بررسی تجربی فرآیند فروشکست اپتیکی در محلول‌های حاوی نانوذرات آلومینیوم و تیتانیم به روش پرتو گمانه

مرضیه اکبری جعفرابادی، مهران صفری سیاه کل، حسین مظفری، و محمد حسین مهدیه

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله میزان عبور پرتو گمانه در فرایند فروشکست اپتیکی برای محلول‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. از یک لیزر پالسی *Nd:YAG* (با طول موج *nm* ۱۰۶۴ و طول پالس *ns* ۱۰~) به عنوان لیزر ایجاد کننده (لیزر پمپ) فرآیند فروشکست اپتیکی استفاده شده است. بخشی از پرتو لیزر پمپ توسط یک شکافنده پرتو جدا شده و به عنوان پرتو گمانه هم‌زمان با پرتو پمپ از ناحیه برهم‌کنش عبور کرده است. دینامیک پلاسمای ایجاد شده در ناحیه فروشکست با اندازه‌گیری عبور پرتو گمانه ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که قابلیت عبور پلاسما برای هر دو محلول با افزایش شدت پرتو لیزر پمپ کاهش می‌یابد. همچنین، قابلیت عبور پلاسما برای محلول حاوی نانوذرات TiO_2 در تمام شدت‌های پرتو لیزر پمپ کمتر از مقدار آن برای محلول حاوی نانوذرات Al_2O_3 است. پلاسمای تولید شده در محلول حاوی نانوذرات TiO_2 سریعتر به چگالی بحرانی برای جذب پرتو گمانه می‌رسد.

کلید واژه- روش پرتو پمپ- گمانه، فروشکست اپتیکی لیزری، لیزر پالسی نانوثانیه، نانوذرات اکسید آلومینیوم، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم.

Optical Probing of Laser Induced Breakdown in Colloidal Al2O3 and TiO2 Nanoparticles

Marzieh Akbari Jafarabadi, Mehran Safari siyahkal, Hossein Mozaffari, and Mohammad Hossein Mahdieh

Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, laser induced optical breakdown in colloidal Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles was studied by using pump- probe beam technique. A Nd:YAG laser beam (operating at 1064 nm with pulse duration ~10 ns) was split in two and used as pump and probe beams in this experiment. The time varying transmission of the probe beam through the plasma was measured during the breakdown process. The results show that, the plasma transmissivity reduces with pump beam intensity. According to these results, the transmission of TiO_2 nanoparticles plasma is higher than that of Al_2O_3. The results also show that, with respect to Al_2O_3, the plasma electron density in TiO_2 colloid increases with a higher rate.

Keywords: Aluminum oxide nanoparticles, Laser induced breakdown, Pump- probe beam technique, Titanium dioxide nanoparticles.

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

۱- مقدمه

در برهم‌کنش لیزرهای پالسی توان بالا با مواد دی‌الکتریک، پدیده فروشکست اپتیکی می‌تواند اتفاق بیافتد. در طی فرآیند فروشکست اپتیکی ایجاد شده با استفاده از لیزرهای پالسی بلند (با طول پالس از مرتبه نانوثانیه)، در زمان‌های ابتدایی پالس، بخشی از انرژی لیزر توسط الکترون‌های آزاد اولیه در محیط دی‌الکتریک جذب می‌شود و پلاسمای ضعیفی شکل می‌گیرد. الکترون های آزاد اولیه می‌توانند توسط جذب چندفوتونی انرژی پرتو لیزر ایجاد شوند. در بقیه زمان پالس با جذب بیشتر انرژی پرتو لیزر در محیط برهم‌کنش، چگالی الکترون‌های آزاد در اثر یونیزاسیون برخوردی افزایش می‌یابد و فرآیند تولید پلاسما کامل‌تر می‌شود. گذار ماده به حالت پلاسما باعث می‌شود که ضریب شکست ماده در ناحیه برهم‌کنش تغییر کند.

