بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

بررسی اثر چیرپ بر افزایش دمای حاصل از اندرکنش تپ‌های لیزری فمتوثانیه با سیلیکون

رضا گودرزی، داوود رزاقی، فرشته حاج اسماعیل بیگی

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی

تپ‌های لیزری فمتوثانیه به دلیل پهنای فرکانسی وسیعی که دارند، در اثر انتشار در محیط دچار چیرپ شدگی می‌شوند. در این مقاله اثری که چیرپ شدگی تپ لیزری بر اندرکنش می‌گذارد، بررسی شده است. دمای حامل‌ها با استفاده از تپ چیرپ شده حدود دو برابر افزایش می‌یابد. همچنین تعداد حامل‌های آزاد در حالت چیرپ شده افزایش یافته و دمای شبکه تا حدود سه برابر نسبت به حالت چیرپ نشده افزایش یافته است. در این مقاله نشان داده شده که استفاده از تپ چیرپ شده می‌تواند باعث افزایش جذب انرژی لیزر توسط حامل‌ها و به دنبال آن افزایش دمای سیلیکون شود. همچنین استفاده از تپ لیزری با چیرپ شدگی منفی، به دلیل نفوذ بیشتر درون نمونه، منجر به افزایش تعداد حامل‌های داغ و افزایش دمای نمونه می‌شود.

کلید واژه: چیرپ، لیزر، فمتوثانیه، سیلیکون

Investigation of the chirp effect on the temperature rising due to the interaction of femtosecond laser pulses with silicon

Reza Goodarzi, Davood Razaghi, Fereshteh Hajiesmaeilbaigi

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technologies Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, North Kargar street, Tehran, Iran

Femtosecond laser pulses due to their wide frequency spectrum will be chirped when propagating into any environment and this phenomenon is unavoidable for femtosecond laser pulses. In this paper, the effect of laser chirping on the interaction is investigated. The temperature of the carriers increases by about twice while using a chirped pulse laser. Also, the number of free carriers for the chirped pulses has enhanced and the lattice temperature has increased about three times relative to the un-chirped pulse. Finally, it has been shown that using a chirped pulse laser can increase the absorption of laser energy and, consequently, increase the temperature of the silicon. Also, negatively chirped laser pulse, due to deeper penetration into the sample, leads to an increase in the number of hot carriers and sample temperature.

Keywords: Chirp, Laser, Femtosecond, Silicon

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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

مقدمه

با پیشرفت فناوری لیزر در عصر حاضر کاربردهای آن نیز به‌طور گسترده در علوم مختلف مانند پزشکی و مهندسی مشهود است. لیزرهای فوق سریع با تپ‌هایی از مرتبه زمانی فمتوثانیه به دلیل مدت زمان بسیار کوتاهی که دارند، کاربردهای ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای چنین لیزرهایی، میکروماشین کاری فلزات و نیمه-رساناها جهت ساخت مدارهای الکترونیکی و همچنین افزایش بازده سلول‌های خورشیدی است. اندرکنش تپ‌های لیزری فمتوثانیه با سیلیکون منجر به ایجاد ساختارهای خودبه‌خودی روی سطح شده که وجود این ساختارها باعث کاهش ضریب بازتاب سطح سیلیکون می‌شود.

سازوکار اندرکنش تپ‌های فمتوثانیه هنوز به‌طور کامل شناخته‌شده نیست و پژوهشگران اثر مؤلفه‌های مختلف دخیل در اندرکنش را مطالعه می‌کنند[1]. یکی از پدیده‌های فیزیکی که برای یک تپ فمتوثانیه اجتناب‌ناپذیر است، پدیده به اصطلاح چیرپ‌شدگی است. تپ لیزری فمتوثانیه، دارای محدوده فرکانسی وسیعی است که با انتشار در محیط به دلیل اثر پاشندگی سرعت گروه، دچار چیرپ‌شدگی می‌شود. در این مقاله، اثر چیرپ‌شدگی تپ‌های لیزر فمتوثانیه روی اندرکنش آن با سیلیکون و گرمایش شبکه بررسی شده است.

