

Metamaterials and Invisibility

Sousan Rasouli

Department of Nanomaterial and Nanocoating, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 167654-654.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22- 10- 2023

Accepted: 27- 02-2024

Available online: --2024

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

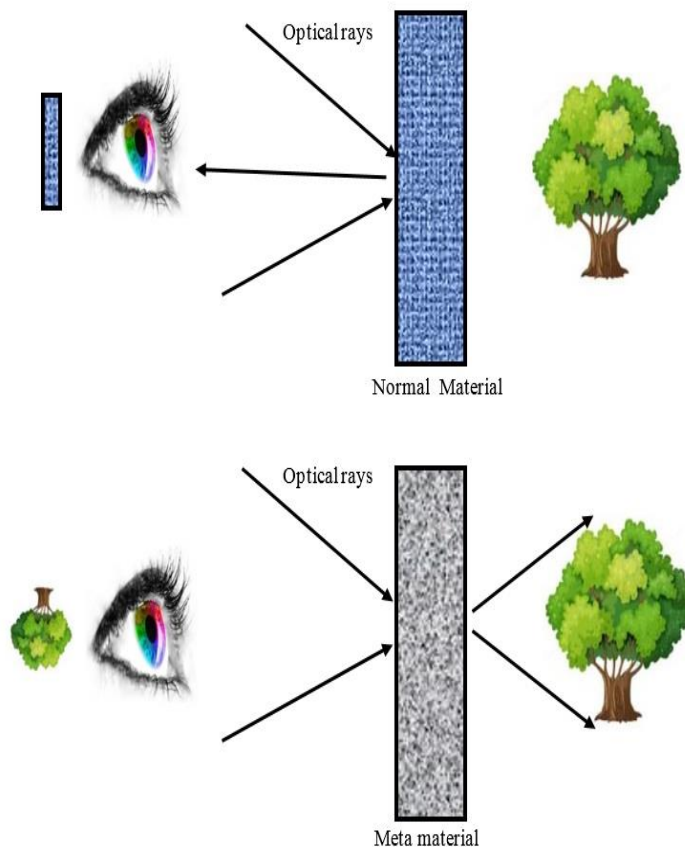
DOI: 10.30509/JSCW.2024.82000

Keywords:

Metamaterials,
Refractive index
Invisibility
Surface plasmon

ABSTRACT

Invisibility is one of the aspirations of human beings that the optics and materials have made, and metamaterials make this achievable. Metamaterials have amazing optical properties, including a negative refractive index, which are not found in nature and must be prepared with special techniques. Normally, the light that hits an opaque object is reflected from it and becomes visible. Metamaterials transform this two-way relationship between light and objects so that the light changes its direction around the object without being reflected and passing through it. In this case, the object becomes invisible because no light is visible. In this article, general information about how objects become invisible and methods of preparing metamaterials will be presented by using the principles of light physics and explaining the phenomena of light refraction and surface plasmon.



Corresponding author: rasouli@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



فرامواد و پدیده نامرئی شدگی

سوسن رسولی

دانشیار، گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴

چکیده

نامرئی شدن یکی از آرزوهای دیرین بشر بوده که امروزه علوم بینایی و نانومواد با پیشرفت‌های وسیع خود آنرا ممکن کرده است و این امر با استفاده از فرامواد (متماتریال) امکان پذیر شده است. فرامواد، که در طبیعت یافت نشده و ساخته دست بشر می باشند دارای خواص نوری شگرفی از جمله ضریب شکست منفی هستند. در حالت عادی نوری که به جسم غیرشفاف برخورد می کند از آن بازتاب شده و به چشم بر می خورد. فرامواد این رابطه دو طرفه نور و اشیاء را دچار تغییر و تحول می کنند بنحوی که نور بدون اینکه بازتاب شود در اطراف جسم تغییر جهت داده و از آن عبور می کند. در این حالت چون نوری به چشم نمی رسد جسم نامرئی می شود. در این مقاله با استفاده از اصول فیزیک نور و توضیح پدیده شکست نور و پلاسمون سطح، کلیاتی در مورد نحوه نامرئی شدن اجسام و روش‌های تهیه فرامواد ارائه خواهد شد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۲/۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/JSCW.2024.82000

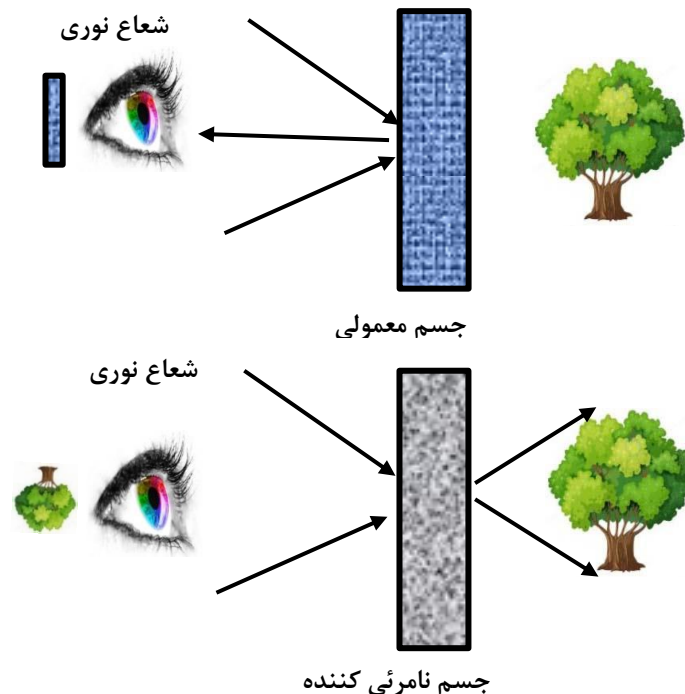
واژه‌های کلیدی:

فرامواد

ضریب شکست

پلاسمون سطح

نامرئی شدگی



۱- مقدمه

در این مقاله به تئوری‌های مربوط به شناخت نور و شکست آن، ضریب شکست، فرامواد، پدیده پلاسمون و ارتباط آنها با یکدیگر در بحث نامرئی‌کنندگی پرداخته شده است. در واقع، شناخت ماهیت فرامواد و عملکرد پدیده نامرئی شدن ارتباط مستقیمی با شناخت تئوری‌های ذکر شده داشته و علوم مربوط به نانوفناوری و نانومواد دارد زیرا ویژگی‌های استثنائی فرامواد فقط در محدوده ابعاد نانومتری مواد ایجاد می‌شوند.

۲- نور

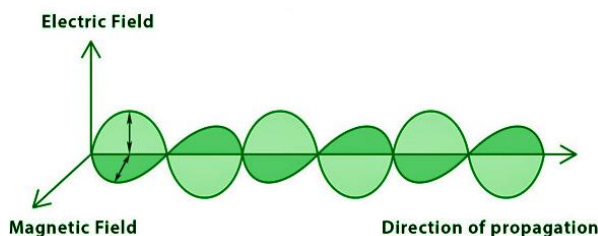
۲-۱- امواج الکترومغناطیسی

نور به عنوان نوعی انرژی الکترومغناطیسی شناخته می‌شود که معمولاً با عنوان امواج الکترومغناطیسی توصیف می‌شود به این مفهوم که شامل دو بردار الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد (شکل ۲). این امواج برای انتشار نیازی به محیط مادی ندارند (۳).

نور در طبیعت، در طول موج‌های مختلف مشاهده می‌شود، اما مهم‌ترین آن، نور سفید است که ترکیبی از سایر طول موج هاست. طیف مرئی طیفی است که با چشم انسان دیده شده و محدوده طول موج آن از ۴۰۰ nm تا ۷۰۰ nm است (شکل ۲). نورهای با طول موج کمتر از ۴۰۰ نانومتر را اصطلاحاً فرابنفش و نورهای با طول موج بیشتر از ۷۰۰ نانومتر را فرورسرخ می‌نامند. هرچه انرژی طول موجی کمتر باشد شکست می‌شود (رابطه مستقیم) و به همین دلیل است که در طیف مرئی خارج شده از منشور رنگ آبی و بنفش بیشترین شکست و قرمز کمترین شکست را دارند. هر چقدر طول موج کمتر باشد، بسامد یا بسامد بیشتر است و طبق رابطه، انرژی فوتون‌های نور انشتین $E=nhf$ انرژی نیز بیشتر خواهد شد. به همین علت پرتوهای نوری بنفش، پر انرژی‌تر از پرتوهای نور قرمز هستند (n =تعداد فوتون‌ها و h =ثابت پلانک هست). نور قرمز دارای بیشترین طول موج (۷۰۰ نانومتر) و کمترین انرژی بوده و نور بنفش دارای کمترین طول موج (۴۰۰ نانومتر) و بیشترین انرژی می‌باشند (۳).

۲-۲- ضریب شکست:

هر ماده‌ای که با نور برهم‌کنش داشته باشد، دارای ضریب شکست است.



شکل ۲: امواج الکترومغناطیسی (۳).
Figure 2: Electromagnetic waves [3].

