بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مطالعه‌ی پاسخ غیر خطی و جفت‌شدگی اسپین- مدار در برهم‌کنش با باریکه‌ی لیزر یون آرگون با شیشه‌های تبادل یون شده‌ی Ag^{+}/Na^{+}

علی اکبر آهنگری[۱]، ابراهیم کریمی[۲] و حمید رضا خالصی‌فرد[۱]

[۱]زنجان، جاده گاوازنگ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، دانشکده فیزیک

[۲]کانادا، اونتاریو، اوتاوا، لویی پاستور ۱۵۰، دانشگاه اوتاوا، دانشکده فیزیک

چکیده – شیشه‌های تبادل یون شده تحت تابش باریکه‌ی لیزر Ar^{+} قرار گرفته‌اند. تصاویر میکروسکوپ پلاریزان ویژگی‌های دوشکستی را برای منطقه‌ی برهم کنش نشان می‌دهد. در یک آزمایش پمپ-پروب باریکه‌ی لیزر *He-Ne* برای بررسی منطقه‌ی برهم‌کنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشاهده شده است که این منطقه می‌تواند اسپین قطبش دایروی نور را به تکانه‌ی زاویه‌ای مداری تبدیل و بار توپولوژیکی باریکه‌ی پروب را پس از برهم‌کنش تغییر دهد. منطقه‌ی برهم‌کنش می‌تواند به عنوان یک جفت‌کننده‌ی دائمی تکانه‌ی زاویه‌ای اسپین- مدار عمل کند که به انرژی تابشی جذب شده از باریکه‌ی لیزر پمپ بستگی دارد. این فرآیند، یک فرآیند غیرخطی است.

کلید واژه- بار توپولوژیکی نور، تکانه‌ی زاویه‌ای ، جفت کننده‌ی اسپین- مدار، فرآیند غیر خطی.

Perusal of Nonlinear Response and Spin to Orbit Coupling in Interaction of Ar^{+} Laser Beam with Ag^{+}/Na^{+} Ion Exchanged Glasses

Ali Akbar Ahangay[1], Ebrahim Karimi[2], Hamid Reza Khalesifard[1]

[1]Physics Faculty, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Gava Zang, Zanjan, Iran

[2]Department of Physics, University of Ottawa, 150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario, K1N 6N5 Canada

Abstract- Sliver ion exchanged glasses have been irradiated with focused Ar^{+} laser beam. Polarized microscope images show birefringent properties for the interaction region. In a pump–probe experiment a He-Ne laser beam has been used to monitor interaction region. It has been observed that the interaction region can couples the spin of a circularly polarized light to orbital angular momentum and change the topological charge of the probing beam after interaction. Interaction region acts as permanent spin to orbital angular momentum coupler depending on the absorbed irradiant energy of the pump laser beam. This is a nonlinear process.

Keywords: Angular momentum, Spin-orbit coupler, Nonlinear process, Topological charge of light.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

خصوصیات دی‌الکتریکی نانوذره‌های فلزات نجیب از جمله‌ی دلایلی است که موجب گشته به عنوان سوپچ‌های نوری سریع، کاتالیست‌های مؤثر و موجبرهای کارا مورد توجه قرار گیرند [۱–۳]. در میان روش‌های گوناگون تهیه نمونه‌ها، تبادل یون یکی از روش‌های مرسوم است که در آن یون‌های فلزی سنگین با یون‌های فلزی سبک جابجا می‌شوند که در بستر شیشه انجام می‌گیرند. در نمونه‌هایی که به روش کاشت یون، آماده شده‌اند خواص غیرخطی مشاهده شده است [۵، ۶]. از طرفی سطح نمونه‌های تبادل یون شده در برهم‌کنش لیزر تحریر می‌شوند. این برهم‌کنش‌ها می‌توانند موجب خوشه‌زایی[1] و نورپارش[2] گردند [۶]. یکی از ابزارهای بررسی فرآیند غیرخطی، اپتیک تکینگی و بررسی جفت‌شدگی اسپین- مدار STOC[3] برای فوتون‌های عبوری از منطقه‌ی برهم‌کنش است. چگالی انرژی در امواج الکترومغناطیسی، با بردار پوینتیگ، **S**، چگالی حجمی تکانه‌ی خطی، $\mathbf{g}=\frac{\mathbf{S}}{c^2}$، و چگالی اندازه حرکت زاویه‌ای $\mathbf{j}=\mathbf{r}\times\mathbf{S}$ تعریف می‌شوند. اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای کل، مجموع اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای اسپینی (ذاتی)، **S**، و مداری (شبه ذاتی)، **L**، است که عبارتند از:

$$S_i=\frac{1}{2\mu_0\omega}\sum_{j,k}\int E_j^*\left(-i\varepsilon_{ijk}\right)E_k d^3r$$