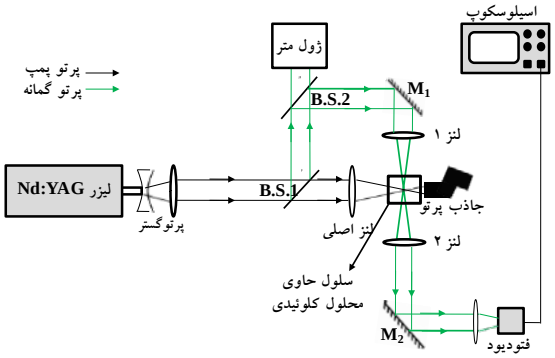
جذب انرژی پرتو لیزر در ماده دی‌الکتریک به عوامل مختلفی از جمله مشخصات پرتو لیزر، مشخصات ماده و وجود ناخالصی در ماده بستگی دارد [۱و۲]. بنابراین دینامیک و همچنین شدت آستانه پدیده فروشکست اپتیکی (کمترین شدت پرتو لیزر پمپ کننده که در آن پدیده فروشکست اپتیکی اتفاق میافتد) برای مواد و مشخصات لیزری مختلف، متفاوت می‌باشد.

روش پرتو پمپ- گمانه یکی از روش‌های بررسی پدیده فروشکست اپتیکی است که با استفاده از آن می توان اطلاعاتی در مورد تحول زمانی پلاسمای ناشی از فروشکست اپتیکی در یک دی الکتریک شفاف به دست آورد [۳]. در این روش از یک پرتو با انرژی مناسب (پرتو پمپ) برای ایجاد پلاسما استفاده می‌شود و سپس عبور و یا انعکاس یک پرتو با انرژی بسیار کم (پرتو گمانه) تحول زمانی پلاسما را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

در این مقاله، پدیده فروشکست اپتیکی در محیط مایع حاوی دو نوع نانوذرات (نیمه هادی و دی الکتریک) با استفاده از روش پرتو گمانه مطالعه شده است. میزان عبور پرتو گمانه، عمود بر پرتو پمپ از پلاسمای تولید شده اندازه‌گیری شده است. با تحلیل سیگنال های به دست آمده، تاثیر شدت پرتو لیزر پمپ و نوع نانوذرات بر دینامیک پلاسمای ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمایش

طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. از پرتو پالسی لیزر Nd:YAG با طول موج nm ۱۰۶۴ و طول پالس ns ۱۰~ برای ایجاد فروشکست اپتیکی استفاده شده است. قسمت عبوری از شکافنده پرتو ۱ (پرتو پمپ کننده) توسط لنز اصلی با فاصله کانونی mm ۱۰۰ درون سلول حاوی محلول متمرکز می‌شود و فروشکست اپتیکی را ایجاد می‌کند. حدود ٪۸ از پرتو لیزر Nd:YAG توسط شکافنده پرتو ۱ بازتاب شده و به عنوان پرتو گمانه استفاده شده است. هنگامی که فروشکست اپتیکی در محلول حاوی نانوذرات ایجاد می‌شود، پرتو گمانه همزمان با پرتو پمپ و عمود بر آن، از ناحیه برهم‌کنش عبور می‌کند. یک فتودیود سریع تغییرات میزان عبور پرتو گمانه از پلاسمای تولید شده در فروشکست اپتیکی را آشکارسازی می‌کند. سیگنال دریافتی فتودیود، توسط یک اسیلوسکوپ به نمایش در می‌آید.



شکل ۱: طرحواره ای از چیدمان آزمایش. دراین شکل آینه‌ها و شکافنده‌های پرتو به ترتیب با M و B.S نشان داده شده است.

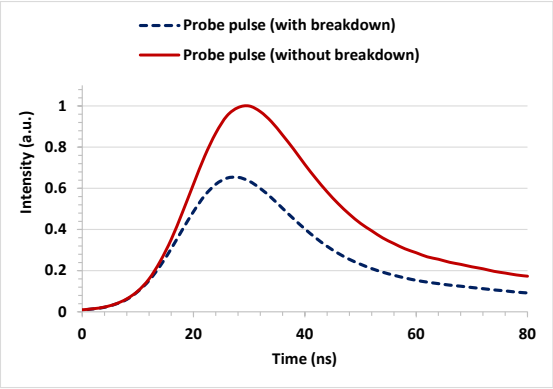
در این آزمایش، فروشکست اپتیکی در دو محلول حاوی نانوذرات Al_2O_3 (فاز آلفا با اندازه nm ۸۰) و TiO_2 (در فاز آناتاس/روتایل[۱] با اندازه nm ۲۰) در آب مقطر (با غلظت $۱/۹۶\times۱۰^{-۴}$ mol/lit) مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش برای محدوده شدت پرتو پمپ GW/cm^2 ۹۰-۱۰ انجام شده است.