از گذشته‌های دور نامرئی شدن یکی از آرزوهای بشر بوده، که درباره آن خیالی‌بافی کرده و داستان‌های تخیلی فراوانی نوشته و فیلم‌های بسیاری نیز در این مورد ساخته شده است. اولین دستاورد در این زمینه، تهیه شل نامرئی‌کننده بوده است (شکل ۱). هنگامیکه نور به جسمی غیر شفاف برخورد می‌کند دو حالت پیش می‌آید. ابتدا بخشی از نور توسط جسم جذب شده و به گرما تبدیل می‌شود سپس بخش اعظم نور از جسم بازتاب می‌شود که به چشم رسیده و موجب دیده شدن جسم می‌شود. در مورد شل نامرئی‌کننده، نور بدون جذب یا بازتاب آن، به طور یکسان به اطراف شیء هدایت شده و با این سازوکار توانایی غیر آشکار کردن آن شیء ممکن می‌شود (۱).

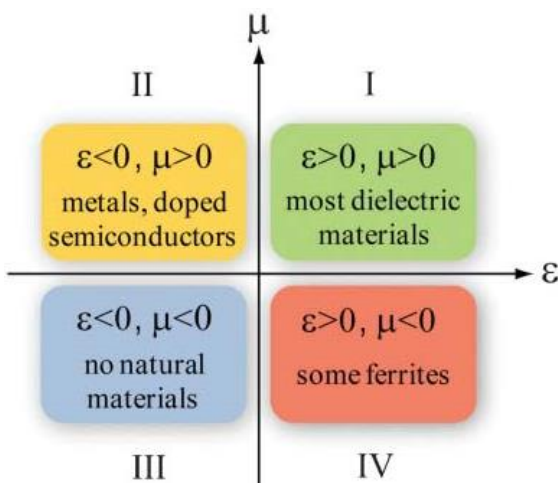
امروزه علوم بینایی با پیشرفت‌های وسیع، توانایی تحقق این آرزوی بشر را ممکن کرده است. این امر با استفاده از فرامواد^۱ امکان پذیر شده است (۲). فرامواد که در طبیعت یافت نشده و دارای خواص نوری ویژه‌ای از جمله ضریب شکست منفی هستند با دستکاری نور موجب پدیده نامرئی شدن می‌شوند. با توجه به اینکه مشاهده اجسام از طریق برخورد نور با چشم انسان رخ می‌دهد در نتیجه شناخت کاملی از نور و عوامل وابسته، در شناخت پدیده نامرئی کردن بسیار کارساز می‌باشد (۲).



شکل ۱: مثال‌هایی از شل نامرئی‌کننده (۱).

Figure 1: Examples of invisible cloaks [1].

¹ Metamaterial



شکل ۳: حالت‌های مختلف گذردهی الکتریکی یا نفوذ پذیری مغناطیسی منفی (۶).

Figure 3: Material classification in function of ϵ and μ [6].

فرامواد که بنام مواد چپگردان نیز شناخته می‌شوند (در مقابل مواد عادی که بنام راست‌گردان شناخته می‌شوند) به موادی اطلاق می‌شوند که دارای ضریب شکست منفی باشند. مواد با ضریب شکست منفی اثری کاملاً متفاوت با مواد با ضریب شکست مثبت دارند. مواد معمولی دارای ضریب شکست مثبت می‌باشند. این نوع مواد (مثل آب و شیشه) مانند تصویر سمت چپ شکل ۴ پرتو را در همان راستای حرکتش جابجا می‌کند اما مواد با ضریب شکست منفی مانند تصویر سمت راست شکل ۴ پرتو را در خلاف جهت حرکتش جابجا می‌کنند (۷).

۲-۳- پدیده پلاسمون سطحی

یک ساختار پلاسمون شامل یک هسته دی‌الکتریک و یک پوسته فلزی است. پلاسمون نوسانات جمعی الکترون‌های لایه هدایت فلز (در مرز هسته - پوسته دی‌الکتریک - فلز) در هنگام عبور فوتون پر انرژی است، در سال ۱۹۵۶، گروهی از پژوهشگران به صورت تحلیلی دلیل افت سریع انرژی فوتون‌ها در هنگام عبور از فلزات را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که این انرژی صرف حرکت جمعی و نوسان گونه الکترون‌های آزاد فلز می‌شود و آن را پلاسمون نامیدند. دلیل این نام گذاری شباهت این نوسانات الکترون‌ها با نوسان‌های ذرات محیط پلاسمای بود (۸-۹). در یک نمای کلی پلاسمون‌ها می‌توانند به عنوان یک نوسان چگالی الکترون‌های آزاد نسبت به یون‌های مثبت در یک فلز توصیف شوند. این تغییرات در مقیاس نانومتری ساختار فلزی رخ می‌دهد. هر فلزی دارای بسامد مشخصی است که در آن پدیده پلاسمای برایش رخ می‌دهد و بنام بسامد پلاسمای می‌باشد. پدیده پلاسمون دلیل براقیت سطح برخی فلزات صیقلی بوده و نقش عمده ای در خواص نوری فلزات ایفا می‌کند (شکل ۵) (۱۰).

این مشخصه، ثابت و بدون بعد بوده و چگونگی سرعت حرکت نور از یک محیط خاص را نسبت به سرعت حرکت نور از یک محیط مرجع (معمولاً خلاء یا هوا) را توصیف می‌کند. هر چه چگالی نوری محیط کمتر باشد، سرعت نور در داخل محیط بیشتر شده و ضریب شکست آن کاهش می‌یابد (۴). ضریب شکست اجسام به بسامد نور برخورد کرده بستگی دارد. در نتیجه به رنگ نور هم بستگی دارد. به عنوان مثال برای آب ضریب شکست $1/33$ برای رنگ زرد است که طول موج آن معادل $589/29$ نانومتر است. وقتی نوری از جسم خارج می‌شود، زاویه انتشار آن نیز نسبت به زاویه اولیه برخورد با محیط فرق خواهد کرد که این تغییر زاویه منجر به شکست نور می‌شود. با اندازه‌گیری زاویه برخورد نور با محیط جدید و زاویه شکست می‌توان ضریب شکست را نیز محاسبه کرد (۴).

در علوم نوری ضریب شکست یک ماده به طور معمول به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$n = c/v \quad (1)$$

در رابطه ۱، c سرعت نور در خلا و v سرعت موج تخت الکترومغناطیسی در محیط است. با استفاده از رابطه‌های ماکسول می‌توان نشان داد که ضریب شکست یک محیط به صورت زیر به گذردهی الکتریکی ϵ و نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی μ آن ماده مربوط می‌شود (رابطه ۲) (۵):

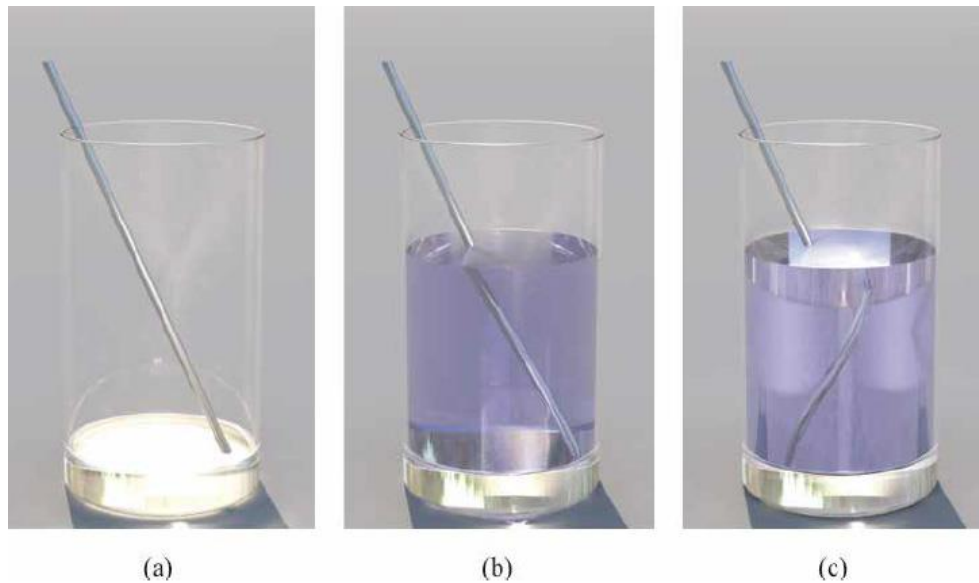
$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (2)$$

در این رابطه هرگاه یکی از مولفه‌های گذردهی الکتریکی یا نفوذ پذیری مغناطیسی منفی باشد ضریب شکست منفی خواهد شد. اکثر فلزات براق در بسامدهای نوری گذردهی الکتریکی منفی دارند. اگر فلز را به صورت مجموعه‌ای از الکترون‌های آزاد در زمینه‌ای از بارهای مثبت در نظر بگیریم می‌توان نشان داد گذردهی الکتریکی فلز از رابطه ۳ حاصل می‌شود (۴):

