

مطالعه تجربی میدان مغناطیسی پلاسمای لیزری با استفاده از اثر وارون فارادی

رکسانا نوریان^۱، امیرحسین فرهبد^{۲*}، مونا روشن^۱

^۱ دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز، تهران

^۲ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتهای کارگر شمالی، تهران

چکیده - در این مقاله میدان مغناطیسی محوری پلاسمای حاصل از برهمکنش باریکه قطبیده دایروی لیزر با هدف فلزی استیل در فشار $1/3 \times 10^{-6}$ میلی بار به روش اثر وارون فارادی مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. شدت میدان لیزر در سطح هدف $10^{12} \times 2/6$ وات بر سانتی متر مربع، پهنای تپ ۴۸ نانو ثانیه و انرژی باریکه لیزر ۵۷۰ میلی ژول است. میدان باریکه کاوش بازتابیده از پلاسما، هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG در طول موج ۵۳۲ نانومتر با پهنای تپ ۱۰ نانوثانیه است. تغییرات حالت قطبش میدان کاوش به کمک مجموعه‌ای متشکل از یک آشکارساز سریع، فیلترهای تضعیف کننده و یک قطبی کننده تحلیل گر مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که چرخش صفحه قطبش میدان بازتابیده از پلاسما تابعی از قطبش میدان برهمکنش است. برای شرایط مذکور در این مقاله چرخشی در حد ۶ درجه برای صفحه قطبش میدان کاوش و میدان مغناطیسی پلاسما از مرتبه 10^3 گاوس مشاهده شده است.

کلید واژه- پلاسمای لیزری، اثر وارون فارادی، میدان مغناطیسی محوری، لیزر نفوذیمیم شیشه

Experimental study of magnetic field of laser-induced plasma by inverse Faraday effect

R. Noorian¹, A.H. Farahbod^{2*} and M. Roshan¹

¹ Faculty of Science, Department of Physics, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran

² Plasma and Nuclear Fusion Research School, INST, North Kargar, Tehran

(*Corresponding author)

Abstract- In this paper, the axial magnetic field produced by the interaction of a circularly polarized laser beam with stainless steel target in 1.3×10^{-4} mbar pressure has been investigated experimentally. To examine the magnetic field, the inverse Faraday effect has been utilized. Laser intensity on the target surface is 2.6×10^{13} W/cm² and the laser pulse width and its energy are 48 ns and 570 mJ, respectively. The probe beam is a second harmonic of cavity damped Nd:YAG laser at 532 nm with 10 ns pulse-width that is synchronized with the interaction laser. The polarization state of the reflected field from plasma analyzed by using a set up consists of a fast detector, attenuator filters and an analyzer. Measurements show that the rotation of plane of polarization of the reflected field depends on the polarization state of the incident field. We have observed about 6 degrees for rotation of the probe beam plane of polarization that gives about 10^3 Gauss for the plasma axial magnetic field.

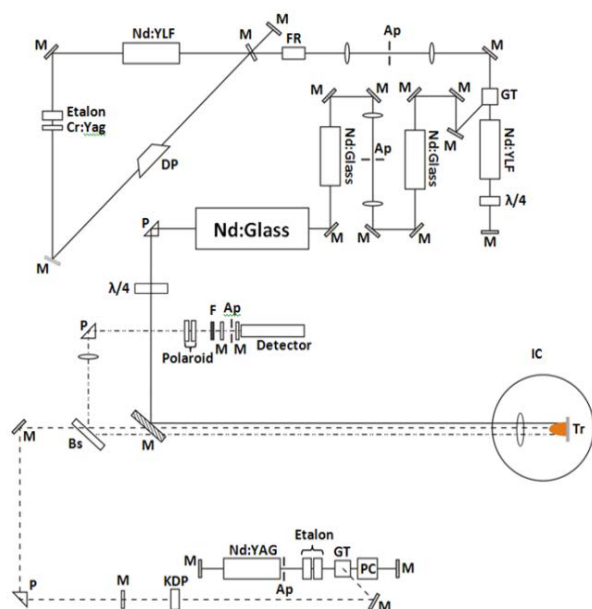
Keywords: Laser-induced plasma, Inverse Faraday effect, Axial magnetic field, Nd:Glass laser

