

## فرامواد (ماتریالها) و پدیده نامرئی شدگی

سوسن رسولی

مقاله مروری

JSCW-2310-1177

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲-۰۷-۳۰

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲-۱۲-۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲-۱۲-۰۸

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

س. رسولی، " فرامواد (ماتریالها) و پدیده نامرئی شدگی"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2310-1177، 1402. این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکتب مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

## فرامواد (متامتریالها) و پدیده نامرئی شدگی

سوسن رسولی

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

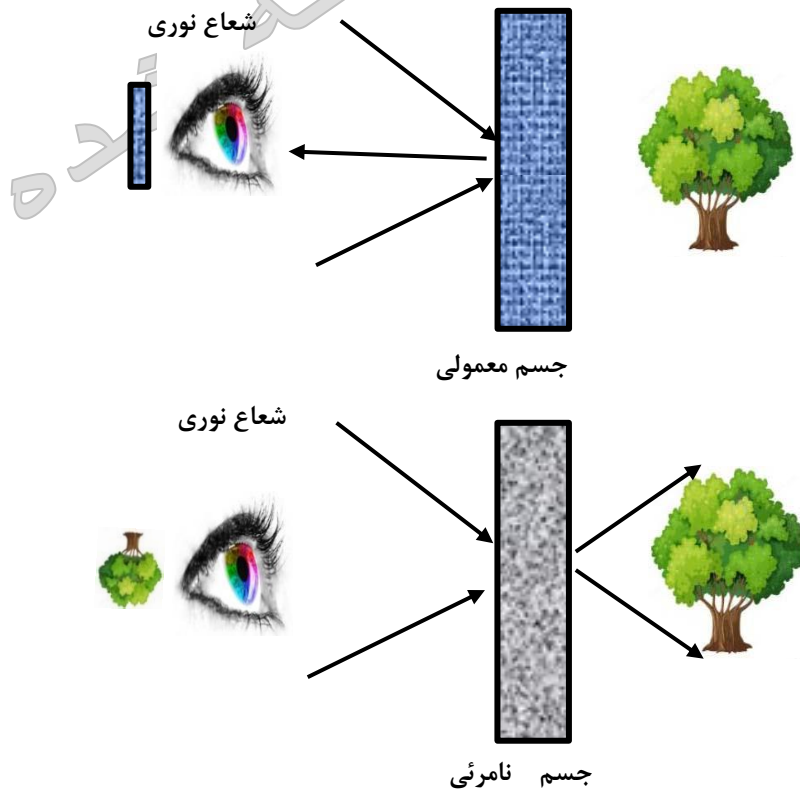
\* rasouli@icrc.ac.ir

### چکیده

نامرئی شدن یکی از آرزوهای دیرین بشر بوده که امروزه علوم بصری و نانومواد با پیشرفت های وسیع خود آنرا ممکن کرده است. این امر با استفاده از متامتریالها (فرامواد) امکان پذیر شده است. متامتریالها، 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 غیر شفاف برخورد می کند از آن بازتاب شده و به چشم بر می خورد، متامتریالها این رابطه دو طرفه نور و اشیاء را دچار تغییر و تحول می کنند بنحویکه 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 متامتریالها ارائه خواهد شد.

کلمات کلیدی: متامتریال، فرامواد، ضریب شکست، پلاسمون سطح، نامرئی شدگی.

### چکیده تصویری:



## Metamaterials and invisibility

Sousan Rasouli

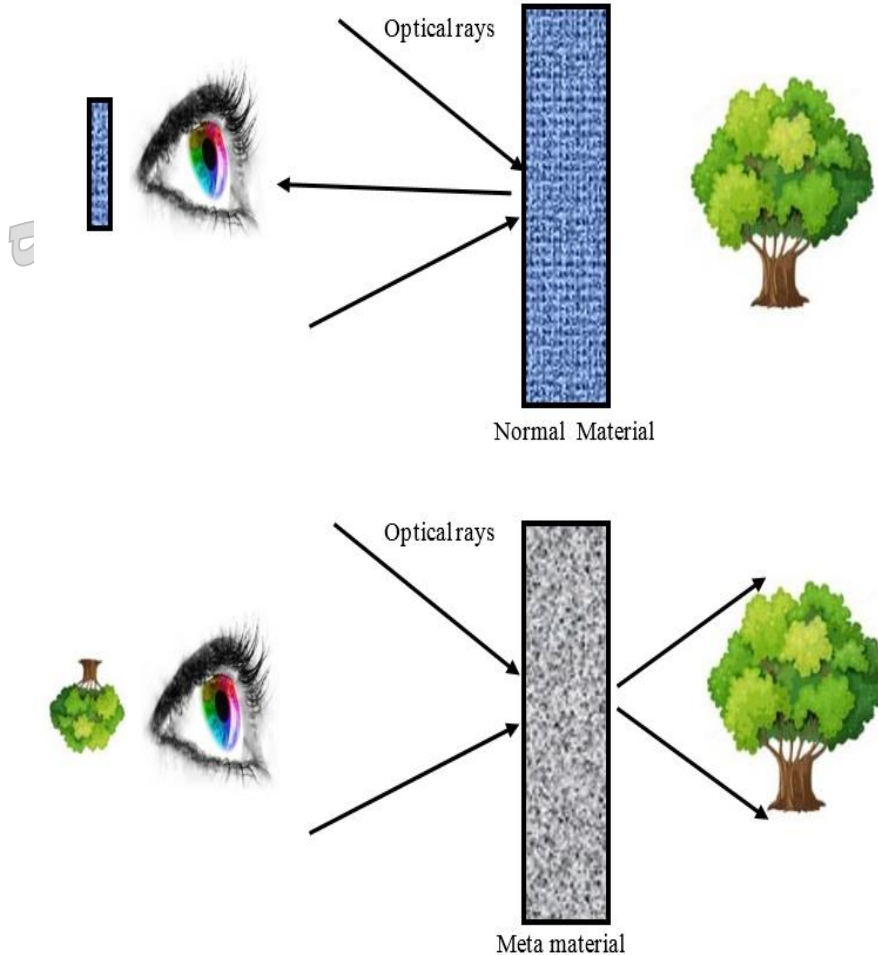
Department of Nanomaterial and Nanocoating, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran,  
P. O. Box: 167654-654.

\* rasouli@icrc.ac.ir

### Abstract

Invisibility, one of the aspirations of human beings, that the optics and materials have made it possible today. This is possible using metamaterials. 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 change and transform this two-way relationship between light and objects so that the light changes its direction around the object without being reflected and passes through it. In this case, because no light is visible, the object becomes invisible. . In this article, by using the principles of light physics and explaining the phenomena of light refraction and surface plasmon, general information about how objects become invisible and methods of preparing metamaterials will be presented.

**Keywords:** Metamaterials, refractive index, invisibility, surface plasmon



## ۱- مقدمه

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



شکل ۱: مثالهایی از شل نامرئی کننده (۱).

