

## سایش لیزری در تولید نانو ذرات

محمد منصوری<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، مرکز آموزش علو پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران ایران، کدپستی: ۱۷۸۱۸۱۳۵۱۳

### چکیده

سایش لیزری پدیده مهیج برهمکنش لیزر با ماده را نمایش می دهد. تولید نانو ذرات در فرایند سایش لیزری به شدت به خواص ماده و پارامترهای لیزر بستگی دارد. یکی از روش های تولید نانو ذرات استفاده از لیزر پالسی جهت جدا کردن جرم از نمونه می باشد. نانو ذرات خواص ویژه ای در مقایسه با توده ماده و حتی ابعاد میکرون دارند. به همین خاطر استفاده از نانو ذرات در اکثر فناوری ها کاربرد پیدا کرده است. در این مقاله ابتدا به چگونگی برهمکنش لیزر با ماده پرداخته و سپس به بررسی پارامترهای موثر برای سایش لیزری بهتر می پردازیم. بعد از آن مکانیزم های اصلی تولید نانوذرات و وابستگی شان به پارامترهای مختلف لیزر و همچنین مکانیزم های جدا شدن ذره از هدف، پرداخته شده است. در انتها تاثیر پارامترهای مختلف لیزر روی اندازه و توزیع ذرات چند نمونه از نانوذرات، به همراه نمودارهای مربوطه آن مورد بحث قرار گرفته است.

**کلیدواژگان:** سایش لیزری، نانوذرات، برهمکنش لیزر با ماده، طول موج لیزر، شدت و مدت زمان پالس لیزر

m.mansouri@khadu.ac.ir

ایمیل نویسنده مسئول:

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

### ۱- مقدمه

لیزر با ماده<sup>۲</sup> را نمایش می دهد. تولید نانو ذرات در فرایند سایش لیزری به شدت به خواص ماده و پارامترهای لیزر بستگی دارد. نانو ذرات خواص ویژه ای در مقایسه با توده ماده و حتی ابعاد میکرون دارند. به همین خاطر استفاده از نانو ذرات در اکثر فناوری ها کاربرد پیدا کرده است. یک سری از خواص فیزیکی مواد بستگی به اندازه آن ها دارد که در ابعاد نانو به نحو بهتری می توان از آن ها استفاده کرد. [۶-۷] تقریباً تمام پلاسما های طبیعی یا آزمایشگاهی را می توان به عنوان منابعی از نانو ذرات در نظر گرفت. همچنین نشان داده شده که پلاسمای ایجاد شده از روش سایش لیزری، منبع مناسبی برای تولید نانو ذرات است. [۱۲-۱۰]

در این مقاله ابتدا به چگونگی برهمکنش لیزر با ماده پرداخته و سپس به بررسی پارامترهای موثر برای سایش بهتر می پردازیم. بعد از آن مکانیزم های اصلی

سایش<sup>۱</sup> در وسیع ترین مفهوم خود، به معنای گندن (جدا کردن) ماده به وسیله نور است. در بیشتر فلزات، شیشه ها و کریستال ها، جدا کردن ماده توسط تبخیر آن به واسطه گرما صورت می گیرد. در پلیمرها عمل جدا کردن ماده را می توان توسط تغییرات فوتوشیمیایی انجام داد که این تغییرات شامل انحلال (تجزیه) شیمیایی پلیمر، شبیه به لیتوگرافی نوری می باشد. به طور معمول، مکان سایش توسط یک گاز خنثی نظیر نیتروژن یا آرگون احاطه می شود. قابلیت مواد به منظور جذب انرژی لیزر، به عمقی که انرژی فرودی می تواند در آن سایش مفیدی انجام دهد، محدود می شود [۶-۱]. یکی از روش های تولید نانو ذرات استفاده از لیزر پالسی جهت جدا کردن جرم از نمونه می باشد.

سایش لیزری<sup>۲</sup> پدیده مهیج برهمکنش

<sup>۱</sup>Ablation  
<sup>۲</sup>Laser Ablation

تولید ذره و وابستگی شان به پارامترهای مختلف لیزر و همچنین مکانیزم های جدا شدن ذره از هدف، پرداخته شده است. در انتها تاثیر پارامترهای مختلف لیزر روی اندازه و توزیع ذرات چند نمونه، به همراه نمودارهای مربوطه مورد بحث قرار گرفته است.

## ۲- تاریخچه

مطالعه بر روی برهمکنش های لیزر و ماده به سرعت بعد از معرفی اولین لیزر یاقوت در سال ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد. از دهه ۱۹۷۰، از لیزرهای نئودیمیم یاق (Nd:YAG) حالت جامد به منظور تحقیق در مورد برهمکنش های لیزر و ماده استفاده شد. در دهه ۱۹۸۰ لیزر با طول زمان پالس خیلی کوتاه در حدود پیکو ثانیه و حتی فمتو ثانیه به کمک توسعه فناوری فشرده سازی پالس در دسترس قرار گرفت [۱۳]. این موضوع یعنی طول زمان پالس کوتاهتر، چگالی توان بیشتر را ممکن می سازد. با رشد فناوری و پیشرفته شدن لیزرهای حالت جامد، استفاده از آن ها در تحقیقات کاربردی و همچنین بررسی اندرکنش لیزر و ماده بیشتر شد.

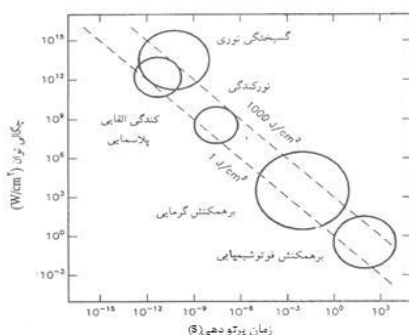
البته قبل از دهه ۱۹۷۰، کاربرد لیزر در بررسی و پردازش نیم رساناها، میکروساختارها و فیلم های نازک به منظور جذب افراد علاقمند به این شاخه از علم شروع شده بود. از جمله تکنیک هایی که با استفاده از لیزر انجام می شود، می توان به گداختگی با لیزر [۱۴]، تمیز کردن سطوح [۱۵]، لیتوگرافی [۱۶] (حکاکی روی سنگ) [۱۶]، حکاکی [۱۶]، حفاری [۱۷]، جوشکاری و برشکاری اشاره کرد. هم در دنیا [۱۸] و هم در ایران [۱۹]، نمونه هایی از کار پژوهشی در زمینه تولید نانو ذرات با استفاده از لیزر شروع و انجام شده است.

## ۳- برهمکنش لیزر با ماده

پالس های با عرض و انرژی متفاوت، تاثیرات مختلفی را در ماده از خود به جای می گذارند. در این قسمت به بررسی این مطلب می پردازیم. به هنگام پرتو دهی ماده، ساز و کارهای برهمکنش متفاوتی روی می دهد. علاوه بر پارامترهای

لیزر، مشخصه های ویژه ماده نیز در تعیین نوع برهمکنش سهم هستند که ضرایب بازتاب، جذب، و پراکندگی از جمله این ها هستند. با استفاده از این ضرایب، میزان کل عبور نور از ماده را در طول موج معینی تعیین می کنند. ویژگی های حرارتی ماده نظیر رسانش حرارتی و ظرفیت گرمایی هم در اندرکنش نقش ایفا می کنند و پارامترهایی نظیر طول موج، زمان پرتو دهی، چگالی انرژی، انرژی باریکه لیزر، چگالی توان و اندازه نقطه کانونی هم مؤثر هستند. از این بین، زمان پرتو دهی یک مشخصه کلیدی به شمار می آید که در عمل، نوع برهمکنش را تعیین می کند. به طور کلی همه برهمکنش های لیزر با ماده را بر اساس پارامترهای برشمرده شده در بالا، به پنج دسته عمده برهمکنش فوتو شیمیایی<sup>۸</sup>، برهمکنش گرمایی<sup>۹</sup>، برهمکنش نورسایشی<sup>۱۰</sup>، برهمکنش سایشی، القایی پلاسمایی<sup>۱۱</sup>، و برهمکنش گسیختگی نوری<sup>۱۲</sup> تقسیم بندی می کنند.

قبل از پرداختن به هر کدام از آن ها به صورت مختصر به این نکته مهم اشاره می کنیم که این برهمکنش ها بیشتر از این که به چگالی سطحی انرژی لیزر بستگی داشته باشند، به چگالی توان سطحی وابسته هستند. به عبارت دیگر در حالی که همه این برهمکنش ها در بازه چگالی سطحی  $1-1000 \text{ J/cm}^2$  قرار دارند، اما از نظر چگالی سطحی توان در بازه  $10^{-15} \text{ w/cm}^2 - 10^3$  اتفاق می افتند، که این امر نشانگر تاثیر فوق العاده مهم زمان اعمال انرژی (پرتو دهی) است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱: برهمکنش لیزر - ماده

۸- Photochemical Interaction

۹- Thermal Interaction

۱۰ - Photo Ablation Interaction

۱۱ - Plasma-Induced Ablation Interaction

۱۲ - Photo Disruption Interaction

Laser Annealing<sup>۴</sup>

Laser Cleaning of Surface<sup>۵</sup>

Lithography<sup>۶</sup>

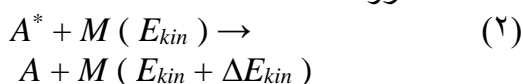
Etching<sup>۷</sup>

گرمایی موجب افزایش موضعی دما می شود. آثار گرمایی می توانند هم به وسیله لیزرهای پالسی و هم به وسیله لیزرهای پیوسته ایجاد شوند. آثار گرمایی بسته به زمان پرتودهی و بیشینه دمایی ماده، اثرات فیزیکی متمایزی همچون آثار انعقادی (لخته شدن)، ذوب، تبخیر، یا کربنی شدن پدید می آورند. در سطح میکروسکوپی، اثر گرمایی ماده دارای منشأ داخلی ناشی از جذب درون حجمی (کپه ای) است، که بر اثر نوارهای چرخشی- ارتعاشی مولکول ها پدید می آید و با فروافت غیر تابشی همراه است. بر همکنش فوتون با یک مولکول هدف A را می توان به صورت یک فرایند دو مرحله ای در نظر گرفت. ابتدا یک فوتون با انرژی  $h\nu$  جذب شده و مولکول را به تراز برانگیخته می برد. سپس بر اثر برخوردهای ناکثسان با مولکول های M محیط پیرامون، مولکول برانگیخته  $A^*$  فرو افت می کند و همزمان انرژی جنبشی مولکول M افزایش می یابد. بنابراین در مقیاس میکروسکوپی، افزایش دما به معنی تبدیل انرژی فوتون به انرژی جنبشی است. این فرایند دو مرحله ای در زیر بیان می گردد:

۱- جذب



۲- فرو افت



به طور کلی در ماده، فرایند جذب ناشی از وجود مولکول های گوناگون تشکیل دهنده آن است. ضریب جذب تا حد بسیار زیادی به طول موج پرتو فرودی بستگی دارد. مثلاً جذب نور توسط مولکول های آب نقش عمده ای را در برهمکنش های حرارتی ایفا می کند. طیف جذب آب (که یکی از مهمترین اجزاء تشکیل دهنده ماده، به خصوص بافت های چشم، محسوب می شود) در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل (۱) یک نمودار تمام لگاریتمی برهمکنش های پنج گانه ذکر شده در بالا است که از آزمایش های متعدد بدست آمده است. محور عمودی بیانگر چگالی توان پرتودهی یا شدت بر حسب  $w/cm^2$  و محور افقی زمان پرتودهی بر حسب ثانیه را نشان می دهد. خطوط قطری بیانگر شارش های ثابت انرژی به ترتیب در  $1 J/cm^2$  تا  $1000 J/cm^2$  می باشند. معمولاً مقیاس های زمانی محور طولی، این نمودار را به پنج گروه تقسیم بندی می کنند. زمان های بیشتر از ۱s (مربوط به امواج پیوسته) برهمکنش فوتو شیمیایی را در بر می گیرند. از ۱۰۰s تا ۱ دقیقه برای برهمکنش های حرارتی، از ۱s تا ۱ns برای سایشی پلاسمایی و گسیختگی نوری است. با این تقسیم بندی دو برهمکنش سایشی پلاسمایی و گسیختگی نوری از نظر زمان پرتودهی مرز خیلی مشخصی ندارند و لذا چگالی انرژی تعیین کننده تفاوت این دو خواهد بود.