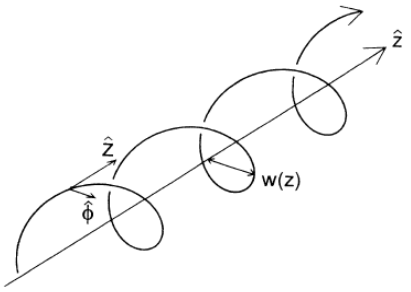
$$L_i=\frac{1}{2\mu_0\omega}\sum_{j}\int E_j^*\left(-ir\times\nabla\right)_i E_j d^3r$$

به عبارت دیگر، اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی، SAM[4]، به خاصیت برداری میدان نوری (قطبش میدان) مربوط می‌شود. مقادیر اختصاص داده شده به این کمیت برابر هستند با $S=\sigma_z\hbar$ ($\sigma_z=\pm1$ برای قطبش دایروی چپگرد و راستگرد و $\sigma_z=0$ برای قطبش خطی). اندازه حرکت زاویه‌ای، OAM[5]، نیز به ساختار فضایی میدان اپتیکی مختلط مربوط است. مقدار OAM برابر است با $L=l\hbar$ که در آن l می‌تواند هر مقدار صحیحی را داشته باشد [۷]. این نوع باریکه‌ها دارای تکینگی در جبهه فازی خود هستند و در روی محور انتشار باریکه نمی‌توان فاز مشخصی به آن‌ها نسبت داد. متوسط زمانی بردار پوینتینگ برای این باریکه‌ها به این صورت است:

$$\frac{\varepsilon_0}{2}\left(\mathbf{E}^*\times\mathbf{B}+\mathbf{E}\times\mathbf{B}^*\right)=i\,\omega\frac{\varepsilon_0}{2}\left(u^*\nabla u-u\nabla u^*\right)$$

$$+\omega k\,\varepsilon_0|u|^2\,\hat{\mathbf{z}}+\omega\sigma_z\,\frac{\varepsilon_0}{2}\frac{\partial|u|^2}{\partial r}\hat{\phi}$$

که در آن u دامنه‌ی پتانسیل برداری موج است. دو جمله اول مستقل از قطبش و مربوط به تکانه زاویه‌ای مداری هستند و جمله آخر سهم قطبش یا اسپین است [۸].



شکل ۱) منحنی مارپیچی بردار پوینتینگ برای باریکه‌ی لاگر- گاوسی [۸].

آزمایش‌ها نشان داده‌اند که اندرکنش لیزر با این نوع شیشه‌ها منجر به تشکیل ساختارهایی در ابعاد نانومتر شده است [۹, ۱۰]. این نمونه‌ها علاوه بر دارا بودن ویژگی دوشکستی، دارای خواص جفت کنندگی تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی به تکانه‌ی مداری نیز هستند [۳]. به صورت یک مدل ساده، اگر عملگر جونز را برای محل اندرکنش باریکه لیزر با نمونه‌ها نسبت دهیم که در آن r_0 شعاع کمره باریکه و δ_0 تأخیر فازی مجانبی برای شعاع‌های بزرگ است و باریکه‌ای با قطبش دایروی چپگرد یا راستگرد، $|\pm\rangle$، از این محل عبور داده شود، خواهیم داشت [۳]:

$$\hat{U}\cdot|\pm\rangle=\cos\left[\frac{\delta(r)}{2}\right]|\pm\rangle-i\sin\left[\frac{\delta(r)}{2}\right]|\pm\rangle e^{\pm il\phi}$$

که تأخیر دوشکستی نوری موضعی بدین صورت است

$$.\delta(r)=\delta_0\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\left(e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}}-1\right)\right]$$

ویژگی‌های نوری، گرمایی و اپتوالاستیکی شیشه به همراه توان باریکه از جمله‌ی عوامل مؤثر در این پارامتر هستند.

