ليزرپزشكى؛ ١٣٨٩، دوره ٧، شماره ٣، صفحات: ٢٢-١٨.

مطالعهٔ فرآیند گرمایش نانوذرات طلا در نانوپزشکی لیزری

خلاصه

زهرا اعلایی^ا شهرام محمد نژاد^۲

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی برق (الکترونیک)، دانشگاه علم و صنعت ایران ۲ پروفسور گروه الکترونیک، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه: برهم کنش پالسهای لیزری بسیار کوتاه با نانوذرات طلا در محیطهای بیولوژیکی برای تخریب سلولهای سرطانی، باکتریها، ویروسها و DNA به کار میرود. پالسهای لیزری بسیار کوتاه انرژی بسیار زیادی را بر روی ذرهٔ بسیار کوچک فلزی متمرکز می کنند. فوتونهایی که توسط الکترونهای آزاد ذره جذب می شوند، به شبکهٔ کریستالی ذره و سپس به محیط اطراف منتقل می شوند. بنابراین نانوذرات به صورت متمرکز باعث انتقال گرما از پالسهای بسیار کوتاه به سلولهای هدف می شوند. شیهسازی این فرآیند تأثیر به سزایی در تحقیقات این حوزه دارد و با استفاده از نتایج آن میتوان به طور پیش بینی شده عمل نمود. **روش بررسی:** در میان نانوساختارها نانوذرات طلا کاندیدای مناسبی برای فرآیند گرمایش لیزری هستند، زیرا آنها جذب کنندههای نوری قوی، پایدار و غیرسمی هستند که به راحتی به پروتئینها متصل می شوند و خواص اپتیکی آنها تنظیم پذیر می باشد. دو مدل

دمایی برای محاسبهٔ دمای الکترونها و دمای شبکهٔ کریستال نانوذره وجود دارد. مدل تک دمایی که دمای یکسانی برای الکترونها و کریستال نانوذره فرض می کند و مدل دودمایی که برای پالسهای لیزری بسیار کوتاه به کار میرود. پالسهای کوتاه قبل از انتقال کامل انرژی الکترونها به شبکه به اتمام می سند و بنابراین دمای الکترونها و شبکه متفاوت است. برای شبیه سازی فرآیند گرمایش نانوذرات طلا از تقریب گرمایی یکنواخت و مدل تک دمایی استفاده شده است. اندازهٔ کوچک نانوذرات در مقایسه با طول موج تابش لیزری تأیید می کند که این مدل تقریب مناسبی برای گرمایش نانوذرات پس از تابش پالسهای لیزری بسیار کوتاه فمتوثانیه، پیکوثانیه و نانوثانیه می بشد. در مدت اعمال پالس لیزری، انتقال گرما به محیط اطراف اندک است اما، زمانی که پالس شروع به تنزل می کند، انتقال گرما از ذره به محیط اطراف به طور قابل ملاحظهای افزایش می یابد. تلفات دما برای پالسهای نانوثانیه ای به دلیل طول پالس طولانی تر نسبت به دیگر پالسها بیشتر می باشد. تأثیر حضور نانوذرات در محیطهای بیولوژیکی مختلف از جمله آب

یافتهها: واکنش گرمایی نانوذرات طلا در خون، پروستات و تومور با حالتی که محیط اطراف آب می باشد، مشابه و قابل مقایسه است. اما، نانوذرات در محیط چربی به دلیل اینکه رسانایی گرمایی کمی دارد، بیشترین دما را در همان سطح انرژی و طول پالس لیزری در مقایسه با دیگر محیطهای بیولوژیکی به دست می آورند. دینامیک دمایی ذرات به تلفات گرمایی از سطح نانوذرات بـه محیط اطراف حساس می باشند. در رژیم فمتوثانیه، طول پالس لیزر بسیار کوچک می باشد و محیط با مشخصات گرمایی بالا هم نمی تواند دما را در طول پالس به میزان چشمگیری کاهش دهد. اما، در رژیمهای پیکو و نانوثانیه محیط با مشخصات گرمایی کـم هـم می تواند دمای نانوذرات را به مقدار زیادی تغییر دهد. با بررسی مقالات دیگر، نتایج تئوری توسط آزمایشهای عملی تصدیق شده است. به طوری کـه ماکزیمم دما برای فمتو، پیکو و نانو به ترتیب حدوداً ۱۰۲۰، ۱۰۵۰ و ۲۰۰۰ درجۀ کلوین در شـدت لیزر ¹mJ/cm² ساm این رژیم فمتو ثانیه کاربرد دارد که دمای الکترونها از دمای شبکه متفاوت است، اما، این روش برای طول پالسهای طولانی تر تنها برای رژیم فمتو ثانیه کاربرد دارد که دمای الکترونها از دمای شبکه متفاوت است، اما، این روش برای طول پالسهای طولانی تر (پیکو و نانوثانیه)، کاربردی ندارد و حتی بعدلیل عدم درنظر گرفتن تلفات گرمایی از سطح نانوذره به محیط اطراف، نتایج بـه دست آمده از صحت کافی برخوردار نیست.