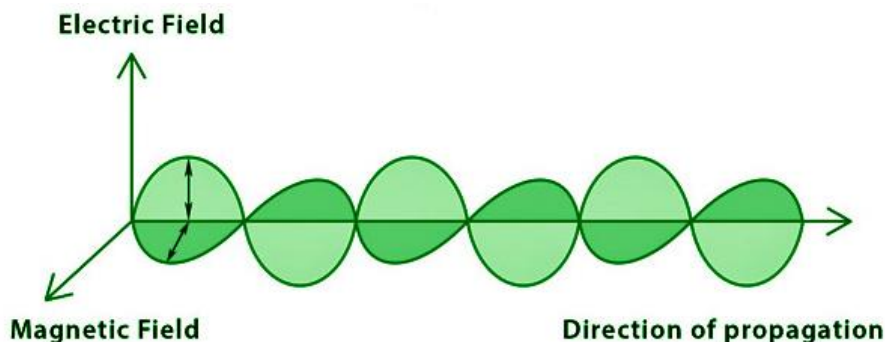
Figure 1: Examples of invisible cloaks [1].

امروزه علوم بصری با پیشرفت های وسیع، توانایی تحقق این آرزوی بشر را ممکن کرده است. این امر با استفاده متامتریالها (فرامواد) امکان پذیر شده است (۲). متامتریالها که در طبیعت یافت نشده و دارای خواص نوری ویژه ای از جمله ضریب شکست منفی هستند با دستکاری نور موجب پدیده نامرئی شدن می شوند. با توجه به اینکه مشاهده اجسام از طریق برخورد نور با چشم انسان رخ می دهد در نتیجه شناخت کاملی از نور و عوامل وابسته، در شناخت پدیده نامرئی کردن بسیار کارساز می باشد (۲). در این مقاله به تئوریهای مربوط به شناخت نور و شکست آن، ضریب شکست، متامتریالها (فرماد)، پدیده پلاسمون و ارتباط آنها با یکدیگر در بحث نامرئی کنندگی 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 متامتریالها فقط در محدوده ابعاد نانومتری مواد ایجاد می شوند.

## ۲- نور

### ۲-۱- امواج الکترومغناطیسی

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



شکل ۲: امواج الکترومغناطیسی (۳).

Figure 2: Electromagnetic waves [3].

# مقاله پذیرفته شده

نور در طبیعت، در طول موج های مختلف مشاهده می شود، 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 ۴۰۰nm تا ۷۰۰nm است (شکل ۲). نورهای با طول موج کمتر از ۴۰۰ نانومتر را اصطلاحاً ماوراء بنفش و نورهای با طول موج بیشتر از ۷۰۰ نانومتر را زیر قرمز می نامند. هرچه انرژی طول موجی کمتر باشد کمتر شکسته می شود (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 فرکانس بیشتر است و طبق فرمول، انرژی فوتون های نور انشتین  $E=nhf$  انرژی نیز بیشتر خواهد شد. به همین علت پرتوهای نوری بنفش، پر انرژی تر 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 می باشند (۳).

## ۲-۲- ضریب شکست:

هر ماده ای که با نور بر هم کنش داشته باشد، دارای ضریب شکست است. این پارامتر، 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 می کند. هر چه چگالی نوری محیط کمتر باشد، سرعت نور در داخل محیط بیشتر شده و ضریب شکست آن کاهش می یابد (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 می شود، زاویه انتشار آن نیز نسبت به زاویه اولیه برخورد با محیط فرق خواهد کرد که این تغییر زاویه منجر به شکست نور می شود. با اندازه گیری زاویه برخورد نور با محیط جدید و زاویه شکست می توان ضریب شکست را نیز محاسبه کرد (۴).

در علوم نوری ضریب شکست یک ماده به طور معمول به صورت رابطه ۱ تعریف می شود

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

در رابطه فوق  $c$  سرعت نور در خلا و  $v$  سرعت موج تخت الکترومغناطیسی در محیط است. با استفاده از معادلات ماکسول می توان نشان داد که ضریب شکست یک محیط به صورت زیر به گذردهی الکتریکی  $\epsilon$  و نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی  $\mu$  آن ماده مربوط می شود (رابطه ۲):

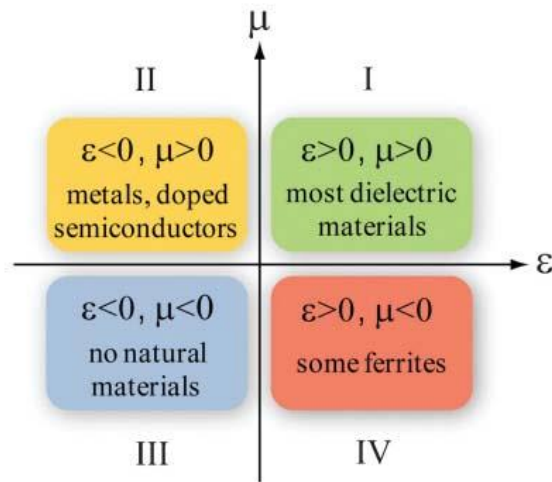
$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (2)$$

در این معادله هر گاه یکی از مولفه های گذردهی الکتریکی یا نفوذ پذیری مغناطیسی منفی باشد ضریب شکست منفی خواهد شد. اکثر فلزات براق در فرکانس های نوری گذردهی الکتریکی منفی دارند. اگر فلز را به صورت مجموعه ای از الکترون های آزاد در زمینه ای از بارهای مثبت در نظر بگیریم می توان نشان داد گذردهی الکتریکی فلز از رابطه ۳ حاصل می شود (۴):

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

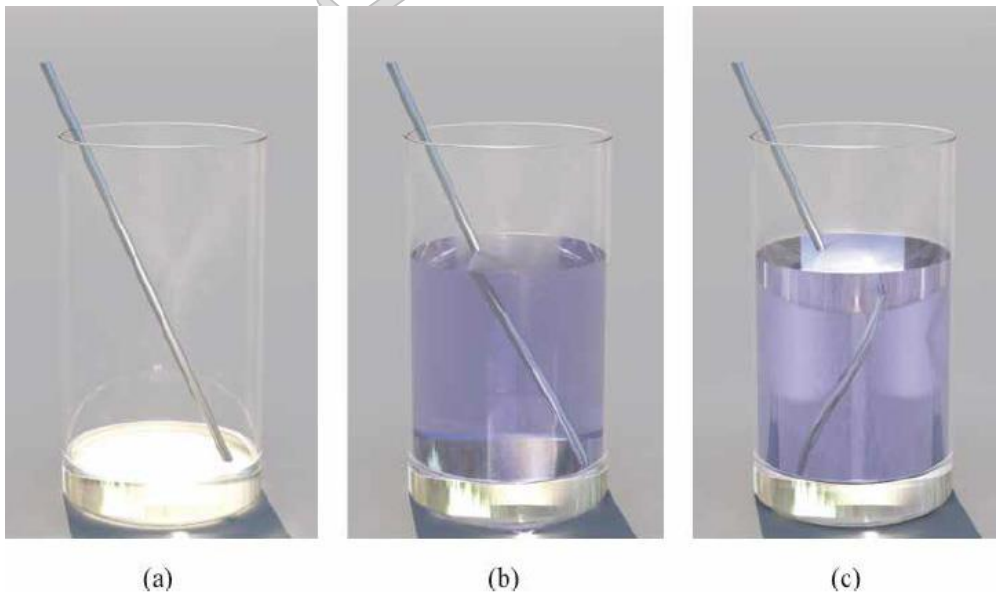
در رابطه ۳  $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}}$  فرکانس پلاسمای الکتریکی است که برای بیشتر فلزات در ناحیه فرابنفش قرار دارد. با توجه به رابطه فوق برای فرکانس های کمتر از فرکانس پلاسمون، گذردهی الکتریکی فلز منفی است. در مواجهه با میدان الکترومغناطیسی و با توجه به مثبت یا منفی بودن گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی منفی چهار حالت مختلف در مواد متصور می باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است (۶).