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (3)$$

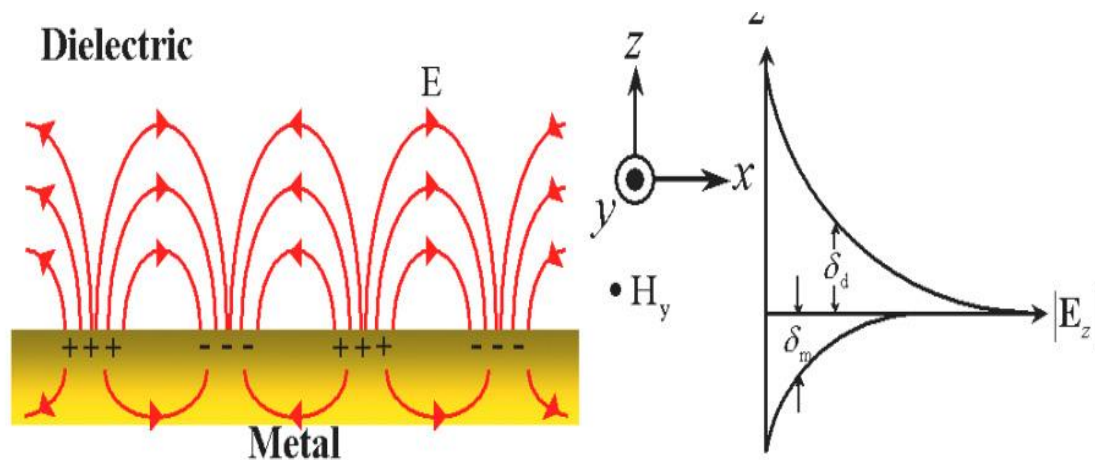
در رابطه ۳، $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}}$ بسامد پلاسمای الکتریکی است که برای بیشتر فلزات در ناحیه فرابنفش قرار دارد. با توجه به رابطه فوق برای بسامدهای کمتر از بسامد پلاسمون، گذردهی الکتریکی فلز منفی است.

در مواجهه با میدان الکترومغناطیسی و با توجه به مثبت یا منفی بودن گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی منفی چهار حالت مختلف در مواد متصور می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است (۶).



شکل ۴: تفاوت شکست نور در ماده ای با ضریب شکست منفی و ماده‌ای با ضریب شکست مثبت. ظرف وسط با اب معمولی با ضریب شکست مثبت ۱/۳ پر شده و ظرف سمت راست با آبی که ضریب شکست آن منهای ۱/۳ است پر شده است (۷).

Figure 4: (a) Calculated ray-tracing image of a metal rod in an empty drinking glass. (b) Same scenery, but the glass is filled with normal water, $n=1.3$, leading to ordinary refraction. (c) The water is replaced by “water” with a fictitious refractive index of $n=-1.3$ [7].



شکل ۵: انتشار پلاسمون سطحی در مرز فلز-دی الکتریک (۱۰).

Figure 5: Surface plasmons propagating along the interface between a metal and dielectric [10].

آنگاه پدیده تشدید پلاسمون سطحی^۱ (SPR) اتفاق می‌افتد. در این شرایط، میدان الکترومغناطیس در فضایی بسیار کوچک در حدود ۱۰۰ نانومتر مکعب متمرکز می‌شود. از آنجا که نانوذرات دارای تعداد زیادتری اتم‌های سطحی در مقایسه با اتم‌هایی که درون حجم آن‌ها قرار دارند می‌باشند در پاسخ به میدان‌ها و نیروهای خارجی اثراتی را نشان می‌دهند که وابسته به اندازه و شکل ذره و به همان نسبت به ثابت دی‌الکتریک محیط و فلز می‌باشد. تغییرات اندک در

اگر بسامد نوری که به فلز برخورد می‌کند کمتر از بسامد پلاسمو باشد بازتاب می‌شود، زیرا الکترون‌های فلز سپر میدان الکتریکی نور می‌شوند. چنانچه بسامد نور بالاتر از بسامد پلاسمو باشد عبور می‌کند، زیرا الکترون‌ها نمی‌توانند به اندازه کافی سریع بوده و مانند سپر میدان الکتریکی نور را دفع کنند. بسیاری از فلزات، که بسامد پلاسمای آن‌ها در ناحیه فرابنفش است، در ناحیه مرئی براق (بازتابنده) هستند (۱۱).

حالت سومی هم وجود دارد که در آن بسامد نوسان پلاسمون ایجاد شده با بسامد امواج الکترومغناطیس برخوردی همسان باشد

¹ Surface Plasmon Resonance (SPR)

شدت جذب قابل مشاهده است (شکل ۶) (۱۱).
مهمترین کاربردهای فناوری تشدید پلاسمون سطحی در تشخیص نشانگرهای زیستی در تشخیص سرطان، تشخیص واکنش‌های مولکول زیستی در داروسازی، تشخیص ویروس، باکتری و سموم زیستی، تشخیص آلاینده‌های هوا، مونواکسید کربن و ترکیبات گوگرددار، تشخیص مواد مخدر و دوپینگ و تعیین گلوکز در تشخیص بیماری‌های دیابت دارند (۱۶-۱۲).

۳- فرامواد

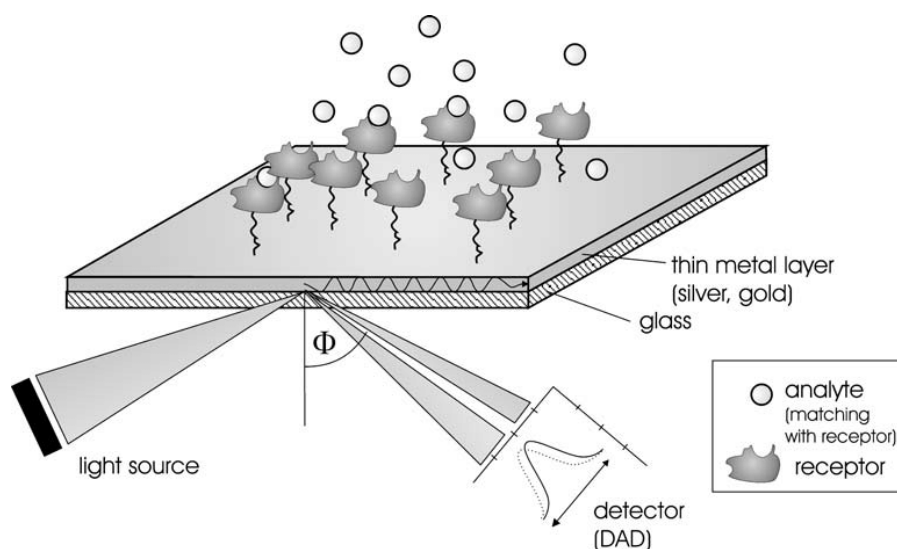
۳-۱- فیزیک مواد با ضریب شکست منفی

در سال ۱۹۶۸ یک فیزیکدان روسی به نام ویکتور وزلاگو از نظر تئوری ثابت کرد که می‌توان موادی با ضریب شکست منفی تهیه کرد. در این مواد دو شرط لازم و اساسی باید به طور همزمان وجود داشته باشد و آن هم دارا بودن ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی (μ) منفی و گذردهی الکتریکی (ϵ) منفی بطور هم‌زمان است (طبق رابطه ۲) (۱۷).
در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌های جدید در ساخت مواد الکترومغناطیسی، تولید مواد با ضریب شکست منفی، با گذردهی الکتریکی (ϵ) و نفوذ پذیری مغناطیسی (μ) منفی، در گستره‌ای از بسامدها امکان پذیر شده است. مفهوم ضریب شکست منفی با ایجاد مفاهیم جالب و جدید، علوم بینایی را گسترش داده است. یک مثال جالب، بحث عدسی کامل است که امکان تصویرسازی با ابعاد زیر طول موج را فراهم می‌کند.

دی‌الکتریک اطراف نانو حجم، بر روی تشدید پلاسمون‌های سطحی اثر می‌گذارد، به طوری که این تغییرات خود را در میزان پرتو پراکنده شده، پرتو جذب شده یا تغییر طول موج آن نشان می‌دهد. مهم‌ترین نانوذرات فلزی که در کاربردهای تشدید پلاسمون مورد نظر هستند عمدتاً شامل طلا، نقره و مس می‌باشد (۱۰).