۱- مقدمه

الکتریکی هنگام عبور از یک محیط دی الکتریک یا پلاسما در راستای میدان مغناطیسی می‌چرخد. موج با قطبش خطی را می‌توان به صورت جمع دو مولفه دایروی چپ گرد و راست گرد تجزیه کرد که چرخش صفحه‌ی قطبش به دلیل اختلاف ضریب شکست میان این دو مولفه میدان است. میزان زاویه‌ی چرخش متناسب است با میدان مغناطیسی که با اندازه‌گیری آن می‌توان معیاری از شدت میدان مغناطیسی بدست آورد

برهمکنش لیزرهای پر توان با ماده می‌تواند میدان‌های مغناطیسی در حد مگا گاوس پدید آورد [۱]. این میدان‌ها می‌توانند نقش مهمی در ترابرد ذرات باردار به ویژه الکترون‌ها در پلاسمای پرچگال به عهده داشته باشند. یکی از روش‌ها برای اندازه‌گیری میدان‌هایی با چنین مرتبه بزرگی استفاده از اثر چرخش فارادی است [۲]. در واقع صفحه قطبش میدان

توربومولکولار با ظرفیت 80 Liter/s صورت گرفته است. پمپ ها قادر هستند تا فشار محفظه را تا 10^{-5} میلی بار کاهش دهند اما اندازه گیری های این مقاله در فشار 10^{-4} میلی بار انجام شده است.



شکل ۱: آرایش تجربی جهت مطالعه تغییرات قطبش و اندازه گیری میدان مغناطیسی محوری پلاسما. نمادهای اختصاری به کار رفته در این شکل: M: آینه، F: فیلتر نوری، P: منشور، BS: شکافنده پرتو، GT: قطبی کننده گن-تامسون، AP: روزنه، FR: ایزوله کننده فارادی، DP: منشور داو، IC: محفظه برهمکنش و هدف Tr.

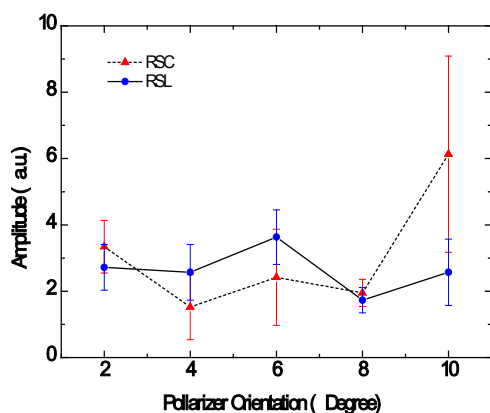
اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که به دلیل کیفیت پایین منشور و آینه‌های هدایت کننده باریکه لیزر، تنها 570 میلی ژول از انرژی خروجی به سطح هدف می‌رسد. به منظور تغییر قطبش میدان از حالت خطی به دایروی و بالعکس از تیغه $\lambda/2$ در مسیر پرتو استفاده شده است. باریکه برهمکنش به کمک عدسی همگرا با فاصله کانونی $7/5$ سانتی‌متر روی هدف کانونی می‌شود. با در نظر گرفتن واگرایی لیزر برهمکنش که حدود $0/5$ میلی رادیان است حداکثر شدت لیزر پس از کانونی شدن بوسیله عدسی بر روی هدف $2/6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ برآورد شده است. لیزر کاوش قادر است پالسی به پهنای زمانی 10 الی 12 نانو ثانیه ایجاد نماید. ساختار این نوسانگر از محیط فعال Nd:YAG و دو آینه تمام بازتابنده، سلول پاکلز و قطبی کننده گن تامسون تشکیل شده است. دو اتالن 3 و 10 میلی

[۳]. میدان الکتریکی یک پالس لیزر با قطبش دایروی نیز می‌تواند سبب حرکت الکترون‌ها در یک مسیر دایروی و تولید میدان مغناطیسی محوری در پلاسما شود که اثر وارون فارادی نامیده می‌شود [۴]. در این مقاله ابتدا به توصیف سیستم تجربی لیزر برهمکنش و کاوش می‌پردازیم و سپس نتایج تجربی بدست آمده برای تغییرات قطبش باریکه کاوش و محاسبه میدان مغناطیسی درون پلاسما ی لیزری ارائه می‌شود.

