بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

# غیرخطیت مرتبه دوم موثر تقویت شده در اثر تشدید پلاسمونیکی نانو سیم طلا

رعنا عسگری ثابت[۱]، حبیب خوش سیما[۱]، عبدالرحمان نامدار[۲]، وحید احمدی[۳]

[۱] پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

[۳] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

**چکیده – نانو سیم طلا با سطح مقطع مربعی شکل برای تقویت غیرخطیت مرتبه دوم دی الکتریک دربرگیرنده آن مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که تشدید پلاسمونیکی ساختار مورد نظر در طول موج $1/5\ \mu m$ رخ داده و منجر به جایگزیده شدن انرژی الکترومغناطیسی در دو انتهای نانو سیم می شود. درجه جایگزیدگی مرتبه دوم میدان الکتریکی برای سلول واحد مورد نظر محاسبه شده است. برای بدست آوردن دامنه میدان های هارمونیک دوم عبوری و انعکاسی از سلول واحد شامل نانو میله احاطه شده توسط دی الکتریکی با غیرخطیت مرتبه دوم، از روش شبیه سازی المان محدود حوزه زمان استفاده شده است. به این منظور از مدل درود حوزه زمان استفاده شده است. پذیرفتاری الکتریکی موثر برای ساختار مورد نظر به روش بازیابی غیرخطی محاسبه گردیده است.**

کلید واژه- تشدید پلاسمونیک، جایگزیدگی میدان الکتریکی، پذیرفتاری الکتریکی موثر، غیرخطیت افزایش یافته

# Enhanced effective second-order nonlinearity due to the plasmonic resonance of the gold nano wire

Rana Asgari Sabet[1], Habib Khoshsima[1], Abdolrahman Namdar[2], Vahid Ahmadi[3]

[1] Research institute for applied physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz

[2]Faculty of physics, University of Tabriz, Tabriz

[3]Faculty of electrical and computer engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

Abstract- A golden nanowire with square cross section is used to enhance the second-order nonlinearity of the embedding nonlinear dielectric. Simulation results using the finite element based software reveal that the plasmonic resonance of the considered structure occurs in the wavelength 1.5 μm. Second-order localization factor is obtained for the considered structure. To obtain the amplitude of the transmitted and reflected second-harmonic fields, finite element time domain simulation is used. Drude model in time domain is applied in these simulations. The effective electric susceptibility is retrieved using nonlinear retrieval method.

Keywords: Plasmonic resonance, electric field localization, effective susceptibility, enhanced nonlinearity



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۱- مقدمه

پیشرفت های اخیر در تکنیک های تولید نانوساختارها، امکان ایجاد ساختارهای فلزی در ابعاد زیر طول موجی را فراهم می کند. در فرکانس های پایین فلزات بصورت رسانای کامل عمل می کنند و عمق نفوذ در این فرکانس ها خیلی کم می باشد. در فرکانس های اپتیکی (مادون قرمز و مرئی) رفتار اپتیکی فلزات بگونه ای است که نمی توان آن ها را رسانای کامل نامید و عمق نفوذ در این فرکانس ها در حدود چند ده نانومتر می باشد. در اینصورت در مرز بین فلز و دی الکتریک اندرکنش تشدیدی بین بارهای سطحی نوسان کننده و میدان الکترومغناطیسی نور تابشی، پلاسمون پلاریتون های سطحی را ایجاد می کند. وقتی نور با ذرات فلزی در ابعاد نانومتر و کوچکتر از طول موج نور اندرکنش کند، الکترون ها بطور محلی حول نانوذره نوسان می کنند و پلاسمون پلاریتون های جایگزیده تشکیل خواهد شد[۱]. در فرکانس تشدید انرژی الکترومغناطیسی در ناحیه زیر طول موجی جایگزیده می شود و این ساختار ها کاربردهایی نظیر نانو آنتن [۲] و حسگر [۳] یافته اند. در این مقاله آرایه ای از نانو سیم ها با سطح مقطع مربعی شکل برای ایجاد تشدید در طول موج ۱/۵ μmمورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج شبیه سازی فاکتور جاگزیدگی برای سلول واحد ساختار مورد نظر و نیز پارامترهای موثر خطی آن به روش بازگشتی محاسبه شده است. سپس محیط دریرگیرنده نانو سیم، دی الکتریک غیرخطی مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. پذیرفتاری الکتریکی موثر برای این ساختار با استفاده از روش بازیابی غیرخطی محاسبه شده است [۴]. نتایج بررسی نشان می دهد که تقویت تولید هارمونیک دوم در مقایسه با برش سیمی احاطه شده توسط دی الکتریک غیرخطی در محدوده گیگا هرتز [ ۶ و ۵ و ۴]، بیشتر بوده است.