# مقاله پذیرفته شده



شکل ۳: حالت‌های مختلف گذردهی الکتریکی یا نفوذ پذیری مغناطیسی منفی (۶).  
Figure 3: Material classification in function of  $\epsilon$  and  $\mu$  [6].

متامتریالها (فرمواد) که بنام مواد چپگردان نیز شناخته می‌شوند (در مقابل مواد عادی که بنام راست گردان 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).

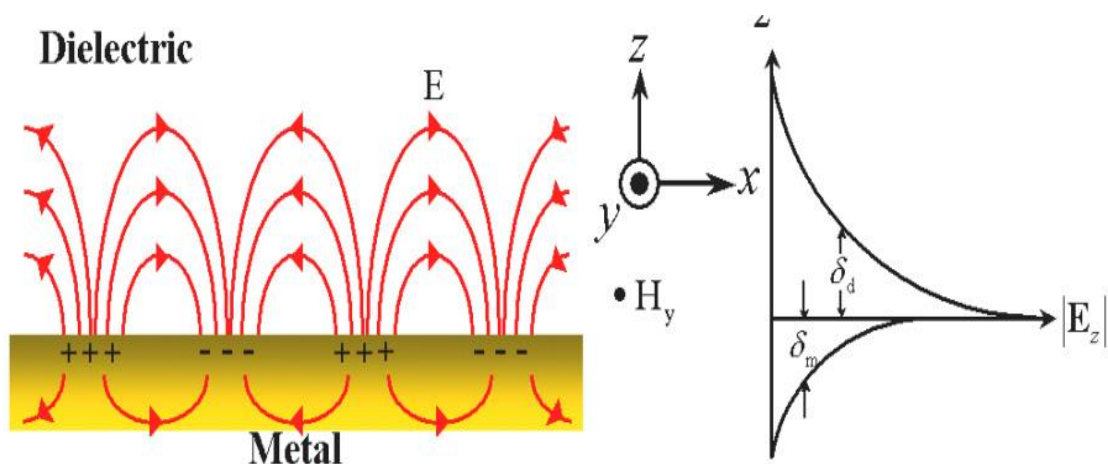


شکل ۴: تفاوت شکست نور در ماده ای با ضریب شکست منفی و ماده ای با ضریب شکست مثبت. ظرف وسط با اب معمولی با ضریب شکست مثبت پر شده و ظرف راست با ابی که ضریب شکست آن منهای ۱/۳ است پر شده است (۷).

**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].

## ۳-۲- پدیده پلاسمون سطحی

یک ساختار پلاسمون شامل یک هسته دی الکتریک و یک پوسته فلزی است. پلاسمون نوسانات جمعی الکترونها را هدایت فلز (در مرز هسته - پوسته دی الکتریک - 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 برای رخ می‌دهد و بنام بسامد پلاسمای می‌باشد. پدیده پلاسمون دلیل براقت سطح برخی فلزات صیقلی بوده و نقش عمده ای در خواص نوری فلزات ایفا می‌کند (شکل ۵) (۱۰).



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].

اگر بسامد نوری که به فلز برخورد می‌کند کمتر از بسامد پلاسمای باشد بازتاب می‌شود، زیرا الکترون‌های فلز سپر میدان الکتریکی نور می‌شوند. چنانچه بسامد نور بالاتر از بسامد پلاسمای 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 ماورای بنفش 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 آنگاه پدیده تشدید پلاسمون سطحی<sup>۱</sup> (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 دی الکتریک محیط و فلز می‌باشد. تغییرات اندک در دی الکتریک 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).

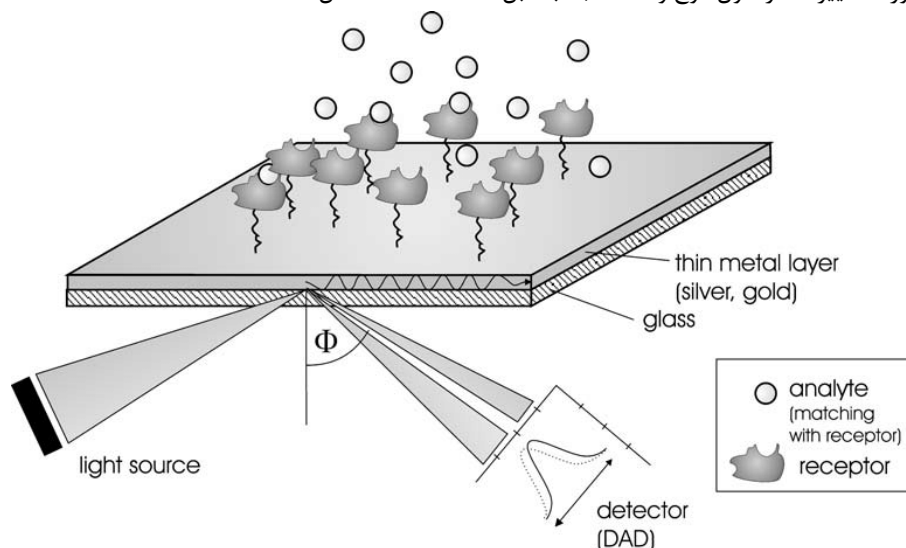
## ۴-۲- کاربردهای پدیده پلاسمون سطحی

پدیده تشدید پلاسمون سطحی، برانگیختگی جمعی الکترونها را آزاد فصل مشترک فلز و دی الکتریک می‌باشد. این برانگیختگی ناشی از برهمکنش امواج الکترومغناطیس در ناحیه مرئی با الکترونها را آزاد 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

<sup>1</sup> Surface Plasmon Resonance (SPR)

# مقاله پذیرفته شده

علوم پزشکی است. با تغییر اندازه ذرات و نیز ضخامت پوسته فلزی طول موج نوری که در آن پلاسمون و تشدید نور اتفاق می افتد تغییر پیدا می کند. 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 بیومولکول‌ها به صورت تغییرات در طول موج و شدت جذب قابل مشاهده است (شکل ۶) (۱۱).



شکل ۶: اندرکنش ماده مورد آنالیز و نور تابیده شده توسط گیرنده آنالیز شده 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].

این تغییرات در حضور بیومولکول‌ها قابل کالیبراسیون غلظت بیومولکول مورد آزمایش می‌باشد. مهمترین کاربردهای فناوری تشدید پلاسمون سطحی در تشخیص بیومارکرها در تشخیص سرطان، تشخیص واکنش‌های بیومولکولی در داروسازی، تشخیص ویروس، باکتری و سموم بیولوژی، تشخیص آلاینده‌های هوا، مونواکسید کربن و ترکیبات گوگردار، تشخیص مواد مخدر و دوپینگ و تعیین گلوکز در تشخیص بیماری‌های دیابت دارند (۱۶-۱۲).

