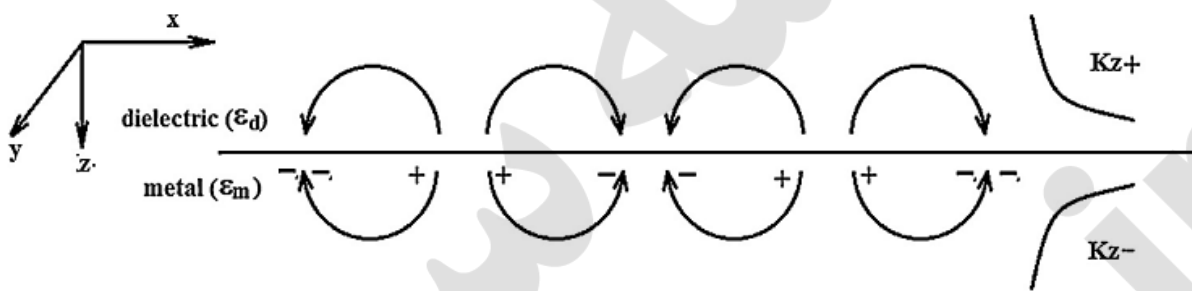
در پایین تر از فرکانس پلاسما، در یک مدل تنها حالت های محو شونده می تواند وجود داشته باشد. دو حالت منحنی در فرکانس پلاسما وجود دارد که در شکل 2 نشان داده شده است.

فاصله بین یک فلز ایده ال و یک دی الکتریک را برای مثال یک

خلا پرتودهی شده با موج الکترومغناطیسی در نظر بگیرید ، p

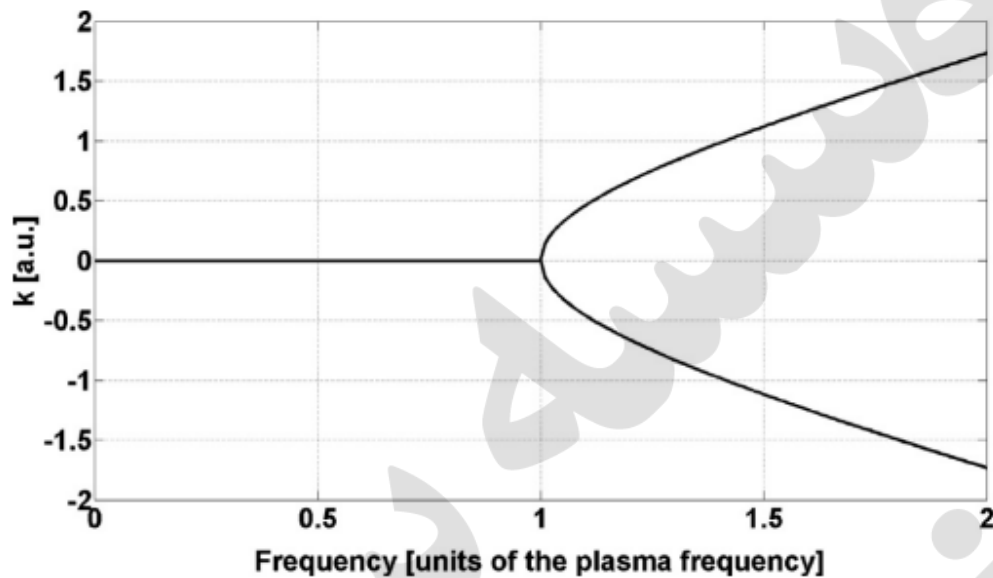
پلاریزه شده در شکل 3 نشان داده شده است. در این جا، فرکانس

طوری انتخاب شده است که $\epsilon_m < 0$ و $\epsilon_d = 1$ ($\epsilon_d \geq 1$) برای خلا باشد (شکل 3).



شکل 3: پلاسمون سطحی بر روی حد فاصل بین

دی الکتریک ($\epsilon_d > 0$) و فلز ($\epsilon_m < 0$)



شکل 2: معادله انتشار برای نور در فلز ایده ال

میدان های بین دو محیط همان طور که در شکل 3 نشان داده شده

است را می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \vec{E}_d &= \vec{E}_0 \exp(j(k_x x + k_y y - \omega t) - K_{z+} z), & z > 0 \\ \vec{E}_m &= \vec{E}_0 \exp(j(k_x x + k_y y - \omega t) - K_{z-} z), & z < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