نتیجهگیری: نتایج حاصل از این مقاله نشان میدهد که مدل تکدمایی روشی مناسب برای درک برهمکنش پالسهای لیزری کوتاه با نانوذرات فلزی میباشد. زیرا درصورتیکه اندازهٔ نانوذره از طول موج تابش لیزر بسیار کوچکتر باشد، تأخیر زمانی بین بـرهمکـنش الکترون و شبکهٔ کریستالی قابل اغماض است و نتایجی مشابه با نتایج مدل دودمایی بهدست میآید.

> نویسنده مسئول: زهرا اعلایی، مرکز تحقیقات نانوپترونیکس، دانشگاه علم و صنعت ایران، تلفن:۲۱۰-۲۲۲۱۶۶۷ پست الکترونیک: alaie.zahra@yahoo.com

واژەھاي كليدى: نانوذرات، پالسھاي ليزرى، ديناميک گرمايي.

مقدمه

در سالهای اخیر، استفاده از پالسهای لیزری بسیار کوتاه براساس نانوذرات جذبکنندهٔ گرما و تلفات دمایی در آنها برای انتقال آن به سلولهای ویژه و نابودی سلولهای ناهنجار انتخاب شدهٔ سرطانی و

باکتریها بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳–۱]. بنابراین شبیهسازی این فرآیند مشابه با مقالهٔ حاضر، تأثیر بهسزایی در تحقیقات این حوزه برای بررسی فرآیندهای فیزیکی دارد. با طراحی

مشخصات لیزر مانند تنظیم طول موج و پهنای پالس و همچنین تعیین شکل و اندازهٔ نانو ذرات، میتوان بهصورت بسیار متمرکز و کاملاً کنترل شده ذرات با ابعاد مختلف را بدون تخریب بافتهای سالم اطراف آنها از بین برد بهطوری که پالسهای لیزری بسیار کوتاه، امکان مینیمم سازی ناحیهٔ تحت تأثیر گرما را فراهم میسازند. همچنین ابعاد ذرات میتواند از چند نانومتر مانند INA (با استفاده از لیزر فمتوثانیه) تا چند ده میکرون مانند اندازهٔ یک سلول سرطانی تغییر کند. ابعاد نانوذرات در مقایسه با طول موج لیزر بسیار کوچک میباشند، از این رو میتوان توزیع گرمایی را در ساختار آنها یکنواخت فرض کرد. بنابراین در این مقاله با فرض یکنواخت بودن توزیع برهم کنش پالسهای لیزری بسیار کوتاه با نانوذرات فلزی مناسب میباشد. هنگامی که پالس لیزری به نانوذرات تابانده میشود، دمای میباشد. هنگامی که پالس لیزری به نانوذرات آناز غیرخطی آنها بهطور ناگهانی افزایش مییابد و به آسانی به آستانهٔ آثار غیرخطی