## ۳- متامتریالها (فرا مواد)

### 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 ( $\mu$ ) منفی و گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ ) 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 ( $\epsilon$ ) و نفوذ پذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) منفی، در گستره‌ای از فرکانس‌ها امکان پذیر شده است. مفهوم ضریب شکست منفی با ایجاد مفاهیم جالب و جدید، علوم بصری را گسترش داده است. یک مثال جالب، بحث عدسی کامل است که امکان تصویرسازی با ابعاد زیر طول موج را فراهم می‌کند.

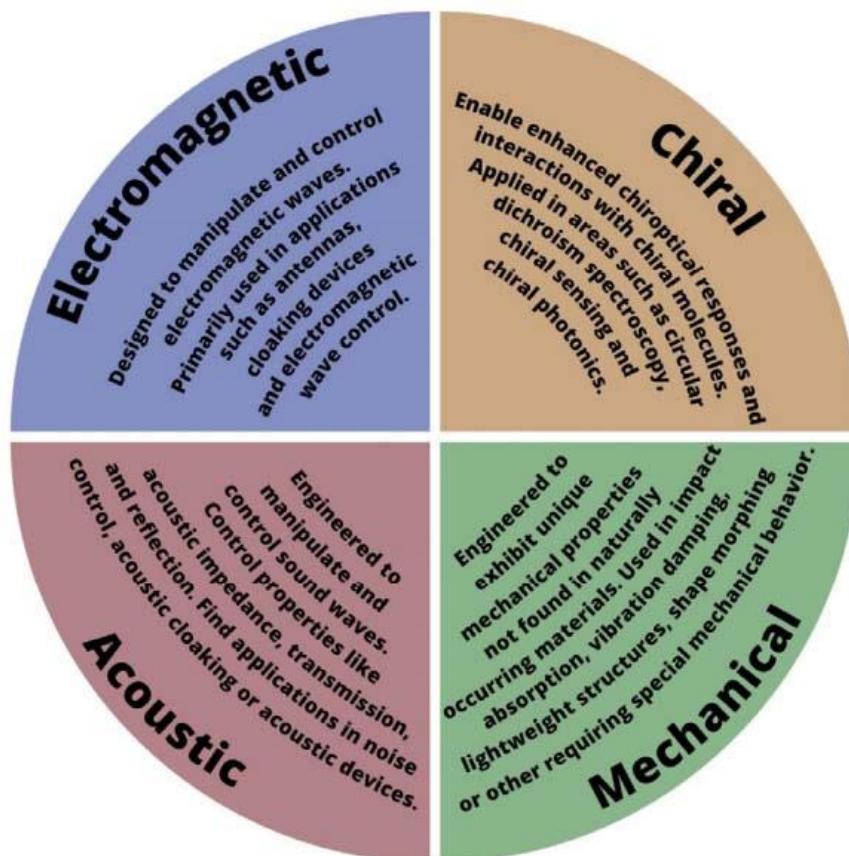
امواج الکترومغناطیسی از دو مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی تشکیل شده‌اند که میدان الکتریکی صرفاً با حضور بار الکتریکی در محل ایجاد می‌شود، اما میدان مغناطیسی از بارهای الکتریکی یا جریان الکتریکی القا می‌شود. یکی از مشخصه‌های نور که علت برخی پدیده‌های نوری مانند شکست نور را توضیح می‌دهد، سرعت نور 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 متامتریالها

متامتریالها در دو دسته مرتعش شونده<sup>۱</sup> و غیر مرتعش شونده<sup>۲</sup> قرار می گیرند. متامتریالهای مرتعش شونده شامل مواد چپگردان و با ضریب شکست کمتر از یک بوده در حالیکه متامتریالهای غیر مرتعش شونده شامل مواد همسانگرد<sup>۳</sup> و مواد هذلولی<sup>۴</sup> می باشند. در متامتریالهای مرتعش شونده اندازه ساختارهای تشکیل دهنده یک دهم طول موج نور برخورد کننده بوده و جریان های نوسانی از مدل تشدید اتمی پیروی می کنند. در متامتریالهای غیر مرتعش شونده اندازه ساختارهای تشکیل دهنده بسیار کمتر از اندازه طول موج نور برخورد کننده است. در فرامواد غیر رزونانسی هیچ جریانی نوسان نمی کند یا موجی پراکنده نمی شود، به علاوه اغماض بیشتری در برابر تغییر شکل های ساختاری در آنها مشاهده می شود.

در شکل ۷ چهار گروه مشخص از متامتریالها بر اساس نوع کاربرد نمایش داده می شود (۱۸).



شکل ۷: چهار گروه مختلف متامتریالها (۱۸).

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

## ۳-۳- متامتریالهای پلاسمونیک

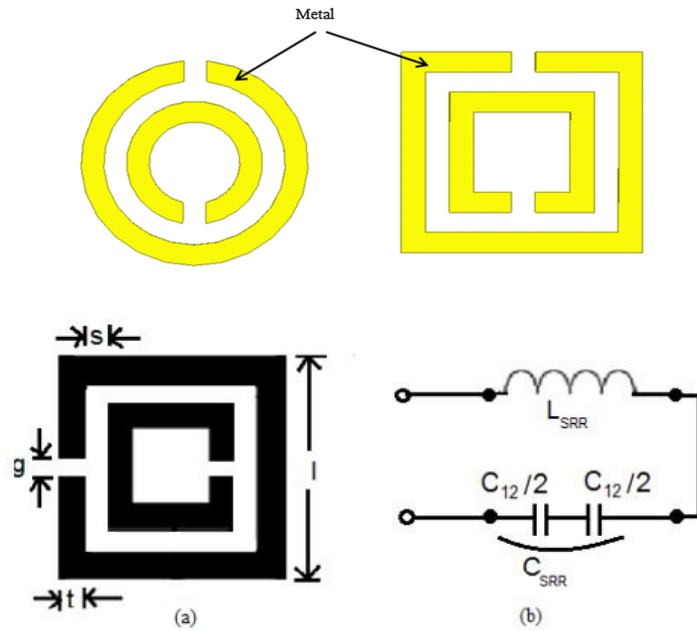
متامتریالهای پلاسمونیک خواص استثنائی نوری خود را نه به واسطه ی ساختار عنصری یا شیمیائی بلکه به واسطه ی شکل منظم و تکرار شده ی واحدهای ساختمانی خود کسب می کنند. در واقع، مطالعه بر روی خواص ویژه نوری متامتریالها با بررسی تشدید کننده های حلقه ای (split-ring resonators SRRs) آغاز شد که اگر با یک بخش الکتریکی هماهنگ شوند در نتیجه با تشدید شدن در یک فرکانس ویژه نوعی مغناطیس ساختگی در آنها ایجاد می شود. در یک تشدید کننده، دو حلقه ی باز در درون هم وجود دارد که حلقه دومی دارای یک شکافی است که در مقابل شکاف حلقه اول قرار می گیرد. تشدید کننده های حلقه ای میتوانند مربع یا دایره ای باشند. شکل ۸ انواع تشدید کننده های حلقه ای و یک تشدید کننده و مدار معادل آن را نشان می دهد (۱۹).