۲-۴- کاربردهای پدیده پلاسمون سطحی

پدیده تشدید پلاسمون سطحی، برانگیختگی جمعی الکترون‌های آزاد فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک می‌باشد. این برانگیختگی ناشی از برهمکنش امواج الکترومغناطیس در ناحیه مرئی با الکترون‌های آزاد نانو ذرات طلا و نقره یا مس می‌باشد. امروزه کاربرد این پدیده در شناسایی و آشکارسازی مواد، گازهای شیمیایی و مولکول‌های بیولوژیکی موضوع مهم تحقیقات بین رشته‌ای علوم پایه، فنی مهندسی و علوم پزشکی است. با تغییر اندازه ذرات و نیز ضخامت پوسته فلزی طول موج نوری که در آن پلاسمون و تشدید نور اتفاق می‌افتد تغییر پیدا می‌کند. موقعیت و شدت پیک‌های جذب و گسیل پلاسمون، متأثر از جذب سطحی مولکول‌ها هستند، که در حسگرهای مولکولی می‌توانند استفاده شوند. برای مثال، به طور کاملاً عملیاتی دستگاه نمونه اولیه تشخیص کازئین موجود در شیر ساخته شده است. دستگاه براساس شناسایی تغییر در جذب لایه طلا کار می‌کند. پلاسمون‌های سطحی موضعی نانوذرات طلا می‌توانند برای شناسایی انواع مختلف مولکول‌ها، پروتئین‌ها و غیره استفاده شوند. در این روش پاسخ الکترون‌های آزاد نانو ذرات به میدان الکترومغناطیس در حضور مولکول‌های زیستی به صورت تغییرات در طول موج و



شکل ۶: اندرکنش ماده مورد آزمون و نور تابیده شده توسط گیرنده بررسی‌شده و توسط صفحه نمایش داده می‌شود (۱۱).

Figure 6: The interaction between an analyte and a receptor can be monitored by analysis of the reflected light [11].

نور برخوردکننده بوده و جریان‌های نوسانی از مدل تشدید اتمی پیروی می‌کنند. در فرامواد غیرمرتعش‌شونده اندازه ساختارهای تشکیل‌دهنده بسیار کمتر از اندازه طول موج نور برخورد کننده است. در فرامواد غیر رزونانسی هیچ جریانی نوسان نمی‌کند یا موجی پراکنده نمی‌شود، به علاوه اغماض بیشتری در برابر تغییر شکل‌های ساختاری در آن‌ها مشاهده می‌شود. در شکل ۷ چهار گروه مشخص از فرامواد بر اساس نوع کاربرد نمایش داده می‌شود (۱۸).

۳-۳- فرامواد پلاسمونیک

فرامواد پلاسمونیک خواص استثنائی نوری خود را نه به واسطه ساختار عنصری یا شیمیائی بلکه به واسطه شکل منظم و تکرار شده واحدهای ساختمانی خود کسب می‌کنند.

¹ Resonant

² Non resonant

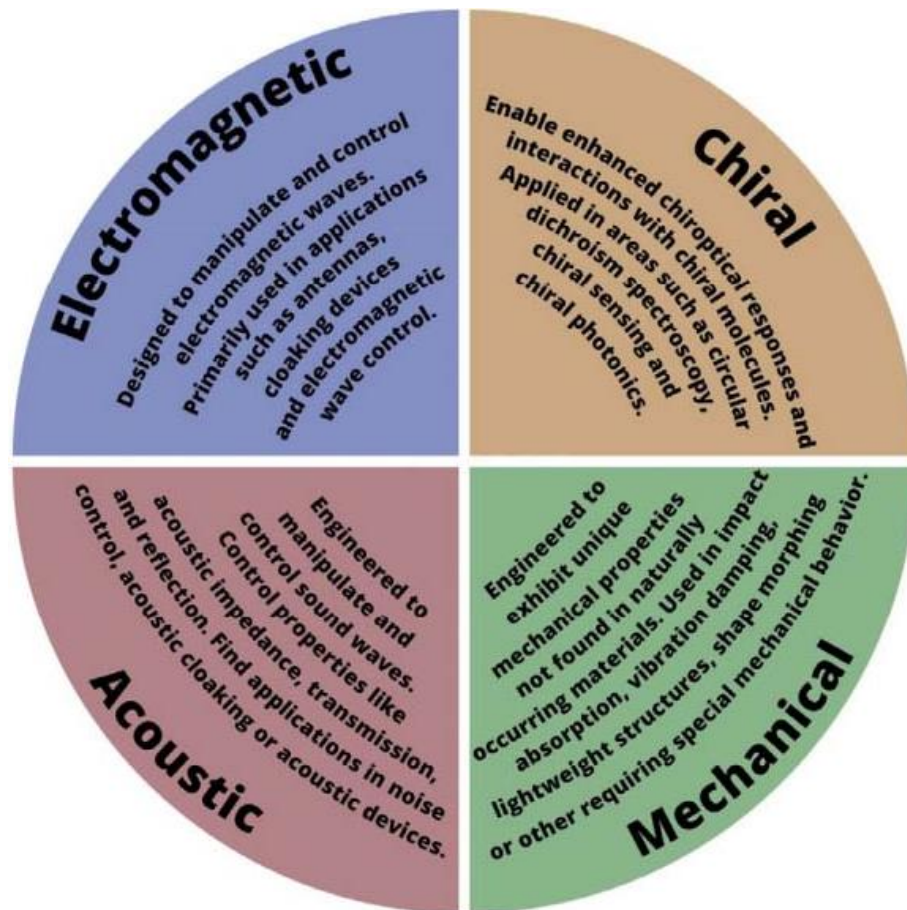
³ Anisotropic

⁴ Hyperbolic

امواج الکترومغناطیسی از دو مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی تشکیل شده‌اند که میدان الکتریکی صرفاً با حضور بار الکتریکی در محل ایجاد می‌شود، اما میدان مغناطیسی از بارهای الکتریکی یا جریان الکتریکی القا می‌شود. یکی از مشخصه‌های نور که علت برخی پدیده‌های نوری مانند شکست نور را توضیح می‌دهد، سرعت نور است. سرعت نور در محیط‌های مختلف متفاوت است که بیشترین آن در خلأ و یا به طور تقریبی در هواست. این سرعت در داخل ماده به شاخص‌های متفاوتی - برحسب حالت و خواص الکترومغناطیسی ماده وابسته است (۵).

۳-۲- انواع فرامواد

فرامواد در دو دسته مرتعش‌شونده^۱ و غیرمرتعش‌شونده^۲ قرار می‌گیرند. فرامواد مرتعش‌شونده شامل مواد چپ‌گردان و با ضریب شکست کمتر از یک بوده در حالی که فرامواد غیر مرتعش‌شونده شامل مواد همسانگرد^۳ و مواد هذلولی^۴ می‌باشند. در فرامواد مرتعش‌شونده اندازه ساختارهای تشکیل دهنده یک دهم طول موج



شکل ۷: چهار گروه مختلف فرامواد (۱۸).

Figure 7: Figure 1. Overview of electromagnetic, chiral, acoustic, and mechanical metamaterials [18].

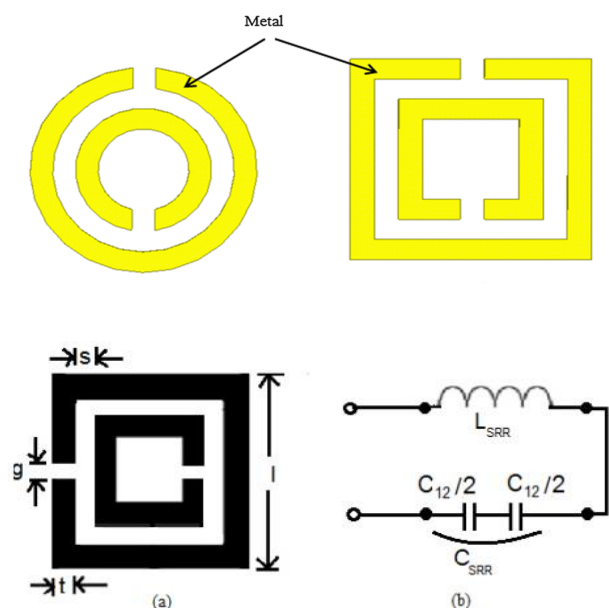
صورت سه‌بعدی قرار گیرند. در شکل ۹ ساختار ایده‌آل یک سیستم سه‌بعدی برای ایجاد ضریب شکست منفی در تمامی جهات نشان داده شده است (۲۱).

از نظر تئوری، سیستمی شامل یک لایه از فرامواد (با شکل منظم تکرار شونده) قرار گرفته بر روی یک لایه دی‌الکتریک به عنوان "پلاسمونیک فرامواد" نامیده می‌شود که توانایی دستکاری کردن امواج الکترومغناطیس نور و در نتیجه ایجاد ضریب شکست منفی را دارد (۲۱).

در "فرامواد پلاسمونیک" سطوح پلاسمونیک ایجاد می‌شوند. سطوح پلاسمونیک موقعی در سطح فلزات ایجاد می‌شوند که نور (با یک طول موج و انرژی مشخص) با الکترون‌های آزاد واقع در سطح فلز اندرکنش داده و این عمل منجر به ایجاد میدان الکترومغناطیسی ثانویه‌ای (علاوه بر بردار مغناطیسی نور) می‌شود که در طول مسیر سطح تماس فلز-دی‌الکتریک حرکت می‌کند. این میدان ثانویه موجب پلاریزه کردن موقت لایه دی‌الکتریک می‌شود (۲۱).

۴- اساس و تئوری نامرئی کردن

یک وسیله نامرئی‌کننده با دستکاری کردن امواج الکترومغناطیس نور (انتقال نور) موجب می‌شود که شیء مربوطه به طور موقت قابل دیده شدن نباشد. مهم‌ترین رویکرد در نامرئی کردن، که امروزه بسیار مورد توجه است، با استفاده از فرامواد انجام می‌شود.