با استفاده از معادلات پیوستگی برای مولفه های تانژانتی میدان های الکتریکی در حد فاصل به شکل ذیل می باشند:

$$k_x^2 + k_y^2 - K_{z+}^2 = \frac{\epsilon_d \mu_0 \omega^2}{c^2} \quad \text{or} \quad \frac{K_{z+}}{\epsilon_d} + \frac{K_{z-}}{\epsilon_m} = 0$$

$$k_x^2 + k_y^2 - K_{z-}^2 = \frac{\epsilon_m \mu_0 \omega^2}{c^2}$$

یک سری برانگیختگی های الکترونی با بارهای موازی با بخش واقعی بردار موجی وجود دارد. از این روی یک حالت با بزرگی مولفه های طولی از میدان های تجزیه کننده بین فلز و دی الکتریک وجود دارد. از این روی، این خطوط تراکم باری بر روی سطح فلز قرار داشته و موسوم به پلاسمون سطحی می باشد که با معادله انتشار نشان داده می شود:

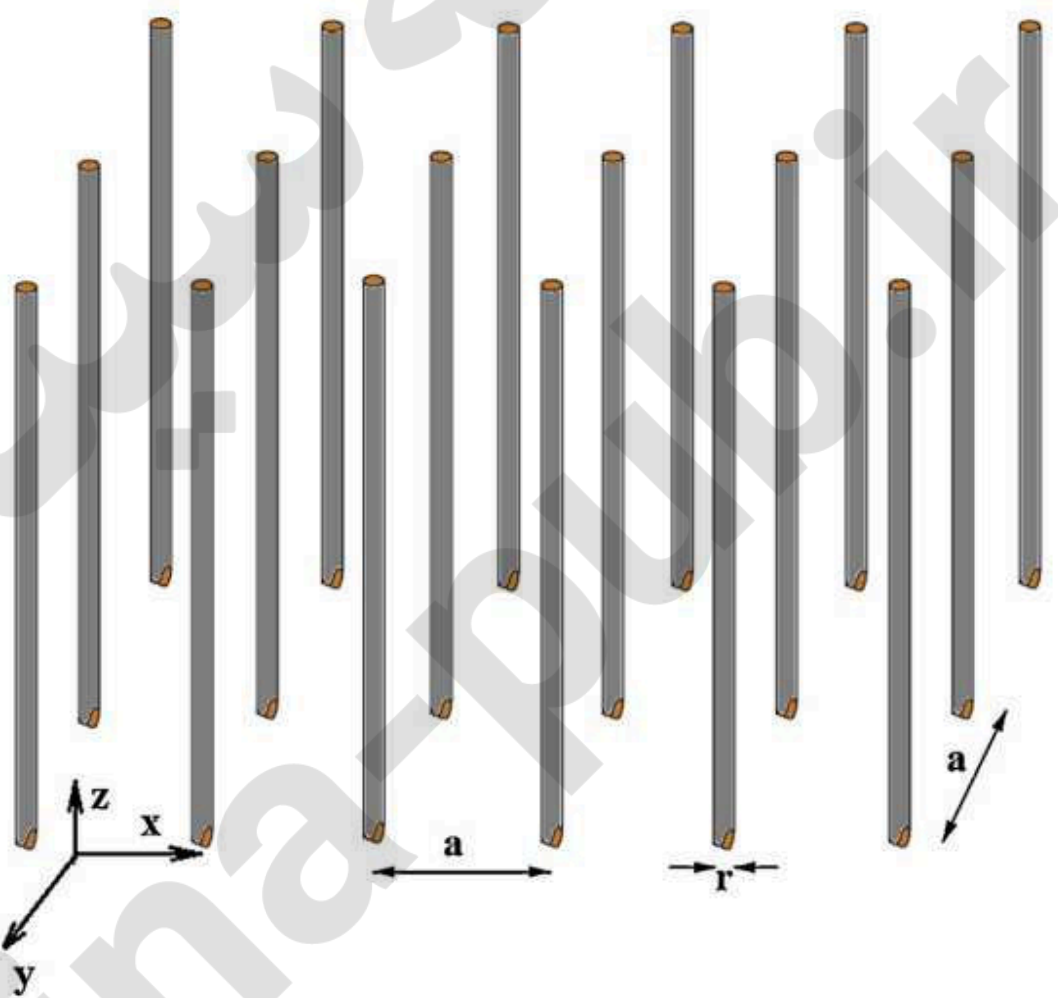
$$k_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right)^{1/2} \quad (5)$$

برای فلزی با $\epsilon_m(\omega)$ ، که در معادله 1 نشان داده شده است و شرایط $\epsilon_d=1$ برای خلا، $k_x > \omega/c$ برای پلاسمون های سطحی وجود دارد (15). از این روی امکان برانگیختگی سطحی پلاسمون ها بر روی سطح کاملا صاف با استفاده از حالت های تکثیر شونده نور وجود دارد. برای برانگیختگی سطحی پلاسمون، برخی مکانیسم ها نظیر زبری سطحی، ساختار فلزی نواری و یا کوپلر دی الکتریک با خلا نظیر منشور یا نیم کره وجود دارد (16).