<sup>1</sup> Resonant

<sup>2</sup> Non resonant

<sup>3</sup> Anisotropic

<sup>4</sup> Hyperbolic



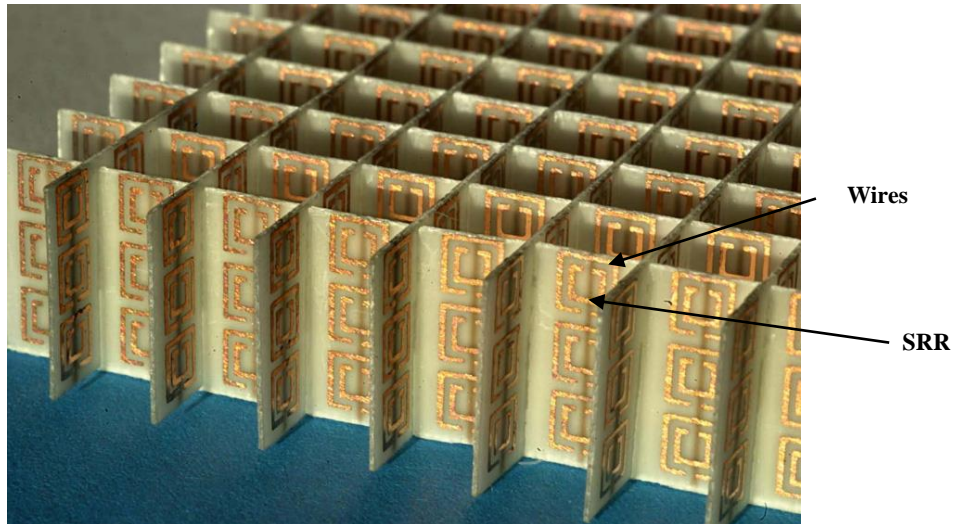
شکل ۸: (بالا) دو نوع تشدید کننده حلقه ای و مربعی، (پائین) ساختار تشدید کننده های حلقه ای (split-ring resonators  $SRR_s$ ) و مدار معادل آن (۱۹).

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

این نوع ساختار موجب به وجود آمدن یک توان الکتریکی می شود که از یک طرف باعث کاهش بسامد رزونانس شده و از طرف دیگر باعث افزایش شدت میدان الکتریکی اولیه می گردد. بطور ساده می توان گفت هنگامیکه این سلول اولیه به طور منظم تکرار شود موجب ایجاد جفت شدگی مغناطیسی تقویت شده بین واحدها و در نتیجه منجر به یک میدان جفت شده ی مغناطیسی بزرگی می شود. این شرایط منجر به ایجاد شرایطی غیر طبیعی از جمله نفوذ پذیری مغناطیسی منفی می شود.

دارا بودن ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) منفی و ضریب گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ ) 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 می توانند دارای چنین شرطی باشند. اما دستیابی به ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی منفی و بطور همزمان با ضریب گذردهی الکتریکی منفی امری بسیار مشکل بوده و در حالت طبیعی هیچ ماده ای نمی تواند چنین خاصیتی داشته باشد. در حالت کلی، خواص فیزیکی مواد موجب ایجاد محدودیتهایی در مواد می شود. به عنوان مثال، فلزات صیقلی ضریب گذردهی الکتریکی منفی را در بسامدهای نوری مشخصی از خود نشان می دهند. پندری و همکارانش نشان دادند که اگر ذرات فلزی به شکل میله ای باشند بسامد ارتعاش آنها در محدوده ی امواج ماکروویو قرار می گیرد و در این فرکانس برخی مواد فرومغناطیسی می توانند ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی منفی هم داشته باشند. اما از نظر کاربردی مشکل اصلی، ایجاد ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی منفی در ناحیه تراهرتز (نزدیک امواج ماکروویو) است (۲۰).

دانشمندان دریافته اند که سیستمی شامل یک دی الکتریک 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 می گردد. اگر بخواهیم این ساختار در تمامی جهات دارای خاصیت دستکاری نور باشد بایستی این ساختارهای منظم به صورت سه بعدی قرار گیرند. در شکل ۹ ساختار ایده آل یک سیستم سه بعدی برای ایجاد ضریب شکست منفی در تمامی جهات نشان داده شده است (۲۱).



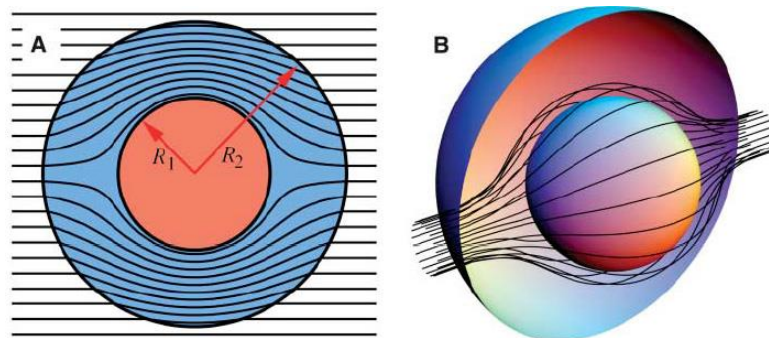
شکل ۹: آرایش سه بعدی ساختارهای SRR تشکیل شده از واحدهای منظم تشدید کننده های حلقوی به روش لیتوگرافی (چاپ سنگی) (۲۱).  
**Figure 9:** A negative index metamaterial formed by SRRs and wires deposited on opposite side lithographically on standard circuit board [21].

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

در "فرا مواد پلاسمونیک" سطوح پلاسمونیک ایجاد می شوند. سطوح پلاسمونیک موقعی در سطح فلزات ایجاد می شوند که نور (با یک طول موج و انرژی مشخص) با الکترونهاى آزاد واقع در سطح فلز اندرکنش داده و این عمل منجر به ایجاد میدان الکترومغناطیسی ثانویه ای (علاوه بر بردار مغناطیسی نور) می شود که در طول مسیر سطح تماس فلز-دی الکتریک حرکت می کند. این میدان ثانویه موجب پلاریزه کردن موقت لایه دی الکتریک می شود (۲۱).

#### ۴- اساس و تئوری نامرئی کردن

یک وسیله نامرئی کننده با دستکاری کردن امواج الکترومغناطیس نور (انتقال نور) موجب می شود که شیئی مربوطه به طور موقت قابل دیده شدن نباشد. مهمترین رویکرد در نامرئی کردن، که امروزه بسیار مورد توجه است، با استفاده از متامتریالها انجام می شود. متامتریالها که در مقیاس نانومتری هستند دارای ضریب شکست منفی بوده و با تاثیر گذاری بر روند گسترش نور در ماده می توانند در تهیه وسایل و پوششهای نامرئی کننده کاربرد داشته باشند. در واقع امواج الکترومغناطیس نور (که موجب دیده شدن اشیاء می شوند) یک رابطه متقابل و دو طرفه با اشیاء دارند. متامتریالها، این رابطه دو طرفه را در یک محدوده ی خاصی از امواج الکترومغناطیس دچار تغییر و تحول می کنند. این تغییر موجب می شود 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 می کنند (۲۰).