## ۲- شبیه سازی

در این مطالعه، سلول واحد آرایه ای از نانو سیم های طلا که در راستای x و y متناوب می باشند، مکعب مربعی به ضلع ۳۰۰ nm در نظر گرفته شده است. نانو سیمی به طول ۲۵۰ nm و سطح مقطع مربعی شکل به ضلع nm ۲۰ در مرکز این سلول واحد قرار گرفته است و محور بلند سیم در راستای x می باشد. با استفاده نرم افزاری که بر پایه روش المان محدود می باشد، توزیع میدان های الکتریکی و مغناطیسی و نیز طیف عبور و انعکاس سلول واحد ساختار مورد نظر، با فرض اینکه محیط اطراف نانو سیم هوا می باشد، در محدوده فرکانسی ۱۰۰-۵۰۰ THz بدست آمده است. وابستگی فرکانسی تابع دی الکتریک طلا طبق رابطه درود با فرکانس پلاسمایی $\omega_p = 1.38\times10^{16}\ [s^{-1}]$ و ثابت میرایی $\Gamma = 2\pi\times6.5\times10^{-12}\ [s^{-1}]$ در نظر گرفته شده است [۷]. موج تختی که در راستای z انتشار می یابد، با قطبشی در راستای محور بلند سیم بطور عمود بر سلول واحد تابیده شده است. برای در نظر گرفتن تناوب سلول واحد در دو راستای عمود بر جهت انتشار شرایط مرزی متناوب استفاده شده است. با مشخص شدن فرکانس تشدید ساختار مورد مطالعه، محیط دربرگیرنده نانو سیم طلا محیط غیرخطی مرتبه دوم با پذیرفتاری الکتریکی $\chi_d^{(2)} = 10^{-12}[m/V]$ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه دامنه میدان های عبوری و انعکاسی هارمونیک دوم، از بخش حوزه زمان نرم افزار المان محدود استفاده شده است. در این بخش باید از مدل درود در حوزه زمان برای در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی تابع دی الکتریک طلا استفاده شود. به این منظور باید رابطه دیفرانسیلی زیر برای قطبش، بصورت مزدوج با معادلات ماکسول حل شود [۸]

$$\frac{\partial^2\vec{P}}{\partial t^2}+\Gamma\frac{\partial\vec{P}}{\partial t}=\varepsilon_0\omega_p^2\vec{E}. \qquad (۱)$$

در این بخش از شبیه سازی موج تختی به صورت $E=E_0\cos(\omega t)$ با دامنه $E_0=10\ GV/m$ و $\omega=2\pi c/\lambda$ ، که در آن $\lambda$ طول موج تشدید می باشد، به ساختار مورد نظر اعمال می شود. با اعمال تبدیل فوریه به سیگنال های عبوری و انعکاسی متغیر با زمان، دامنه مختلط میدان های الکتریکی در فرکانس اصلی و هارمونیک دوم محاسبه می شود.

.



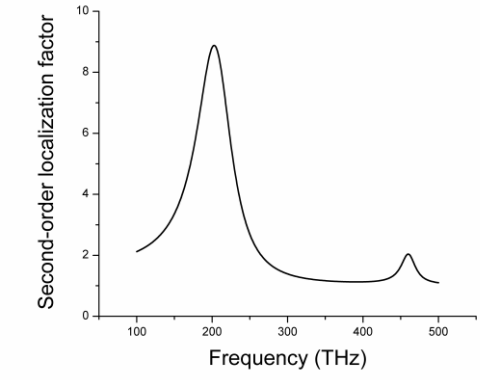
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۳- نتایج شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود حوزه فرکانس نشان می دهد که با انتخاب مناسب ابعاد نانو سیم، در فرکانس متناظر با طول موج ۱/۵ μm یک تشدید رخ می دهد که بصورت قله ای در طیف انعکاس ظاهر می شود. در حقیقت در این فرکانس یک توزیع بار مشابه دوقطبی تحریک می شود که یک موج سطحی ایستا در راستای سیم القا می کند و تشدید پلاسمونیکی نامیده می شود [۹]. این امر موجب جایگزیده شدن میدان الکتریکی در دو انتهای سیم می گردد. با استفاده از توزیع میدان الکتریکی فاکتور جایگزیدگی مرتبه دوم از رابطه زیر:

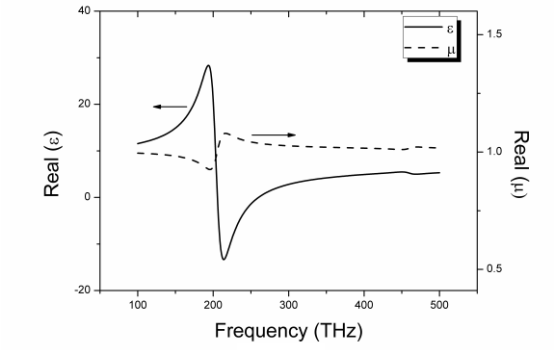
$$L(|E|^2)=\frac{\int_v |E_{unitcell}(\vec{r})|^2\, d\vec{r}^3}{\int_v |E_{\hom}(\vec{r})|^2\, d\vec{r}^3} \qquad (۲)$$

که نسبت انتگرال حجمی اندازه میدان الکتریکی به توان ۲، روی سلول واحد ساختار مورد نظر به همان انتگرال برای یک لایه همگن با ویژگی های خطی هم ارز می‌باشد [۱۰]، محاسبه گردیده است (شکل ۱).

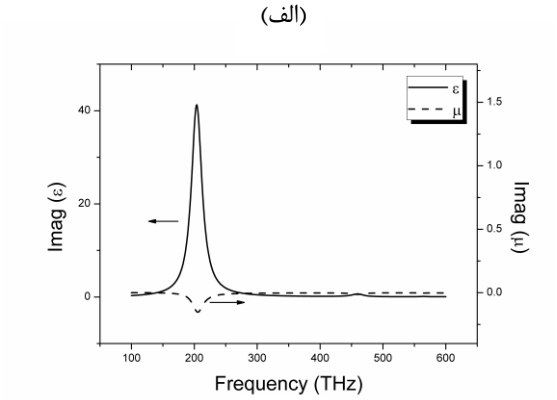



شکل ۱: فاکتور جایگزیدگی مرتبه دوم برای ساختار مورد نظر.

همانطور که در شکل (۱) ملاحظه می شود، در اثر تشدید پلاسمونیکی فاکتور جایگزیدگی در فرکانس تشدید برابر ۸/۸ می باشد. این مقدار در مقایسه با سیم های فلزی که قبلا برای افزایش غیر خطیت مورد بررسی قرار گرفته اند [۱۰و ۶ و ۵] ، تقریبا چهار برابر بزرگتر می باشد. قله ی دوم که در فرکانس ۴۵۰ THz مشاهده می شود، مربوط به تشدید مرتبه ی بالاتر می باشد. به دلیل اینکه ابعاد سلول واحد و نانو سیم کوچکتر از طول موج می باشد می توان نانوسیم احاطه شده با دی الکتریک غیرخطی را به عنوان یک محیط غیرخطی همگن با پذیرفتاری الکتریکی موثر ( $\chi_{eff}^{(2)}$ ) در نظر گرفت. برای محاسبه پذیرفتاری الکتریکی موثر از روش بازگشتی غیرخطی که بر پایه روش ماتریس انتقال می باشد، استفاده شده است [۴]. در این روش مشخصات خطی موثر (گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی) در فرکانس تابشی و هارمونیک دوم باید معلوم باشد. این کمیت ها با استفاده از روش بازگشتی متداول [۱۱]، از روی ضرایب عبور و انعکاس محاسبه گردیده است که در شکل (۲) نشان داده شده است.




(الف)




(ب)

شکل ۲: قسمت حقیقی (الف) و موهومی (ب) گذردهی الکتریکی($\varepsilon$) و تراوایی مغناطیسی($\mu$) موثر محاسبه شده به روش بازیابی.

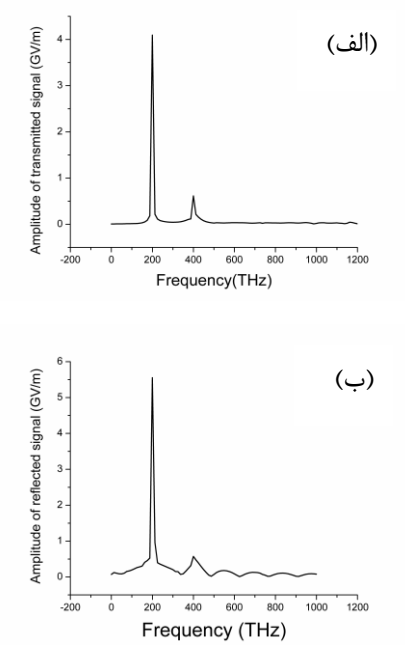
تشدیدی که به فرم لورنتز در گذردهی الکتریکی موثر ملاحظه می شود بدلیل تحریک تشدید پلاسمونیکی می باشد [۱۲]. برای محاسبه دامنه مختلط میدان های عبوری و انعکاسی، تبدیل فوریه بر سیگنال های عبوری و انعکاسی اعمال شده است. دامنه این میدان ها در شکل



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

(۳) نشان داده شده است. همچنین اختلاف فاز میدان های عبوری و انعکاسی نسبت به میدان تابشی نیز محاسبه گردیده است.