[1] Clustraization
[2] Photofragmentation
[3] Spin to Orbit Coupling
[4] Spin Angular Momentum, SAM
[5] Orbital Angular Momentum, LAM

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

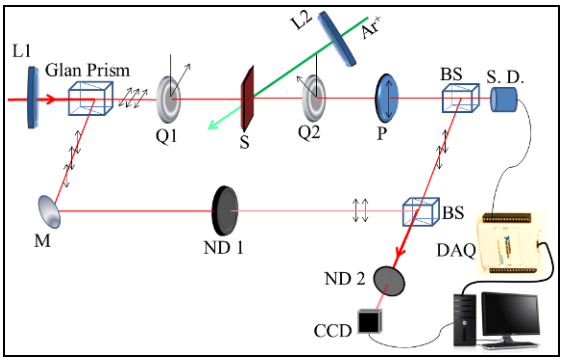
بار توپولوژیکی مرتبط با ساختارهای تشکیل شده، l، در ساختار جبهه موج و فاز باریکه، وارد می‌شود. با استفاده از طرح‌های تداخلی می‌توان $|l|$ را بدست آورد.

۲- آزمایش‌ها

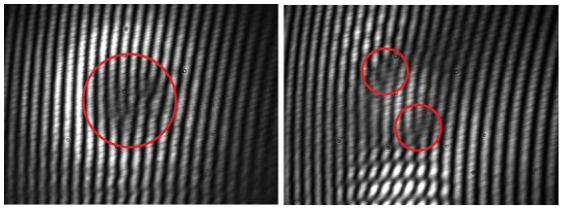
شیشه‌های تبادل‌یون شده با پاشیدن یکنواخت نمک اسیدی روی سطح شیشه و قرار دادن در کوره آماده می‌شوند. این نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای 400^{o} C قرار می‌گیرند و سپس با استفاده از اسید نیتریک و آب مقطر و صابون شسته می‌شوند. سپس، نمونه‌ها تحت تابش باریکه‌ی کانونی شده‌ی لیزر Ar^{+} بس‌مد با طول موج غالب ۵۱۴nm (باریکه‌ی پمپ) قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۲ باریکه‌ی لیزر He-Ne پروب کردن محل برهم‌کنش را انجام می‌دهد. پس از جدا شدن قطبش‌های عمود و موازی باریکه‌ی پروب در عبور از منشور گلن، تیغه‌ی ربع موج، Q1، قطبش باریکه را دایروی می‌کند. در عبور از محل برهم‌کنش، این قطبش مختل شده و هنگام خروج از تیغه‌ی ربع موج دوم، Q2، ترکیبی از قطبش‌های موازی و عمود را خواهد داشت. آنالیزور P قطبش موازی را مسدود کرده و فقط قطبش عمود عبور می‌کند. شدت باریکه‌ی پروب توسط آشکارساز فتودیودی سیلیکون، S. D. و کارت DAQ و طرح تداخلی نیز به وسیله‌ی CCD ثبت می‌گردند. عدسی L1 و L2 باریکه‌های لیزر آرگون و He-Ne را روی نمونه کانونی می‌کنند. S نمونه و ND نیز فیلتر چگالی خنثی را نشان می‌دهند.