### ۳-۱ برهمکنش فوتو شیمیایی

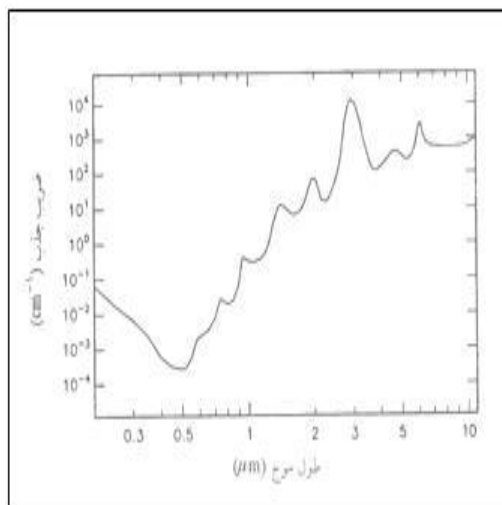
فیزیک فرایند میکروسکوپی اثر فوتو شیمیایی دقیقاً شناخته شده نیست و تنها مشاهدات تجربی بیانگر این برهمکنش می باشند. با این حال مشخص است که نور اثراتی شیمیایی را القا می کند و با ماکرو مولکول ها یا ماده واکنش انجام می دهد. این عمل را می توان به آزاد سازی انرژی بر اثر سنتز نوری و یا به برانگیزش بیولوژیک نسبت داد. به هر حال در این مبحث، این نوع برهمکنش خیلی مورد نظر نیست و تنها صرف آشنایی، مشخصات آن را به طور خلاصه بیان می کنیم. این فرایند با چگالی توان کم  $0.1-50 w/cm^2$  در بازه زمانی نسبتاً طولانی و با عرض پالسی از ۱s تا موج پیوسته با استفاده از لیزرهای مثل لیزرهای رزین ای سرخ، دیودی و هلیوم- نئون برای درمان فوتو دینامیک و برانگیزش بیولوژیک به منظور به کارگیری واکنشگرهای نوری به عنوان کاتالیزور<sup>۱۳</sup> مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۳-۲ برهمکنش گرمایی

انرژی منتقل شده به ماده در برهمکنش

جدول ۱: ضریب جذب  $a$  و طول جذب آب لایر طول موج های مختلف

طول موج لیزر (nm)	۱۹	۲۴۸	۳۰۸	۳۵۱	۵۱۴	۶۳۳	۶۹۴	۸۰۰	۱۰۵۳	۱۰۶۴	۲۱۲۰	۲۹۴۰	۱۰۶۰۰
نوع لیزر	ArF	KrF	XeCl	XeF	Argon ion	He-Ne	Ruby	Diod e	Nd:YLF	Nd:YAG	Ho:YAG	Er:YAG	CO <sub>2</sub>
$a(c^{-1}m)$	۱/۱	۱/۱	۱/۱۰۵	۱/۱۰۲۲	۱/۱۰۰۲۹	۱/۱۰۰۲۹	۱/۱۰۰۵۶	۱/۱۰۰۲۰	۱/۱۰۵۷	۱/۱۰۶۱	۳۶	۱۲۰۰۰	۱/۱۰
L(cm)	۱۰	۵۵	۱۷۰	۴۳۰	۲۴۰۰	۲۴۰	۱۱۰	۵۰	۱/۷	۱/۶	۱/۲۸	۱/۱۰۰۰۰	۱/۱۰۰۰



شکل ۲: طیف جذبی آب

### ۳-۳ نورسایشی

برداشت ماده به طور تمیز و دقیق و بدون هیچگونه تخریب حرارتی (مانند انعقاد، تبخیر و...) که معمولاً با پرتو دهی نور فرابنفش ایجاد می شود، نورسایشی نامیده می شود. هنگامی که ماده در معرض تابش لیزر قرار می گیرد، تجزیه می شود. چگالی توان و آستانه<sup>۱۷</sup> این نوع برهمکنش  $w/cm^2$   $10^7 - 10^8$  است که با پالس های میکرو ثانیه رخ می دهد. گرچه نورسایشی در ابتدا روی موادی از جنس پلی متیل-متاکریلات، پلی ایمید، تفلون، و دیگر پلیمرهای آلی انجام پذیرفته است، اما امروزه نورسایشی یکی از موفق ترین روش های جراحی<sup>۱۸</sup>، نکساری<sup>۱۹</sup> قرنیه چشم به شمار می آید. نورسایشی نوعی گسست مولکولی است، به این ترتیب که با جذب یک فوتون مقدار زیادی انرژی به مولکول منتقل شده و آن را به یک حالت الکترونی برانگیخته (بیش از انرژی پیوندی) می برد. این دو  $A$  و  $B$  ممکن است در ارتعاشات بعدی گسسته شوند. از این رو نورسایش با فرایند دو مرحله ای زیر بیان می گردد:



همان گونه که مشاهده می شود، در ناحیه مرئی ضریب جذب آب خیلی کم است. اما در بافت، جذب نور مرئی ۱۴ و فرابنفش ۱۵ بسیار بیشتر از آنچه در شکل می بینیم است، که این به فراوانی نسبی ماکرومولکول های دیگر تشکیل دهنده بافت، مانند ملاتین و هموگلوبین مربوط می شود. هرچه به سمت ناحیه فروسرخ طیف پیش می رویم، مولکول های آب جاذب بهتری هستند، زیرا ضریب جذب مولکول های آب تا چند مرتبه بزرگی افزایش می یابد. ضریب جذب<sup>۱۶</sup>  $a$  (که در رابطه قانون لامبرت که به فرم روبرو است  $I = I_0 e^{-ax}$ ) و طول جذب آب ( $L$ ) برای طول موج های مهم لیزر، در جدول (۱) فهرست شده اند. در اینجا لازم است اشاره کنیم که در تضعیف کلی، علاوه بر جذب، پراکندگی ریلی هم مؤثر است، که به دلیل وابستگی<sup>۱</sup>  $(\lambda^4)$  برای ناحیه فرابنفش از تأثیر بیشتری برخوردار است.

احتمال روی دادن این پدیده، به انرژی فوتون های پرتوی لیزری و انرژی پیوندی مولکول های تحت پرتو دهی بستگی دارد.

### ۴-۳ سایش پلاسمایی

وقتی در جامدات و مایعات چگالی توان به بیش از  $w/cm^2$   $10^{11}$  برسد و یا در هوا از  $w/cm^2$   $10^{14}$  فراتر رود، پدیده فرو شکست نوری روی می دهد. این فرایند سایش ایجاد شده، ناشی از تشکیل پلاسمای یونیزه در عرض پالس های  $100\text{fs}-500\text{ps}$  و با چگالی توان های  $w/cm^2$   $10^{11}-10^{13}$  است، که با استفاده از لیزرهای Nd:YLF، Nd:YAG و Ti:Sapphire قابل روی دادن است. گاهی اوقات به جای سایش پلاسمایی، واژه سایش به واسطه پلاسمای نیز به کار می رود. هر دو واژه به طور کلی بیان می کنند که یونش پلاسمای آغازگر این نوع فرایند سایش است. مهمترین پارامتری که در سایش پلاسمایی نقش ایفا می کند، شدت بالایی میدان الکتریکی موضعی E است. اگر  $E$  از مقدار آستانه تجاوز کند، یعنی اگر میدان الکتریکی، مولکول ها و اتم ها را وادار به یونش کند، آنگاه فرو شکست نوری حاصل می گردد. شدت میدان الکتریکی طبق رابطه زیر تعیین کننده چگالی توان موضعی I است.

$$I(r,t) = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2 \quad (5)$$

که  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک و  $c$  سرعت نور است. برای پالس های پیکو ثانیه شدت آستانه فرو شکست نوری  $w/cm^2$   $10^{11}$  است که متناظر با شدت میدان الکتریکی حدود  $w/cm^2$   $10^7$  می باشد. این میدان الکتریکی با میدان های کولمبی اتم یا درون مولکولی قابل مقایسه است. مثلاً در مولکولی با بار هسته  $10^{-18} C$  و شعاعی حدود  $10$  آنگستروم، میدان هسته در موضع الکترون با رابطه تقریبی به مقدار  $v/m$   $9/1 * 10^9$  و یا  $v/m$   $9/1 * 10^7$  که حدود شرط لازم برای یونش پلاسمای است ایجاد می شود.

### ۵-۳ گسیختگی نوری

از جمله آثار شکست نوری، پدیده های تشکیل پلاسمای و تولید امواج ضربه ای است. اگر فرو شکست نوری در ماده های نرم یا مایعات

روی دهد، علاوه بر آثار فوق ممکن است پدیده های حفره سازی و فوران نیز رخ دهند که مفاهیم آن ها را در اینجا بررسی می کنیم. در انرژی های بالاتر پالس و انرژی های بیشتر پلاسمای، اثرات جانبی امواج ضربه ای و مکانیکی از اهمیت بیشتری برخوردار می گردند و حتی ممکن است بر کل ماده تاثیر گذارند. دلیل عمده آن این است که اثرات مکانیکی، رابطه خطی با انرژی جذب شده دارند. بنابراین به خاطر آثار مکانیکی در این پدیده، واژه گسیختگی نوری را برای آن برگزیده اند.