در نتیجه با علم بر مشخصات خطی موثر، ضخامت و دامنه میدان های هارمونیک دوم برای ساختار مورد نظر می توان پذیرفتاری الکتریکی موثر را بازیابی نمود. نتایج محاسبات از طریق روش بازگشتی غیرخطی نشان می دهد که پذیرفتاری الکتریکی موثر تقریبا ۳۰۰ برابر پذیرفتاری الکتریکی دی الکتریک غیرخطی دربرگیرنده نانوسیم می باشد ($\frac{\chi^{(2)}_{eff}}{\chi^{(2)}_{d}}$ = ۳۰۰). این مقدار افزایش در مقایسه با ساختارهای شامل سیم فلزی در فرکانس های پایین که در آن ها تشدید پلاسمونیکی رخ نداده است [ ۶ و ۵ و ۴]، یک مرتبه مقداری بزرگتر می باشد.




شکل ۳: دامنه میدان عبوری (الف) و انعکاسی (ب) حاصل از تبدیل فوریه .

نتایج حاصل نشان می دهد که ساختار ذکر شده می تواند به عنوان وسیله ای برای تولید منابع نوری در نانو ابزار های فوتونیکی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله سلول واحد آرایه ای از نانو سیم های طلا برای افزایش غیر خطیت دی الکتریک غیرخطی دربرگیرنده نانوسیم مورد استفاده قرارگرفته است. نتایج شبیه سازی المان محدود حوزه فرکانس نشان می دهد که تشدید پلاسمونیکی ساختار مورد نظر در طول موج ۱/۵ μm رخ می دهد. درفرکانس تشدید درجه جایگزیدگی مرتبه دوم میدان الکتریکی ۸/۸ بدست آمده است که در مقایسه با ساختارهای مشابه بررسی شده در فرکانس های پایین تر تقریبا چهار برابر شده است. سپس محیط اطراف نانو سیم دی الکتریک غیرخطی مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. با استفاده از شبیه سازی المان محدود حوزه زمان دامنه میدان های اصلی و هارمونیک دوم عبوری و انعکاسی محاسبه گردیده است. پذیرفتاری الکتریکی موثر ، $\chi^{(2)}_{eff}$، برای ساختار مورد نظر، که با استفاده از روش بازگشتی غیرخطی محاسبه شده است، در مقایسه با پذیرفتاری الکتریکی دی الکتریک غیر خطی ، $\chi^{(2)}_{d}$، استفاده شده ۳۰۰ برابر شده است.

## مراجع


[1] Biagioni P., Huang J.-S., Hecht B., *Nanoantennas for visible and infrared radiation*, **Rep. Prog. Phys**. 75(2) (2012) 024402.

[2] Crozier K. B., Sundaramurthy A., Kino G. S., Quate C. F., *Optical antennas: Resonators for local field enhancement*, **Appl. Phys**. 94(7) (2003) 4632-4642.

[3] Amanda J., Christy L., Haynes Adam D., *Plasmonic materials for surface-enhanced sensing and spectroscopy*, **MRS BULLETIN,** 30 (2005) 368-375.

[4] Larouche S, Smith D. R. *A retrieval method for nonlinear metamaterials*. **Opt. Commun** 283 (2010) 1621-1627.

[5] Sabet R. A., Khoshsima H., Namdar A., Ahmadi V., *Retrieval of the effective quadratic and cubic susceptibilities in metamaterials*, **J. Mod. Optic**. (2014) 1-5.

[۶] رعنا عسگری ثابت، حبیب خوش سیما، عبدالرحمان نامدار، وحید احمدی، *تولید هارمونیک دوم تقویت شده در ساختار فرامادہ غیرخطی*، بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران (۱۳۹۲).

[7] Linden S., Enkrich CH., Wegener M., Zhou J., *Magnetic response of metamaterials at 100terahertz*, **Science**. 306 (2004) 1351-1353.

[8] Jichun L. Aihua W., *Finite Element Analysis for Wave Propagation in Double Negative Metamaterials*, **J. Sci. Comput.** 32 (2003) 263-286.

[9] Gao H., *Fabrication and optical characterization of metamaterials and nano-antennas*, **Ph.D Thesis**, 2008.

[10] Rose A., Larouche S., Smith D. R., *Quantitative study of the enhancement of bulk nonlinearities in metamaterials*, **Phys. Rev. A** 84 (2011) 053805(1-13).

[11] Smith D. R, Vier D. C., Th. Koschny, Soukoulis C. M., *Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials*, **Phys. Rev. E**. 71 (2005) 036617(1-11).

[12] Pshenay-Severin, E., *Design, realization, and characterization of optical negative index metamaterials*, **Ph.D thesis**, 2011.




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]