همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

بهبود جریان الکترونی حاصل از برهمکنش پالس لیزر KrF با دتریم

سمیه زارع *

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران،ایران

چکیده: در این مقاله برهمکنش پالس لیزر KrF با هدف دتریم مطالعه می‌شود. در محدوده غیرنسبیتی، مهم‌ترین مکانیزم جذب انرژی لیزر در سطح بحرانی پلاسما، جذب برخوردی است. بنابراین فرکانس برخورد الکترون-یون در میزان جذب نقش مهمی دارد. در دماهای بیشتر از دمای بحرانی، پارامتر برخورد الکترون-یون کوچکتر از طول موج دوبروی خواهد شد و ضریب رسانندگی و فرکانس برخورد در برهمکنش باید کوانتومی محاسبه شوند. حال با فرض دمای بزرگتر از ۳۶ الکترون ولت برای پلاسمای دتریم، تصحیحات کوانتومی فرکانس برخورد و ضریب رسانندگی در کد دوسیالی GENUINE اعمال می‌شوند. تحت تاثیر این تصحیحات و افزایش فرکانس برخورد و ضریب رسانندگی پلاسما، گرمایش الکترون‌ها و عمق نفوذ آن‌ها در پلاسما بهبود می‌یابد. دمای الکترون‌ها به طور یکنواخت تا بیشینه‌ی، $3/2\times10^{7}K$ افزایش خواهد یافت و الکترون‌ها در مدت زمانی بیش از ۶۰۰fs در بیشینه دما هستند که این دما بیشتر از دو برابر دمای الکترون‌ها با فرض فرکانس کلاسیکی خواهد بود.

کلید واژگان: لیزرKrF؛ تصحیح کوانتومی؛ گرمایش الکترون؛

Improving the electron current in interaction of KrF laser with deuterium

Somaye Zare

Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract-In this article, the interaction of KrF laser with deuterium is investigated. in sub-relativistic intensities, the collisional absorption is dominant. Therefore, the collision frequency of electron-ion has important role in the energy absorption. At high temperatures, the classical impact parameter is longer than Broglie wavelength. as a consequence, the quantum correction appears in the frequency collisions and the electrical conductivity. Considering the plasma temperature greater than 36ev and the quantum correction in GENUINE two-fluid hydrodynamic code, the electron heating in plasma are studied. It is found that due to the quantum correction, the collision frequency and the electrical conductivity are modified. So the electron heating considerably increases up to the maximum temperature of $3.2\times10^{7}K$ which is bigger than about twice the classical case. Also, the temperature stays almost constant for more than 600 fs of interaction time.

Keywords: KrF laser, Quantum correction, Electron heating

* sozare@aeoi.org.ir

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

۱- مقدمه

برهمکنش لیزرهای پرشدت با مواد، روشی برای تولید ذرات پرانرژی مانند الکترون، پروترون، نوترون و تولید اشعه ایکس همدوس، اشعه گاما، تابش تراهرتز و هارمونیک های بالاست. در برهمکنش لیزر با پلاسما، الکترون‌ها به طور مستقیم تحت تاثیر میدان الکترومغناطیس لیزر، شتاب می‌گیرند. مطالعات زیادی جهت بهبود فرایند شتاب‌دهی الکترون‌ها در محدوده نسبیتی و غیرنسبیتی صورت گرفته است. استربری اولین فردی بود که الکترون‌ها و یون‌های حاصل از برهمکنش یک پالس لیزر تراوات KrF را در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرد[۱]. شتاب الکترون‌ها در شروع واکنش، ناشی از نیروی اثرگذار است، اما با پیشروی لیزر به عمق پلاسما و رسیدن به سطح بحرانی با بیشترین چگالی، جذب گرمایی تحت مکانیزم عکس تابش ترمزی غالب می‌شود. در اوایل دهه ۸۰، در چندین گزارش، نتایج اندازه‌گیری ضریب رسانندگی و رسانش گرمایی پلاسمای درون توکومک، با محاسبات تئوری سازگار نبود، برای مثال در یک گزارش، ضریب رسانندگی حاصل از آزمایش حدود ۳۰ درصد بزرگتر از نتایج تئوری بود[۲]. بعدها پی بردند که علت این تفاوت در این است که در دماهای بالاتر از دمای مشخصی موسوم به دمای بحرانی پلاسما، ضریب رسانندگی آن در محاسبات تئوری باید کوانتومی در نظر گرفته شود که پروفسور هورا محاسبات مربوط به این تصحیحات را در کتابی به چاپ رسانده است[۳]. در این مقاله با فرض پلاسمایی بالاتر از دمای بحرانی، ضریب رسانندگی و فرکانس برخورد، با توجه به تصحیحات ارائه شده توسط پورفسور هورا، کوانتومی در نظر گرفته شده است و این تصحیحات در معادلات کد دوسیالی *GENUINE*، اعمال شده است. سپس فرایند گرم شدن الکترون‌ها در برهمکنش پالس لیزرکوتاه KrF با پلاسما بررسی شده است و دمای الکترون‌های تولیدی با حالت کلاسیکی مقایسه شده است.