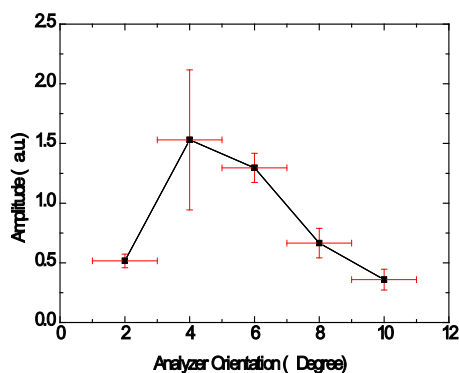
۲- آرایش تجربی

سامانه لیزر برهمکنش متشکل است از نوسانگری با محیط فعال Nd:YLF است، شکل ۱. در مجموعه سیستم برهمکنش طول موج 1053 نانومتر لیزر Nd:YLF بکار گرفته شده است. نوسانگر سیستم برهمکنش از نوع حلقوی نا هم سطح، متشکل از سه آینه 100% در طول موج 1053 نانومتر تحت زاویه 45° ، یک آینه با ضریب بازتابش 50% و منشور داو (برای کاهش حساسیت نوسانگر به تنظیمات آینه‌ها) است که به کمک بلور Cr:YAG عمل سوئیچ Q انفجالی برای آن صورت می‌گیرد. تعداد مدهای طولی نوسانگر بوسیله یک اتالن به ضخامت 6 میلیمتر و ضریب بازتابندگی 30% در هر سطح تا حداقل ممکن (2 الی 4 فرکانس طولی) کاهش می‌یابد و پالسی با پهنای زمانی 48 نانوثانیه و انرژی خروجی 12 میلی ژول و واگرایی باریکه کمتر از $0/5$ میلی رادیان ایجاد می‌نماید. پرتو نوسانگر پس از خروج از شکافنده پرتو به منظور جلوگیری از برگشت باریکه بازتابیده لیزر از هدف طی فرایند برهمکنش به نوسانگر و حفاظت از قطعات اپتیکی آن از ایزوله کننده فارادی عبور کرده و پس از پالایش فضایی پرتو و افزایش قطر آن توسط فیلتر فضایی با بزرگنمایی $1/6$ و بازتاب از آینه تمام بازتابان M وارد یک تقویت کننده دو عبوری با محیط فعال Nd:YLF و قطر محیط فعال 5 میلیمتر می‌شود و پس از یک رفت و برگشت از این تقویت کننده با انرژی 210 میلی ژول از آن خارج می‌شود. انرژی باریکه خروجی پس از سه مرحله تقویت آینه در تقویت کننده‌های تک عبوری Nd:YLF و Nd:Glass به حداکثر $3/5$ ژول می‌رسد. مشاهدات صورت گرفته در این مقاله برای انرژی خروجی نهایی 1 ژول انجام شده است. پرتو خروجی از تقویت کننده نهایی به کمک یک منشور و 3 آینه تمام بازتابان و عبور از تیغه نیم موج به داخل محفظه برهمکنش هدایت می‌شود که تامین خلاء آن به کمک مجموعه پمپ چرخشی و یک پمپ کوچک

نسبت سیگنال دریافت شده در هر حالت نشان می‌دهد که میدان لیزر برهمکنش با قطبش خطی حداقل تاثیر را بر چرخش صفحه قطبش میدان باریکه کاوش دارد. با حضور باریکه کاوش و تغییر قطبش میدان باریکه برهمکنش از خطی به دایروی، چرخش صفحه قطبش میدان باریکه کاوش بازتابیده از پلاسما در حد ۶ درجه به دلیل بروز میدان مغناطیسی محوری حاصل از جریان چنبره‌ای ناشی از میدان الکتریکی لیزر برهمکنش با قطبش دایروی به نحو بارزی مشاهده می‌شود، شکل ۱.



شکل ۱: دامنه سیگنال دریافت شده برای باریکه کاوش در حضور باریکه برهمکنش به ترتیب با قطبش دایروی RSC، و قطبش خطی RSL.



شکل ۲: نسبت دامنه سیگنال اندازه‌گیری شده بازتابیده از پلاسما برای باریکه لیزر با قطبش خطی بر سیگنال دریافت شده برای باریکه لیزر با قطبش دایروی، بر حسب زاویه جهت‌دهی قطبی کننده تحلیل‌گر برای دریافت حداقل سیگنال.