در تحقیقات قبلی برای بررسی برهمکنش لیزر با نانوذره برای هر پهنای پالس مدل خاصی به کار رفته است. نتایج بهدست آمده از تحقیقات قبلی نشان میدهد دو مدل گرمایی برای محاسبهٔ دمای شبکه و دمای الکترون وجود دارد [۵ و ۶]. روش اول مدل تکدمایی است که در این مقاله برای طول پالسهای مختلف بررسی شده است. در این مدل فرض می شود که پروفایل دما در کل ذره یکنواخت است. این تقریب بهدلیل اینکه اندازهٔ نانوذرات در مقایسه با طول موج لیزر خیلی کم میباشد، قابل کاربرد است. در مدل دودمایی، دو دمای متفاوت برای الکترونهای رسانش گرمایی و شبکهٔ کریستال نانوذره درنظر گرفته می شود که تغییرات دمایی آن ها متناسب با کوپلینگ الكترون- فونون و اختلاف دماى الكترونها و شبكه مىباشد. در مدل به کار رفته وابستگی پارامترهای ترمودینامیکی الکترونها، ذرات و محيط اطراف برروی دمای آنها درنظر گرفته میشود. بررسی تحقیقات اخیر حاکی از آن است که نانوذرات طلا مناسبترین حسگر نوری- گرمایی در میان دیگر نانوساختارها میباشند. زیرا آنها جذبکنندهٔ قوی، پایدار و غیرسمی هستند و بهراحتی به بافتها یا پروتئينها متصل مي شوند [۴].

در این مقاله گرم شدن نانوذرات طلا با شعاع ۳۰ نانومتر در محیط آبی را توسط پالسهای لیزری با پهنای متفاوت شبیهسازی و نتایج حاصل از شبیهسازی را با هم مقایسه کردهایم. این مقاله علاوه بر فراهم ساختن بینشی ابتدایی در مورد خصوصیات اپتیکی نانوذرات طلا، توصیف جامعی از دینامیک تبدیل انرژی اپتیکی به گرما در محیطهای نانوکامپوزیتی ارائه میدهد.

مدل تکدمایی

در هنگام برهم کنش لیزری با شدت I_0 و پهنای پالس T با نانوذرات فلزی با شعاع I_0 انرژی لیزر توسط الکترونهای آزاد جذب می شوند و سپس از گاز الکترونی به داخل شبکه منتقل می شوند. در مدل تک دمایی فرض شده است که انتقال گرما بسیار سریع است یعنی دمای شبکه و الکترونها در هر لحظه از زمان با هم برابرند ($T_e=T_s$). به همین دلیل ما تنها به بررسی توزیع دمایی شبکه می پردازیم. معادله ای که انتقال گرمایی لیزر به نانو ذرات را نشان می دهد به صورت زیر است [P-Y]:

 $\frac{dT_s}{dt} = \frac{3K_{abs}I_0f(t)}{4r_0C_s(T_s)\rho_s} - \frac{\mu_{\infty}T_s}{(s+1)r_0^2C_s(T_s)\rho_s} \left[\left(\frac{T_s}{T_{\infty}}\right)^{s+1} - 1 \right] + \frac{3L}{r_0C_s(T_s)}\frac{dr_0}{dt}$

جملهٔ اول در سمت راست معادلهٔ گرمای تولیدشده در حجم کروی نانوذره را در اثر جذب انرژی لیزر نشان میدهد. اثر جذب انرژی تابشی در ذره به شدت نور I_0 ، یروفایل نور فرودی f(t)، ضریب جذب و شعاع ذره r_0 بستگی دارد. در این مدل فرض شده است که Kabs جذب انرژی در سرتاسر شعاع ذره یکنواخت میباشد. جملهٔ دوم بیانگر تلفات انرژی از سطح نانوذره به محیط اطراف به علت پروسهٔ انتشار $T\infty$ گرما است. $\mu\infty$ رسانایی گرمایی محیط اطراف در دمای معمول است و ثابت نمایی s هم به ویژگیهای گرمایی محیط اطراف نانوذره بستگی دارد. در عمل، انتقال دما از سطح ذره به محیط اطراف به طول پالس لیزر هم وابسته میباشد. جملهٔ آخر نشاندهندهٔ تلفات انرژی در اثر تبخير ذره مي باشد. اين تبخير به مشخصات پالس ليزري و خصوصیات ذره بستگی دارد. (Cs (Ts) ظرفیت گرمایی شبکهٔ کریستال در دمای کریستال L،Ts گرمای نهان تبخیر و r_0 شعاع نانوذره است. چون گرمشدن نانوذرات در زیر دمای گذار فاز در مادهٔ تشكيل دهندهٔ ذره اتفاق می افتد، از جملهٔ سوم معادلهٔ ۱ صرف نظر می کنیم. این معادله بیانگر یک دمای یکسان برای الکترونهای رسانای گرما و شبکهٔ کریستال نانوذره میباشد. در این مقاله با کدنویسی در محیط Matlab مدل تکدمایی را پیادهسازی نمودهایم و به ازای طول پالسهای لیزری مختلف و شرایط متفاوت، دمای نانوذرات را محاسبه کردهایم.