۲- تئوری

هرگاه دمای پلاسما آنچنان بالا باشد که در برخورد الکترون با یون، پارامتر برخورد کلاسیکی از طول موج دوبروی، کوچکتر شود، باید در محاسبات پلاسمای دو سیالی، فرکانس برخورد را کوانتومی در نظر گرفت. فرکانس برخورد با تصحیح کوانتومی، اولین بار توسط بتی معرفی شد و توسط پروفسور هورا تکمیل شد. با فرض پارامتر برخورد کوانتومی، فرکانس برخورد و ضریب رسانندگی برابر هستند با[۳]،

$$\sigma = \frac{eZ^3((1+4T^*/T)^{1/2}-1)^2}{\sqrt{3k_B T\, r_{Bohr} m_e}},\ \nu = -\frac{\pi m_e r_{Bohr}^2}{4Z^3}\frac{\sqrt{3k_B T/m_e}}{((1+4T^*/T)^{1/2}-1)^2} \qquad (۱)$$

r_{Bohr} شعاع بوهر، m_e جرم الکترون، n_e چگالی الکترونی، k_B ثابت پولتزمن و T دمای پلاسما را نشان می‌دهند. همچنین $T^* = 4.176\times10^5 Z^2\ K$، دمای بحرانی است که تنها به درجه یونیزاسیون یون‌ها بستگی دارد. این دما برای هدف دتریم، ۳۵/۹ الکترون‌ولت است. در دماهای کمتر از دمای بحرانی، نتایج فرکانس برخورد کلاسیکی و کوانتومی یکسان خواهند بود.