شکل ۸: (بالا) دو نوع تشدیدکننده حلقه‌ای و مربعی، (پائین) ساختار

تشدیدکننده‌های حلقه‌ای (split-ring resonators SRRs) و مدار معادل آن (۱۹).

Figure 8: a) Geometry of SRR with no. of turns b) Equivalent circuit diagram of SRR [19].

در واقع، مطالعه بر روی خواص ویژه نوری فرامواد با بررسی تشدیدکننده‌های حلقه‌ای شکاف‌دار^۱ آغاز شد که اگر با یک بخش الکتریکی هماهنگ شوند در نتیجه با تشدید شدن در یک بسامد ویژه نوعی مغناطیس ساختگی در آنها ایجاد می‌شود. در یک تشدیدکننده، دو حلقه باز در درون هم وجود دارد که حلقه دومی دارای یک شکافی است که در مقابل شکاف حلقه اول قرار می‌گیرد. تشدیدکننده‌های حلقه‌ای می‌توانند مربع یا دایره‌ای باشند. شکل ۸ انواع تشدیدکننده‌های حلقه‌ای و یک تشدیدکننده و مدار معادل آن را نشان می‌دهد (۱۹).

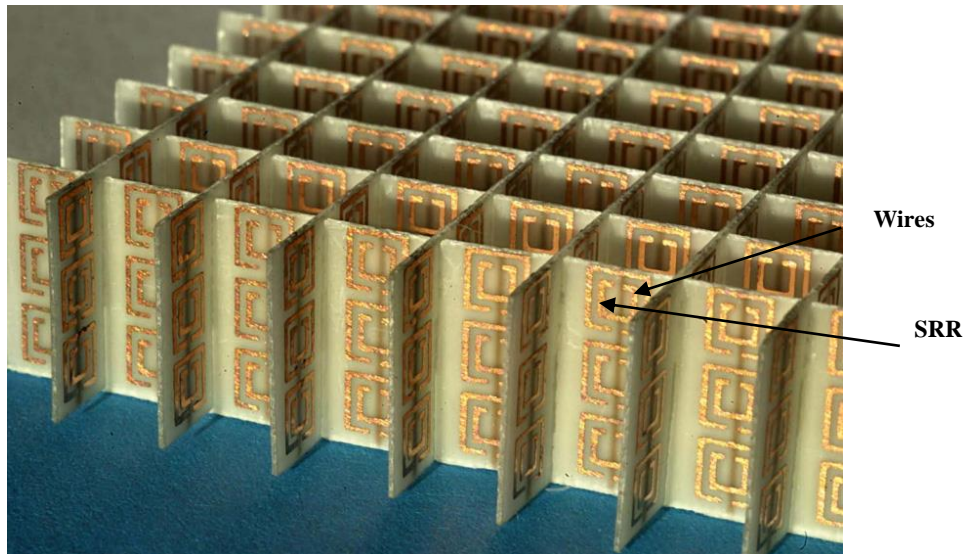
این نوع ساختار موجب به وجود آمدن یک توان الکتریکی می‌شود که از یک طرف باعث کاهش بسامد رزونانس شده و از طرف دیگر باعث افزایش شدت میدان الکتریکی اولیه می‌گردد. بطور ساده می‌توان گفت هنگامی که این سلول اولیه به طور منظم تکرار شود موجب ایجاد جفت‌شدگی مغناطیسی تقویت شده بین واحدها و در نتیجه منجر به یک میدان جفت‌شده مغناطیسی بزرگی می‌شود. این شرایط منجر به ایجاد شرایطی غیرطبیعی از جمله نفوذپذیری مغناطیسی منفی می‌شود.

دارا بودن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) منفی و ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) منفی بطور هم‌زمان شرط اولیه برای داشتن موادی با ضریب شکست منفی است.

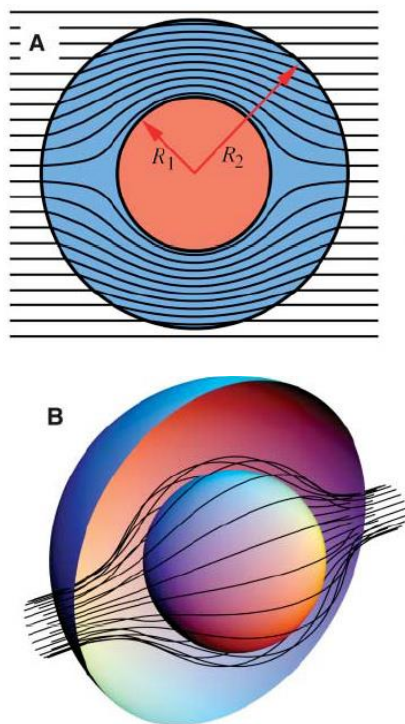
دستیابی به ضریب گذردهی الکتریکی منفی خیلی پیچیده نیست و فلزاتی مانند طلا و نقره با سطوح بسیار صیقلی می‌توانند دارای چنین شرطی باشند. اما دستیابی به ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی و بطور هم‌زمان با ضریب گذردهی الکتریکی منفی امری بسیار مشکل بوده و در حالت طبیعی هیچ ماده‌ای نمی‌تواند چنین خاصیتی داشته باشد. در حالت کلی، خواص فیزیکی مواد موجب ایجاد محدودیت‌هایی در مواد می‌شود. به عنوان مثال، فلزات صیقلی ضریب گذردهی الکتریکی منفی را در بسامدهای نوری مشخصی از خود نشان می‌دهند. پندری و همکاری‌اش نشان دادند که اگر ذرات فلزی به شکل میله‌ای باشند بسامد ارتعاش آنها در محدوده امواج ماکروویو قرار می‌گیرد و در این بسامد برخی مواد فرومغناطیس می‌توانند ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی هم داشته باشند. اما از نظر کاربردی مشکل اصلی، ایجاد ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی در ناحیه تراهرتز (نزدیک امواج ماکروویو) است (۲۰).

دانشمندان دریافته‌اند که سیستمی شامل یک دی‌الکتریک و یک فلز (طلا، نقره و مس) اگر به صورت ساختارهای بسیار کوچک و منظم تکرار شونده باشد مانند SRR عمل کرده و دارای ضریب شکست منفی می‌گردد. اگر بخواهیم این ساختار در تمامی جهات دارای خاصیت دستکاری نور باشد بایستی این ساختارهای منظم به

^۱ Split-ring resonators SRRs



شکل ۹: آرایش سه‌بعدی ساختارهای SRR تشکیل شده از واحدهای منظم تشدیدکننده‌های حلقوی به روش لیتوگرافی (چاپ سنگی) (۲۱).
Figure 9: A negative index metamaterial formed by SRRs and wires deposited on opposite side lithographically on standard circuit board [21].



شکل ۱۰: مسیر شعاع‌های نور در برخورد با جسم نامرئی شونده. الف) نمای دوبعدی و ب) نمای سه‌بعدی (۲۰).

Figure 10: A ray-tracing program has been used to calculate ray trajectories in the cloak, assuming that $R_2 \gg \lambda$. A: two-dimensional cross section, B: A 3D view of the same process [20].

مبنای این وسیله بر رابطه‌های ماکسول، که در همه مختصات یکسانند، پایه گذاری شده و انتقال مختصات فقط مقادیر گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی را تغییر می‌دهد. و با انتخاب

فرامواد که در مقیاس نانومتری هستند دارای ضریب شکست منفی بوده و با تاثیر گذاری بر روند گسترش نور در ماده می‌توانند در تهیه وسایل و پوشش‌های نامرئی‌کننده کاربرد داشته باشند. در واقع امواج الکترومغناطیس نور (که موجب دیده شدن اشیاء می‌شوند) یک رابطه متقابل و دو طرفه با اشیاء دارند. فرامواد، این رابطه دو طرفه را در یک محدوده خاصی از امواج الکترومغناطیس دچار تغییر و تحول می‌کنند. این تغییر موجب می‌شود که نور بدون اینکه منعکس شود در اطراف ماده تغییر جهت داده و از اطراف آن عبور کند. برای تجسم بهتر این حالت یک تکه سنگ بزرگ در مسیر جریان یک رود را در نظر بگیرید و اینکه آب مجبور است آن را دور بزند اما پس از عبور از سنگ دوباره امواج آب به هم رسیده و مسیر عادی خود را طی می‌کنند (۲۰).

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، امواج نور پس از عبور از فرامواد خم شده اند. خمش نور می‌تواند با ترفندهای نوری متنوعی ایجاد شود که برخی از آنها به صورت طبیعی اتفاق می‌افتد مانند سراب در بیابان. در سراب پرتوهای نور خم شده و به جای زمین به سمت آسمان منعکس می‌شوند و در نتیجه زمین در زاویه‌های مشخصی نامرئی به نظر می‌رسد. ولی برای ساختن یک دستگاه نامرئی‌کننده کامل و خوب، رعایت موارد بیشتری از این مثال لازم است، چون ممکن است نور طبیعی اشیاء کوچک‌تر از طول موج خود (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) را پنهان کند اما این هدف نهایی نامرئی کردن نیست. برای ساخت دستگاه نامرئی‌کننده نور باید به اطراف شی هدایت شود تا برای ناظر این طور به نظر برسد که هیچ شی در آنجا نیست (۲۰).