نتايج شبيهسازى

پالسهای فمتو ثانیه

در مد فمتوثانیه، وابستگی زمانی دمای شبکه را برای پهنای پالس کمتر از زمان گرم شدن و خنک شدن الکترون شبیهسازی کردهایم. محاسبات برای چگالی انرژی پالس $E = 1.0 \ mJ/cm^2$ و طول پالس ۶۰ فمتوثانیه انجام شده است. شکل زمانی پالس لیزر فمتوثانیه در شکل ۱ (منحنی خطچین) نشان داده شده است که مطابق با

خروجی تجربی مشاهده شده از یک لیزر Ti:sapphire میباشد. فلوی لیزر را ^{1.0} mJ/cm² انتخاب کردیم تا تنها با اعمال یک پالس لیزر، سلول سرطانی از بین برود. نتیجهٔ شبیهسازی گرم شدن نانوذرات طلا توسط پالس لیزری فمتوثانیه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تغییرات دمایی نانوذره پس از اعمال یک پالس فمتوثانیه

شکل ۱ تأخیر زمانی ۱۰۰ فمتوثانیهای را در گرم شدن ذره همراه با دمای بیشینهٔ شبکه حول ۱۰۲۰ درجهٔ کلوین در ۱۷۵ فمتوثانیه پس از انتهای پالس نشان میدهد. قسمت اشباعشده در منحنی دمایی شبکه توسط انتشار گرمایی کوچک و قابل اغماض از سطح نانوذره به محیط اطراف در مقیاس زمانی فمتوثانیه قابل توجیه است. انتقال گرما از الکترون به شبکه خیلی سریع است. بههمین دلیل دمای ذره در مدل تکدمایی، تغییرات دمایی الکترون را بی معطلی دنبال می کند.

همچنین تأثیر نرخهای مختلف انتقال دمای نانوذرات به محیط اطراف در رژیم فمتوثانیه بررسی شده است که در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به شکل مشخص است که بهدلیل کوتاهی بسیار زیاد پالس لیزری به ازای نرخهای پایین انتقال دما هیچ تغییری در دمای نانوذرات مشاهده نمی شود و برای نرخهای بالای انتقال دما از 30=s به بعد، تغییرات دما مشاهده می گردد. بنابراین در این رژیم امکان انتقال دما به بافتهای اطراف بسیار کم می باشد و تلفات دمایی تنها برای نرخهای انتقال بسیار بالا دیده می شود که در محیطهای بیولوژیکی وجود ندارد.

شبیهسازی فرآیند گرمایی پالسهای فمتوثانیه با استفاده از مدل دودمایی در مرجع [۴] انجام شده است. مقایسهٔ نتایج شبیهسازی مدل تکدمایی با مدل دودمایی مرجع [۴] در رژیم فمتوثانیه نشان میدهد که بهجز تأخیری که در اثر نفوذ گرما از الکترونها به شبکه صورت میگیرد، ماکزیمم دمای حاصل از دو مدل مشابه است. این تأخیر در اثر کوتاهتربودن طول پالس فمتوثانیه در مقایسه با زمان انتقال گرما از الکترونها به شبکه کریستال میباشد. بنابراین برای جبران این تأخیر پیشنهاد میشود که در کارهای آینده سعی شود اثر کوچکترشدن

اندازهٔ نانوذره و درنتیجه کوچکشدن شبکهٔ کریستالی و تأثیر استفاده از فازهای کریستالی مختلف نانوذرات طلا برروی سرعت حرکت الکترون و انتقال گرما به شبکهٔ کریستالی بررسی شود و نیز روشهایی برای افزایش سرعت حرکت الکترون از جمله القای پلاسمونهای سطحی یافت گردد.