بررسی نظری

در اندرکنش لیزر با ماده، جذب انرژی لیزر توسط الکترون‌های ماده هدف رخ می‌دهد که با توجه به نوع ماده و لیزر، سازوکارهای جذب مختلفی رخ می‌دهند. هنگامی که از تپ‌های لیزر فمتوثانیه برای اندرکنش استفاده شود، به دلیل آن‌که زمان تپ‌ها کوتاه‌تر از زمان مورد نیاز برای انتقال انرژی از الکترون به شبکه است، سازوکار جذب و کندوسوز هدف با حالتی که از لیزرهای با مدت زمان نانوثانیه استفاده می‌شود، متفاوت است[2]. در این حالت می‌توان برای هدف دو زیر سیستم درنظر گرفت که حامل‌ها (الکترون) در یک زیر سیستم قرار گرفته و اتم‌های شبکه در زیر سیستم دیگری قرار می‌گیرند؛ هر کدام از این زیر سیستم‌ها در طی اندرکنش و پس از آن دمای مختص به خود را دارند و آنقدر انرژی جذب‌شده از لیزر توسط حامل‌ها به شبکه منتقل می‌شود تا دو زیرسیستم به تعادل حرارتی برسند. به این روش بررسی اندرکنش تپ‌های لیزری با ماده، مدل دو-دمایی گفته می‌شود[1]. معادلات دو-دمایی که برای سیلیکون نوشته می‌شود، به‌صورت زیر است[3]:

$$3n_c K_B \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla\cdot\left(k_c \nabla T_c\right) - \frac{3n_c K_B}{\tau_c}\left(T_c - T_l\right) + \left(\alpha + \Theta n_c\right) I - \frac{\partial n_c}{\partial t}\left(E_g + 3K_B T_c\right) - n_c\left(\frac{\partial E_g}{\partial n_c}\frac{\partial n_c}{\partial t} + \frac{\partial E_g}{\partial T_l}\frac{\partial T_l}{\partial t}\right) \qquad (۱)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla\cdot\left(k_l \nabla T_l\right) + \frac{3n_c K_B}{\tau_c}\left(T_c - T_l\right) \qquad (۲)$$

معادله (۱) برای حامل‌ها و معادله (۲) مربوط به شبکه می‌باشد. در معادلات (۱و۲)، نماد (c) برای حامل‌ها و (l) برای شبکه نوشته شده، (n_c) چگالی حامل‌ها، (T) دما، (K_B) ثابت بولتزمن، (k) رسانندگی حرارتی، (C) ظرفیت گرمایی، (τ_c) زمان لازم برای انتقال حرارت از حامل‌ها به شبکه، (E_g) انرژی گاف، (α) ضریب جذب، (Θ) سطح مقطع جذب حامل‌ها، (t) زمان و (I) شدت لیزر می‌باشند.

برای به دست آوردن دمای حامل‌ها و شبکه در زمان اندرکنش و پس از آن، باید معادلات دو دمایی به طور همزمان حل شوند. حل معادلات دو دمایی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. برای سادگی، معادلات تنها در راستای انتشار لیزر حل شده و از انتقال حرارت به محیط صرف‌نظر می‌شود. با توجه به این‌که زمان اندرکنش در محدوده‌ی فمتوثانیه است، این

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

فرض‌ها دور از واقعیت نیست[1]. برای حل دقیق معادلات دو-دمایی باید پارامترهای موجود در معادلات به درستی انتخاب شوند. شدت لیزر (I) که نقش اساسی در اندرکنش ایفا می‌کند، وابستگی زمانی دارد و به شکل زیر نوشته می‌شود:

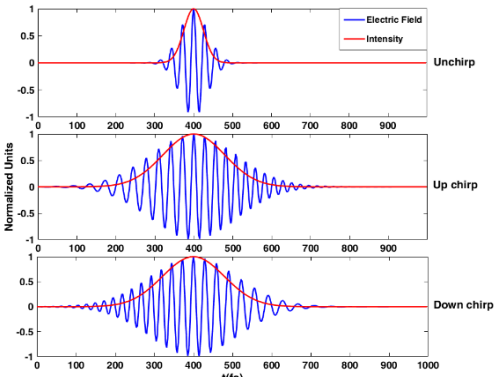
$$I=\sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi}}(1-R)I_0\exp\left(-4\ln 2\frac{(t-t_0)^2}{\tau_L^2}\right)e^{-\alpha z} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، (R=0.3) ضریب انعکاس سطح، (I_0) بیشینه شدت لیزر، (t_0=400 fs) زمانی است که بیشینه شدت لیزر به هدف می‌رسد، (τ_L) مدت زمان تپ لیزر و (z) عمق نمونه در راستای انتشار لیزر است.