2-1-2 ساختار سیم-مش

ساختار های فلزی-دی الکتریک به خاطر پاسخ الکترودینامیکی مطالعه شده است (2). همان طور که در منبع 16 گزارش شد

ساختار فلزی مش سیم دارای باند توقف فرکانس پایین از صفر تا فرکانس کات آف می باشد که به حرکت الکترون ها در سیم های فلزی نسبت داده شده است.



شکل 4: آرایش سیم های فلز نازک با شعاع r و a در دوره a میدان الکتریکی به صورت موازی با سیم ها بوده و $\lambda \gg r, a$ است. الکترون ها محدود به حرکت درون سیم ها تنها بوده و این موجب کاهش تراکم موثر الکترون می شود (2).

فرکانس پلاسمون ها از حالت پلاسمونیک طولی برای سیستم به صورت ذیل است:

$$\omega_p = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (6)$$

اگر $r = 1 \mu\text{m}$, $a = 10 \text{mm}$ و سیم های آلومینیوم، فرکانس پلاσμα حدود

2 گیگاهرتز بوده و گذردهی دی الکتریک کمپلکس به شکل ذیل

است:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p}{\omega(\omega + j(\varepsilon_0 a^2 \omega_p^2 / \pi r^2 \sigma))} \quad (7)$$

که برای آلومینیوم $\sigma = 3.65 \times 10^7 \text{ S/m}$ می باشد.

در شکل 5 الف و ب ، معادلات انتشاری را برای این ساختار نشان می دهند. وابستگی فرکانسی (بیان شده در واحد های فرکانسی پلاسما) از مولفه واقعی (شکل 5 الف) و مولفه موهومی (شکل

5 ب) عدد موجی

بر اساس معادله 7، می توان مشاهده کرد که ساختار سیمی توصیف شده در بالا دارای مقدار منفی با مقدار واقعی ε بیش از مقدار تقریبی $0.5 \omega_p$ است که بعد از آن با در نظر گرفتن روند مجانبی به طرف 1 برای فرکانس بالا مثبت تر می شود. مولفه موهومی ε

