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

شبیه سازی و ساخت سوئیچ تمام نوری بر اساس تشدید پلاسمون سطحی و اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست القایی در فیلم پلیمری حاوی رنگینه

علی جندقیان، محسن کوهکن و عزالدین مهاجرانی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – در این تحقیق با توجه به حساسیت زیاد پلاسمون سطحی به تغییرات ضریب شکست، یک سوئیچ تمام نوری بر اساس پلاسمون سطحی ساخته شده است. یک ساختار ۴ لایه (منشور-فلز-پلیمر و رنگینه-هوا) بر اساس چیدمان پلاسمون سطحی کرشمن تشکیل شد که در آن از ترکیب پلیمر *PMMA* و رنگینه *DR1* به عنوان محیط فعال سوئیچ استفاده شده است. تابش پرتو دمش با طول موج ۵۳۲ نانومتر به این محیط یک دوشکستی و در نتیجه تغییر ضریب شکست در ماده به وجود می‌آورد که توسط چیدمان تشدید پلاسمون سطحی این تغییر ضریب شکست برای توان های مختلف دمش اندازه گیری و مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه- پلاسمون سطحی، دو شکستی القایی، سوئیچ تمام نوری

Simulation and fabrication of all-optical switch based on surface plasmon resonance and measuring the induced refractive index changes in a dye doped polymer film

Ali Jandaghian, Mohsen Kouhkan, Ezeddin Mohajerani

Laser and plasma research institute, Shahid beheshti university, Tehran, Iran

Abstract- In this study, an all-optical switch is fabricated according to high sensitivity of surface plasmon resonance to refractive index changes. A four-layer structure (prism-metal-polymer-air) is established based on Kretschmann configuration that composition of PMMA-DR1 is used as active medium of switch. With illumination of 532 nm pump beam to this medium, a birefringence and therefore a refractive index change would appear in the medium. This changes for two different power of pump monitored and analysed by Kretschmann configuration.

Keywords:

All optical switch, Induced birefringence, Surface plasmon resonance

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-19]

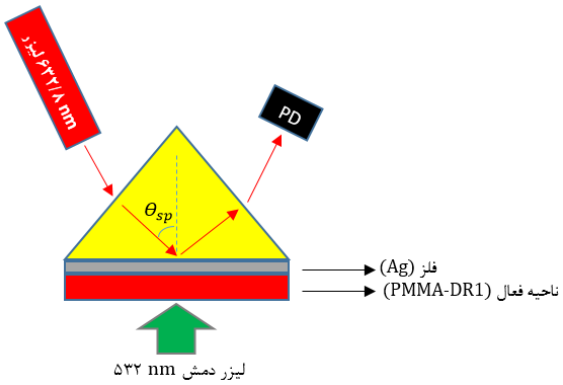
۱- مقدمه

سوئیچ‌های تمام نوری در تجهیزات مخابراتی و ادوات فعال نوری همچون دریچه‌های منطقی آینده جایگاه ویژه ای دارند. به واسطه‌ی گسترش روز افزون پلاسمون سطحی در شاخه اپتیک، استفاده از آن در سوئیچ‌های تمام نوری طی سال‌های اخیر افزایش پیدا کرده است. سرعت و حساسیت بالا دو ویژگی اساسی هستند که سوئیچ‌های تمام نوری بایستی از آن برخوردار باشند. طی سال‌های اخیر مواد زیادی در این سوئیچ ها به کار گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان داده که مواد آلی به علت حساسیت بالاتر و هزینه ی پایین‌تر مزیت بیشتری نسبت به مواد معدنی و غیرآلی دارند. به صورت خاص در رنگینه‌های آزو به علت وجود باند N=N، فرآیند ایزومریزاسیون پرتوی به صورت رفت و برگشت (سیس-ترانس) انجام می شود و همین ویژگی باعث افزایش محدوده‌ی کاربردی آن‌ها از ذخیره پرتوی داده‌ها تا سوئیچ‌های نوری می‌شود[۱].

در این تحقیق از ترکیب پلیمر PMMA به عنوان محیط میزبان و از رنگینه‌ی آزو DR1 به عنوان ماده میهمان با نسبت ٪۵ وزنی برای محیط فعال سوئیچ در غالب یک ساختار ۴ لایه ای به منظور تشکیل و بررسی پلاسمون سطحی استفاده شده است.