[۱] Anatase/Rutile

۳- نتایج

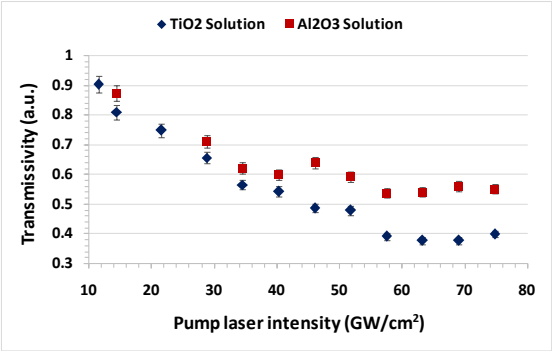
شکل ۲ سیگنال پرتو گمانه را پس از عبور از ناحیه برهم‌کنش در دو حالت بدون فروشکست اپتیکی (پرتو پمپ مسدود شده است) و در حالت فرو شکست اپتیکی (پرتو پمپ با شدت ۳۴/۵ GW/cm^2 درون سلول حاوی محلول، فروشکست اپتیکی را ایجاد کرده است) نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سیگنال پرتو گمانه با وجود فروشکست اپتیکی در زمان خاصی نسبت به سیگنال پرتو گمانه در شرایطی بدون فروشکست اپتیکی کاهش یافته است.

هنگامی که پرتو پمپ در محلول حاوی نانوذرات متمرکز می‌شود، بخشی از انرژی آن توسط محلول جذب می‌شود و پلاسما تشکیل می‌شود. چگالی الکترونی پلاسما با جذب پرتو پمپ افزایش می‌یابد. هنگامی که چگالی الکترونی پلاسما به مقدار بحرانی‌ای رسید، می‌تواند پرتو گمانه را به مقدار قابل ملاحظه‌ای جذب، بازتاب و یا پراکنده کند. البته مقداری از پرتو گمانه که بازتاب و پراکنده می‌شود نسبت به سهمی که جذب می‌شود، ناچیز می‌باشد. به همین دلیل، زمانی که چگالی الکترونی پلاسما به مقدار بحرانی خود برسد (زمان بحرانی)، میزان عبور پرتو گمانه از ناحیه برهم‌کنش کاهش می‌یابد.



شکل۲: یک سیگنال نمونه پرتو گمانه (با شدت ۰/۱۹ GW/cm^2) در حالتی که پرتو پمپ مسدود شده باشد (خط ممتد) و حالتی که پرتو پمپ با شدت ۳۴/۵ GW/cm^2 درون سلول حاوی محلول (محلول حاوی نانوذرات Al_2O_3) متمرکز شده و فروشکست اپتیکی ایجاد شده است (خط‌چین).