هنگامی پدیده حفره سازی روی می دهد که باریکه لیزر به جای آن که روی سطح کانونی شود، داخل ماده متمرکز می گردد. مثلاً پدیده تشکیل حفره درون قرنیه با کانونی شدن یک پالس لیزری مثل Nd:YLF پیکو ثانیه ای در زیر اپتیلوم عملی می شود. بلافاصله بعد از پرتو دهی، ماده به گونه ای شکل می یابد که از تلاشی حباب های حفره ساز ممانعت کند. این گسیختگی نوری شیوه ای مناسب برای جراحی با حداقل آسیب است. از مهمترین کاربردهای گسیختگی نوری برداشت کپسول خلفی عدسی چشم و سنگ شکنی با لیزر در خردسازی سنگ های مجاری ادرار می باشد. به طور کلی پدیده گسیختگی نوری به صورت اثرات مکانیکی که دارای چندین منشأ هستند، در نظر گرفته می شود و با شکست نوری آغاز می گردد. ساز و کارهای اولیه در این فرایند، تولید امواج ضربه ای و تشکیل حفره هستند. اگر حفره ها درون شاره باشند و نزدیک مرز یک جامد فروپاشیده شوند، آنگاه این فرایند با تشکیل فوران کامل می شود. ایده اصلی در فرایند گسیختگی نوری خردسازی و برش ماده توسط نیروهای الکتریکی است. در حین این عمل مواردی چون جرقه زنی پلاسمای، تولید امواج ضربه ای، حفره سازی و ایجاد فوران مشهود است. این فرایند توسط لیزرهای حالت جامدی مانند Nd:YLF، Nd:YAG و Ti:Sapphire با عرض پالسی در بازه  $100\text{ns}$  تا  $100\text{fs}$  و چگالی توانی در حد  $w/cm^2$   $10^{11}-10^{13}$  برای خردسازی لنز چشم و سنگ شکنی، عملی می شود. [۴]

### ۴- سایش لیزری و عوامل کلیدی موثر

سایش در وسیع ترین مفهوم خود به معنای جدا کردن ماده توسط نور است. در بیشتر فلزات،

شیشه ها و کریستال ها، جدا کردن ماده توسط تبخیر آن به واسطه گرما صورت می گیرد. در پلیمرها عمل جدا کردن ماده را می توان توسط تغییرات فوتوشیمیایی انجام داد که این تغییرات شامل انحلال (تجزیه) شیمیایی پلیمر، شبیه به لیتوگرافی نوری می باشد. اگر جدا کردن ماده توسط تبخیر انجام شود باید توجه خاصی به پلام ایجاد شده داشت. پلام یک بخار پلاسما مانند متشکل از قطعات مولکولی، ذرات خنثی، الکترون های آزاد و یون ها و محصولات واکنش شیمیایی است. پلام مسئولیت جذب و پراکنش نوری باریکه فرودی را به عهده دارد و می تواند اطراف ماده را متراکم کرده و باریکه نوری را به آن برساند.

به طور معمول، مکان سایش توسط یک گاز خنثی نظیر نیتروژن یا آرگون احاطه می شود. قابلیت مواد به منظور جذب انرژی لیزر، به عمقی که انرژی فرودی می تواند در آن سایش مفیدی انجام دهد محدود می شود. عمق‌گذاری تابعی از چگالی انرژی باریکه، طول زمان پالس لیزر و طول موج لیزر است که توسط عمق جذب ماده و گرمایی تبخیر آن تعیین می شود. چندین پارامتر کلیدی در فرایند سایش لیزری قابل ملاحظه است که در زیر به برخی از آن ها اشاره شده است.

پارامتر اول انتخاب یک طول موج با حداقل عمق جذب می باشد. این عمل به رسوب بالایی انرژی در یک حجم کوچک از نمونه کمک خواهد کرد تا از یک سایش سریع و کامل، اطمینان حاصل شود. پارامتر دوم طول زمان پالس کوتاه است که ماکزیمم توان قله را فراهم کرده و هدایت گرمایی به اطراف محیط کاری را به حداقل می رساند. این عمل مشابه یک سیستم در حال ارتعاش است که جرم آن بزرگ و تابع اعمال کننده نیرو فرکانس بالایی دارد. چنین ترکیبی دامنه پاسخ را کاهش خواهد داد.

پارامتر سوم نرخ تکرار پالس است. اگر نرخ تکرار خیلی پائین باشد، از تمام انرژی لیزر برای سایش استفاده نمی شود، زیرا مقداری از انرژی به علت نرخ تکرار پائین پالس، ناحیه مورد تابش را ترک می کند که این امر سبب خنک شدن آن ناحیه می شود. با نرخ تکرار بالایی پالس، زمان برای انتقال گرما محدود شده و می توان گرمایی نفوذ کرده به ماده را حفظ کرد که این امر باعث بالا رفتن راندمان سایش خواهد شد. با این کار، بیشتر

انرژی فرودی به منظور سایش استفاده خواهد شد و مقدار کمی از آن در محیط اطراف ماده هدر می رود. پارامتر چهارم کیفیت پرتو است. کیفیت پرتو توسط درخشندگی، قابلیت کانونی شدن و همگنی آن تعیین می شود. اگر نتوان باریکه ای با کیفیت خوب به ناحیه سایش رساند، از انرژی آن به خوبی استفاده نمی شود. بعلاوه اگر پرتو در اندازه کنترل شده نباشد، ممکن است ناحیه‌گنده شده با شبیهی بیش از حد در کنار لبه ها و بزرگتر آنچه که خواسته شده، باشد.

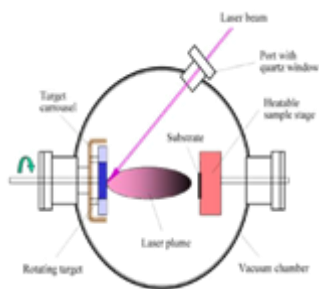
### ۵- روش تولید ذره

در این قسمت به بررسی روش تولید ذره پرداخته اما قبل از شروع این بحث، خلاصه ای از اثر تابش لیزر به هدف جامد و فعل و انفعالات رخ داده، که منجر به جدا شدن ذرات از هدف می شود می پردازیم. سایش لیزری پدیده مهیج برهمکنش لیزر با ماده را نمایش می دهد. هنگام تابش باریکه لیزر پالسی توان بالا به ماده هدف، توده ای از ماده جدا شده و شکل گیری پلاسما اتفاق می افتد. مقدار جرم جدا شده و انرژی پلاسمایی که بوسیله لیزر ایجاد می شود بسته به پارامترهای لیزر (طول زمان پالس، انرژی و طول موج)، خصوصیات هدف جامد و محیط اطراف تغییر می کند. زمانی که پالس لیزر به سطح نمونه می رسد مقداری از انرژی پالس از سطح بازتاب شده که میزان بازتاب پذیری به ماده و طول موج لیزر بستگی دارد. بخشی از انرژی جذب شده توسط نمونه از طریق فوتون های اپتیکی به الکترون ها توزیع و سپس به شبکه منتقل می شود. انرژی بالایی ورودی ممکن است باعث واکنش های فوتوشیمیایی شود که در نتیجه آن اتم ها و مولکول ها از سطح آزاد می شوند. زمانی که سطح توسط انرژی لیزر گرم شود می تواند به دماهای خیلی بالا حتی نزدیک به نقطه بحرانی برسد و باعث تسریع در فرایند تبخیر شود. مابقی انرژی به کمک انتقال گرما درون ماده منتشر می شود. بسته به انرژی لیزر به کار رفته، ممکن است سطح جامد به مایع تبدیل شود. با حرکت فصل مشترک مابین سطوح مایع- جامد، بخش مایع ممکن است از منطقه ذوب شده همانند قطره های کوچک جدا شود که این خود آهنگ سایش ماده را بیشتر می کند. شایان ذکر است که برای برخی مواد تاثیرهای تنش گرمایی مهم است، چرا که ممکن است هدف جامد از سطح شکسته

ذرات بزرگ ترگنده شده و همگی به درون ICP-MC منتقل می شوند. سپس آن ها در پلاسمای القائی یونیزه شده و در انتها، در طیف نمایی جرمی تحلیل می شوند. این موضوع تنها به اطلاعات اتمی از ماده مانند ICP-AES محدود نشده، بلکه می تواند با ظرافت و دقت بهتری انجام شود تا جایی که بتوان نسبت عناصر را نیز تعیین کرد. این فناوری جدید به طور گسترده در زمینه های بیشماری به کار گرفته شده است.

### - لایه نشانی فیلم نازک

لایه نشانی توسط پالس لیزر<sup>۲۰</sup>، فرایندی است که پالس های لیزر، ماده را از هدف جدا کرده و آن را روی یک زیر لایه ته نشین می کند. چون این فرایند سریع و تمیز است، می توان ضخامت فیلم ایجاد شده را با دقت کنترل کرد. لایه نشانی فیلم نازک به وسیله پالس لیزر امتیازاتی فراتر از روش های متداول نظیر رسوب شیمیایی بخار<sup>۲۱</sup> یا رسوب فیزیکی بخار<sup>۲۲</sup> دارد (شکل ۳). از امتیازات این روش می توان به یکنواخت بودن لایه تهیه شده و آسان بودن بررسی ساختار آن اشاره کرد.



شکل ۳: نمای شماتیکی نحوه عملکرد PLD

گرماي نامتعادل هدف منجر به بخار عناصر مختلف و سپس رسوب فیلم های متعدد روی زیرلایه می شود. می توان با انتخاب طول موج های مناسب در پالس های کوتاهتر، استوکیومتری<sup>۲۸</sup> فیلم های رسوب شده را به دست آورد. [۲۴]

شود. [۲۰] سایش لیزری یک فناوری قدرتمند برای آنالیز شیمیایی مستقیم نمونه<sup>۱۸</sup> [۲۱]، لایه نشانی فیلم نازک<sup>۱۹</sup> [۲۲] و ماشین کاری در ابعاد میکرون<sup>۲۰</sup> [۲۳] است. در زیر به توضیح مختصری از کاربردهای اشاره شده می پردازیم.

### - آنالیز شیمیایی مستقیم

روش های نمونه گیری شیمیایی سنتی معمولاً به مراحل خسته کننده ای برای تولید نمونه نیاز دارند که البته بسیار وقت گیر بوده و همچنین فاضلاب (مواد زائد سمی) تولید می کنند. بنابراین ممکن است مشکلاتی به وجود آید، زیرا برخی نمونه ها مانند اورانیوم<sup>۲۱</sup> به آسانی نمی توانند در حلال شیمیایی حل شوند، بنابراین چالشی برای آشکار سازی این نمونه ها به وجود می آید. سایش لیزری فناوری نوید بخشی است که راهی برای تحلیل شیمیایی مستقیم نمونه فراهم می کند. از امتیازات این روش این است که کمترین مقدار ممکن جرم از نمونه جدا می شود. این کار بدون ایجاد مواد زائد سمی انجام می شود. از دیگر مزایای سایش لیزری می توان به جدا کردن جرم از هر نوع ماده، اشاره کرد. سایش لیزری قادر به تبخیر مستقیم نمونه های جامد، جهت آنالیز عناصر آنها، با مقیاس طیف نمایی<sup>۲۲</sup> گسیل اتمی پلاسمای جفت شده یا طیف نمایی جرم است. با روش طیف نمایی گسیل اتمی، طیف نمایی شکست لیزر القاء شده<sup>۲۳</sup> (LIBS) از یک یا چند لیزر، جهت گندن جرم از نمونه در مقیاس اتمی و تولید پلاسمای استفاده می شود. پلاسمای ایجاد شده را می توان توسط طیف نمایی ذرات گسیل شده جهت شناسایی عناصر درون آن تحلیل کرد.