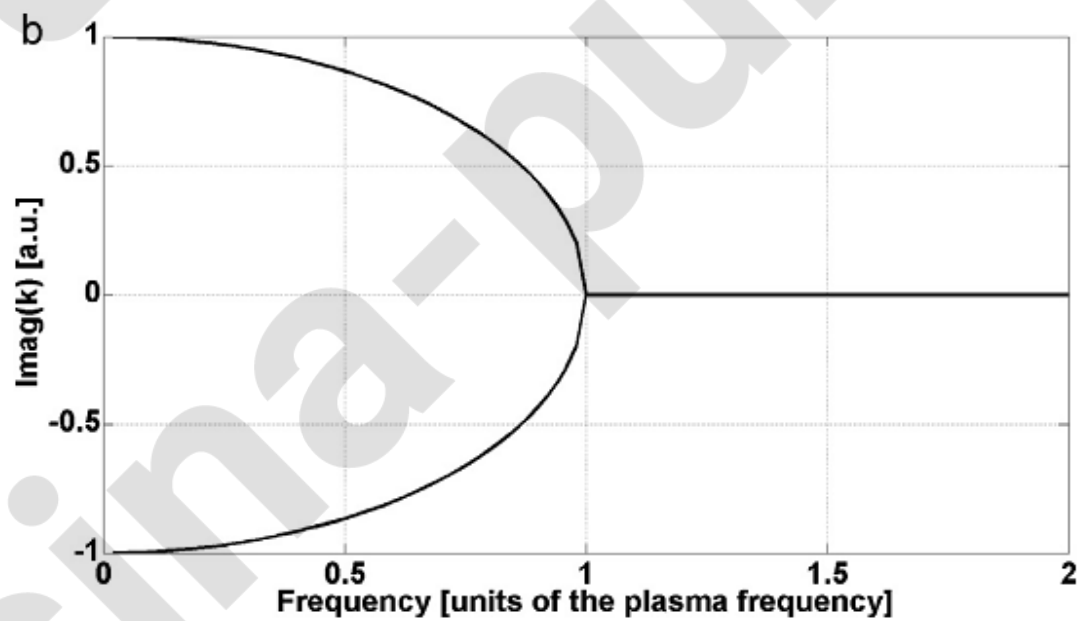
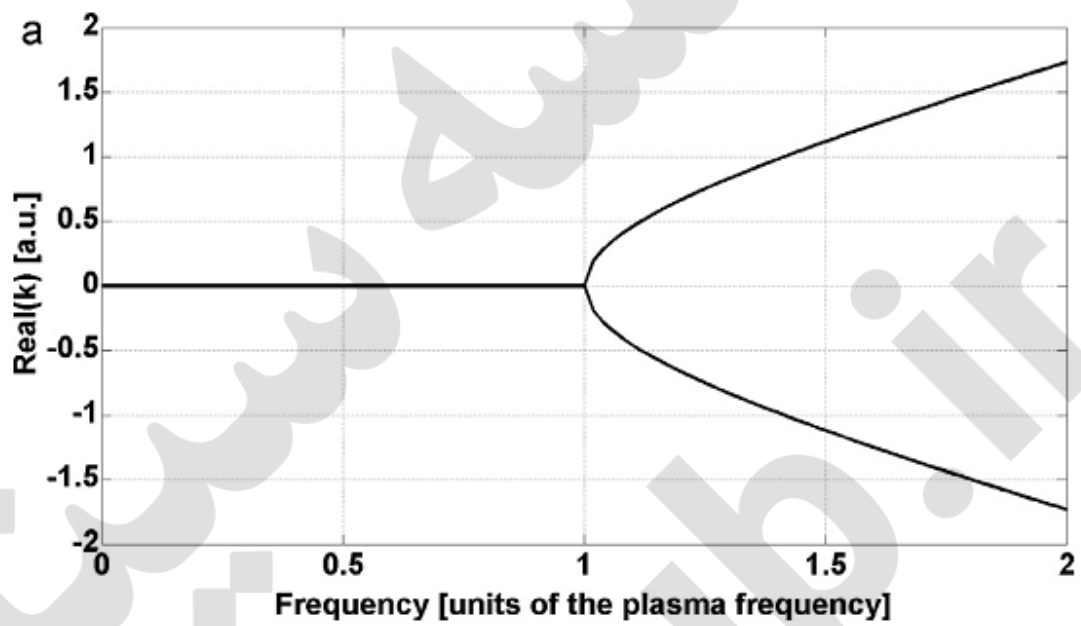
دارای ماکزیمم مقدار برای فرکانس بسیار کوچک فرکانس بوده و بعد از آن به طور مجانبی به طرف 0 کاهش می یابد. وابستگی گذردهی دی الکتریک پیچیده برای ساختار سیم در شکل 6 الف و ب نشان داده شده است.

خصوصیت اصلی ساختار مش سیم، انتشار مکانی قوی گذردهی دی الکتریک می باشد که به صورت تشکیل حالت های TEM علاوه بر حالت های TE و TM از ساختار تک محوری معمولی نشان داده می شود(17).

به دلیل مقدار نهایی گذردهی دی الکتریک سیم ها، حالت های TEM یک انتشار سهمی را نشان می دهد(18). در این خصوص،