شکل ۱۰: مسیر شعاعهای نور در برخورد با جسم نامرئی شونده. الف) نمای ۲ بعدی و ب) نمای ۳ بعدی (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].

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، امواج نور پس از عبور از فرامواد خم شده اند. خمش نور می تواند با ترفندهای نوری متنوعی ایجاد شود که برخی از آنها به صورت طبیعی اتفاق می افتد مانند سراب در بیابان. در سراب پرتوهای نور خم شده و به جای زمین به سمت آسمان منعکس می شوند و در نتیجه زمین در زاویه های مشخصی نامرئی به نظر می رسد. ولی برای ساختن یک دستگاه نامرئی کننده 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 نامرئی کننده نور باید به اطراف شی هدایت شود تا برای ناظر این طور به نظر برسد که هیچ شی در آنجا نیست (۲۰).

مبنای این وسیله بر معادلات ماکسول، که در همه مختصات یکسانند، پایه گذاری شده و انتقال مختصات فقط مقادیر گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی را تغییر می دهد. و با انتخاب بردارهای آن دو، می توان سیستم های مختصات مختلف مانند حفره را شبیه سازی کرد (شکل ۱۰). حفره جایی از فضاست که برای امواج الکترو مغناطیس 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 می شود که جسم مورد نظر به طور موقت قابل دیده شدن نباشد (۲۲).

تهیه یک ساختار پلاسمونیک (شامل فلز-دی الکتریک) توسط نوری که بسامد آن با بسامد تشدید ساختار پلاسمونیک همخوانی دارد موجب می شود که ضریب شکست ساختار مانند هوا می شود. یعنی نور را نه خم می کند و نه بازتاب می دهد بلکه نور از آن عبور می کند. اگرچه این ساختار پلاسمونیک مقداری از نور را جذب می کند 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)

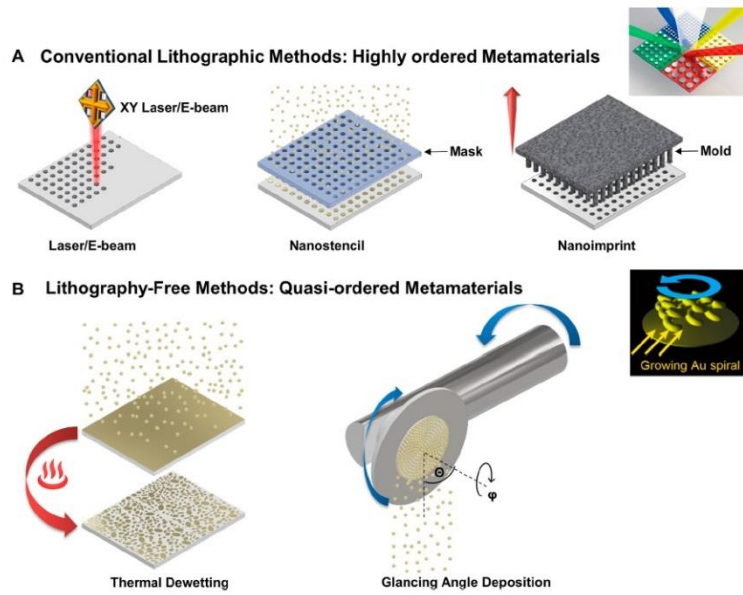
تهیه واقعی موادی با ضریب شکست منفی تنها در سال ۲۰۰۰ بود که محقق شد که در آن یک گروه از محققین دانشگاه برکلی با استفاده از تجهیزات بسیار پیچیده توانستند برای نخستین بار آن هم در مقیاس میلی متری یک ساختار کامپوزیتی را تهیه کنند که دارای ضریب شکست منفی در محدوده امواج ماکروویو بود (۲۱). بطور کلی دو رویکرد اصلی برای تهیه فرامواد وجود دارد که شامل روش های بر پایه لیتوگرافی (چاپ سنگی) و روشهای غیر لیتوگرافی مطرح هستند. روش های بر پایه لیتوگرافی پیچیده به عنوان رویکرد از بالا به پائین شناخته شده و در آن با تکنیکهای نوشتاری مستقیم قادر به تهیه نانو ساختارهای پلاسمونیک با اشکال فضائی کنترل شده شگفت انگیزی هستند. این روش هم بسیار هزینه بر بوده و هم اینکه امکان تولید این مواد در مقیاس زیاد وجود ندارد. از سالهای ۲۰۰۵ رویکرد غیر لیتوگرافی یا روش از پائین به بالا برای ایجاد مواد پلاسمونیک مورد توجه قرار گرفته است که به نام روش خودسامانی یا خود آرائی نیز شناخته شده هستند (۲۳-۲۴). روشهای خود آرائی بر خلاف روشهای از بالا به پائین می توانند به طور همزمان در حجم وسیعی به اجرا گذاشته شوند و معمولاً بر پایه محلول قابل انطباق می باشند. نانوذرات معدنی (غیر آلی) بلوکهای اولیه ایده آلی برای ساخت مواد با راهکار پایین به بالا هستند و به تازگی برای خودسامانی کلوئیدهای نانوذرات فلزی برای تهیه مواد پلاسمونیک مورد استفاده قرار گرفته اند. این استراتژی تهیه مواد پلاسمونیک کارآمد و موثر است زیرا مرتب کردن نانوذرات در یک فرم خاص می تواند برای کارکردهای نوری ویژه مهندسی شود. شکل زیر دو روش عمده برای تهیه ماتریالهای پلاسمونیک را مقایسه می کند (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 ایمپرنت، لیتوگرافی کلوئیدی ماسک حفره ای با لایه نشانی غیر طبیعی می باشد. شکل ۱۲ این روشها را نشان می دهد (۲۶).