در کنار مطالعه طیف گسیل اپتیکی، روش عمومی دیگری در تحلیل شیمیایی وجود دارد که در آن سایش لیزر با طیف نمایی جرم پلاسمای جفت شده القائی<sup>۲۴</sup> (ICP-MC) تلفیق می شود. در این روش، در اثر تابش لیزر به ماده اتم ها و

- Direct Sample Chemical Analysis<sup>۱۸</sup>
- Thin Film Deposition<sup>۱۹</sup>
- Micromachining<sup>۲۰</sup>
- Uranium<sup>۲۱</sup>
- Spectroscopy<sup>۲۲</sup>
- Laser-induced Breakdown Spectroscopy<sup>۲۳</sup> (LIBS)
- Inductively-coupled Plasma Mass Spectrometry<sup>۲۴</sup> (ICP-MS)

- Pulsed Laser Deposition (PLD)<sup>۲۰</sup>
- Chemical Vapor Deposition (CVD)<sup>۲۱</sup>
- Physical Vapor Deposition (PVD)<sup>۲۲</sup>
- Stoichiometry<sup>۲۸</sup>

## ماشین کاری در ابعاد میکرون

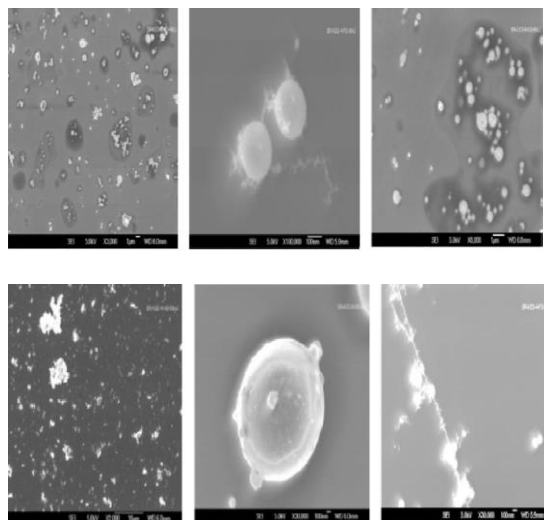
ماشین کاری در ابعاد میکرون با لیزر، امتیاز قابلیت برش مستقیم نمونه را دارد. تقریباً همه مواد می توانند با انتخاب طول موج و چگالی انرژی مناسب، ماشین کاری شوند. با استفاده از ماشین کاری در ابعاد میکرون می توان به ساخت سهب، عدی میکرو ساختارها با وضوح بالاتری نسبت به دیگر فناوری ها مانند حکاکی دست یابیم. لیزر استفاده شده برای ماشین کاری در ابعاد میکرون به طور معمول لیزرهای اگزایمر<sup>۲۹</sup> پالسی هستند. در سال های اخیر لیزرهای پیشرفته با طول زمان پالس خیلی کوتاه (حدود پیکو ثانیه و حتی فمتو ثانیه) بیشترین توجه را در میکروماشین کاری به خود اختصاص داده اند. علت این است که طول زمان پالس، کمتر از نوعی زمان مشخصه<sup>۳۰</sup> گرمایی است (چند پیکو ثانیه)، چنانکه با عمق نفوذ گرمایی کمتر، دقت بالا و سایش سریع با کمترین آسیب را می توانیم بدست آوریم. بعلاوه باریکه لیزر فمتو ثانیه ای با پلاسمای ایجاد شده توسط لیزر اندرکنش ندارد زیرا طول زمان پالس لیزر کوتاه است. بنابراین با جذب کامل انرژی لیزر روی هدف، راندمان بالاتری از سایش ماده را می توان بدست آورد.

## ساخت نانو مواد

فناوری نانو، مزایای تولید مواد با ویژگی های جدید اپتیکی، الکتریکی، مکانیکی و ... را در اختیار ما قرار می دهد. از کاربردهای سایش لیزری، ساخت مواد در ابعاد نانو مانند نانو ذرات یا نانو سیم ها است. نانو مواد را می توان باگندن اتم ها از نمونه و چگالش آن ها به ذرات، سیم ها، یا لوله ها تحت فرایندهای طراحی شده خاصی، تولید کرد. استفاده از لیزرها جهت پردازش مواد، به دانش پایه برهمکنش لیزر با ماده نیاز دارد. این برهمکنش یک فرایند بسیار پیچیده است. برهمکنش انرژی الکترومغناطیسی پالس لیزر با ماده هدف می تواند منجر به ذوب، تبخیر، گندن اتم ها، یونها و مولکول های نمونه شود. همچنین در طول این فرایند امواج ضربه ای تشکیل شده که باعث گسترش پلاسمای می شود. برای سایش لیزری با تابش بالای لیزر، ممکن است در اثر گرم شدن سریع ماده در خواص گرمایی و اپتیکی ماده تغییر

ایجاد شود. بخار تولید شده می تواند با بخشی از پالس لیزر برهمکنش کرده و پلاسمای بسیار نامتعادلی تولید کند. باید توجه کرد که این فرایندها در میزان انرژی لیزر که می تواند به نمونه منتقل شود، تاثیر می گذارند. امروزه یکی از مهمترین موضوعات در کاربرد سایش لیزری، کنترل اندازه، شکل و تعداد ذرات جدا شده از ماده می باشد.

با نگاهی به مجموعه ذرات تولید شده به وسیله سایش لیزری می بینیم که اندازه ذرات از محدوده نانومتر تا چندین میکرون تغییر می کند و زمانی که ذرات متراکم می شوند شکل آن ها از حالت کروی به سمت اشکال بی قاعده تغییر پیدا می کند (شکل ۴).



شکل ۴: تصاویر SEM ذرات تولیدی فلز برنج به روش سایش لیزری [20]

وجود پالس های مکرر لیزر، باعث تغییر بیشتر در توپوگرافی<sup>۳۱</sup> سطح ذره می شود و احتمال آنکه ذرات بزرگتر تولید شود را افزایش می دهد. هنگامی که پالس لیزر به سطح نمونه می رسد، مقداری از انرژی توسط سطح بازتاب می شود. این نکته حائز اهمیت است که میزان بازتاب پذیری، بستگی به جنس ماده و طول موج لیزر دارد. انرژی جذب شده توسط نمونه، از فوتون های اپتیکی به الکترون ها و سپس به شبکه منتقل شده است که سرانجام این انرژی درون ماده پخش می شود. انرژی بالای پالس های لیزر ممکن است باعث عکس العمل های فوتوشیمیایی شود که در

<sup>۲۹</sup> - Excimer Lasers

<sup>۳۰</sup> - Characteristic Time

<sup>۳۱</sup> - Topography

### ۶-۵-۳ تبخیر<sup>34</sup>

اگر جدا کردن ماده توسط تبخیر انجام شود باید توجه خاصی به پلام ایجاد شده داشت. پلام یک بخار پلاسما مانند متشکل از قطعات مولکولی، ذرات خنثی، الکترون های آزاد و یون ها و محصولات واکنش شیمیایی است. پلام مسئولیت جذب و پراکندگی نوری باریکه فرودی را به عهده دارد و می تواند اطراف ماده را متراکم کرده و باریکه نوری را به آن برساند. جرم تبخیر شده از هدف به شکل پلام بخار در آمده و با دما و فشار بالا از سطح دور می شود. اصولا دمایی سطح با آهنگ تبخیر تعیین می شود. آهنگ تبخیر از سطح مایع از رابطه (۶) به دست می آید. [۲۶]

$$j_{ev} = n l \sqrt{\frac{K_B T_l}{2\pi m_a}} \exp\left(-\frac{h_{iv}}{K_B T_l}\right) - \theta s n_v \sqrt{\frac{K_B T_v}{2\pi m_a}} \quad (6)$$

که  $n$  تعداد اتم ها در واحد حجم، اندیس های  $v$  و  $l$  به ترتیب نشاندهنده حالت بخار و مایع،  $h_{iv}$  و  $T_v$  گرمایی نهان تبخیر و دمایی بخار هستند،  $M_a$  جرم اتمی و  $K_B$  ثابت بولتزمن است. اولین عبارت در رابطه (۶) آهنگ تبخیر از سطح مایع با دمایی  $T_l$  را نشان می دهد و عبارت دوم، آهنگ تراکم مولکول هایی که پشت سطح مایع هستند (که به سطح مایع بر می گردند) را نشان می دهد. ضریب چسبندگی  $\theta_s$  احتمال این است که اتم بخار شده به سطح مایع برگردد و جذب آن شود.

### ۵-۴-۴ نوب<sup>35</sup>

مقدار انرژی که از آن در تبخیر ماده استفاده نشده، باعث گرم شدن ماده می شود. این موضوع سبب افزایش انرژی درونی شده و دمایی ماده را بالا می برد. انرژی به کمک هدایت گرما درون ماده پخش می شود. توزیع دما از معادله رسانش گرما (رابطه ۷) پیروی می کند.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + (1-R) I_0 \alpha \exp(-\alpha y) \quad (7)$$

که  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $K$ ,  $T$  دما، رسانندگی دما، گرمایی ویژه و چگالی را نشان می دهد. عبارت دوم در سمت راست رابطه (۷) عبارت منبع را نشان می دهد، که انرژی جذب شده لیزر به وسیله ماده در عمق

نتیجه آن، اتم ها و مولکول ها را از سطح جدا می شوند. سطح گرم شده می تواند به دماهای نزدیک دماهای بحرانی برسد و باعث تسریع در فرایند تبخیر شود.

### ۵-۱ شروع سایش با لیزر

باریکه فرودی لیزر در محل برخورد با هدف، ناحیه داغی را ایجاد می کند که باعث تبخیر آن محل شده که نتیجه آن، پلاسمایی است که شامل اتم های بخار یونیزه شده و الکترون هاست. ممکن است ابر پلاسما مقداری از انرژی لیزر فرودی را جذب کند. در نتیجه تنها اجازه می دهد که بخشی از انرژی لیزر به سطح برسد. پلاسما گسترش یافته و به وسیله جذب فوتون گرم می شود. بعد از آن، بخار به وجود آمده اطراف پلاسما سرد می شود و تشکیل ذرات آئروسول شروع می شود. ویژگی های ذرات آئروسول (تمرکز تعداد، شکل، توزیع اندازه و ...) از تاثیرات فرایندهای مختلف نتیجه می شود. در طول فرایند سایش لیزری یک سری از رویدادها توسط لوشنیکوف<sup>۳۲</sup> شرح داده شده است که برای مثال می توان به باریکه فرودی، انفجار پلاسما، گسترش ابر پلاسما، شکل گیری هسته، رشد تراکمی، گسترش ابر، لخته شدن و تراکم اشاره کرد. [۲۵]

### ۵-۲ شکل گیری پلاسما<sup>33</sup>

ناحیه ای از سطح هدف که لیزر به آن تابیده، تا دمایی بالایی گرم می شود. پیداست که بخش بزرگی از انرژی لیزر جذب شده و به منظور تبخیر اتم های ماده استفاده شده که نتیجه آن کاهش انتقال انرژی به داخلی ترین بخش ماده است. در جلوی بخار تشکیل شده، پلاسما با گاز پیرامون برخورد می کند و امواج ضربه ای تشکیل می شود (سرعت این امواج بیش از سرعت صوت است). پلاسمایی بخار در یک حالت نامتعادل شدید با چگالی یونی  $10^{16}$  - ions/cm<sup>۳</sup> است. زمان مشخصه برای تشکیل ابر پلاسما در حدود  $10^{-7}$  ثانیه است. هنگامی که همه اتم ها و مولکول ها یونیزه شده اند، دمایی درون پلاسما می تواند به چند ده هزار کلوین برسد.

- Lushnikov<sup>۳۲</sup>  
- Plasma Formation<sup>33</sup>

- Vaporization<sup>34</sup>  
- Melting<sup>35</sup>

Z از سطح است. R بازتاب پذیری سطح،  $I_0$  تابش لیزر و  $\alpha$  ضریب جذب است (بخش موهومی ضریب شکست ثابت فرض شده است). اگر میزان زیادی از انرژی لیزر توسط ماده جذب شود، ماده جامد ذوب می شود. در این حالت معادلات تعادل انرژی به صورت زیر بیان می شود. [۲۶]

$$T_s(z + z_{int}) + T_l(z + z_{int}) + T_m \quad (۸)$$

$$(۹) K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - K_s \frac{\partial T_l}{\partial z} = h_{sl} v_{int}$$

که  $h_{sl}$  گرمای نهان برای ذوب و  $v_{int}$  سرعت فصل مشترک عمود بر سطح است. حرکت فصل مشترک در دمای ذوب  $T_m$ ، همدمای فرض شده است. سرعت و موقعیت فصل مشترک مایع - جامد، که محصولات ضخامت لایه مذاب است را نیز می توان به دست آورد.