۲- اصول و ساختار

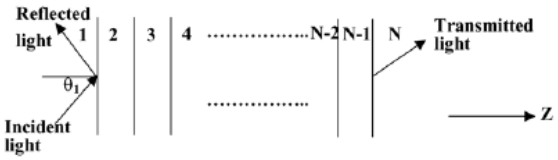
شکل ۱ ساختار سوئیچ تمام نوری را به صورت طرح وار نشان می‌دهد. این ساختار چند لایه شامل منشور SF4 با ضریب شکست ۱/۷۵، لایه ی نقره با ضخامت ۴۷ نانومتر و لایه‌ی پلیمری با ضخامت حدود ۷۰۰ نانومتر و ضریب شکست ۱/۵ می باشد. این ساختار بر اساس چیدمان کرشمن برای پایش و اندازه گیری تغییرات ضریب شکست ناحیه فعال طراحی شده است[۲]. به این صورت که پلاسمون سطحی توسط طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر تشدید می شود و پس از بازتاب از قاعده منشور وارد آشکارساز می‌شود. تغییرات ضریب شکست توسط پرتو دمش ۵۳۲ نانومتر ایجاد می‌شود.



شکل ۱: ساختار سوئیچ تمام نوری که بر اساس چیدیمان کرشمن طراحی شده است.

۲-۱- اصول فیزیکی

یکی از ویژگی‌های ساختار هندسه کرشمن تشدید پلاسمون در سطح خارجی فلز در مرز فلز و ماده مورد نظر است. با حل همزمان معادلات ماکسول در مرز لایه‌های مختلف، می‌توان ضریب بازتاب و عبور مجموعه‌ی لایه‌ها را در زاویه‌های مختلف به دست آورد. برای به دست آوردن جمله ای که بیانگر میزان ضریب بازتاب برای پرتویی با قطبش p باشد از مدل N لایه که در شکل ۲ مشخص شده، استفاده شده است[۳].



شکل۲: مدل N لایه برای تعیین ضریب بازتاب شدتی [۳]

هر لایه دارای ضخامت دلخواه d_k ، ثابت دی الکتریک ϵ_k، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ_k و ضریب شکست n_k است. فرض بر این است که تمام لایه‌ها یکنواخت، همسانگرد و غیر مغناطیسی هستند. دامنه میدان مماسی در مرز اول $Z = Z_1 = 0$ توسط ماتریس زیر به دامنه میدان در مرز آخر $Z = Z_{N-1}$ مربوط می باشد.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

که V_1 و U_1 به ترتیب مولفه مماسی میدان مغناطیسی و الکتریکی و V_{N-1} و U_{N-1} مربوط به مولفه‌های میدان ها در آخرین لایه می‌باشند.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-19]

در نهایت ماتریس M که مشخصات همه‌ی لایه‌ها را با هم در نظر می‌گیرد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \prod_{k=2}^{N-1} M_k \qquad (۲)$$

که در آن

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & \dfrac{-i\sin\beta_k}{q_k} \\ -i\, q_k \sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

و

$$q_k = \left(\frac{\mu_k}{\epsilon_k}\right)^{1/2} \cos\theta_k = \frac{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2\theta_1)^{1/2}}{\epsilon_k} \qquad (۴)$$

$$\beta_k = \frac{2\pi d_k}{\lambda}(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2\theta_1)^{1/2} \qquad (۵)$$

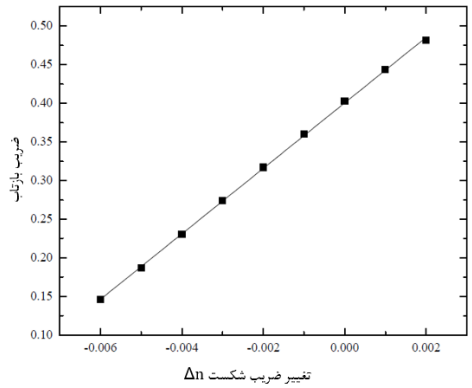
مقدار ضریب بازتاب برای پرتو با قطبش P به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 - (M_{21} + M_{22}q_N)}{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 + (M_{21} + M_{22}q_N)} \qquad (۶)$$

که در نهایت ضریب بازتاب شدتی برای پرتو با قطبش P به صورت زیر بدست خواهد آمد[۳] :

$$R_p = |r_p|^2 \qquad (۷)$$

با توجه به رابطه ضریب شکست با بازتاب در معادلات قبلی می‌توان به صورت عددی تغییرات بازتاب را بر حسب تغییر ضریب شکست بدست آورد. شکل ۳ این نتایج عددی را نشان می‌دهد.