محیط سیم نشان دهنده کلاس خاصی از فرامواد با سطح فرکانس

همسان سهمی می باشد



شکل 5: معادله انتشار برای سیم های نازک آلومینیوم با شعاع 1

میکرومتر و یک شبکه 10 میلی متری، فرکانس پلاسما حدود 2

گیگاهرتز می باشد: الف: بخش واقعی ب: بخش موهومی

2-2 فرامواد با تراوایی منفی و یا با تراوایی بسیار مثبت

فعالیت مغناطیسی در بیشتر مواد در فرکانس های بالا حتی چند صد

مگاهرتز و یا چند گیگاهرتز متوقف می شود. از این روی یک

چالش اصلی زمانی ایجاد می شود که برای ایجاد فعالیت

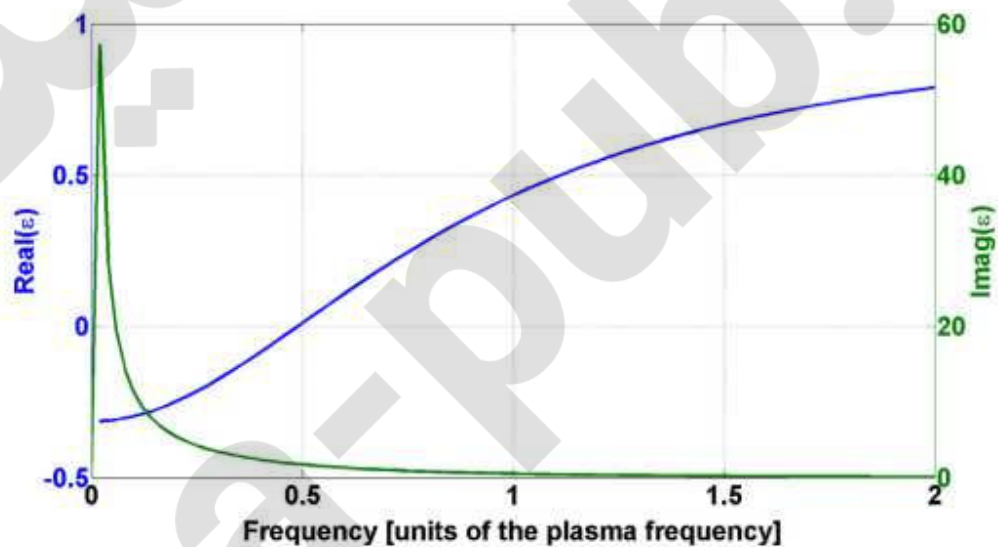
مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی منفی در فرکانس های مایکروویو و یا

بالا تر وجود داشته باشد. فرامواد وجود دارند که در دامنه خاصی

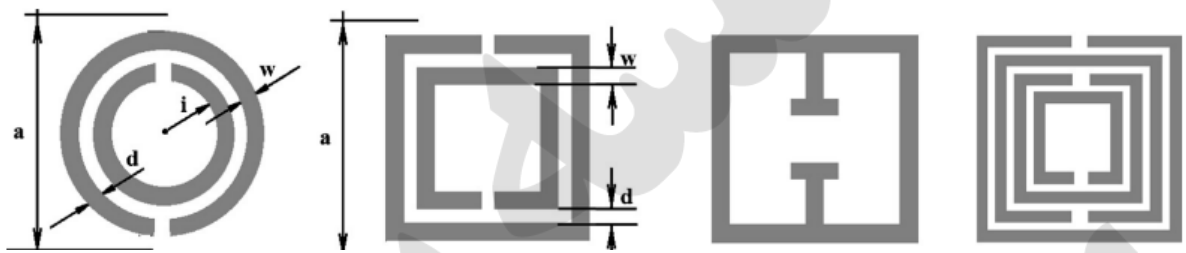
از فرکانس ها در حوزه فوق دارای تراوایی مغناطیسی مثبت بالا

بوده و در دیگر دامنه ها می تواند دارای تراوایی مغناطیسی منفی باشد.

از این دیدگاه، تنها دو نوع رایج مورد استفاده ارایه می شود که شامل همناگر حلقه ای تقسیمی و رول سویسی د بارول سویسی مخروطی متغیر خاص است (24).



شکل 6: وابستگی بر فرکانس گذردهی پیچیده سیم های نازک الومینیوم با شعاع 1 میکرومتر و دوره شبکه 10 میلی متر



شکل 7: همواکر حلقه تقسیم: الف: ساختار مدور، ب: ساختار

مربعی، ج: ساختار تک حلقه ای د: ساختار حلقه های چندگانه

1-2-2 همواگر های حلقه ای تقسیمی

این نوع فرا مواد دارای مزیت های صفحه ای زیاد می باشند

طوری که استفاده کاربردی از آن از طریق فتو لیتوگرافی برای

ابعاد نسبتا بزرگ و نانولیتوگرافی برای ابعاد نانومتری محقق می

شود و به همین دلیل، به طور گسترده ای استفاده می شود. بزرگی متغیرها به خوبی بررسی شده است که برخی از آنها در شکل 7 نشان داده شده است.

همنواگر حلقه تقسیم یک ساختار بسیار رسانا است که در آن خازن بین دو حلقه موجب تعدیل اندوکتانس می شود. در شکل 7 ب، شکل گروهی ساختار فلزی توسط یک ساختار مستطیلی جایگزین می شود. در شکل 7 د، همنواگر حلقه تقسیم چندگانه نشان داده شده است در شکل 7 ج، دیگر شکل فیزیکی SRR نشان داده شده است.