پلاسمونیک کارآمد و موثر است زیرا مرتب کردن نانوذرات در یک شکل خاص می‌تواند برای کارکردهای نوری ویژه مهندسی شود. شکل زیر دو روش عمده برای تهیه فرامواد پلاسمونیک را مقایسه می‌کند (۲۵).

از سال‌های ۲۰۰۵ تا کنون رویکرد لیتوگرافی پیشرفت‌های زیادی داشته و به روش‌های مختلفی قابل انجام بوده و شامل لیتوگرافی پرتو الکترونی، پرتو یون متمرکز، لیتوگرافی نانو ایمپرننت، لیتوگرافی کلئیدی ماسک حفره‌ای با لایه نشانی غیرطبیعی می‌باشد. شکل ۱۲ این روش‌ها را نشان می‌دهد (۲۶).

از مزایای روش‌های لیتوگرافی به دقت بسیار بالای آن می‌توان اشاره کرد ولی از آنجا که بسیار هزینه بر هستند امکان تهیه در مقیاس بالا را ندارند. روش‌های از پائین به بالا دقت کمتری دارند ولی کم هزینه‌تر و قابل توسعه‌تر هستند (۲۷).

در روش‌های بر پایه خودسامانی نانوذرات فلزی با اشکال مشخص به عنوان واحدهای (بلوک‌های) اولیه برای ساخت مواد الکترومغناطیس مطرح هستند اما مشکل این روش منظم کردن واحدها به صورت دسته‌های منظم است. در حالی که خودسامانی توانسته موجبات تسریع ساخت مواد پلاسمونیک مهندسی شده را فراهم کند اما باید توجه زیادی بر سمت جابجائی، جهت‌گیری و ظرفیت‌دار کردن نانوذرات معطوف شود (۲۸).

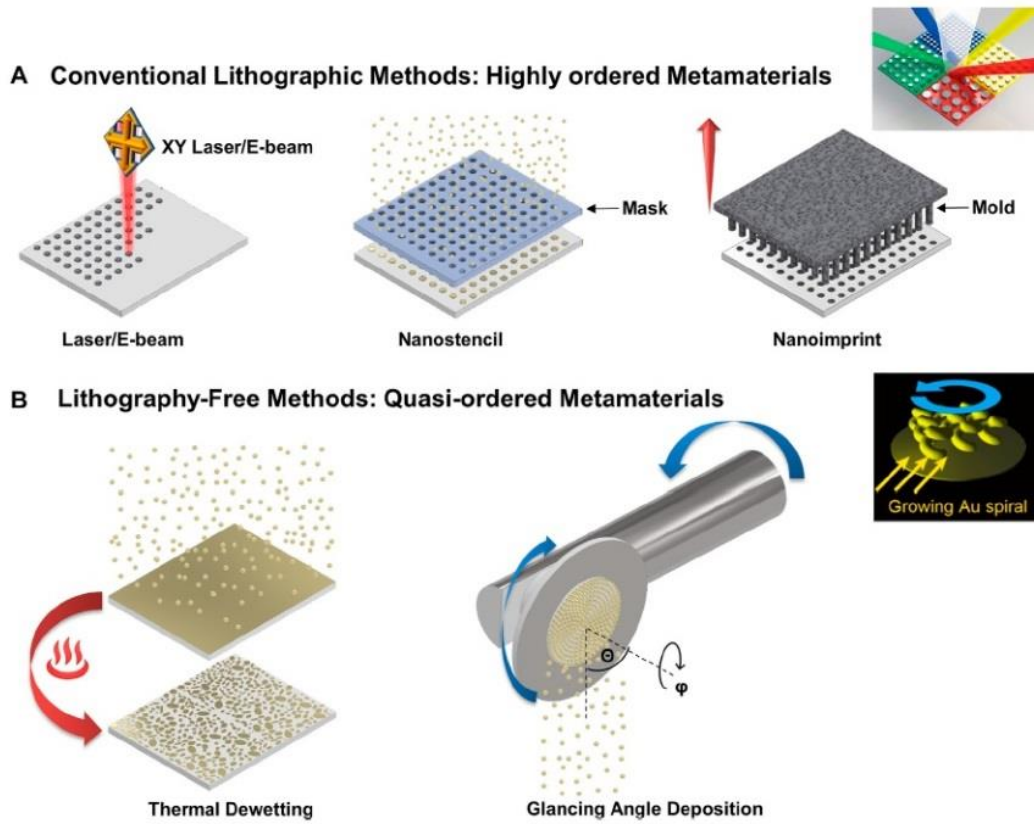
شکل ۱۱ مقایسه روش‌های بر پایه لیتوگرافی و خودسامانی را به نمایش می‌گذارد. راهبردهای مختلفی برای خودسامانی قابل برنامه ریزی از طریق تغییر شیمیائی نانوذرات به مورد اجرا گذاشته شده اند از جمله به استفاده از رابطه‌ای DNA، پلیمرهای گرفت شده یا روش‌های پیچیده عامل‌دار کردن سطح اشاره کرد (۲۸-۲۶). در هر حال، این متدها معمولاً کنترل اندکی بر جهت‌گیری نسبی بین نانوذرات داشته و مشکل انطباق بین بلوک‌های ذرات را مطرح می‌کند. استراتژی‌های خودسامانی ایده‌آل باید موجب تسریع ساخت ساختارها در مقیاس وسیع و یا تهیه فیلم‌ها بشوند به نحوی که بتواند به راحتی وارد طراحی تجهیزات نوری موجود شوند. شکل ۱۳ نمای کلی تهیه ناوذرات آرائیده شده با استفاده از DNA را به نمایش می‌گذارد (۲۸). یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تهیه واحدهای تکرار شونده فرامواد پلاسمونیک خودسامانی ردیف‌های نانوذرات پلاسمونیک در بلوک کوپلیمرها یا مخلوط‌های پلیمری-نانوذرات است که در آن نانوذرات با شکل‌های مشخص روی رشته‌های پلیمری که با بستر پلیمری غیرقابل امتزاج هستند اتصال داده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است واحدهای نقاط مغناطیسی با ابعاد نانومتری در یک بستر پلیمری با اشکال نواری یا ذره ای سامان دهی شده اند (۲۹). همان‌طور که از شکل ۱۴ بر می‌آید در هر دو حالت خودسامانی واحدهای نقاط مغناطیسی با دقت بسیار بالائی در نوارهای مورد نظر آرائیده شده‌اند.

بردارهای آن دو، می‌توان سیستم‌های مختصات مختلف مانند حفره را شبیه‌سازی کرد (شکل ۱۰). حفره جایی از فضا است که برای امواج الکترومغناطیس نامرئی است. به خاطر جذاب و ساده بودن این ایده، خیلی تلاش‌ها در راستای ساخت این روش نامرئی کردن انجام شد تا به نتیجه برسد. یک وسیله نامرئی کننده با دستکاری امواج الکترومغناطیس نور (انتقال نور) موجب می‌شود که جسم مورد نظر به طور موقت قابل دیده شدن نباشد (۲۲).

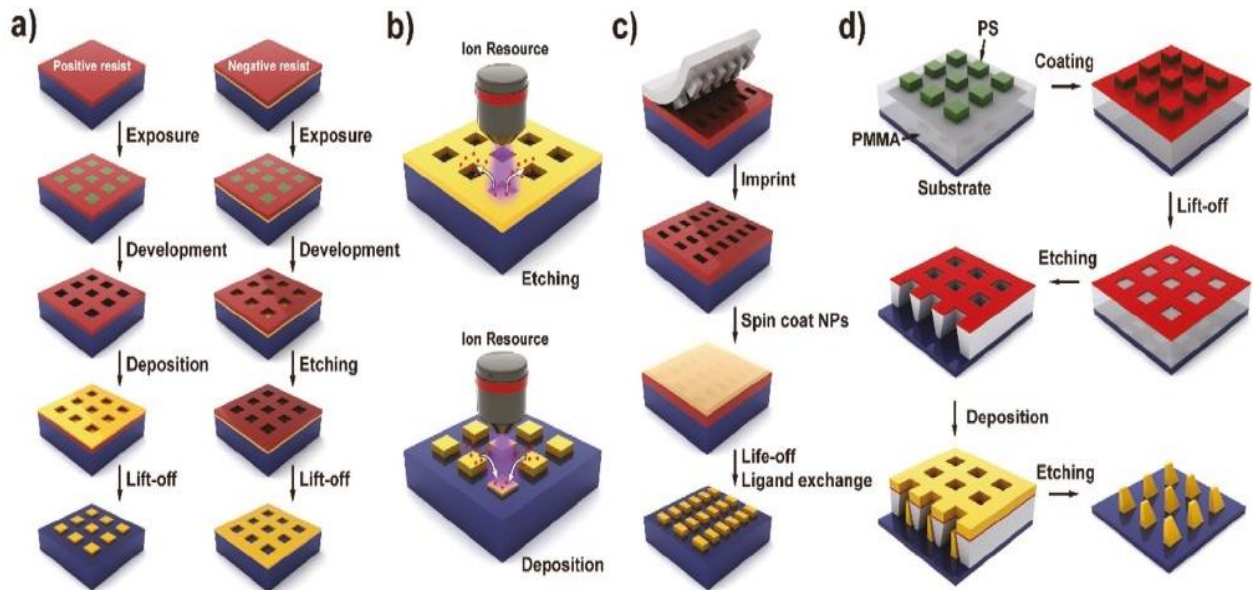
تهیه یک ساختار پلاسمونیک (شامل فلز-دی الکترونیک) توسط نوری که بسامد آن با بسامد تشدید ساختار پلاسمونیک هم‌خوانی دارد موجب می‌شود که ضریب شکست ساختار مانند هوا می‌شود. یعنی نور را نه خم می‌کند و نه بازتاب می‌دهد بلکه نور از آن عبور می‌کند. اگرچه این ساختار پلاسمونیک مقداری از نور را جذب می‌کند اما اگر با موادی پوشش داده شود که شدت نور را تشدید کند در نتیجه میزان نور جذب شده با میزان تشدید آن برابر بوده و همدیگر را خنثی کرده و در آن محدوده نوری جسم نامرئی خواهد شد (۲۰).