با توجه به رابطه (۱) برای مقدار چرخش صفحه قطبش میدان الکتریکی باریکه کاوش ناشی از میدان مغناطیسی B_z ، که برای اثر فارادی معکوس می‌توان آن را میدان مغناطیسی حاصل از چرخش الکترون‌های کرونای پلاسما در اثر میدان قطبیده

متر با ضریب بازتاب ۲۰ و ۳۰٪ برای کاهش تعداد مدهای طولی نوسانی نوسانگر و افزایش طول همدوسی لیزر به کار رفته است. روزنه ۲ میلیمتری برای بهبود کیفیت باریکه خروجی و حذف مدهای عرضی مراتب بالاتر مورد استفاده قرار گرفته است. پرتو کاوش از سمت منشور گلن تامسون خارج می‌شود و پس از عبور از کریستال KTP فرکانس آن دو برابر می‌گردد و هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر و قطبش خطی پدید می‌آید. سپس پرتو کاوش به کمک منشور و آیینه تمام بازتابان، هم راستا با پرتو برهمکنش، وارد محفظه می‌شود و پس از بازتابش از پلاسما به کمک یک تیغه شیشه‌ای ساده، ۵٪ آن وارد آشکارساز می‌شود. از عدسی روبروی آشکارساز با فاصله کانونی ۲۵ سانتی متر برای جمع آوری هر چه بیشتر پرتو بازتابیده از پلاسما و افزایش دامنه پالس ورودی به آشکارساز استفاده شده است. در مسیر پرتو بازتابی از ۲ قطبی کننده استفاده شد. ابتدا قطبی کننده‌ها و آشکارساز را به کمک یک نمونه از پالس کاوش بدون حضور پلاسما و در حالت قطبی کننده‌های متعامد کالیبره می‌کنیم به نحوی که آشکارساز هیچ نمونه‌ای از پالس کاوش را دریافت نکند. این نقطه را زاویه ۹۰ درجه میان پلارویدها در نظر می‌گیریم. پس از تشکیل پلاسما، قطبش پرتو کاوش بازتابیده از پلاسما به دلیل وجود میدان مغناطیسی در آن تغییر می‌یابد و این تغییر قطبش سبب می‌شود که بخشی از میدان باریکه کاوش از قطبی کننده‌ها عبور نماید و توسط آشکارساز شناسایی شود. اندازه‌گیری‌ها برای دو حالت باریکه برهمکنش با قطبش خطی و قطبش دایروی و انرژی ۵۷۰ میلی ژول انجام شده است. در هر اندازه‌گیری زاویه قطبی کننده تحلیلگر آنقدر تغییر داده می‌شود تا سیگنال دریافت شده توسط آشکارساز به حداقل ممکن کاهش یابد. بدین ترتیب اندازه چرخش صفحه قطبش میدان باریکه کاوش پس از بازتابش از پلاسما بدست می‌آید.

۳- روش محاسبه میدان مغناطیسی

نمودارهای شکل ۱ سیگنال‌های دریافت شده به وسیله آشکارساز را به ازای قطبش خطی و قطبش دایروی برای باریکه برهمکنش به ازای زاویه جهت‌دهی قطبی کننده تحلیل‌گر واقع در جلوی آشکارساز، به منظور دستیابی به حداقل عبوردهی مجموعه قطبی کننده‌های نصب شده در مقابل آشکارساز را در حضور باریکه کاوش نشان می‌دهند.

بوسیله دوربین CCD برای پلاسما $L_p \approx 0.2$ cm، اندازه میدان B برابر با ۱۳۶۹ گاوس بدست می‌آید که قابل مقایسه با مقادیر بدست آمده از رابطه (۳) در حد ۱۰۰۰ گاوس برای مقادیر محاسبه شده برای حداکثر اندازه میدان مغناطیسی محوری متناظر با حداکثر چگالی الکترونی بدست آمده از روش تداخل‌سنجی است [۵]، شکل ۳.