برای بررسی اثر محیط اطراف برروی تغییرات دمایی نانوذرات مورد تابش، در اینجا برای محیطهای بیولوژیکی مختلفی از جمله آب، پروستات، خون، چربی و تومور، تغییرات دمایی نانوذرات طلا محاسبه و شبیه سازی شده است که در شکل ۳ دیده می شود. همانطور که در شکل دیده می شود، در محیطهای بیولوژیکی نسبت به محیطهای آبی، دمای نانوذرات به مقدار بیشتری افزایش می یابد که برای عدم آسیب دیدن محیط اطراف باید آن را در نظر گرفت.

پالسھای پیکوثانیہ

۲.



در این مد پالسهای گوسی با پهنای ۴۰ پیکوثانیه را برای شبیهسازی بهکار بردیم.

شکل ۳- تأثیر محیطهای بیولوژیکی مختلف برروی تغییر دمایی نانوذرات طلا در برهمکنش با پالسهای فمتوثانیه



شکل۴- توزیع دمایی، زمانی برای نانوذرات طلا با اعمال پالس لیزری ۴۰ پیکوثانیه

بعد از حدوداً ۱۰۰ پیکوثانیه، خنک شدن نانوذرات به علت انتشار گرما به محیط آبی اطراف شروع میشود. بیشینهٔ دمایی که در آن نانوذرهٔ طلا با اعمال پالس لیزری به دست میآورد، ۱۰۰۵ درجهٔ کلوین است که این دما برای آغاز مکانیزم از بین بردن سلولهای سرطانی کافی می باشد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، پس از اتمام پالس لیزری، دمای شبکه پس از رسیدن به دمای بیشینه یک روند کاهشی دارد. این کاهش دما بیانگر تلفات دمایی از سطح نانوذره به محیط اطراف در مقیاس زمانی پیکوثانیه می باشد. با مقایسهٔ شکلهای ۱ و ۲ پی می بریم که تلفات دمایی در مد فمتوثانیه نسبت به پیکوثانیه کمتر است.

همانند قسمت قبل در اینجا نیز تأثیر سرعتهای انتقال گرمای مختلف بررسی شده است که در شکل ۵ دیده می شود. اثر سرعت انتقال گرما بر روی مکانیزم گرمایی پالسهای پیکوثانیه نسبت به فمتو ثانیه بیشتر می باشد (که این ناشی از بزرگتر بودن بازهٔ زمانی است که پالس اعمال می گردد) و ۱۰۰۰ برابر بیشتر از بازه زمانی پالسهای فمتو ثانیه می باشد. بنابراین زمان بیشتری برای انتقال گرما به بافتهای اطراف و تلفات آن وجود دارد.

در مراجع ۱۰ و ۱۱ از مدل دودمایی برای بهدست آوردن توزیع دمایی ذرات در حین فرآیند تابش لیزر پیکوثانیهای استفاده شده است. پروفایل دمای مراجع ۱۰ و ۱۱ مشابه با نتایج بهدست آمده در این مقاله میباشد. ماکزیمم دمای حاصل در مرجع ۱۰ مشابه با نتایج بهدست آمده یعنی حدود دو برابر مقدار بهدست آمده در مقالهٔ حاضر حاصل در مرجع ۱۱ حدود دو برابر مقدار بهدست آمده در مقالهٔ حاضر میباشد که به شدت و طول پالس به کار رفته مربوط می شود. شدت پالس به کار رفته ۱۰۰mJ/cm2 بوده است که ۱۰۰ برابر بیشتر از مقدار به کار رفته در این مقاله است و طول پالس به کار رفته در مرجع ۱۰۰ همای است که حدود ۶ برابر کمتر از طول پالس به کار رفته در

شبیهسازیها میباشد. بنابراین مدل تکدمایی، سینتیک گرمایی پیکوثانیه را با دقت خوبی نشان میدهد.

در مرجع ۱۱ با استفاده از وابستگی ویژگیهای میدان الکترومغناطیسی نانوذره به مشخصات تابش فرودی و نیز تصویربرداری از توزیع شدت میدان الکتریکی در مجاورت نانوذره، نتایج تئوری توسط آزمایشهای عملی تأیید شده است.