پدیده مهمی که در این مقاله بررسی می‌شود، اثر چیرپ‌شدگی است. چیرپ که در اثر تغییرات سرعت گروه به ازای طول‌موج‌های مختلف ایجاد می‌شود به‌صورت ضریبی در فاز میدان الکتریکی لیزر وارد می‌شود، چنان‌که دامنه میدان الکتریکی لیزر عبارت است از:

$$A=A_0\exp\left(\phi+at^2\right) \quad (۴)$$

(A_0) دامنه میدان الکتریکی لیزر، (A) در این رابطه، پارامتر (a) فاز و (ϕ)بیشینه دامنه میدان الکتریکی لیزر، چیرپ است. پارامتر چیرپ بسته به ویژگی محیط انتشار می‌تواند عددی مثبت و یا منفی باشد که باعث چیرپ Upمثبت و یا منفی شود. چیرپ مثبت و منفی به ترتیب نیز گفته می‌شوند.Down chirp و chirp

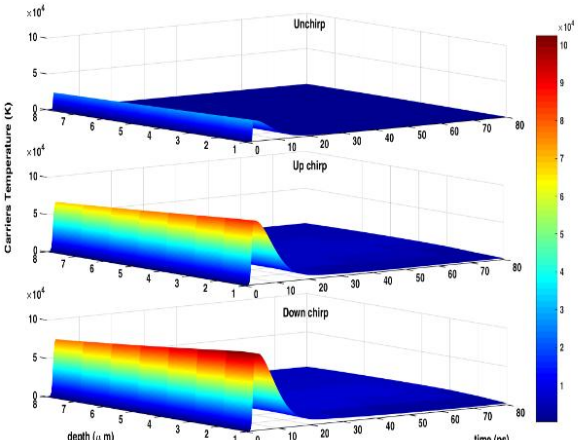


شکل ۱: اثر چیرپ روی نوسانات میدان الکتریکی (آبی) و شدت لیزر (قرمز) برای تپ‌های چیرپ‌نشده، با چیرپ مثبت و منفی

در شکل (۱)، تپ‌های لیزری با چیرپ مثبت، منفی و بدون چیرپ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. انرژی کل هر سه تپ یکسان است. همان‌طور که از شکل مشخص است، با اعمال چیرپ، پهنای زمانی تپ افزایش می‌یابد و در چیرپ مثبت ابتدا مؤلفه‌های فرکانسی کوچک‌تر و سپس مؤلفه‌های فرکانسی بزرگ‌تر به هدف می‌رسند درحالی‌که در چیرپ منفی این موضوع برعکس است.

نتایج و بحث

جهت بررسی اثر چیرپ در اندرکنش تپ‌های لیزر فمتوثانیه با سیلیکون، معادلات دو-دمایی با درنظر گرفتن اثر چیرپ در شدت لیزر حل شد. پارامترهای چیرپ a=3 و a=-3 برای به ترتیب چیرپ مثبت و منفی انتخاب شدند. با حل معادلات دو-دمایی تغییرات دمایی حامل‌ها در عمق نمونه و در زمان‌های مختلف به‌دست آمد. در شکل (۲)، تغییرات دمایی حامل‌ها برای تپ‌های هم‌انرژی با چیرپ مثبت، منفی و بدون چیرپ نشان داده شده است.



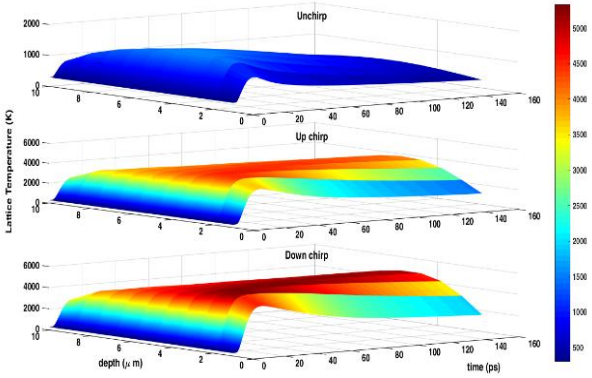
شکل ۲: تغییرات دمای حامل‌ها در زمان و در عمق‌های مختلف نمونه برای تپ‌های بدون چیرپ، با چیرپ مثبت و منفی

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، با اعمال چیرپ، بیشینه دمای حامل‌ها نسب به حالت بدون چیرپ تا دو برابر افزایش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل این افزایش دما، ریشه در معادلات دو-دمایی دارد، جایی که تعداد حامل‌ها نقش تأثیرگذاری در افزایش و یا کاهش دما ایفا می‌کنند. با اعمال چیرپ، مدت زمان تپ لیزر افزایش