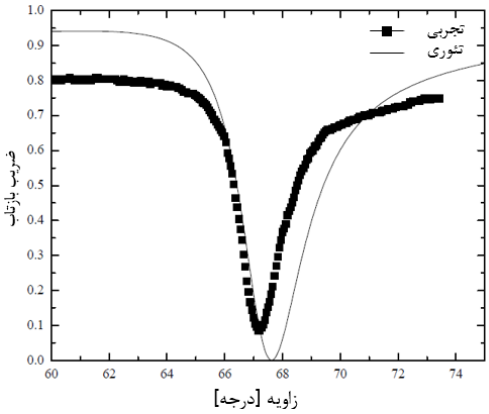


شکل ۳ : نتایج عددی(نقاط مربعی) بیانگر رابطه میان ضریب بازتاب و تغییر ضریب شکست و نمودار انطباق (خطی) که از داده های گسسته عبور کرده است.

با فیت کردن یک تابع خطی از این نقاط می‌توان دید که در بازه بازتاب ۰/۱۵ تا ۰/۵ رابطه میان ضریب بازتاب و تغییر ضریب شکست محیط پلیمری به صورت خطی می باشد، که معادله این خط به صورت R_p = ۴۲/۳۹ Δn+۰/۴ محاسبه گردید.

۳- نتایج تجربی

پس از کامل شدن ساختار سوئیچ با قرار دادن آن در چیدمان پلاسمون سطحی میزان بازتاب قاعده منشور در زوایای مختلف بدست آورده شد. شکل۴ نتایج تئوری و تجربی این آزمایش را نشان می‌دهد.



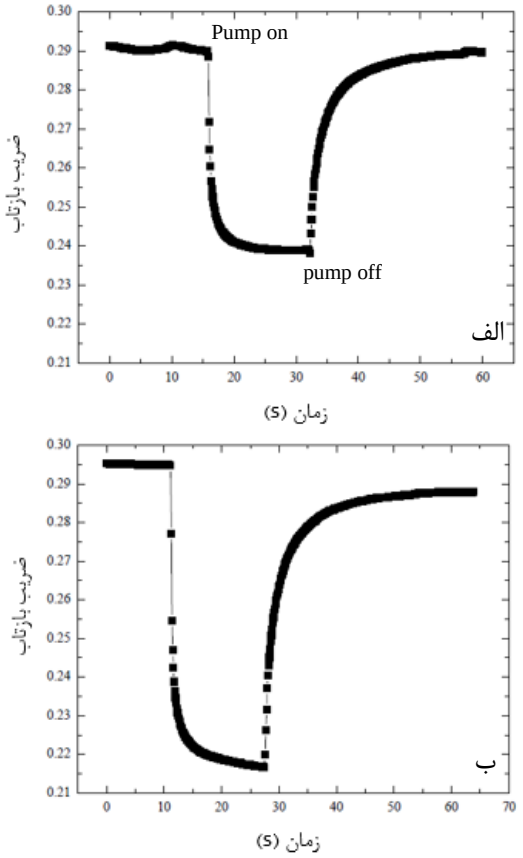
شکل ۴: مقایسه نتایج تئوری و عملی طیف بازتابی پلاسمون سطحی ساختار ۴ لایه، نمودار مربعی نتایج عملی و نمودار خطی نتایج تئوری را نشان می دهد.

دلیل عدم انطباق کامل نتایج تئوری و عملی، خطای اندازه گیری در آزمایشگاه می باشد. ولی از لحاظ شیب در قسمت چپ نمودار افت بازتاب انطباق خوبی مشاهده شد.

پس از کامل شدن ساختار سوئیچ آن را در چیدمان تشکیل پلاسمون سطحی قرار داده و پرتو ۶۳۲/۸ نانومتر به عنوان پرتو کاوشگر در زاویه‌ای که بازتاب در ناحیه خطی مذکور قرار بگیرد تنظیم شد. پس از آن پرتو دمش با طول موج ۵۳۲ نانومتر که در ناحیه جذبی محیط فعال سوئیچ قرار دارد، را با قطبش خطی از پشت به قاعده منشور تابانده شد تا دو شکستی القایی در محیط پلیمری به وجود آید. شکل ۵ اثر پرتو دمش روی پرتو کاوشگر برای دو توان مختلف پرتو دمش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با وصل کردن پرتو دمش بازتاب کاهش یافته است. از آن جا که نقطه کار این سوئیچ در سمت چپ

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-19]

افت ضریب بازتاب قرار گرفته بنابراین کاهش ضریب بازتاب طبق شکل ۳ نشان دهنده کاهش ضریب شکست در محیط پلیمری در اثر تاباندن پرتو به محیط است.