#### ۶- روشهای جداسازی ذره

در حین تولید ذره به کمک فرایند سایش لیزری، ممکن است روشهای های مختلفی روی دهد که در هر کدام اندازه ذره ایجاد شده متفاوت خواهد بود. در زیر انواع این مکانیزم ها به طور خلاصه بیان شده است. [۲۰]

#### ۶-۱- تشکیل هسته<sup>۳۶</sup> و چگالش<sup>۳۷</sup>

از آنجائی که پلام بخار<sup>۳۸</sup> به بیرون پخش شده و شروع به سرد شدن می کند، در قسمت جلوی آن امکان تشکیل ذرات آئروسول فراهم می شود. زمان های مشخصه برای شکل گیری ذرات، نوعاً از مرتبه نانو ثانیه هستند که بسیار کوتاهتر از طول زمان تشکیل ابر پلاسما است. مقیاس زمانی بسیار کوتاه برای شکل گیری ذره، تضمین می کند که بخار به ذرات تبدیل خواهد شد. متراکم سازی اتم های تبخیر شده، مکانیزمی برای تولید ذرات در مقیاس نانو را فراهم می کند. فشار پیرامون، خواص گاز و دما از فاکتورهای اساسی در فرایندهای متراکم سازی هستند. بیشتر مطالعات عددی که روی این فرایند انجام شده است، مکان امواج ضربه ای و خواص

گاز را محاسبه کرده است. نتایج تجربی معمولاً اندازه ذرات را بین چندین ده نانومتر گزارش داده اند. مولکول ها با همدیگر برخورد کرده و آئروسول های بزرگتر را تشکیل می دهند. به هر حال احتمال تشکیل ذرات بزرگتر از میکرون خیلی پائین است. ذرات بزرگتر به وسیله مکانیزم های دیگر تولید می شوند که در ادامه توضیح داده شده است.

#### ۶-۲- ورقه شدن هدف جامد<sup>۳۹</sup>

ورقه شدن (پوسته شدن)، گندن ماده شکسته شده در حالت جامد است که به وسیله اثرات فوتومکانیکی ناشی از فشار و همچنین گسترش گرمای القایی لیزر در سطح هدف، ایجاد می شود. این نوع گندن، خصوصاً برای مواد شکننده (بی دوام)، مواد نسوز نظیر مواد تک کریستالی شامل سیلیکن، گرافیت یا مواد شیشه گونه مهم است. موادمعمولاً در طول صفحات کریستالوگرافی خود شکافته می شوند. این ذرات اندازه بزرگ و شکل نامنظم دارند. سطح نمونه پس از فرایند ورقه شدن می تواند به آسانی توسط شکل دهانه شناسایی شود.

#### ۶-۳- جداسازی ذرات میکرونی<sup>۴۰</sup>

شکل کروی ذرات نشان می دهد که سرچشمه آنها از حالت مایع است. شکل گیری ذرات بزرگ بجز آن هایی که در سطح مایع شکل گرفته اند شبیه به حالت قبلی (ورقه شدن) است. ذرات بزرگ از ذوب شدن مکان نزدیک به فصل مشترک مایع- جامد شکل می گیرند. هنگامی که پالس لیزر با انرژی بالا به سطح هدف می رسد در اثر تبخیر ماده پلام بخار ایجاد می شود.

فشار و دمای پلام ایجاد شده خصوصاً در مرحله اولیه شکل گیری پلام بخار، خیلی زیاد است. فشار بالا ممکن است مایع ذوب شده را به بیرون از مرکز ناحیه ای که با لیزر گرم شده هدایت کند، که بعد از سرد شدن، به فرم یک دهانه آتشفشان در می آید معمولاً در اطراف دهانه یک دیواره بالا آمده مشخص است که گواه محکمی از یک سطح ذوب شده است. شکل (۴) یک سری تصاویر که از فرایند

- Nucleation<sup>۳۶</sup>  
- Condensation<sup>۳۷</sup>  
- Vapor plume<sup>۳۸</sup>

- Solid Exfoliation<sup>۳۹</sup>  
- Micron-Sized Particle (Spallation)<sup>۴۰</sup>

#### ۶-۴ تغییر (استحاله) فاز<sup>41</sup>

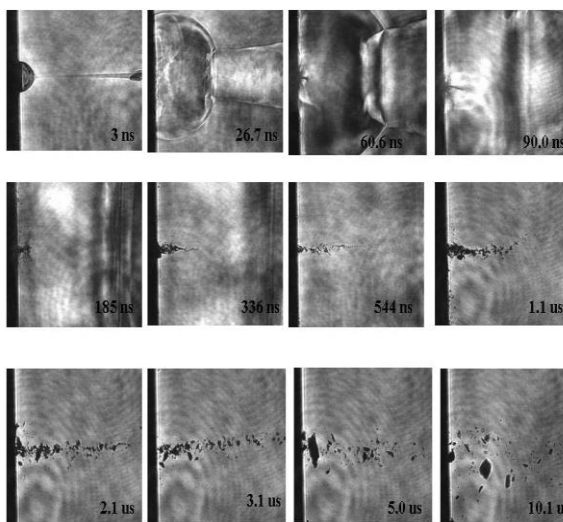
مکانیزم دیگری که باعث‌کننده شدن مقدار زیاد جرم می‌شود، در تغییر فاز ملاحظه شده است. اگر چه تغییر فاز به عنوان مکانیزم اصلی سایش لیزری پالس کوتاه در تعدادی از کارها بحث شده است، اما جزئیات فرایند برای این روش تولید ذره، هنوز در حال مطالعه است. تغییر در شکل دهانه و حجم نمونه به هنگام استفاده از پالس لیزر با انرژی بسیار بالا، گزارش شده است. زمانی که چگالی توان لیزر بزرگتر از مقدار بحرانی است، آهنگ سایش اندازه گرفته شده از عمق دهانه به سرعت تغییر می‌کند. این مکانیزم برپایه ترمودینامیک کلاسیک تحلیل شده است. هنگامیکه ناحیه ای از سطح هدف بیش از حد پایداری ترمودینامیکی خودش در اثر تابش لیزر با طول پالس کوتاه گرم شود، مسلماً در اثر این فزونی‌گرما سطح مایع دستخوش تغییر شده و مایع به مخلوط بخار و قطرات کوچک مایع تبدیل می‌شود. این نوع تغییر در خواص دهانه، توسط بسیاری از محققان روی مواد مختلف شامل سیلیکن، سرب، مس و شیشه گزارش شده است و راه بسیار کارآمدی برای جداکردن مواد در فرایند سایش لیزری است.

#### ۶-۵ انعقاد<sup>42</sup> (لخته شدن) و تراکم<sup>43</sup>

در کنار مکانیزم های اصلی تولید ذره، چندین مکانیزم فرعی نیز وجود دارد که در آن‌ها ذرات تولید نخواهند شد اما ممکن است توزیع اندازه ذره یا تمرکز تعداد ذرات تغییر کند. این فرایندها می‌توانند چندین نانو ثانیه تا چندین میلی ثانیه بعد از پالس لیزر اتفاق افتد. دو فرایند بسیار مهم، لخته شدن و تراکم هستند که معمولاً اندازه نهایی ذره را افزایش می‌دهند. ذرات بعد از شکل گیری توسط فرایند سایش لیزری، در محیط گازی پیرامونشان با یکدیگر برخورد می‌کنند و اگر اندازه حرکت خطی به مقدار کافی بزرگ یا ذرات در فاز مایع باشند، ذرات با هم آمیخته شده (منعقد شده) و ذرات بزرگ جدیدی تشکیل می‌شوند. این فرایند، انعقاد نامیده می‌شود. فرایند تراکم خیلی زودتر از آنکه چگالش شروع شود، شکل می‌گیرد. لازم به ذکر است که آئروسول‌ها با اندازه

سایش لیزری نمونه سیلیکن، با شدت بالایی لیزر تقریباً حدود  $30 \text{ GW/cm}^2$  است را نشان می‌دهد. چندین مکانیزم تولید ذره را می‌توان از این تصاویر تشخیص داد. شکل گیری پلام را خیلی زود بعد از چندین نانو ثانیه بعد از پالس لیزر، می‌توان مشاهده کرد. فشار و دمای بالای پلام، گاز اطراف را به بیرون رانده که این عمل منجر به شکل گیری امواج ضربه ای می‌شود.

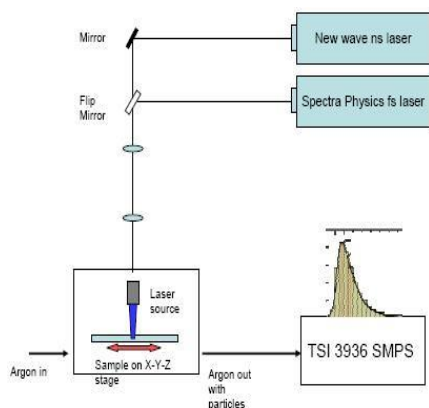
سطح تماسی بین پلام بخار و گاز پیرامون وجود دارد. اگر چه این سطح خیلی واضح نیست، می‌توان با قسمت های تیره تر، در تصویر مربوط به امواج ضربه ای مشاهده کرد. با گذشت زمان پلام بخار و موج ضربه ای به سمت بیرون (درون گاز پیرامون) گسترش می‌یابند. تقریباً  $50 \text{ ns}$  بعد از پالس لیزر، ذرات جدا شده از سطح را می‌توان مشاهده کرد. به هر حال، در تابش بالای لیزر ذرات خیلی بزرگ در حدود  $10 \mu\text{m}$  مشاهده شده اند که  $1 \mu\text{s}$  بعد از اعمال پالس لیزر، به صورت عمودی از سطح نمونه جدا می‌شوند. این ذرات بزرگ شاید نتیجه ای از پدیده تغییر فاز باشند. این فرایند تا حدود  $10 \mu\text{s}$  بعد از پالس لیزر طول می‌کشد.  $30-20 \mu\text{s}$  بعد از پالس لیزر، ذرات خیلی بزرگ که حتی در محدوده ای بزرگتر از  $30-20 \mu\text{m}$  تخمین زده شده تولید می‌شوند. از شکل نامنظم ذرات به آسانی می‌توان تشخیص داد که کدام شان از محصولات فرایند ورقه شدن هستند.



شکل ۵: تصاویر ذرات جدا شده سیلیکن در زمان های تاخیری متفاوت [۲۰]

- Phase Explosion<sup>41</sup>  
 - Coagulation<sup>42</sup>  
 - Agglomerates<sup>43</sup>

بخش تاثیر پارامترهاي مختلف ليزر شامل طول زمان پالس، انرژی ليزر و همچنين نرخ شارش<sup>۶</sup> گاز، روي اندازه ذرات توليد شده مورد بررسی قرار گرفته است. چيدمان آزمایش در شکل (۷) نشان داده شده است که شامل دو دستگاه ليزر و یک چيدمان اپتیکی براي باریکه ليزر است.