شکل ۵- تأثیر سرعتهای انتقال گرمای مختلف در رژیم پیکوثانیه

پالسهای نانو ثانیه

برای پروسهٔ گرم کردن لیزری نانوذرات طلا در رژیم نانوثانیه، مشخصهٔ زمان گرم کردن شبکه (T_i) خیلی کوچکتر از طول پالس لیزر (T_i) است: $^{T} >> ^{T_i}$. این بدان معنی است که دمای داخل نانوذرات تقریباً در سرتاسر نانوذره و در تمام مدت طول پالس لیزری T_i یکنواخت میباشد. در این حالت دمای الکترون و شبکه یکسان است ($^{T}_{e}=T_{s}$). بنابراین گرمکردن یکنواخت ذره و تبادل گرمایی نیمه پایدار با محیط اطراف را تنها میتوان با مدل OTM (مدل تکدمایی) توصیف کرد. مشخصهٔ زمان گرم کردن شبکه (T_i) که برای تشکیل توزیع دمایی

نیمه پایدار در سرتاسر نانوذره لازم میباشد، از رابطهٔ زیر بهدست میآید:

$$\tau_i = \frac{r_0^2}{4 \chi}$$

که در رابطهٔ فوق ۲۵ شعاع ذره و X نفوذپذیری گرمایی ماده برای نانوذرهٔ مربوطه میباشد. برای نانوذرات طلا با شعاع $\lambda_{i} = 1.18 \times 10^{-4} m^2/s$, $r_0 = 20 - 30 nm$ شبکه $r_i = 20 - 30 nm$ است که کمتر از $\tau_i = 10^{-8} s$ میباشد. محاسبات در سیستم تکدمایی برای نانوذرهٔ طلا با شعاع

 $E = 10 mJ/cm^2$ ، انرژی پالس لیزر فرودی $E = 10 mJ/cm^2$ ، طول پالس $\tau_i = 10 ns$ و با توزیع زمانی داده شده، انجام شده است. پروفایل پالس لیزر و طول 8ns آن نزدیک به آزمایش عملی انجام شده در مرجع ۲ انتخاب شده است. مقدار فلوی لیزر $10 mJ/cm^2$ قابل مقایسه با مقدار فلوی به کاررفته در فوتوگرمایی سلولهای سرطانی میباشد [۱ و ۳]. سینتیک گرمایی نانوذرهٔ طلا در شکل ۶ دیده میشود.



شکل 8- سینتیک گرمایی نانوذرات طلا توسط پالس لیزری نانوثانیه10ns با چگالی انرژی $E=10mJ/cm^2$ و پهنای پالس

همانطور که در شکل ۶ دیده میشود، مدت پالس لیزری انتقال گرما از نانوذره به محیط اطراف مقدار ناچیزی است و ذره به سرعت به دمای بالا می رسد. نرخ دمایی حدوداً ¹⁻ Ks^{-1} است. دمای ذره اندکی پس از انتهای پالس افزایش می ابد. با توجه به شکل ۶ بیشترین دما 7000K است که در مدت زمان sn 5. ¹⁴ حاصل میشود که قبل از آن پالس لیزری شروع به تنزل می کند. پس از آن زمان انتقال گرما از ذره به محیط اطراف به صورت اساسی افزایش محیط اطراف تا مدت زمان sn 0، تقریباً K 1000 باقی می ماند که این زمان کار ار بوینای پالس لیزری است. وجود ندارد. دمای ذره و این زمان کار ار بر پهنای پالس لیزری است. زمان کامل برای یک دوره (گرم کردن از دمای اولیه) حدوداً sn 30 ا

اثر سرعتهای انتقال دمای مختلف در شکل ۷ دیده می شود. با افزایش سرعت انتقال حرارت، دما به مقدار زیادی کاهش می یابد زیرا زمان اعمال پالس در مقیاس نانوثانیه نسبت به فمتو و پیکوثانیه به مقدار کافی بزرگ است تا دما به مقدار زیادی به محیط اطراف منتقل شود، به همین دلیل نسبت به دو رژیم قبلی، تنها افزایش ۰/۲۵ سرعت انتقال حرارت، دما را به مقدار قابل توجهی کاهش می دهد.