شکل ۵ : تأثیر پرتو دمش روی پرتو کاوشگر برای الف) پرتو دمش با توان ۱/۸ mW و ب) پرتو دمش با توان ۵/۸ mW

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بعد از اعمال پرتو دمش به محیط تقریباً ۱۵ ثانیه زمان لازم است تا میزان بازتاب به یک مقدار ثابت برسد. با دقت در نمایه ی افت میزان بازتاب در شکل ۵، می توان دید که ابتدا یک افت تند تغییر و سپس یک افت کند تغییر رخ می دهد و در آخر تغییرات به حداقل می رسد. برای اندازه گیری ضریب شکست، نقطه ای که تغییرات بازتاب به حداقل می رسد، به عنوان مرجع انتخاب شده است. در مجموع این آزمایش برای دو توان مختلف پرتو دمش تکرار شد و میزان کاهش بازتاب در هر مرحله به دست آمد. با توجه به رابطه خطی تغییرات ضریب شکست بر حسب ضریب بازتاب که در بخش قبلی، میزان تغییر ضریب شکست القا شده توسط پرتو دمش در هر مرحله محاسبه شد. جدول ۱ نتایج نهایی اندازه گیری تغییر ضریب شکست را نشان می‌دهد.

جدول ۱: تغییرات ضریب شکست برای دو توان مختلف دمش

توان دمش	تغییر ضریب بازتاب	تغییر ضریب شکست
۱/۸ mW	-۰/۰۵۱	-۰/۰۰۱۲
۵/۸ mW	-۰/۰۷۸	-۰/۰۰۱۸

همانطور که از نتایج جدول ۱ مشخص است، با افزایش توان پرتو دمش میزان تغییر ضریب شکست القایی در محیط پلیمری نیز افزایش پیدا کرده است. ضریب شکستی که در معادلات پلاسمون سطحی ظاهر می‌شود، ضریب شکست مماسی در مرز فلز و پلیمر است. از طرفی با اعمال پرتو دمش به محیط پلیمری، رنگینه‌ها در راستای عمود بر قطبش پرتو دمش جهت‌گیری می‌کنند[۴]. این جهت گیری باعث ایجاد دو شکستی در ماده می‌شود. جهت‌گیری در راستای عمود بر مرز فلز-پلیمر بیشتر از سایر جهت‌ها است و بنابراین ضریب شکست در این راستا افزایش می‌یابد و به دنبال آن می‌توان کاهش ضریب شکستِ مشاهده شده در نتایج تئوری و تجربی را به کاهش تعداد مولکول‌های رنگینه که در راستای مرز فلز-پلیمر جهت گیری نموده اند، نسبت داد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به حساسیت بالای چیدمان پلاسمون سطحی به ضریب شکست، یک سوئیچ تمام نوری با محیط فعال پلیمر PMMA که آلائیده به رنگینه DR1 است ساخته شد. تغییر ضریب شکست القایی توسط پرتو دمش در این محیط تا ۴ رقم اعشار اندازه‌گیری شد. با توجه به جهت گیری مولکول‌های رنگینه در راستای عمود بر قطبش پرتو کاهش ضریب شکست مشاهده شده در آزمایش را می‌توان به کاهش تعداد مولکول‌های رنگینه که در راستای مرز فلز-پلیمر جهت گیری نموده‌اند، نسبت داد.

مراجع

[1] RK Banyal, BR Prasad, High-contrast, all-optical switching in bacteriorhodopsin films Applied optics 44(2005), 5497
[2] Xueliang Shi, Shilie Zheng, Hao Chi, Xiaofeng Jin, Xianmin Zhang, All-optical modulator with long range surface plasmon resonance, Optics & Laser Technology 49(2013) 316–319
[3] B.D. Gupta, Anuj K. Sharma, Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor: a theoretical study, Sensors and Actuators B 107 (2005) 40–46
[4] Xiaoxia Zhong, Xiuqin Yu, Qu Li, Shouyu Luo, Yingli Chen, Yu Sui, Identification of the alignment of azobenzene molecules induced by all-optical poling in polymer film Optics, Communications 190(2001) 33-337.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-19]