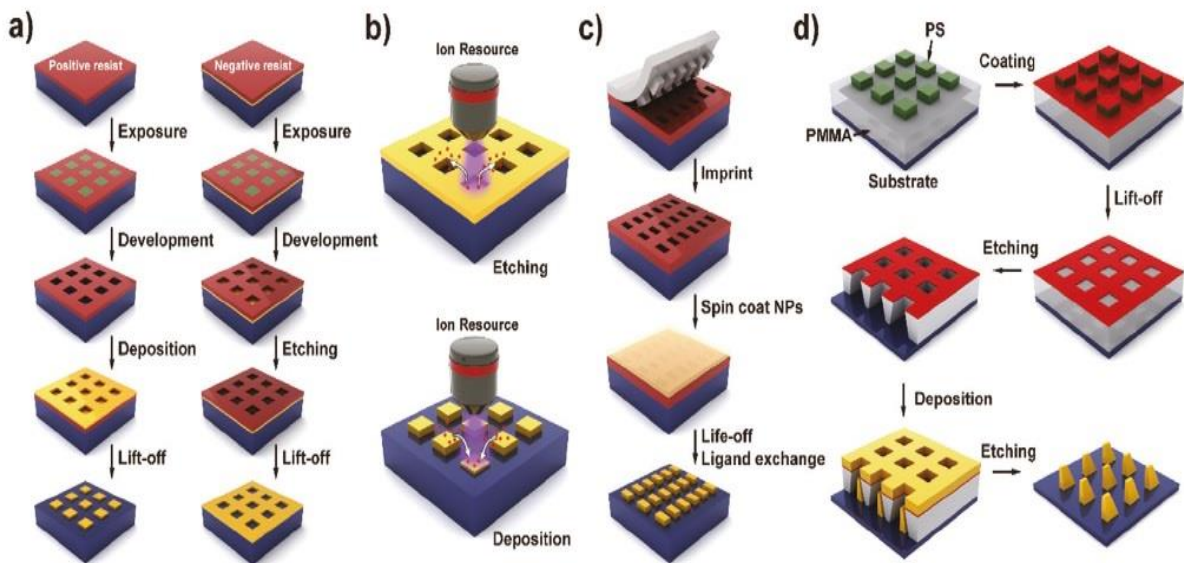
از مزایای روشهای لیتوگرافی به دقت بسیار بالای آن می توان اشاره کرد ولی از آنجا که بسیار هزینه بر هستند امکان تهیه در مقیاس بالا را ندارند. روشهای از پائین به بالا دقت کمتری دارند ولی کم هزینه تر و قابل توسعه تر هستند (۲۷).

در روشهای بر پایه خود سامانی 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 دسته های منظم است. در حالیکه خودسامانی توانسته موجبات تسریع ساخت مواد پلاسمونیک مهندسی شده را فراهم کند اما باید توجه زیادی بر سمت جابجائی، جهت گیری و ظرفیت دار کردن نانوذرات معطوف شود (۲۸).

شکل (۱۱) مقایسه روشهای بر پایه لیتوگرافی و خود سامانی را به نمایش می گذارد.



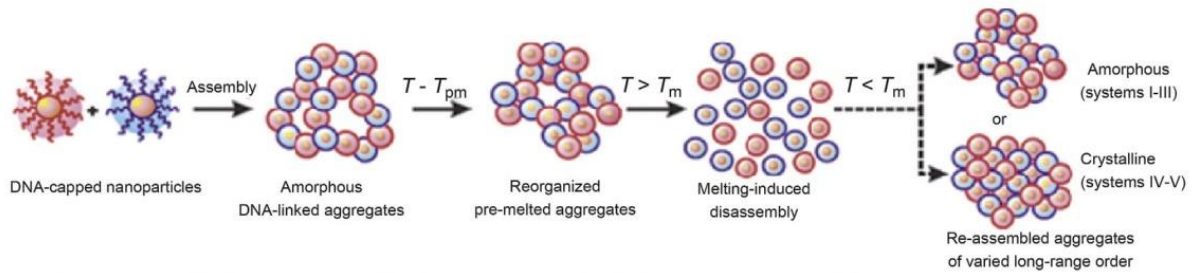
شکل ۱۱: نمای کلی مقایسه دو روش تهیه متامتریالهای منظم با روش لیتوگرافی (A) و تقریباً منظم با روش خود سامانی (B) (۲۵).  
**Figure 11:** (A) Schematic diagram representing different conventional lithographic methods from left to right: Laser/E-beam lithography, nanostencil lithography, and nanoimprint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



شکل ۱۲: روشهای مختلف انجام لیتوگرافی (چاپ سنگی) (a) لیتوگرافی پرتو الکترونی (b) پرتو یون متمرکز (c) لیتوگرافی نانو ایمپرننت (d) لیتوگرافی کلوئیدی ماسک حفره ای با لایه نشانی غیر طبیعی (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].

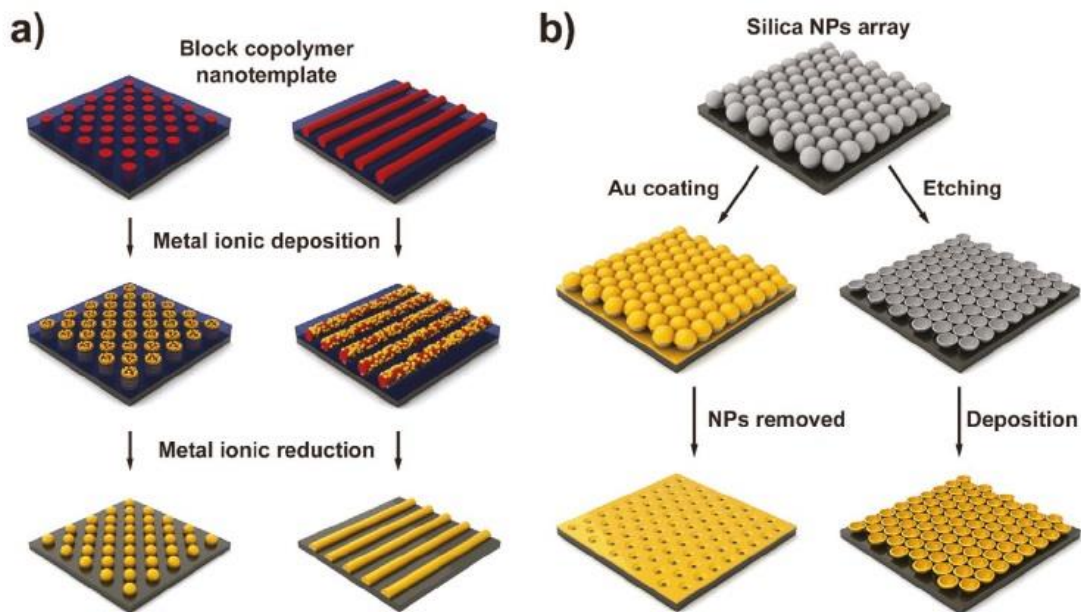
راهبرد های مختلفی برای خودسامانی قابل برنامه ریزی از طریق تغییر شیمیایی نانوذرات به مورد اجرا گذاشته شده اند از جمله به استفاده از رابطهای DNA، پلیمرهای گرفت شده یا روشهای پیچیده ی عامل دار کردن سطح اشاره کرد (۲۸-۲۶). در هر حال، این متدها معمولاً کنترل اندکی بر جهت گیری نسبی بین نانوذرات داشته و مشکل انطباق بین بلوکهای ذرات را مطرح می کند. استراتژی های خود سامانی ایده آل باید موجب تسریع ساخت ساختارها در مقیاس وسیع و یا تهیه فیلمها بشوند به نحویکه بتواند به راحتی وارد طراحی تجهیزات نوری موجود شوند. شکل ۱۳ نمای کلی تهیه ناوذرات آراینده شده با استفاده از DNA را به نمایش می گذارد (۲۸).



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].

یکی از کاربردی ترین روشهای تهیه واحدهای تکرار شونده متامتریالهای پلاسمونیک خودسامانی ردیفهای نانوذرات پلاسمونیک در بلوک کوپلیمرها یا مخلوطهای پلیمری-نانوذرات است که در آن نانوذرات با شکلهای مشخص روی رشته های پلیمری که با بستر پلیمری غیر قابل امتزاج هستند اتصال داده می شوند. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است واحدهای نقاط مغناطیسی با ابعاد نانومتری در یک ماتریکس پلیمری با اشکال نواری یا ذره ای سامان دهی شده اند (۲۹). همانطور که از شکل ۱۴ بر می آید در هر دو حالت خود سامانی واحدهای نقاط مغناطیسی با دقت بسیار بالایی در نوارهای مورد نظر آراشیده شده اند.