۲-۱- نتایج آزمایش‌ها

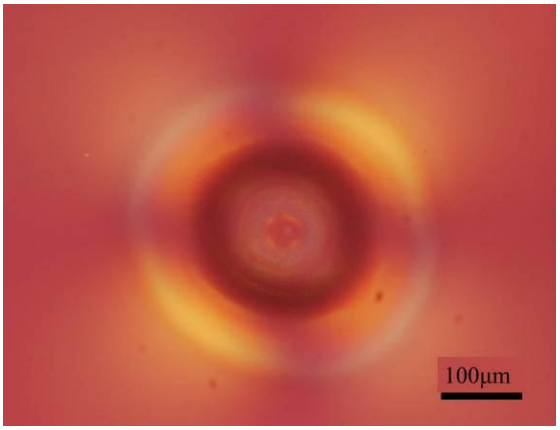
مطابق شکل ۲ طرح تداخلی چنگالی در محل CCD نشاندهنده‌ی مقدار تکانه‌ی زاویه‌ی مداری القا شده به باریکه به مقدار $l=|2|$ است (شکل ۳). اختلاف تعداد خطوط طرح تداخلی در بالا و پایین نقطه‌ی چنگالی برابر با مقدار l است. علت اعمال شدن STOC، تغییر محور اپتیکی نمونه‌ها در حین و پس از برهم‌کنش با باریکه‌ی لیزر Ar^{+} است. طرح کونوسکوپیک در زیر میکروسکوپ پلاریزان نشان از تک محوری شدن محل برهم‌کنش است. اندازه‌گیری شدت باریکه‌ی عبوری باریکه‌ی پروب از محل برهم‌کنش توسط آشکارساز فتودیود سیلیکون، نشان دهنده‌ی تحولی مانا است. میزان این تحول به مقدار توان و زمان پمپ کردن نمونه توسط باریکه‌ی لیزر آرگون بستگی دارد. توان باریکه‌های تابیده شده به نمونه‌ها عبارتند از ۲/۵W، ۳/۵W و ۴/۵W و زمان‌های تابش نیز شامل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۰، ۲/۰، ۴/۰، ۸/۰، ۱۶/۰، ۳۲/۰، ۶۴/۰، ۱۲۸/۰، ۲۵۶/۰، ۵۱۲/۰ ثانیه.



شکل ۲) چیدمان آزمایش



شکل ۳) طرح تداخلی در اثر تحول حاصل از برهم‌کنش باریکه‌ی پمپ با نمونه‌ها در حین پمپ کردن (چپ) و پس از قطع پمپ و سرد شدن نمونه (راست)

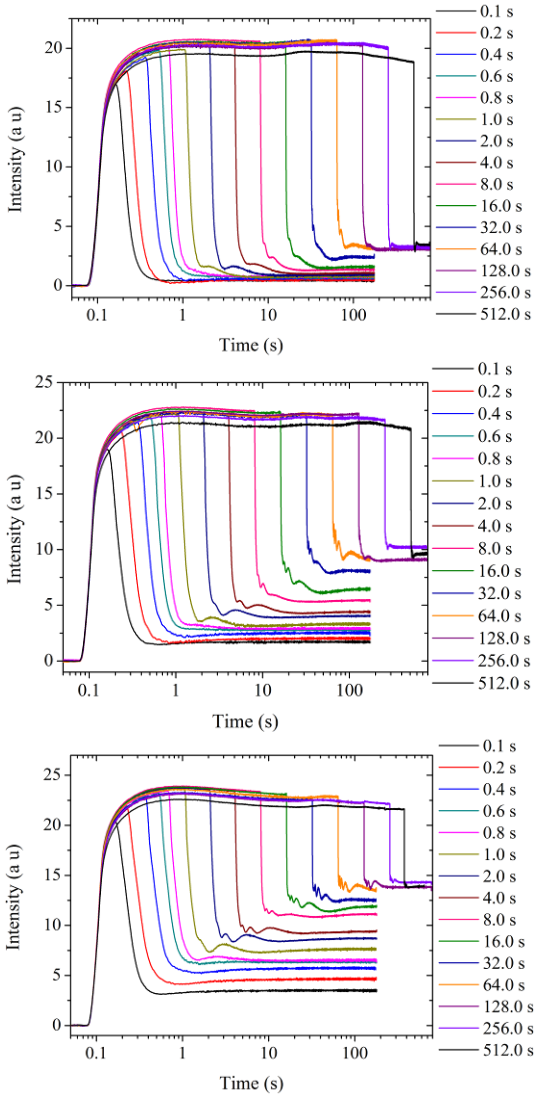


شکل ۴) طرح کونوسکوپیک تولید شده زیر میکروسکوپ پلاریزان.