۵- رویکردهای تهیه موادی با ضریب شکست منفی (مواد پلاسمونیک)

تهیه واقعی موادی با ضریب شکست منفی تنها در سال ۲۰۰۰ بود که محقق شد که در آن یک گروه از محققین دانشگاه برکلی با استفاده از تجهیزات بسیار پیچیده توانستند برای نخستین بار آن هم در مقیاس میلی‌متری یک ساختار کامپوزیتی را تهیه کنند که دارای ضریب شکست منفی در محدوده امواج ماکروویو بود (۲۱). بطور کلی دو رویکرد اصلی برای تهیه فرامواد وجود دارد که شامل روش‌های بر پایه لیتوگرافی (چاپ سنگی) و روش‌های غیرلیتوگرافی مطرح هستند. روش‌های بر پایه لیتوگرافی پیچیده به عنوان رویکرد از بالا به پائین شناخته شده و در آن با روش‌های نوشتاری مستقیم قادر به تهیه نانو ساختارهای پلاسمونیک با اشکال فضائی کنترل شده شگفت‌انگیزی هستند. این روش هم بسیار هزینه بر بوده و هم اینکه امکان تولید این مواد در مقیاس زیاد وجود ندارد. از سال‌های ۲۰۰۵ رویکرد غیرلیتوگرافی یا روش از پائین به بالا برای ایجاد مواد پلاسمونیک مورد توجه قرار گرفته است که به نام روش خودسامانی یا خودآرائی نیز شناخته شده هستند (۲۴-۲۳). روش‌های خودآرائی بر خلاف روش‌های از بالا به پائین می‌توانند به طور هم‌زمان در حجم وسیعی به اجرا گذاشته شوند و معمولاً با روش‌های ارزان قیمت بر پایه محلول قابل انطباق می‌باشند. نانوذرات معدنی (غیرآلی) بلوک‌های اولیه ایده آلی برای ساخت مواد با راهکار پایین به بالا هستند و به تازگی برای خودسامانی کلئیدهای نانوذرات فلزی برای تهیه مواد پلاسمونیک مورد استفاده قرار گرفته اند. این استراتژی تهیه مواد

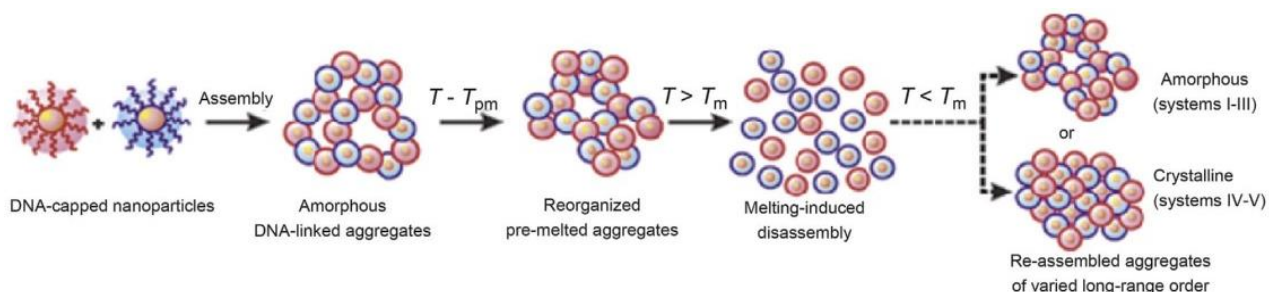


شکل ۱۱: نمای کلی مقایسه دو روش تهیه فرامواد منظم با روش لیتوگرافی (A) و تقریباً منظم با روش خودسامانی (B) (۲۵).
Figure 11: (A) Schematic diagram representing different conventional lithographic methods from left to right: Laser/E-beam lithography, nanostencil lithography, and nanoimprint lithography [25].



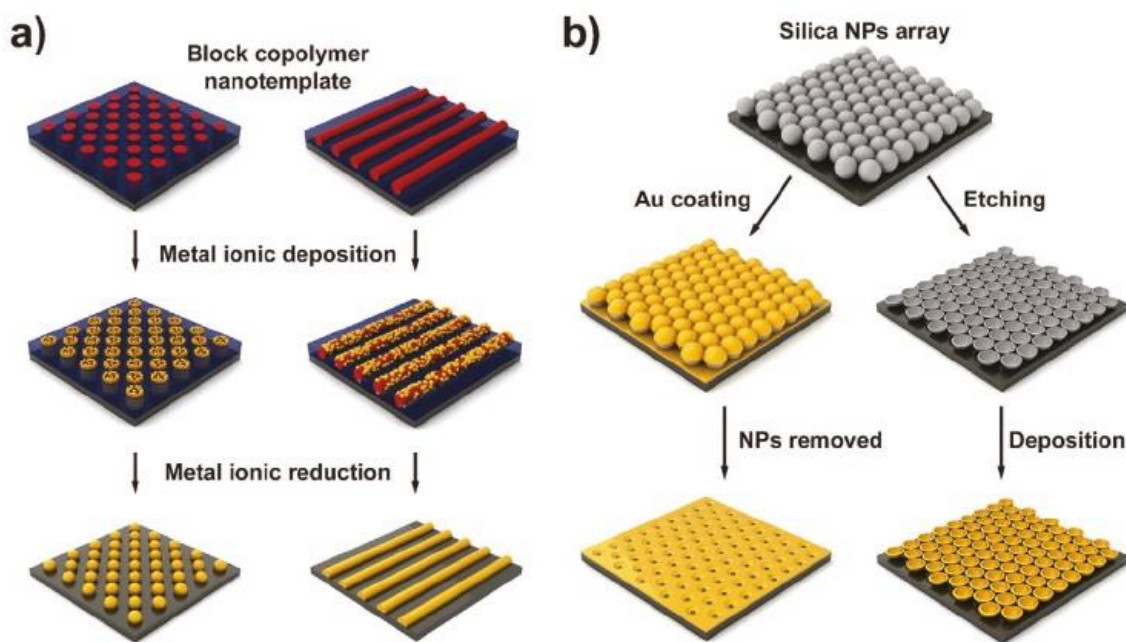
شکل ۱۲: روش‌های مختلف انجام لیتوگرافی (چاپ سنگی) (a) لیتوگرافی پرتو الکترونی (b) پرتو یون متمرکز (c) لیتوگرافی نانو ایمپرننت (d) لیتوگرافی کلونیدی ماسک حفره‌ای با لایه نشانی غیرطبیعی (۲۶).

Figure 12. Illustration of a) photolithography or electron-beam lithography process, b) focused-ion beam, c) nanoimprint lithography and d) hole-mask colloidal lithography and off-normal deposition [26].



شکل ۱۳: استفاده از DNA برای تهیه و خودآرایی نانوذرات (۲۸).

Figure 13: Fabrication of plasmonic nanostructures using DNA linkers. The assembly system of DNA-capped nanoparticles [28].



شکل ۱۴: نمای کلی استفاده از روش خودسامانی در تهیه سطوح فلزی با اشکال منظم با استفاده از واحدهای کوپلیمر و طرحواره نانو با استفاده از نانو ارایه‌ها (۲۹).

Figure 14. Schematic illustration for metal-surfaces ensemble prepared by self-assembled nanopatterns with a) block copolymer nanotemplate and b) NPs array [29].