میدان مغناطیسی متغیر زمانی به صورت عمود بر سطح حلقه اعمال شده و ایجاد یک جریانی می کند که بستگی به خواص رزونانت ساختار داشته و تولید میدان مغناطیسی می کند که موجب بهبود میدان برخوردی شده و ایجاد μ منفی یا مثبت می کند. به عبارت دیگر، عملیات SRR نشان دهنده پاسخ میرایی فرامواد به شبیه سازی الکترومغناطیسی است (25).

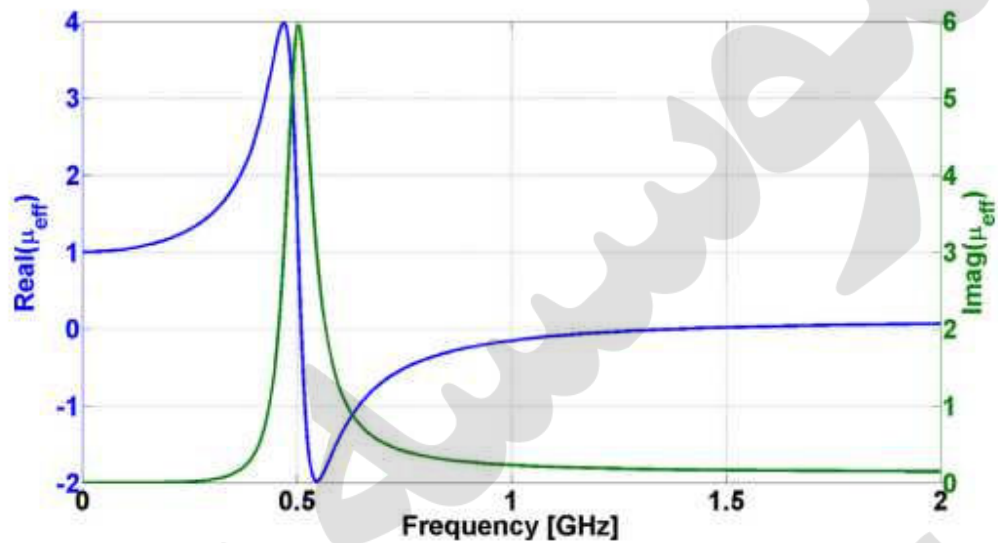
برای یک SRR مضاعف حلقه ای، در خلا و بدون ضخامت لایه فلزی، معادله ذیل برای μ به صورت معتبر می باشد (19)

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + (2\sigma j / \omega r \mu_0) - (3dc^2 / \pi^2 \omega^2 r^3)} \quad (8)$$

که σ مقاومت فلزی بوده و C سرعت نور در خلا است. μ_{eff} دارای رزونانس نشان داده شده در شکل 8 است.

بررسی شکل 8، وجود دو فرکانس مشخص یعنی فرکانس زاویه ای رزونانس $\omega_0, \mu_{\text{eff}}$ را نشان می دهد که به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\frac{3dc^2}{\pi^2 r^2}} \\ \omega_{mp} &= \sqrt{\frac{3dc^2}{\pi^2 r^3(1 - (\pi r^2/a^2))}} \end{aligned} \quad (9)$$



شکل 8: تراوایی مغناطیسی موثر برای SRR حلقوی مضاعف با

ابعاد $a=30\text{ mm}$, $r=16\text{ mm}$, $d=1.5\text{ mm}$, $w=1\text{ mm}$ برای فلز مس.

در زیر فرکانس رزونانت، μ_{eff} بهبود یافته است که بین ω_0 و ω_{mp} ،

مولفه واقعی μ_{eff} منفی است. برای یک مقدار SRR با ابعاد فوق

الذکر، $f_0 \cong 0.51\text{ GHz}$ و $f_{\text{mn}} \cong 1.42\text{ GHz}$ صادق است.

در شکل 9، معادله پراکنش برای Srr مضاعف نشان داده شده است. دو خط چین عمودی متناظر با فرکانس های f_0 و f_{mp} می باشند. برای $f < f_0$ ، رفتار SRR نشان دهنده وجود حالت عرضی و فاصله بین $f_0 < f < f_{mp}$ است. برای فرکانس های بالاتر، یک حالت مغاطیسی طولی فاقد انتشار ایجاد می شود.

2-2-2 رول سوییس

یک رول سوییس