شکل ۷- اثر سرعتهای انتقال دمای مختلف در رژیم نانوثانیه

برای پالس های نانوثانیه ای هم تأثیر حضور نانوذرات در محیطهای بیولوژیکی مختلف بررسی شده است که در شکل ۸ دیده می شود. برخلاف رژیم های قبلی حضور در بافتهای بیولوژیکی نسبت به محیط آبی، دمای نانوذرات طلا کمتر افزایش می یابد که به دلیل بزرگی بازهٔ زمانی اعمال پالس و داشتن زمان کافی برای اتلاف دما به محیط اطراف می باشد. درواقع، در این رژیم پالسی اتلاف دما به محیط اطراف



پالسهای نانوثانیهای

نسبت به افزایش دما در اثر بزرگتر بودن زمان پالس اهمیت بیشتری دارد و با سرعت بیشتری خود را نشان میدهد.

در این رژیم طول پالس از زمان انتقال گرما از الکترونها به شبکه بزرگتر است بنابراین دمای الکترونها و شبکه با یکدیگر مشابه میباشد و حتی تلفات دما از سطح نانوذره به محیط اطراف هم قابل

ملاحظه می گردد. بنابراین مدل تک دمایی این رژیم را به خوبی توصیف می کند و مدل دودمایی در این رژیم پاسخ صحیحی را ارائه نمی دهد. هرچند جواب به دست آمده با استفاده از این مدل در مقالات دیگر [۱۰] با جواب مدل تک دمایی متفاوت است و حتی عدم صحت آن نیز مشخص شده است.

نتيجەگيرى

بر اساس مدل تک دمایی (OTM) در مد فمتوثانیه تقریباً پس از ۱۵۰فمتوثانیه دمای نانوذره به بیشینهٔ مقدار خود می سد و حتی ۱۰۰ فمتوثانیه پس از انتهای پالس دمای نانوذره تقریباً ثابت می باشد و تلفات دمایی قابل اغماض است. در مد پیکوثانیه حدوداً ۵۰ پیکوثانیه پس از انتهای پالس، خنک شدن نانوذرات به علت انتشار گرما به محیط اطراف شروع می شود. در مد نانوثانیه قبل از شروع تنزل پالس لیزری، دمای نانوذره به بیشینهٔ مقدارش می رسد و پس از آن انتقال گرما از ذره به محیط اطراف به صورت اساسی افزایش می یابد.

در مد نانوثانیه خصوصیات اپتیکی نانوذراتی که شعاع آنها کمتر از ۳۵ نانومتر است، بیشتر از تلفات گرمایی بر دینامیک دمایی مؤثر است. برای ذرات بزرگتر تلفات گرمایی بر ویژگیهای اپتیکی غالب میشود و منحنی دما توسط تعادل بین گرمای نانوذره و تلفات انرژی از سطح آن مشخص میشود. تلفات انرژی به معنای انتشار گرما به محیط اطراف میباشد. بنابراین مدل تکدمایی توصیف مناسبی از گرم کردن نانوذرات توسط لیزر در رژیمهای فمتو، پیکو و نانوثانیه میباشد.

با بررسی اثر نرخ انتقال دمای مختلف برای هر سه نوع پالس مشاهده شد که انتقال دما به محیط اطراف با افزایش مدت زمان پالس بیشتر صورت می گیرد و تنها افزایش جزئی در نرخ انتقال گرما، دما را به مقدار زیادی کاهش می دهد. همچنین برای پیش بینی دقیق انتقال دما تأثیر حضور در محیطهای بیولوژیکی هم بررسی گردید. اتلاف دما

و انتقال آن به محیطهای اطراف برای پالسهای بزرگتر با شدت بیشتری صورت میگیرد و دمای نانوذرات در آن محیطها با افزایش مدت زمان پالس کاهش مییابد. در آزمایشهای عملی نیز این اتلاف دما و انتقال آن به محیط اطراف ذره مشاهده شده است.