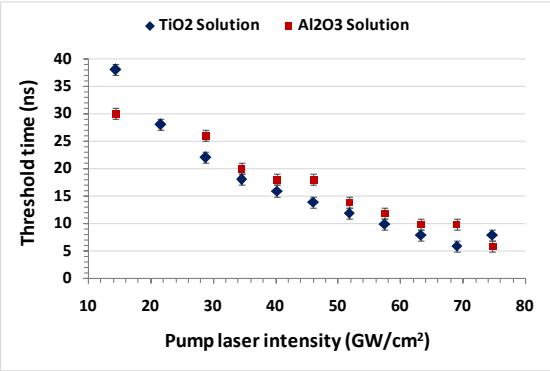
برای بررسی قابلیت عبور پلاسما، انتگرال زمانی سیگنال پرتو عبوری برای هر دو محلول و برای هر شدت پرتو پمپ محاسبه شد و نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، با افزایش شدت پرتو پمپ، قابلیت عبور پلاسما برای هر دو محلول کاهش می‌یابد. با افزایش شدت پرتو پمپ، میزان انرژی جذب شده از پرتو گمانه توسط پلاسما افزایش می‌یابد و قابلیت عبور پلاسما کاهش می‌یابد. اگرچه، آهنگ کاهش قابلیت عبور پلاسما با افزایش شدت پرتو گمانه کاهش یافته است. به صورتی که در شدت‌های پرتو پمپ بالاتر از ۴۰ GW/cm^2، قابلیت عبور پلاسما تقریبا ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۳: قابلیت عبور پلاسمای تولید شده در محلول‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 بر حسب شدت پرتو لیزر پمپ.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، قابلیت عبور پلاسما برای محلول حاوی نانوذرات TiO_2، در همه شدت‌های پرتو پمپ کمتر از قابلیت عبور پلاسما برای محلول حاوی نانوذرات Al_2O_3 می‌باشد. نانوذرات Al_2O_3 (با گاف انرژی حدود ۷ eV)، دی‌الکتریک هستند و گاف انرژی بالاتری نسبت به نانوذرات TiO_2 نیمه‌هادی (با گاف انرژی حدود ۳ eV) دارند [۴و۵]. در ابتدای فرآیند فروشکست اپتیکی، در مایع حاوی نانوذرات نیمه‌هادی، تعداد الکترون‌های آزاد اولیه بیشتر از تعداد آن‌ها در محلول حاوی نانوذرات دی‌الکتریک می‌باشد. همچنین به علت کمتر بودن گاف انرژی در مواد نیمه‌هادی، یونیزاسیون برخوردی با نرخ بیشتری در محلول حاوی نانوذرات نیمه‌هادی اتفاق میافتد. بنابراین شدت آستانه فروشکست اپتیکی برای محلول حاوی نانوذرات TiO_2 (۱۱/۵ GW/cm^2) کمتر از شدت آستانه برای محلول حاوی نانوذرات Al_2O_3 (۱۴/۴ GW/cm^2) است. همچنین به علت بیشتر بودن آهنگ رشد چگالی الکترونی در محلول حاوی نانوذرات TiO_2، قابلیت عبور پلاسما برای محلول حاوی نانوذرات TiO_2 کمتر از مقدار آن برای محلول حاوی نانوذرات

Al_2O_3 می‌باشد.



شکل ۴: زمان بحرانی (زمان رسیدن پلاسما به چگالی بحرانی) بر حسب شدت پرتو لیزر پمپ برای محلول‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2.

زمان بحرانی یعنی زمان رسیدن پلاسما به چگالی بحرانی برای هر دو محلول بر حسب شدت پرتو پمپ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، زمان بحرانی برای هر دو محلول با افزایش شدت پرتو پمپ، کاهش می‌یابد. کاهش زمان بحرانی در این حالت، به دلیل افزایش آهنگ رشد چگالی الکترونی پلاسما با افزایش شدت پرتو پمپ می‌باشد. بنابراین پلاسما در زمان کمتری به چگالی بحرانی می‌رسد و می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای پرتو گمانه را جذب نماید.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، پلاسمای تولید شده در محلول حاوی نانوذرات TiO_2 زودتر به چگالی بحرانی می‌رسد. کمتر بودن زمان بحرانی برای محلول حاوی نانوذرات TiO_2 به علت بالاتر بودن سرعت رشد چگالی الکترون‌های آزاد در این محلول می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، پدیده فروشکست اپتیکی در محلول‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 به روش پرتو پمپ- گمانه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که قابلیت عبور پلاسما به شدت پرتو پمپ و نوع نانوذرات بستگی دارد. همچنین میزان عبور پرتو گمانه با وجود فروشکست اپتیکی، در زمان خاصی (زمان بحرانی) که به شدت پرتو پمپ و نوع نانوذره بستگی دارد، نسبت به حالت بدون فروشکست اپتیکی کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] R. G. Pinnick, P. Chylek, M. Jarzembski, E. Creegan, V. Srivastava, G. Fernandez, J.D. Pendleton, A. Biswas, “Aerosol-induced laser breakdown thresholds: wavelength dependence”, Appl. Opt., Vol. No. 5, pp. 987–996, 1988.

[2] Ch. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, “Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightlyfocused femtosecond laser pulses”, Meas. Sci. Technol., Vol. 12, No. 11, pp. 1784-1794, 2001.

[3] M. H. Mahdieh, M. Akbari, J., Z. Bababei, “Optical transmission and reflection of a plasma produced in nanosecond laser induced air breakdown”, Proc. SPIE 9255, XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014, 92554H (2015).

[4] G. Sh. Mital, T. Manoj, “A review of TiO_2 nanoparticles”, Chinese Sci. Bull., Vol.56, No.16, pp.1639–1657, 2011.

[5] S. Miyazaki, “Photoemission study of energy-band alignments and gap-state density distributions for high-k gate dielectrics”, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 19, No.6, pp. 2212, 2001.