پس از طی این زمان‌ها، اجازه داده می‌شود تا نمونه سرد شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که به محض تابانیدن لیزر پمپ به نمونه، مقدار شدت رسیده به آشکارساز، به سرعت افزایش و هنگام قطع باریکه‌ی پمپ، این شدت به سرعت نزول پیدا می‌کند و پس از چند نوسان کوچک، به یک

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

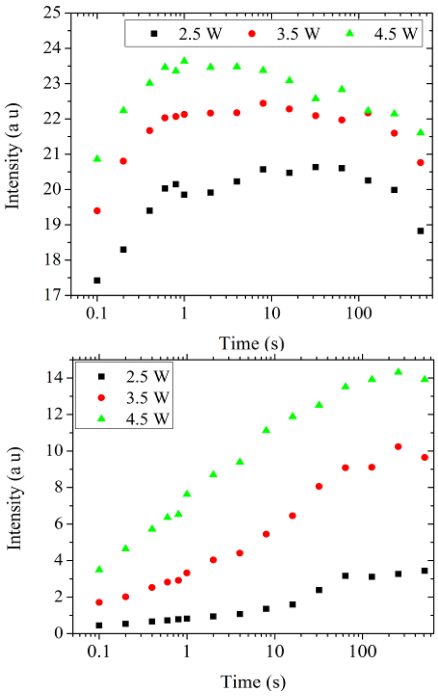
مقدار ثابت می‌رسد. در شکل ۶ رفتار نمونه‌ها در دو موقعیت پمپ شدن و واهلش، بررسی شده است که نشان می‌دهد در تمامی نمونه‌ها، نقاطی که بیشتر از ۶۴s پمپ شده و سرد شده‌اند، بیشینه STOC را دارند. این حالت در هنگام تابیده شدن باریکه‌ی پمپ، زمانی رخ می‌دهد که نمونه‌ها بین ۴ الی ۸ ثانیه پمپ شده باشند. میزان افزایش STOC با افزایش توان رابطه‌ی خطی ندارد که یک تحول غیرخطی را در برهم‌کنش با باریکه‌ی پمپ نشان می‌دهد.



شکل ۵) شدت عبوری باریکه‌ی پروب از محل برهم‌کنش. با افزایش توان از بالا به پایین، به ترتیب ۲٫۵W، ۳٫۵W و ۴٫۵W.

۳- نتیجه‌گیری

نمونه‌هایی که در اثر برهم‌کنش باریکه‌ی لیزر آرگون با شیشه‌های تبادل یون شده Ag^{+}/Na^{+} تولید می‌شوند قادر به اعمال OAM به باریکه‌ی عبوری به مقدار $|l|=2$ هستند. در این برهم‌کنش محور نوری باریکه تغییر کرده و به یک محیط تک محوری تبدیل می‌شود. این پدیده یک پدیده‌ی غیرخطی است.



شکل ۶) میزان STOC و عبور شدت باریکه‌ی پروب در نمونه‌های مختلف، در هنگام پمپ کردن (بالا) و پس از قطع پمپ و واهلش محل برهم‌کنش

مراجع

[1] U. Kreibig, M. Vollmer, *Optical properties of metal clusters*. Springer-Verlag, 1995.

[2] J.-P. Blondeau, *et al*, *Precipitation of silver nanoparticles in glass by multiple wavelength nanosecond laser irradiation*, ***J. Optoelectron. Advanced Mater.***, 12 (2010) 445–450.

[3] J. M. Amjad, *et al.*, *Laser-induced radial birefringence and spin-to-orbital optical angular momentum conversion in silver-doped glasses*, **Appl. Phys. Lett.**, 99 (2011) 011113–011113.

[4] R. A. Wood, *et al*, *Annealing of ion implanted silver colloids iin glass*, **J. App. Phys.** 74 (1993) 5754–5756.

[5] F. Gonella, *et al.*, *Interaction of high-power laser light with silver nanocluster composite glasses*, **Appl. Phys. Lett.**, 69 (1996) 3101–3103.

[6] G. Battaglin, *et al.*, *Silver nanocluster formation in ion-exchanged glasses by annealing, ion beam and laser beam irradiation: An EXAFS study*, **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B**, 200 (2003) 185–190.

[7] L. T. Juan P. Torres, Ed., *Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum*. WILEY, 201

[8] L. Allen, *et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*, **Phys. Rev. A** 45(1992) 8185–8189.

[9] A. A. Ahangary, *et al*, *Computing the Size Distribution of Silver Nanoparticles Formed on the Surface of a Soda-lime Glass*, **16th Iranian Conf. Opt. Photonics,** 2009.

[10] A. Ahangary, *et al*, *Statistical analysis of Size Distribution of Ag Clusters Formed over the Surface of Ag+ / Na+ Ion-Exchanged Soda-Lime Glasses As a Result of Interaction with an Intense Ar+ - Laser*, **17th Iran. Conf. Opt. Photonics**, 2011.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]