شکل ۷: چيدمان آزمایش براي اندازه گيري ذرات با استفاده از SMPS

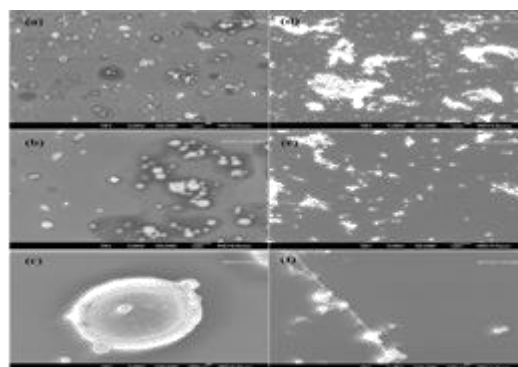
هر دو ليزر در طول موج ۲۶۶ nm عمل می کنند. یک ليزر ND:YAG با طول زمان پالس ۶ ns و یک ليزر Ti: sapphire با طول زمان پالس ۱۵۰ fs. تاثيرات انرژی هاي مختلف ليزر و شرايط انجام آزمایش، بر اندازه ذره توليد شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. باریکه هاي هر دو ليزر در حالت اتوماتیک روي محور xyz جهت بندي شده اند که نمونه ها در آن محل واقع شده اند. سايش در محل تمرکز باریکه ليزر روي هدف انجام می شود، جائيکه اندازه لکه<sup>۷</sup> براي ليزر نانو ثانيه اي (ليزر با طول زمان پالس نانو ثانيه) ۶۰ میکرون و براي ليزر فمتو ثانيه اي (ليزر با طول زمان پالس فمتو ثانيه) ۳۰ میکرون است.

در مقایسه آزمایش هاي دو ليزر، تست ها براي طول زمان پالس مختلف، براي انرژی و اندازه لکه یکسان ليزر انجام شده است. در تصویر برداري مکان، اندازه لکه ليزر نانو ثانيه اي ۶۰ میکرون بود، بنابراین از یک گیره جاخار<sup>۸</sup> جهت کاهش اندازه لکه به همان قطري که اندازه لکه ليزر فمتو ثانيه اي است (۳۰ میکرون) استفاده شده

نانو که در بخار تشکیل می شوند، به خاطر الکترون هاي موجود در پلازما به شدت باردار هستند. ذرات باردار نیز به خاطر تقيد الکترونی به یکدیگر پیوسته، و تراکم ها بوسیله شکل زنجيره يا نسج (شبكة) قابل شناسایی می شوند. [۲۰]

#### ۷- تاثیر عوامل ليزر در اندازه و توزيع ذرات

در اين بخش به بررسی اندازه و توزيع تعداد نانو ذرات به روش سايش ليزري و وابستگی آن ها به عوامل ليزر از قبيل طول زمان پالس و چگالی انرژی ليزر، می پردازيم. اين ذرات با استفاده از دستگاه DMA اندازه گيري شده اند. ذرات توليد شده از گندگی ليزري با طول زمان پالس نانو ثانيه<sup>۹</sup> و فمتو ثانيه<sup>۱۰</sup>، جمع آوري شده و تصاویر SEM آن ها در شکل (۶) آمده است.



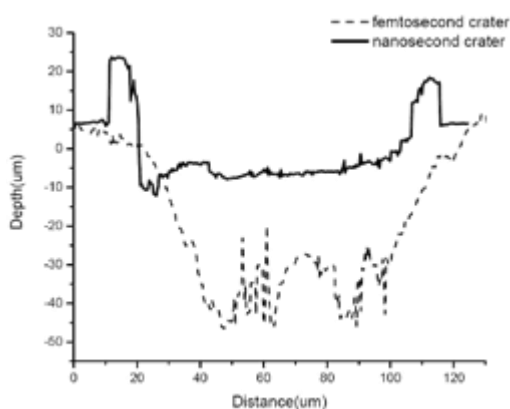
شکل ۶: تصاویر SEM آلياز برنج در فرایند سايش ليزري براي دقت هاي مختلف (a,b,c) با طول پالس نانو ثانيه (d,e,f) با طول پالس فمتو ثانيه [۲۰]

همانطور که می بينيم شکل و اندازه اين ذرات را می توان به طور مستقيم در تصاویر SEM مشاهده کرد. عيب روش اندازه گيري با SEM اين است که نمی توان در لحظه توليد ذرات، اندازه گيري را انجام داد، بلکه بايد ذرات را جمع آوري کرده و به میکروسکوپ منتقل کنیم. هنگامی که سايش ليزري انجام می شود، اندازه گيري با DMA، روشی مناسب براي به دست آوردن توزيع اندازه ذرات است. DMA قادر به انجام یک مطالعه دقيق و منظم براي تعيين تاثير پارامترهاي مختلف ليزر روي اندازه ذره است. البته عيب روش اندازه گيري با DMA اين است که نمی توان شکل ذرات را تشخيص داد. در اين

<sup>۶</sup> Flow Rate  
<sup>۷</sup> Spot Size  
<sup>۸</sup> Pinhole

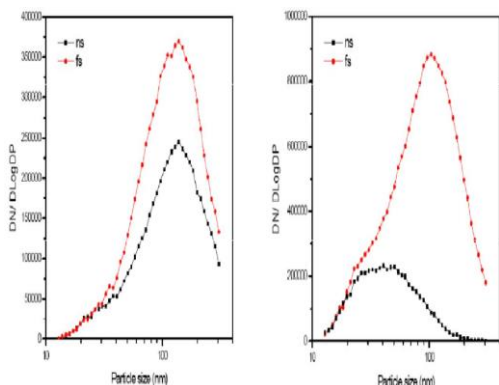
<sup>۹</sup> Nano Second  
<sup>۱۰</sup> Femto Second

(۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار توزیع اندازه ذرات برای طول زمان پالس نانو ثانیه و فمتو ثانیه (الف) مس بالا سمت راست (ب) سیلیکن بالا سمت چپ (ج) روی تصویر پایین [۲۰]

در فرایند سایش فلزاتی مانند روی و مس، اندازه ذره برای لیزر با پالس فمتو ثانیه ای بزرگتر از لیزر با پالس نانو ثانیه ای است که در این حالت نیز چگالی تعداد ذرات برای لیزر فمتو ثانیه ای بیشتر است. همچنین برای سیلیکن، زمانی که از لیزر فمتو ثانیه ای استفاده می شود چگالی تعداد ذرات بالا است اما اندازه ذره برای هر دو حالت استفاده از لیزر فمتو ثانیه ای و نانو ثانیه ای یکسان است. برای هر دو فلز حجم جدا شده از نمونه با استفاده از لیزر فمتو ثانیه ای بزرگتر از لیزر نانو ثانیه ای است (شکل های ۹ و ۱۰) و همین طور برای سیلیکن، که البته این موضوع مطابق با چگالی های بالای تولید ذره روی تصاویر SEM و اندازه گیری های DMA نیز هست.



شکل ۹: تغییرات عمق دهانه بر حسب فاصله در فرایند سایش برای لیزرهای نانو ثانیه ای و فمتو ثانیه ای [۲۰]

است. در اینجا سایش لیزری در یک محیط شامل گاز آرگون زیر فشار اتمسفر، بررسی می شود. نرخ شارش گاز آرگون در اتاقک ۱ L/min است. خصوصیت بی اثر بودن گاز آرگون با عت می شود که از واکنش آن با محصولات تولید شده در فرایند سایش لیزری ممانعت کند.

در این کار از یک سیستم تصویر برداری ذرات متحرک<sup>۴۹</sup> (SMPS) سری ۳۹۳۶، برای اندازه گیری ذرات استفاده شده است. یک کلید قطع و وصل جریان قبل از ورودی به SMPS نصب شده تا از نرخ شارش کاری SMPS اطمینان حاصل گردد. باقیمانده شار از یک فیلتر عبور داده می شود. تحت شرایط گازی با هوای زیر فشار اتمسفر، دستگاه می تواند اندازه های ذره را از ۱۰ nm تا ۸۵۰ nm با استفاده از تحلیل گر تحرک دیفرانسیلی (DMA) اندازه گیری کند. معادله زیر نشان می دهد که اندازه ذره D انتخاب شده به وسیله DMA متناسب با ولتاژ به کار رفته V است. [۲۰]

$$\frac{D_p}{C} = \frac{2neV}{3\alpha q_{sh} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} L \quad (10)$$

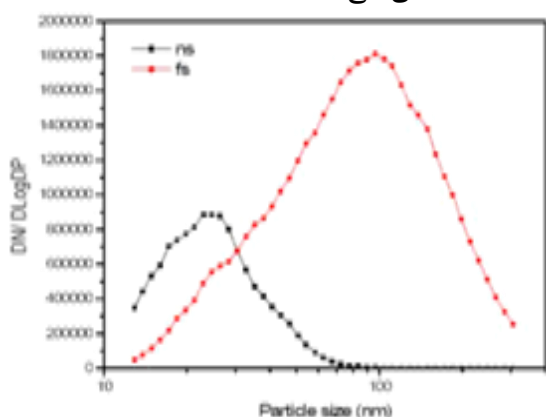
به هر حال در آرگون تخلیه قوس الکتریکی در ولتاژهای پائین تر از مقدار طراحی شده در هوا اتفاق می افتد و ماکزیمم اندازه ذره را از ۸۵۰ nm به تقریباً ۴۰۰ nm کاهش می دهد. زمان لازم برای تصویربرداری جهت اندازه گیری ذره، حداقل یک دقیقه برای هر داده می باشد. در این زمان با رشد دهانه، اندازه ذره گنده شده ممکن است تغییر کند. برای حذف تأثیرات تغییر شکل دهانه روی اندازه ذره، نمونه را با سرعت های مختلفی حرکت می دهند تا تأثیر گسترش دهانه بر روی اندازه ذره مورد بررسی کنند.

## ۱-۷ طول زمان پالس

آزمایش ها با طول زمان پالس مختلف با استفاده از انرژی یکسان (۰/۱۲ میلی ژول که ماکزیمم انرژی لیزر UV فمتو ثانیه ای است) و اندازه لکه ۳۰ میکرون که مطابق با شار تابشی ۱۷ است، انجام شده است. توزیع اندازه ذرات برای سه ماده در شکل

<sup>۴۹</sup> - Scanning Mobility Particle System (SMPS)

وسيله جدا شدن از ناحیه مذاب تولید می شوند، اندازه آن ها بزرگتر می شود. این ذرات در اندازه چندین ده نانومتر به وسیله چگالش شکل می گیرند. بیشتر مواد توسط لیزر فمتو ثانیه ای تبخیر شده و چگالیده می شوند. آئروسول ها با چگالی تعداد بالا با هم برخورد کرده و ذرات یا لخته های جدیدی را تشکیل می دهند. که قابل مقایسه با آئروسول های شکل گرفته از سایش لیزر نانو ثانیه ای است. شکل (۱۱) تصاویر SEM ذرات فلز روی را که با استفاده از هر دو لیزر فمتو ثانیه ای و نانو ثانیه ای به دست آمده نشان می دهد.