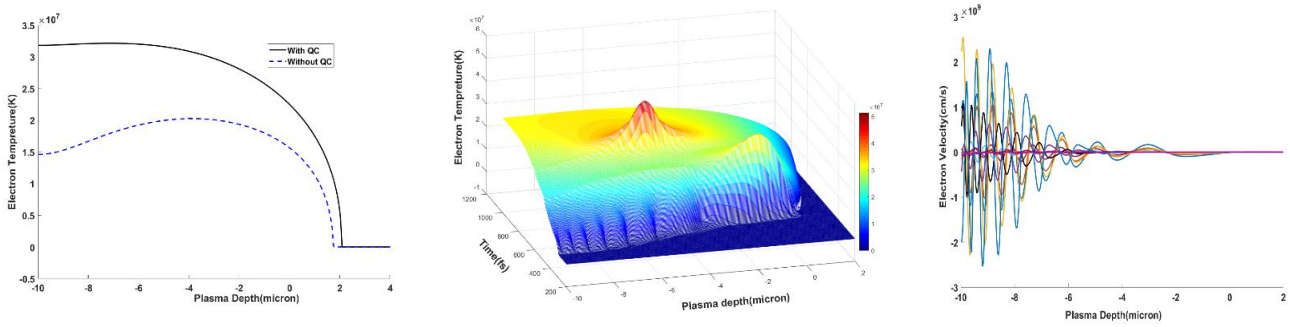
۳- محاسبات

محاسبات با اعمال اصلاحات در کد *GENUINE* انجام شده است. پالس لیزر *KrF* با طول موج *nm* ۲۴۸، شدت $8\times10^{16} Wcm^{-2}$ و طول پالس *fs*۳۰۰ به پلاسما با ضخامت μm ۲۰با دمای اولیه *ev* ۱۰۰ تابیده می‌شود. در شروع واکنش شتاب الکترون‌ها ناشی از نیروی اثرگذار است، به همین علت الکترون‌ها رفتاری نوسانی حول محور باریکه لیزر خواهند داشت. با نفوذ الکترون‌ها در پلاسما و رسیدن به سطح بحرانی دتریم با بیشترین چگالی، جذب انرژی لیزر توسط الکترون‌ها عمدتا توسط مکانیزم عکس تابش ترمزی خواهد بود. پس میزان انرژی جذب شده توسط الکترون‌ها در سطح بحرانی به فرکانس برخورد بستگی دارد. بنابراین با وارد شدن تصحیح کوانتومی در فرکانس برخورد و افزایش آن انتظار می‌رود که گرمایش الکترون‌ها بهبود یابد و همچنین به علت افزایش ضریب رسانندگی، الکترون‌ها تا عمق بیشتری نفوذ کنند. در شکل

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

۱الف توزیع سرعت الکترون‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت الکترون، حدود $۲/۵\times۱۰^{۹}\ cm/s$ خواهد بود که این الکترون‌ها با نفوذ در پلاسما انرژی خود را به یون‌ها منتقل می‌کنند تا اینکه در عمق $۱۲\ \mu m$ متوقف شوند. همچنین در شکل ۱ب دیده می‌شود که بیشینه دمای الکترون‌ها $۳/۲\times۱۰^{۷}\ K$ است. دمای الکترون‌ها با انتقال انرژی الکترون به بلوک‌های یونی حاصل از مکانیزم SLPA، به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد، این بلوک‌های یونی در واکنش‌های گداخت هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند[۴]. از شکل مشاهده می‌شود که الکترون‌ها در مدت زمانی بیشتر از $۶۰۰fs$ در دمای تقریباً ثابتی باقی می‌مانند که فرصت خوبی برای جذب انرژی الکترون‌ها توسط بلوک‌های یونی است. با توجه به اینکه الکترون‌ها تحت تاثیر نیروی پاندرماتیو شتاب می‌گیرند، با افزایش شدت لیزر، گرمایش الکترون‌ها بهبود می‌یابد. با مقایسه دمای الکترون‌ها با مرجع [۴] تاثیر شدت لیزر مشهودتر است. شکل ۱ج دمای الکترون‌ها با اعمال تصحیحات کوانتومی و بدون آن را مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که دمای الکترون‌ها با این تصحیحات بیش از دو برابر حالت کلاسیکی است. با مقایسه نتایج این کار با مرجع[۴] نتیجه می‌شود که هر چه دمای پلاسما از دمای بحرانی بزرگتر باشد، تاثیر تصحیحات کوانتومی بر گرمایش الکترون‌ها بیشتر است و توزیع دمایی الکترون‌ها یکنواخت‌تر خواهد بود و الکترون‌ها عمق نفوذ کمتری خواهند داشت.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱- (الف) سرعت الکترون‌های در راستای انتشار با فرض تصحیح کوانتومی، (ب) توزیع دمایی الکترون‌ها در عمق پلاسما در زمان‌های مختلف با فرض تصحیح کوانتومی، (ج) مقایسه دمای الکترون‌ها با فرض تصحیح کوانتومی(خط ممتد) و بدون تصحیح کوانتومی(خط چین).

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله گرمایش الکترون‌ها در برهمکنش لیزر KrF با پلاسمای دوتریم با دمای اولیه $۱۰۰ev$ مطالعه شد. مشاهده شد که مشابه نتایج حاصل از آزمایش‌های توکومک، با اعمال تصحیحات کوانتومی گزارش شده توسط پروفسور هورا گرمایش الکترون‌ها بهبود می‌یابد و الکترون‌ها از باریکه لیزر تا رسیدن به دمای $۳/۲\times۱۰^{۷}K$ و سرعت $۲/۵\times۱۰^{۹}cm/s$ انرژی جذب خواهند کرد. باریکه الکترونی در جهت پالس لیزر در پلاسما حرکت می‌کند و با انتقال انرژی خود به یون‌ها در عمق معینی متوقف خواهند شد.

مراجع

[۱] M. Varshney *et al*., **J. Plasma Phys**. 72, 195 (2006).
[۲] G. Grieger, V. Wendelstein, **Plasma Physics** Vol. I, 173 (1980).
[۳] H. Hora, Plasmas at High Temperature and Density. *Heidelberg: Springer* (1991).
[٤] S. Zare, E. Yazdani, R. Sadighi-Bonabi, A. Anvari, H. Hora, **J.Applied Phys**. 117, 143303 (2015).

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]