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

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

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده نامرئی شدن مورد بررسی قرار گرفت که بر اساس علوم نوری و نانومواد قرار دارد. اساس نامرئی شدن بر استفاده از فرامواد (متامتریالها) قرار دارد. این ساختارهای طراحی شده دارای خواص الکترومغناطیسی استثنائی هستند که محدودیت های مواد معمولی را به چالش می کشند. متامتریالها در طبیعت یافت نشده و دارای خواص نوری ویژه ای از جمله ضریب شکست منفی هستند و محققین از طریق طراحی و چیدمان دقیق نانوساختارها، این فرامواد را برای انحراف و کنترل نور تنظیم کرده و نور را به اطراف جسم هدایت می کنند بنحویکه برای مشاهده گر نامرئی شود. در واقع، امواج الکترومغناطیس نور یک رابطه متقابل و دو طرفه با اشیاء دارند.

متامتریالها، این رابطه دو طرفه را در یک محدوده ی خاصی از امواج الکترومغناطیس دچار تغییر و تحول می کنند. این تغییر موجب می شود که نور بدون اینکه منعکس شود در اطراف ماده تغییر جهت داده و از اطراف آن عبور کند. دانشمندان دریافته اند که ساختارهای پلاسمونیک شامل یک دی الکتریک و یک فلز (طلا و نقره) اگر به صورت ساختارهای بسیار کوچک و منظم تکرار شوند باشد می تواند مانند یک تشدید کننده حلقه ای 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 می شود که ضریب شکست ساختار مانند هوا می شود. یعنی نور را نه خم می کند و نه بازتاب می دهد بلکه نور از آن عبور می کند. مهمترین روشهای تهیه فرامواد پلاسمونیک شامل روشهای بر پایه لیتوگرافی (چاپ سنگی) و روشهای غیر لیتوگرافی می باشند. 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 ایمپرنت، لیتوگرافی کلونیدی ماسک حفره ای با لایه نشانی غیر طبیعی می باشد. این رویکرد هم بسیار هزینه بر بوده و هم اینکه امکان تولید متامتریالها در مقیاس زیاد وجود ندارد. رویکرد غیر لیتوگرافی که به نام روش خودسامانی یا خود آرائی نیز شناخته شده است بر خلاف روشهای از بالا به پایین می تواند به طور همزمان در حجم وسیعی به اجرا گذاشته شود. چالش مهم در این رویکرد منظم کردن واحدهای اولیه از نانوذرات پلاسمونیک است که آن را با استفاده از عامل دار کرده ذرات، پیوند DNA بر روی ذرات و یا استفاده از یک بستر پلیمری حل کرده اند.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## ۷- منابع

1. Metamaterials based optical cloaks that promise invisible planes, vehicles and armies, and protection from earthquakes & tsunamis, 2018 Available from: <https://idstch.com>.
2. W. Cai, U.K. Chettiar, A.V. Kildishev, V.M. ShalaeV, Optical cloaking with metamaterials, Nature Photonics. 2007;1:224-227. <https://doi.org/10.1016/j.cphy.2009.01.002>.
3. David H. Stealin, Ann W. Morgenthaler, Jin Au Kong, Electromagnetic waves, Published by Pearson (edition First Edition), 1993.
4. Rupali Sethi, Refractive Index and it's Application, LAP Lambert Academic Publishing, 2018.
5. Andrews, David L. Photonics, Volume 2. Nanophotonic Structures and Materials. JohnWiley&Sons, 2015.
6. Ji Chen, Shanshan Hu, Shining Zhu, Tao Li1, Metamaterials: From fundamental physics to intelligent design, Wily Interdisciplinary Materials. 2022;1-25. <https://doi.org/10.1002/idm2.12049>
7. Gunnar Dolling and Martin Wegener, 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. Barnes, William L.; Dereux, Alain; Ebbesen, Thomas W. Surface plasmon subwavelength optics .Natures, 2003; 424(6950):824-30. <https://doi.org/10.1038/nature01937>.
9. Lu Wang, Morteza Hasanzadeh Kafshgari, and Michel Meunier, Optical Properties and Applications of Plasmonic-Metal Nanoparticles, Adv Funct Mater. 2020,30(51),2005400. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005400>.
10. Akihiro Sato, 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. Michael Keusgen, Biosensors: new approaches in drug discovery, Naturwissenschaften. 2002;89:433-444. <https://doi.org/10.1007/s00114-002-0358-3>.
12. Shuwen Zeng,a Dominique Baillargeat,c Ho-Pui Hod and Ken-Tye Yong, Nanomaterials enhanced surface plasmon resonance for biological and chemical sensing applications, Chem Soc Rev. 2014,43,3426. <https://doi.org/10.1039/c3cs60479a>.
13. Y.I. Abdulkarim, Y.I. Abdulkarim, M. Bakır, İ. Yaşar, H. Ulutaş, M. Karaaslan, F.Ö. Alkurt, C. Sabah, J. Dong, 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, M.R., Islam, M.T., M., M.S.*et al.* 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, K.T., Lin, H., Yang, T.*et al.* 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. Lukas Malen , Ondrej Fiser, Paul R. Stauffer, Tomas Drizdal, Jan Vrba and David Vrba, Feasibility Evaluation of Metamaterial Microwave Sensors for Non-Invasive Blood Glucose Monitoring, *Sensors.* 2021;21:6871. <https://doi.org/10.3390/s21206871>.
17. Veselago V. G. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Sov Phys Usp.* 1968;10:509–514. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>.
18. Paulina Góra and Przemysław Łopato, 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. Rajni1, and Anupma Marwaha, 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. Gang Bao, Hongyu Liu, Jun Zou, 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. Morgan Stefik, Stefan Guldin, Silvia Vignolini, Ulrich Wiesnerd and Ullrich Steinere, Block copolymer self-assembly for nanophotonics, *Chem Soc Rev.*2015. <https://doi.org/DOI: 10.1039/c4cs00517a>.
24. Alberto Alvarez-Fernandez, Cian Cummins, Matthias Saba, Ullrich Steiner, Guillaume Fleury, Virginie Ponsinet, and Stefan Guldin, 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. I Bergmair, B Dastmalchi, M Bergmair, A Saeed , W Hilber, G Hesser, C Helgert, E Pshenay-Severin, T Pertsch, E B Kley, U Hubner, N H Shen, R Penciu, M Kafesaki, C M Soukoulis6, K Hingerl, M Muehlberger and R Schoeftner. 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.mattod.2015.01.018>.
29. Muhlig S, Cunningham A, Dintinger J, Scharf T, Bu rgi Th. Falk Lederer and Carsten Rockstuhl, Self-assembled plasmonic metamaterials. *Nanophotonics.* 2013;2(3):211–240, <http://doi.org/10.1515/nanoph-2012-0036>.