الکترومغناطیس نور یک رابطه متقابل و دو طرفه با اشیاء دارند. فرامواد، این رابطه دو طرفه را در یک محدوده خاصی از امواج الکترومغناطیس دچار تغییر و تحول می‌کنند. این تغییر موجب می‌شود که نور بدون اینکه منعکس شود در اطراف ماده تغییر جهت داده و از اطراف آن عبور کند. دانشمندان دریافتند که ساختارهای پلاسمونیک شامل یک دی‌الکتریک و یک فلز (طلا و نقره) اگر به صورت ساختارهای بسیار کوچک و منظم تکرار شوند می‌تواند مانند یک تشدیدکننده حلقه‌ای SRR عمل کرده و دارای ضریب شکست منفی گردند. تهیه یک ساختار پلاسمونیک توسط نوری که بسامد آن با بسامد تشدید ساختار پلاسمونیک هم‌خوانی دارد موجب

۶- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده نامرئی شدن بر اساس علوم نوری و نانومواد مورد بررسی قرار گرفت. اساس نامرئی شدن بر استفاده از فرامواد قرار دارد. این ساختارهای طراحی شده دارای خواص الکترومغناطیسی استثنائی هستند که محدودیت‌های مواد معمولی را به چالش می‌کشند. متامتریال‌ها در طبیعت یافت نشده و دارای خواص نوری ویژه‌ای از جمله ضریب شکست منفی هستند و محققین از طریق طراحی و چیدمان دقیق نانو ساختارها، این فرامواد را برای انحراف و کنترل نور تنظیم کرده و نور را به اطراف جسم هدایت می‌کنند بنحوی که برای مشاهده گر نامرئی شود. در واقع، امواج

رویکرد منظم کردن واحدهای اولیه از نانوذرات پلاسمونیک است که آن را با استفاده از عامل‌دار کرده ذرات، پیوند DNA بر روی ذرات و یا استفاده از یک بستر پلیمری حل کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

از پشتیبانی و حمایت پژوهشگاه رنگ برای انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

می‌شود که ضریب شکست ساختار مانند هوا می‌شود. یعنی نور را نه خم می‌کند و نه بازتاب می‌دهد بلکه نور از آن عبور می‌کند. مهم‌ترین روش‌های تهیه فرامواد پلاسمونیک شامل روهای بر پایه لیتوگرافی (چاپ سنگی) و روش‌های غیرلیتوگرافی می‌باشند. از سال‌های ۲۰۰۵ تا کنون رویکرد لیتوگرافی پیشرفت‌های زیادی داشته و به روش‌های مختلفی قابل انجام بوده و شامل لیتوگرافی پرتو الکترونی، پرتو یون متمرکز، لیتوگرافی نانو ایمپرننت، لیتوگرافی کلونیدی ماسک حفره‌ای با لایه نشانی غیرطبیعی می‌باشد. این رویکرد هم بسیار هزینه بر بوده و هم اینکه امکان تولید فرامواد در مقیاس زیاد وجود ندارد. رویکرد غیرلیتوگرافی که به نام روش خودسامانی یا خودآرایی نیز شناخته شده است بر خلاف روش‌های از بالا به پائین می‌تواند به طور هم‌زمان در حجم وسیعی به اجرا گذاشته شود. چالش مهم در این

۷- مراجع

1. Metamaterials based optical cloaks that promise invisible planes, vehicles and armies, and protection from earthquakes & tsunamis, 2018 Available from: <https://idstch.com>.
2. Cai W, Chettiar UK, Kildishev AV, Shalaev VM. Optical cloaking with metamaterials, *nature photonics*. 2007;1:224–227. <https://doi.org/10.1016/j.cphy.2009.01.002>.
3. David H, Ann S, Morgenthaler W, Kong JA. *Electromagnetic waves*, Published by Pearson (edition First Edition), 1993.
4. Rupali S, *Refractive Index and it's application*, LAP Lambert Academic Publishing, 2018.
5. Andrews DL. *Photonics, Volume 2. nanophotonic structures and materials*. johnwiley&sons, 2015.
6. Chen J, Hu Sh, Zhu Sh, Li T, *Metamaterials: From fundamental physics to intelligent design*. Wiley Interdisciplinary Materials. 2022;1–25. <https://doi.org/10.1002/idm2.12049>
7. Dolling G, Wegener M, Photorealistic images of objects in effective negative-index materials. *Opt. Express*. 2006;14(5):1842–1849. <https://doi.org/10.1364/oc.14.001842>.
8. William L B, Dereux A, Thomas W E. Surface plasmon subwavelength optics. *Natures*, 2003;424(6950):824–30. <https://doi.org/10.1038/nature01937>.
9. Wang L, Hasanzadeh Kafshgari M, Meunier M. Optical properties and applications of plasmonic-metal nanoparticles. *Adv Funct Mater*. 2020;30(51),2005400. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005400>.
10. Sato A. Surface plasmon fluorescence spectroscopy and optical waveguide fluorescence spectroscopy in limit of detection studies, [Master Thesis] Max Planck Institute for Polymer Research, Mainz, 2006.
11. Keusgen M. Biosensors: new approaches in drug discovery. *Naturwissenschaften*. 2002;89:433–444. <https://doi.org/10.1007/s00114-002-0358-3>.
12. Zeng Sh. Baillargeat D, Hod HP, Yong KT. Nanomaterials enhanced surface plasmon resonance for biological and chemical sensing applications, *Chem Soc Rev*. 2014;43,3426. <https://doi.org/10.1039/c3cs60479a>.
13. Abdulkarim YI, Abdulkarim YI, Bakır M, Yaşar İ, Ulutaş H, Karaaslan M, Alkurt FÖ, Sabah C, Dong J. Highly sensitive metamaterial-based microwave sensor for the application of milk and dairy products. *Appl Opt AO*. 2022; 61: 1972–1981. <http://doi.org/10.1364/AO.451900>.
14. Islam MR, Islam MT. Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application. *Sci Rep*. 2022;12:6792. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10729-4>.
15. Lin KT, Lin H, Yang, T. Structured graphene metamaterial selective absorbers for high efficiency and omnidirectional solar thermal energy conversion. *Nat Commun*. 2020;11:1389. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15116-z>.
16. Malen L, Fiser O, Stauffer PR., Drizdal T, Vrba J, Vrba D. Feasibility evaluation of metamaterial microwave sensors for non-invasive blood glucose monitoring, *sensors*. 2021;21:6871. <https://doi.org/10.3390/s21206871>.
17. Veselago VG. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*. 1968;10:509–514. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>.
18. Góra P, Lopato P. Metamaterials' application in sustainable technologies and an introduction to their influence on energy harvesting devices, *Appl Sci*. 2023;13:7742. <https://doi.org/10.3390/app13137742>
19. Rajni, Marwaha A. An accurate approach of mathematical modeling of srr and sr for metamaterials, *J Eng Sci Technol Rev*. 2016;9(6),82–86. <https://doi.org/10.25103/jestr.096.11>.
20. Pendry J, Schurig D, Smith D. Controlling electromagnetic fields. *Sci*. 2006;1780–1782. <https://doi.org/10.1126/science.1125907>.
21. Smith D, Pendry J, Wiltshire, M. Metamaterials and negative refractive index. *Sci*. 2004;305:788–792. <https://doi.org/10.1126/science.1096796>.
22. Bao G, Liu H, Zou J, Nearly cloaking the full Maxwell equations: Cloaking active contents with general

- conducting layers. *J Math Pures Appl.* 2014;101:716–733. <https://doi.org/10.1016/j.matpur.2013.10.010>.
23. Stefik M, Guldin S, Vignolini S, Wiesner U, Steiner U, Block copolymer self-assembly for nanophotonics, *Chem Soc Rev.* 2015. <https://doi.org/10.1039/c4cs00517a>.
24. Alvarez-Fernandez A, Cummins C, Saba M, Steiner U, Fleury G, Ponsinet V, Guldin S. Block copolymer directed metamaterials and metasurfaces for novel optical devices *Adv. Optical Mater.* 2021;9:2100175. <https://doi.org/10.1002/adom.202100175>.
25. Furusawa G, Kan T. Au nanospirals transferred onto pdms film exhibiting circular dichroism at visible wavelengths. *Micromachines.* 2020;11(7):641-649. <https://doi.org/10.3390/mi11070641>
26. Ke Wang, Seong Hun Park, Jintao Zhu, Jung Kyu Kim, Lianbin Zhang, and Gi-Ra Yi, Self-Assembled colloidal nanopatterns toward unnatural optical meta-materials, *Adv Funct Mater.* 2020,2008246. <http://doi.org/10.1002/adfm.202008246>.
27. Bergmair I, Dastmalchi B, Bergmair M, Saeed A, Hilber W, Hesser G, et al. Single and multilayer metamaterials fabricated by nanoimprint lithography. *Nanotechnol.* 2011;22:325301.2011. <http://doi.org/10.1088/0957-4484/22/32/325301>.
28. Chao J, Lin Y, Liu H, Wang Lianhui, Fan Ch. *Mater Today.* 2015;18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matod.2015.01.018>.
29. Muhlig S, Cunningham A, Dintinger J, Scharf T, Burger Th, Lederer Falk, et al. Self-assembled plasmonic metamaterials. *Nanophotonics.* 2013;2(3):211–240, <http://doi.org/10.1515/nanoph-2012-0036>.

How to cite this article:

Rasouli S. Metamaterials and invisibility, *Stud color world.* 2024;14(2):119-132. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.82000> [In Persian].