مقایسه مدل تکدمایی در این مقاله با مدل دودمایی در مقالات دیگر [۱۱۹۱] نشان میدهد که مدل دو دمایی تنها برای رژیم فمتوثانیه کاربرد دارد که دمای الکترونها از دمای شبکه متفاوت است، اما، برای طول پالسهای طولانیتر (پیکو و نانوثانیه)، این روش کاربردی ندارد و حتی بهدلیل عدم درنظر گرفتن تلفات گرمایی از سطح نانوذره به محیط اطراف، نتایج بهدست آمده از صحت کافی برخوردار نیست.

پیشنهاد می شود برای جبران تأخیری که در مدل تک دمایی در رژیم فمتوثاتیه بهوجود میآید، روشهایی برای افزایش سرعت حرکت الكترون و جبران تأخير ارائه شود. نتايج اين مقاله نشان مىدهد كه انتقال حرارت، نقش بهسزایی در سرد شدن نانوذرات گرمشده و درنتیجه یاسخ ایتیکی محیط دارد. در کارهای آینده باید تأثیر فرآیند گرمایی برروی پاسخ اپتیکی نانوذرات بررسی شود و اثر پاسخ اپتیک غیرخطی نانوذرات نیز درنظر گرفته شود. همچنین برای شبیهسازیهای آینده بهتر است از مدلهایی استفاده شود که اثر فشار ناشی از تغییر فاز محیط اطراف و شکل گیری حباب در محیط آبی را در نظر بگیرد. تأثیر اندازهٔ شعاع نانوذرات برروی دینامیک دمایی آنها در محیطهای بیولوژیکی بسیار جالب خواهد بود. بنابراین توصیه می شود که در کارهای آتی با بررسی اندازهٔ نانوذرات و حتی شکل آنها، شعاع و شکل بهینه شوند. همچنین هنوز جایگزینی برای نانوذرات طلا در فرآیند فوتوگرمایی یافت نشده است اما، یافتن نانوذرات رسانای دیگر با مشخصات سازگارتر ستودنی است و مقدمهٔ جدیدی برای گسترش علم در این شاخه خواهد بود.

References

- 1. Pitsillides CM, Joe EK, Wei X, Anderson RR, Lin CP. Selective cell targeting with light-absorbing microparticles and nanoparticles. Biophysical Journal 2003; 84(6): 4023.
- 2. Zharov VP, Letfullin RR, Galitovskaya EN. Microbubbles-overlapping mode for laser killing of cancer cells with absorbing nanoparticle clusters. Physics D 2005; 38(15): 2571.
- 3. Letfullin RR, Joenathan C, George TF, Zharov VP. Cancer cell killing by laser-induced thermal explosion of nanoparticles. Nanomedicine 2006; 1: 473.
- 4. Letfullin RR, Joenathan C, George TF, Zharov VP. Laser-induced explosion of gold nanoparticles: potential role for nanophotothermolysis. Journal of Nanomedicine 2006; 1(4): 473-80.
- 5. Wu JL, Wang CM, Zhang GM. Ultrafast optical response of the Au-BaO thin film stimulated by femtosecond pulse laser. Journal of Applied Physics 1998; 83(12): 7855.
- 6. Chichkov BN, Momma C, Nolte S, Alvensleben FV, Tünnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. Applied Physics A 1996; 63(2): 109.

- 7. Letfullin RR, Igoshin VI. Multipass optical reactor for laser processing of disperses materials. Quantum Electronics 1995; 25(7): 684.
- 8. Letfullin RR. Solid aerosols into the strong laser fields. Bulletin of the Samara State Technical University. Physical-Mathematical Sciences 1996; 4: 243.
- 9. Letfullin RR, Igoshin VI. Theoretical modeling of plasma formation and generation of electromagnetic fields in the gas-dispersed media under the action of laser radiation. Trudy FIAN 1993; 217: 112.
- Ekici O, Harrison RK, Durr NJ, Eversole DS, Lee M, Ben-Yakar A. Thermal analysis of gold nanorods heated with femtosecond laser pulses. J Phys D Appl Phys 2008; 41: 85501.
- 11. Nedyalkov NN, Imamova S, Atanasov PA, Tanaka Y, Obara M. Interaction between ultrashort laser pulses and gold nanoparticles: nanoheater and nanolens effect. J Nanoparticle Research 2010; 13: 2181-93.