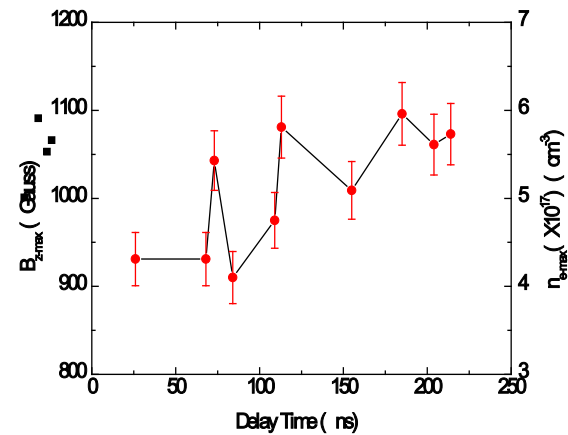
۴- نتایج

در این پژوهش، میدان مغناطیسی پلاسمای ناشی از برهمکنش پالس لیزر با انرژی ۵۷۰ میلی ژول و پهنای ۴۸ نانوثانیه و شدت متمرکز شده 2.6×10^{13} وات بر سانتی متر مربع با هدف استیل در محیط خلاء و فشار 10^{-4} / ۳ میلی بار به کمک اندازه گیری تغییرات صفحه قطبش باریکه کاوش مورد سنجش قرار گرفت. محاسبه میدان مغناطیسی محوری با فرض توزیع نمایی چگالی الکترونی و تغییرات آرام میدان مغناطیسی صورت گرفته است. اندازه گیری‌ها طی یک بازه زمانی ۲۰۰ نانوثانیه ای از لحظه برخورد باریکه لیزر بر سطح هدف نشان دهنده تغییرات آرام میدان مغناطیسی محوری ناشی از حرکت الکترون ها بر روی مسیر بسته به دلیل قطبیدگی دایروی میدان لیزر میدان ایجاد شده در پلاسما حدود ۱۰۰۰ گاوس برآورد گردید.

۵- مراجع

- [1] F. Francis Chen, "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" Springer (1984).
- [2] I. H. Hutchinson "Principles of Plasma Diagnostics" 2nd Edition, Chambridge University Press (2005).
- [3] S. Eliezer "The Intraction of High Power Lasers with Plasmas" IOP Publishing (2002).
- [4] Y. Horovitz et al., **Physics Letters A** 246,329(1998).
- [۵] رکسانا نوریان، امیر حسین فرهد، زهراسادات محمدی، " اندازه گیری چگالی الکترون برای پلاسمای حاصل از لیزر به روش تداخل‌سنجی " نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۹۱).

دایروی لیزر در نظر گرفت، و با فرض تغییرات آهسته میدان مغناطیسی، می‌توان B را از زیر انتگرال رابطه (۱) خارج نمود که در این صورت رابطه (۲) بدست می‌آید.



شکل ۳: مقادیر محاسبه شده به کمک رابطه (۳) برای حداکثر میدان مغناطیسی محوری پلاسمای لیزری، و چگالی الکترونی در لحظات گوناگون پس از برهمکنش لیزر با هدف.

$$\theta = 3/0.2 \left(\frac{\lambda_p}{\mu m} \right)^2$$

$$\int_0^1 \left(\frac{dz}{\mu m} \right) \left(\frac{n_e}{1.21 \text{ cm}^{-2}} \right) \left(\frac{B}{\text{MGauss}} \right) \left(1 - \frac{n_e}{n_{ec}} \right)^{-1/2}$$

(۱)

$$B = \theta(\text{deg}) \times 10^6 /$$

$$\left(3/0.2 \left(\frac{\lambda_L}{\mu m} \right)^2 \int_0^1 \left(\frac{dz}{\mu m} \right) \left(\frac{n_e}{1.21 \text{ cm}^{-2}} \right) \left(1 - \frac{n_e}{n_{ec}} \right)^{-1/2} \right)$$

(۲)

$$B = B_c \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega} \right) \left(\frac{eE_0}{m_e \omega c} \right) \approx 6/5 \times 10^6 \left(\frac{n_e}{n_{ec}} \right)^{1/2} \left(\frac{I_L}{1.4 \text{ W/cm}^2} \right)^{1/2}$$

(۳)

حد بالای انتگرال گیری در رابطه (۲) به دلیل دو بار عبور باریکه کاوش از پلاسما برای اثر فارادی معکوس از L_p به $2L_p$ تغییر یافته است. برای مقدار زاویه چرخش صفحه قطبش میدان باریکه کاوش با فرض نیمرخ نمایی $n_e = n_{ec} e^{-z/\alpha L_p}$ سوی محیط بیرونی که فرضی نزدیک به مشاهدات تجربی است و $n_{ec} \approx 1.21 \text{ cm}^{-3}$ چگالی بحرانی برای طول موج باریکه کاوش و همچنین تنظیم ضریب $\alpha = 0.1$ با توجه به ابعاد ثبت شده