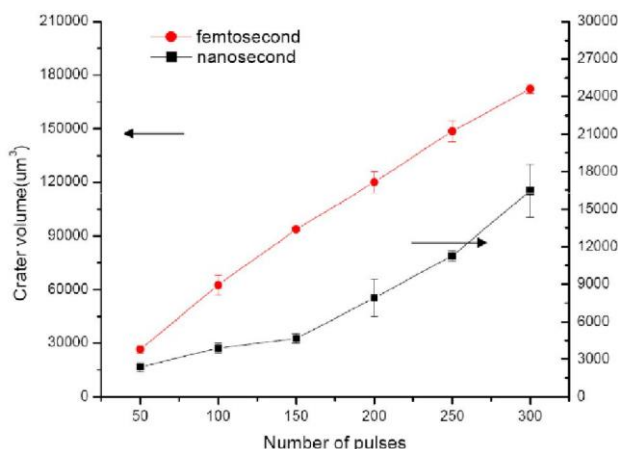


شکل ۱۱: تصاویر SEM فرایند سایش فلز روی (a) طول زمان پالس نانو ثانیه (b) طول زمان پالس فمتو ثانیه [۲۰]

با نگاهی به شکل می توان دید که بیشترین ذرات را می توان در سایش با لیزر فمتو ثانیه ای یافت تا در لیزر نانو ثانیه ای. اگر چه ذرات تولید شده با لیزر فمتو ثانیه ای بزرگتر از چند صد نانومتر هستند، اما آن ها از جدا شدن ناحیه مذاب از سطح تشکیل نشده اند. اندازه گیری DMA برای فلز روی نشان می دهد که برای طول زمان پالس نانو ثانیه ای از ۳۰ nm به ۱۰۰ nm برای طول زمان پالس فمتو ثانیه ای افزایش می یابد که در این حالت، تغییر چگالی تعداد ذرات تقریباً دو برابر می شود.

## ۲-۷ انرژی لیزر

در این بخش تاثیر چگالی انرژی لیزر<sup>۱۱</sup> (منظور چگالی سطحی انرژی است) نانوثانیه ای روی اندازه ذره برای نمونه های کربن، سیلیکن،



شکل ۱۰: نمودار تغییرات حجم دهانه بر حسب تعداد پالس در فرایند سایش لیزرهای نانو ثانیه ای و فمتو ثانیه ای [۲۰]

برای آلیاژ برنج (اغلب مس)، لیزر با طول زمان پالس نانو ثانیه، ذرات کروی با اندازه میکرون تولید می کند در حالیکه لیزر فمتو ثانیه ای ذرات لخته شده بزرگ تولید می کند. ذرات بزرگی که از لیزر نانو ثانیه ای و ذرات لخته شده ای که از لیزر فمتو ثانیه ای تولید می شوند، از حد آشکار سازی DMA بزرگتر بوده و با آن قابل اندازه گیری نیستند. به خاطر تفاوت طول زمان پالس، مکانیزم های تشکیل ذرات برای دو لیزر فمتو ثانیه ای و نانو ثانیه ای با هم اختلاف دارند.

برای فلزات، اغلب در سایش با لیزر فمتو ثانیه ای در اطراف دهانه<sup>۱۲</sup> هیچ لبه ای بالا نمی آید در حالیکه وقتی از لیزر نانو ثانیه ای استفاده می شود یک لبه بلند واضح به وجود می آید. نرخ سایش برای لیزر فمتو ثانیه ای با تعداد پالس ثابت است، در حالیکه همین نرخ سایش برای لیزر نانو ثانیه ای بعد از چندین پالس افزایش می یابد (شکل ۹).

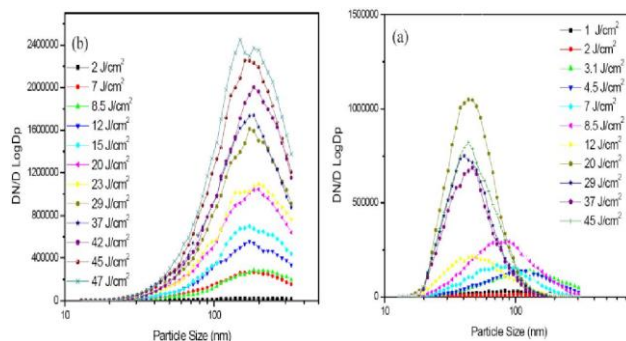
این افزایش نرخ سایش برای لیزر نانو ثانیه ای، به جدایی ماده مذاب پس از اعمال پالس های مکرر مربوط است زیرا خود ماده مذاب نرخ سایش را افزایش می دهد. در طول فرایند سایش لیزری با طول زمان پالس فمتو ثانیه، تبخیر فرایند غالب است.

ماکزیمم چگالی تعداد ذرات در سایش با لیزر نانو ثانیه ای فلزات روی و مس، به ترتیب در ۳۰ nm و ۵۰ nm اتفاق می افتد. از زمانی که ذرات به

<sup>۱۱</sup> - Laser Energy Density

<sup>۱۲</sup> - Crater

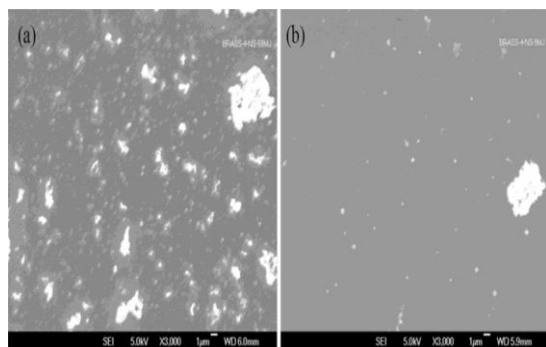
روی و مس بررسی شده است. شکل (۱۲) توزیع اندازه ذرات برای مقادیر مختلف چگالی انرژی لیزر برای دو عنصر روی و کربن را نشان می دهد.



شکل ۱۲: نمودار توزیع اندازه ذرات (الف) روی (ب) کربن (اندازه گیری با DMA)

همانطور که می بینیم توزیع اندازه ذرات با چگالی انرژی لیزر تغییر می کند. در تمامی نمونه ها، چگالی تعداد ذرات با افزایش انرژی لیزر افزایش می یابد. تغییرات قطر نانو ذرات با انرژی لیزر، با استفاده از قطر میانگین که از داده ها به دست آمده و در شکل (۱۳) نشان داده شده، مورد بررسی واقع شده است. میانگین قطر ذرات در یک توزیع فرکانسی قطر میانگین تعریف می گردد. در این توزیع نیمی از ذرات بزرگتر و نیمی کوچکتر از قطر میانگین در نظر گرفته شده است.

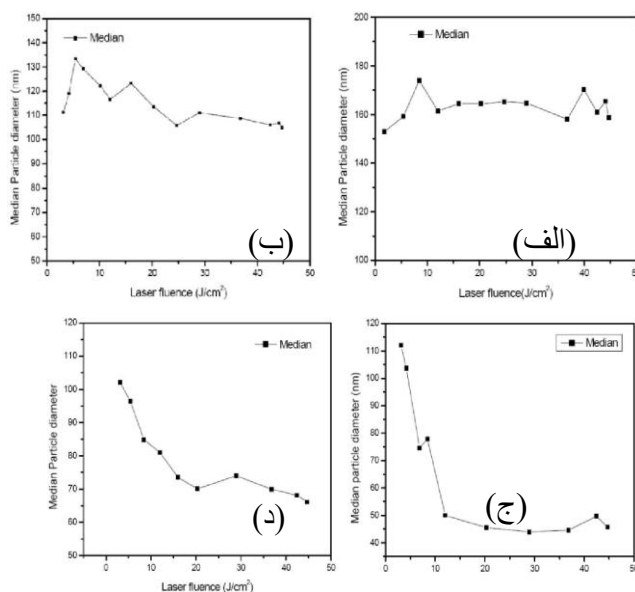
همانطور که در شکل (۱۳) می بینیم، ذرات فلز از ذرات کربن و سیلیکن کوچکتراند. با افزایش انرژی لیزر اندازه میانگین قطر ذرات فلز کاهش می یابد، در حالیکه میانگین قطر ذرات برای کربن و سیلیکن تغییر زیادی نکرده است. در چگالی انرژی  $10 \text{ j/cm}^2$  قطر میانگین برای فلز برای مس در چگالی انرژی  $15 \text{ j/cm}^2$  از  $110 \text{ nm}$  به  $70 \text{ nm}$  کاهش یافته است. می بینیم برای هر دو فلز روی و مس به ترتیب حتی با افزایش چگالی انرژی به ترتیب  $10 \text{ j/cm}^2$  و  $15 \text{ j/cm}^2$ ، قطر میانگین ذرات تغییر نمی کند. برای سیلیکن با افزایش چگالی انرژی لیزر، قطر میانگین ذرات به تدریج از  $130 \text{ nm}$  به  $110 \text{ nm}$  کاهش می یابد، در حالیکه برای کربن اندازه ذرات با انرژی اعمالی تغییر نمی کند. با اینکه چگالی انرژی برای فلزات به یک مقدار معین افزایش می یابد، میانگین اندازه ذرات کوچکتر شده است. هنوز دلیل این مشاهده مشخص نمی باشد. البته لازم به ذکر است که با وجود کوچک شدن قطر میانگین ذرات، تعداد آن ها افزایش یافته است. حجم دهانه با چگالی انرژی لیزر افزایش می یابد و تصاویر SEM شکل (۱۴) نیز بیشتر ذرات را در انرژی بالاتر نشان داده است.



شکل ۱۴: تصاویر SEM ذرات آلیاژ برنج با شارتابشی لیزر (a)  $5 \text{ j/cm}^2$  (b)  $45 \text{ j/cm}^2$  [۲۰]

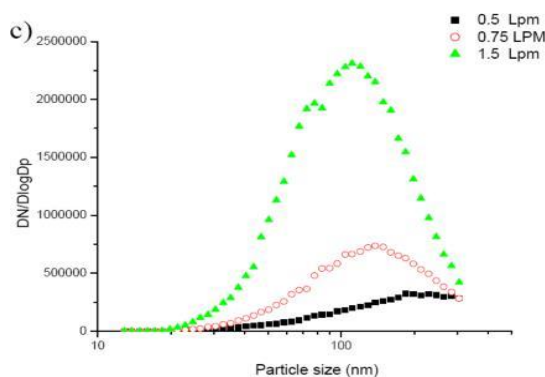
(ب)

اگر ذرات مشاهده شده توسط چگالش شکل گرفته شده باشند، ذرات بزرگتر باید از تبخیر مواد تولید شده باشند. چگالی انرژی بالای لیزر باعث بیشتر شدن دمای پلاسما می شود و سرعت خنک شدن گاز پیرامون راکند می کند که این عمل باعث به تاخیر انداختن شروع فرایند چگالش می شود.



شکل ۱۳: نمودار قطر میانگین اندازه گیری شده نانو ذرات نسبت به چگالی انرژی لیزر (الف) کربن (ب) سیلیکن (ج) روی (د) مس [۲۰]

همچنین چگالی انرژی بالای لیزر باعث سرعت بخشیدن گسترش پلام بخار می شود. بنابراین حتی چگالی تعداد اتم ها در چگالی انرژی بالای لیزر نسبت به چگالی انرژی پائین لیزر، کمتر است که این ناشی از خنک شدن بسیار زیاد پلام بخار است. این دلایل باعث شکل گیری ذرات بیشتری می گردد. اما ذرات کوچکتر در چگالی انرژی بالای لیزر، قطر میانگین ذرات در فلز روی از ۱۱۰ nm به ۴۵ nm کاهش می یابد در حالی که در اندازه قطر میانگین ذرات مس و سیلیکن تنها تغییر کوچکی حاصل می شود. در این حالت، قطر میانگین ذرات کربن تقریباً بدون تغییر می ماند.