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

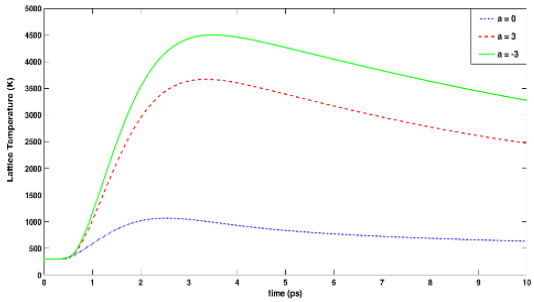
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

می‌یابد، از طرفی با جذب انرژی لیزر و یونیزاسیون، تعداد حامل‌های هدف نیز افزایش می‌یابند. حامل‌ها عامل اصلی جذب انرژی لیزر هستند و درنتیجه با افزایش تعداد آن‌ها، جذب انرژی لیزر نیز به‌طور مؤثرتری انجام می‌شود و درنتیجه دمای حامل‌ها افزایش می‌یابد. از این‌رو می‌توان گفت در یکه چرخه دوطرفه، با طولانی شدن مدت زمان تپ، تعداد حامل‌ها افزایش می‌یابند و با افزایش تعداد حامل‌ها، جذب انرژی بیشتری روی می‌دهد و دمای حامل‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۳: تغییرات دمای شبکه در زمان و در عمق‌های مختلف نمونه برای تپ‌های بدون چیرپ، با چیرپ مثبت و منفی

در شکل (۳)، تغییرات دمایی شبکه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، دمای شبکه با استفاده از چیرپ منفی بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. واضح است که حامل‌های داغ‌تر منجر به شبکه‌ای با دمای بیشتر می‌شوند اما دلیل آن‌که چیرپ منفی باعث ایجاد شبکه‌ای با دمای بیشتر از چیرپ مثبت شده است، تغییرات فرکانسی چیرپ منفی است. با افزایش چگالی حامل‌ها در طی اندرکنش، اثر حفاظ پلاسما [4] افزایش یافته و دیگر لیزر قادر به نفوذ به درون نمونه نیست. لذا افزایش فرکانس تپ در انتهای اندرکنش نمی‌تواند باعث نفوذ لیزر درون نمونه شود درحالی که با استفاده از چیرپ منفی در نیمه اول اندرکنش، بیشترین نفوذ رخ می‌دهد و لیزر می‌تواند بخش زیادی از انرژی خود را به حامل‌های موجود در عمق نمونه منتقل کند. در شکل (۴)، اثر چیرپ بر تغییرات دمایی هدف در زمان اندرکنش و پس از آن نشان داده شده است.



شکل ۴: اثر چیرپ بر تغییرات دمایی هدف برای تپ‌های با پارامترهای چیرپ a=0, 3, -3

نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر چیرپ در اندرکنش تپ‌های لیزری فمتوثانیه با سیلیکون بررسی شد. نشان داده شد که در حالت چیرپ به دلیل افزایش زمان مدت تپ، جذب انرژی بهتری رخ داده و دمای حامل‌ها و شبکه نسبت به حالت بدون چیرپ افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که به دلیل افزایش اثر حفاظ پلاسمایی، چیرپ منفی می‌تواند باعث انتقال انرژی بیشتری به درون نمونه شود و در نتیجه دمای هدف با استفاده از چیرپ منفی به بیشترین مقدار نسبت به حالت بدون چیرپ و چیرپ مثبت می‌رسد.

مرجع‌ها

[1] Thomson, Robert, Christopher Leburn, and Derryck Reid, eds. Ultrafast nonlinear optics. Springer, 2013.

[2] Phillips, K. C., Gandhi, H. H., Mazur, E., & Sundaram, S. K. (2015). Ultrafast laser processing of materials: a review. Advances in Optics and Photonics, 7(4), 684-712.

[3] Gan, Y., & Chen, J. K. (2011). Combined continuum-atomistic modeling of ultrashort-pulsed laser irradiation of silicon. Applied Physics A, 105(2), 427-437.

[4] Aguilera, J. A., Aragon, C., & Penalba, F. (1998). Plasma shielding effect in laser ablation of metallic samples and its influence on LIBS analysis. Applied surface science, 127, 309-314.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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