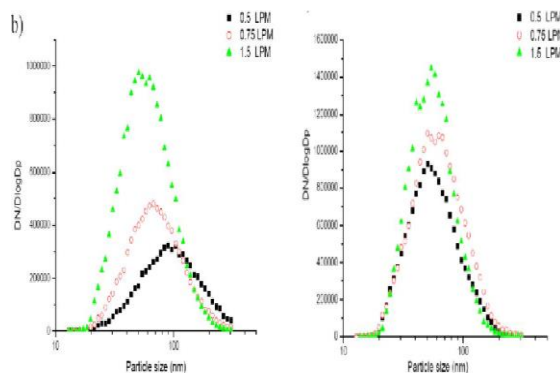


شکل ۱۵: نمودار توزیع اندازه ذرات در نرخ شارش مختلف برای عناصر مختلف (ج) سیلیکن [۲۰]

در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می گردد که توزیع اندازه ذرات در نرخ های متفاوت شارش برای فلز روی یکسان می باشد. از آنجائیکه نرخ شار بالاتر راندمان بیشتری را ایجاد می کند چگالی تعداد ذرات افزایش می یابد. برای موارد مس و سیلیکن در حالت نرخ شارش پایین تر، اندازه ذرات بزرگتر شده، در حالی که چگالی تعداد آن ها بسیار پائین است. زمانی که نرخ شارش کاهش می یابد، اندازه میانگین ذرات مس از ۵۰ nm به ۱۰۰ nm افزایش می یابد. در حالی که اندازه میانگین ذرات سیلیکن بیش از ۴۰۰ nm می باشد اما مقدار دقیق آن قابل تخمین نمی باشد. فاصله اتاقک سایش تا دریچه SMPS ۱/۵ متر است و زمان ماندن آئروسول ها در داخل لوله به ترتیب برای نرخ شارهای متفاوت ذکر شده، ۵، ۳/۳۳ و ۱/۶۷ ثانیه است. در گزارشات آمده است که بخار روی به سرعت متراکم شده و ذرات آن تشکیل می گردد. در این حالت ذرات لخته ای ایجاد نمی شود. برای مس و سیلیکن، تا مادامی که ذرات در لوله باقی مانده اند، به صورت پیوسته اندازه ذرات تغییر می کند. این بار گاز محیط و خود ذرات در شرایط دمایی اطاق قرار دارند. در این حالت باید ذرات جامد شده و نمی توانند به صورت ذرات منفرد لخته شوند. اما در عوض ذرات منعقد شده از برخورد ذرات کوچکتر تشکیل می گردد. بنابراین اندازه ذرات در نرخ شارش پائین تر، بزرگتر می شود. زمانی که از SMPS برای اندازه گیری ذرات استفاده می شود، به منظور جلوگیری یا کاهش تشکیل این نوع لخته ها، باید از نرخ شارش بالاتر استفاده کرد. [۲۰]

### ۳-۷ نرخ شارش

مقایسه توزیع اندازه ذرات با نرخ متفاوت شارش گاز آرگون، اطلاعاتی در مورد چگونگی انعقاد و لخته شدن ذرات به دست می آید. سه نرخ شارش مختلف آزمایش شده برای شارش گاز آرگون، در داخل اتاقک انتخاب شده مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۵ لیتر در دقیقه است. چگالی انرژی لیزر در  $20 \text{ j/cm}^2$  ثابت نگه داشته شده است. یک کلید قطع و وصل شار نصب شده تا تنها اجازه ورود  $0.3 \text{ L/min}$  شار را به SMPS بدهد. چگالی تعداد ذرات برای هر نرخ شار، توسط بخشی از شار کل استفاده شده در اندازه گیری نرمالیزه شده است. نتایج برای سه نرخ شار متفاوت در مورد نمونه های مختلف در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمودار سه نرخ شار متفاوت در مورد نمونه های مختلف (الف) روی (ب) مس .

## ۸- نتیجه گیری

تولید نانو ذرات در فرایند سایش لیزری به شدت به خواص ماده و پارامتر های لیزر بستگی دارد. هنگامی که از لیزر با انرژی بالا استفاده شود، مکانیزم جداسازی جرم از بخار خالص، تحت تاثیر میزان انرژی لیزر تغییر می کند تا آن که برای انرژی های بسیار بالایی لیزر مرحله تغییر فاز را نیز شامل می شود. در شکل گیری ذرات متراکم شده از بخار، پارامترهای پیرامون محیط از قبیل خواص گاز و فشار گاز تاثیرگذار هستند. البته ویژگی های مکانیکی ماده نیز ممکن است تاثیرگذار باشد. از پارامترهای مهم تاثیرگذار لیزر در اندازه و تعداد نانو ذرات تولید شده انرژی و طول زمان پالس لیزر است. نتایج تجربی نشان می دهند که اندازه نانو ذرات عنصر روی تولید شده به روش سایش لیزری، به چگالی انرژی لیزر بستگی دارد درحالی که برای عنصر کربن چنین رفتاری در محدوده چگالی انرژی لیزری اعمال شده، مشاهده نمی شود. این در حالی است که برای هر دو عنصر با افزایش چگالی انرژی، تعداد نانو ذرات تولید شده افزایش می یابد. هنوز علت اصلی این مشاهده، مشخص نمی باشد. امید است با فراهم شدن شرایط آزمایشگاهی مناسب در کشور، بتوان به بررسی علل این پدیده که می تواند راه گشایی در جهت بهبود کیفی و کمی نانو ذرات تولید شده باشد، دست یافت.

## تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

## تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

## مراجع

- [1] Maiman T.H., Nature, 187, 493(1960). DOI: <https://doi.org/10.1038/187493a0>
- [2] Javan A. , Bennett W.R. and Herriott D.R., Phys. Rev. Lett, 106-6(1961). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.106>
- [3] Orazio S., Principles of Lasers, second edition Plenum Press, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 1982.

[4] Production of two superimposed perpendicular polarizations P and S in a Q-switched Nd:YAG laser , Mohammad Aqbaei et al., 15th Iran Optics and Photonics Conference, (2008), (In Persian).

[5] Pooler Jr C.P., Owens F J., Introduction to Nanotechnology, Wiley(2003).

[6] KkohlherM., Fritzsche W., Nanotechnology :An introduction to nanotechnology techniques; Wiley-VCH, (January 2008) , 284 pages.

[7] W. Marine, L. Patrone, B. Luk yunchuk, M. Sentis, Appl. Surf. Sci. 345,154-155(2000).

[8] Vaezzadeh M., Saeidi M., Zarei M., Laser ablation and influence of Debye temperature and laser parameters on size and number of nanoparticles, 2010. 42(5):1787-1789.

DOI: [10.1016/j.physe.2010.01.049](https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.01.049)

[9] R. Hergenroder, V. Hommes, M. Miclea, Lasers: Applications in Science and Industry , Appl. Surf. Sci., edited by Krzysztof Jakubczak, first edition London, 2011.

[10] Eliezer S., Eliaz N., Grossman E., Fisher D., Gouzman I., Henis Z., Pecker S., Horovitz Y., Fraenkel M., Maman S., Lereah Y., Nanoparticles and nanotubes induced by femtosecond lasers, 23(01):15 – 19, (2005). DOI: [10.1017/S0263034605050056](https://doi.org/10.1017/S0263034605050056)

[11] Amoroso S., Ausanio G., Bruzzese R., Vitiello M., Wang X., Femtosecond laser pulse irradiation of solid targets as a general route to nanoparticle formation in a vacuum, Phys. Rev. B 71, 33406(2005), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.033406>

[12] Scuderi D., Albert O., Moreau D., Pronko P.P., Etchepare J., Appl. Phys. Lett. 86, 71502(2005).

[13] Strickland D. and Mouro G., "Compression of amplified chirped optical pulses," Opt. Commun 56,219 (1985).

Sci. Volume 20, Issue 8, 1989, Pages 865-870, DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(89\)90713-1](https://doi.org/10.1016/0021-8502(89)90713-1)

[26] Prokhorov A. M., konov V. I, Ursu I., Mihailescu I. N., Laser heating of metals, (Adam Hilger, New York, IOP Publishing, Bristol,1990). Optics and Lasers in Engineering, Volume 15, Issue 4, p. 279-280. DOI:10.1016/0143-8166(91)90067-4

[14] Tsukamoto H., and Suzuki T., Selective laser annealing (SELA) used in the fabrication of Sub-0.1  $\mu\text{m}$  MOSFETs, Solid-State Electronics,42, 547-556(1998) , DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(97\)00208-6](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(97)00208-6)

[15] Zapka, W., Ziemlich, W., Leung , W. P., and Tam, A. C. Microel.Engin,20,171,(1993).

[16] Jain K., "Excimer laser lithography, Volume: PM03, Date Published: 1 February 1990,Pages: 214 (1990).

[17] Kovacs G., Maluf N., and K. E. Petersen, Bulk micromachining of silicon, Published in Proceedings of the IEEE, pp1536 (1998). DOI:10.1109/5.704259

[18] Ready J. F., Industrial Applications of Lasers , (Academic Press, New York), 2nd Edition - April 16, (1997).

[19] Fabrication of copper and silver nanogold particles by Kondosuspulse method, Manfragha Tilki Reza et al.,The paper of Iran Physics Conference, (2006), (In Persian).

[20] Liu C., A study of particle generation during laser ablation with applications, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley,(2005).

[21] Sankur, H. and Cheung, J. T., Appl.Phys.A,47,271(1988).

[22] J. J. Ritsko, in Laser Micro-Fabrication: Thin Film Processes and Lithography, D.J.Ehrlich and J.Y.Tsao, eds., (Academic, San Diego, 1989).

[23] Lenzner, M., Krausz, F., Kruger, J., and Kautek, W. Applied Surface Science 11,154-155,(2014),.

DOI: [10.1016/j.apsusc.2013.11.030](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.030)

[24] Harilal S. S. , Bindhu C. V.,et al. , Temporal and Spatial Behavior of Electron Density and Temperature in a Laser-Produced Plasma from YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> , Appl.Phys.Lett.52,1825,(1998). DOI: <https://doi.org/10.1366/0003702981943671>

[25] Lushnikov A. A., Maksimenko V.V. , Pakhomov A.V. , Fractal aggregates from laser plasma, J. Aerosol



## Laser abrasion in the production of nanoparticles

Mohamad Mansouri<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Physics Department, Alou Payah Training Center, Khatam Al Anbia Air Defense School, Tehran, Iran, Postal Code: 1781813513

### Abstract:

Laser wear shows the exciting phenomenon of laser interaction with matter. The production of nanoparticles in the laser abrasion process is highly dependent on the properties of the material and laser parameters. Nanoparticles have special properties compared to the mass of matter and even micron dimensions. For this reason, the use of nanoparticles has been used in most technologies. In this article, we will first discuss how the laser interacts with the material, and then we will examine the effective parameters for better wear. After that, the main mechanisms of particle production and their dependence on different laser parameters, as well as the mechanisms of particle separation from the target, have been discussed. At the end, the effect of different laser parameters on the size and distribution of particles of several samples has been discussed along with the relevant diagrams.

**Keywords:** *laser wear, nanoparticles, laser interaction with matter, laser wavelength, laser pulse intensity and duration*