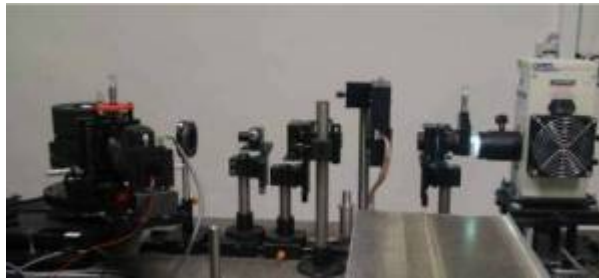


میکروسکوپ تفرق نور ایستا و کاربردهای آن

صدیقه صادق حسنی^۱، سمیرا گل زردی^۱، مجتبی نسب^۲

^۱ پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات نانو

^۲ شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو



- ۱ چکیده
- ۲ ۱- مقدمه
- ۳ ۲- میکروسکوپ پراکندگی نور ایستا.....
- ۳ ۲-۱- اثر متقابل بین نور و ذرات.....
- ۴ ۲-۲- اصول دستگاهی میکروسکوپ تفرق نور ایستا.....
- ۷ ۲-۳- تفاوت بین تفرق نور ایستا و تفرق نور پویا.....
- ۸ ۳- انواع میکروسکوپ SLS.....
- ۸ ۳-۱- تفرق نور لیزر ایستا با زاویه کوچک.....
- ۸ ۳-۲- تفرق نور لیزر ایستا با زاویه مستقیم.....
- ۹ ۳-۳- تفرق نور لیزر ایستا دو زاویه‌ای.....
- ۹ ۳-۴- تفرق نور لیزر ایستا چند زاویه‌ای.....
- ۹ ۳-۵- تلفیق دو روش تفرق نور لیزر ایستا و دینامیک.....
- ۱۰ ۴- کاربردهای میکروسکوپ SLS.....
- ۱۱ ۵- بررسی توزیع اندازه ذرات با استفاده از میکروسکوپ SLS.....
- ۱۷ ۸- منابع.....

چکیده

امروزه مطالعه ویژگی‌ها و خواص مواد، بدون شناخت ریزساختارها امکان‌پذیر نیست. بررسی آرایش اتمی به‌همراه آنالیز موضعی، اطلاعات ارزشمندی برای درک خواص مواد، طراحی مواد جدید و پیش‌بینی رفتارهای موردنیاز فراهم‌نموده‌است. روش تفرق نور لیزر ایستا، یک فناوری موفق برای تعیین مشخصات ریزساختار و ساختار بلوری فلزات، سرامیک‌ها، مواد زمین‌شناسی، پلیمرها و مواد بیولوژیکی و بررسی توزیع اندازه ذرات موجود در یک محلول است.

۱- مقدمه

در زندگی روزانه، اثر طبیعی پراکندگی نور در بسیاری از موارد به چشم می‌خورد. به‌عنوان مثال، پراکندگی نور به‌وسیله ذرات موجود در جو، باعث ایجاد رنگ آبی آسمان می‌شود و همچنین مناظر زیبایی از رنگ‌ها که گاهی هنگام طلوع و غروب خورشید دیده‌می‌شوند، اثرات پراکندگی نور ثابت (ایستا) هستند. به طور کلی تأثیر متقابل تابش‌های الکترومغناطیسی با مولکول‌ها، سبب ایجاد پدیده جذب یا پراکندگی نور می‌گردد. پراکندگی در اثر فعل و انفعالات ناشی از الکترون‌های موجود در مولکول‌ها و نوسانات میدان الکتریکی تشعشع حاصل می‌شود. از این رو، دوقطبی‌های موجود در مولکول‌ها تحریک می‌شوند و با مؤلفه میدان الکتریکی نور ورودی نوسان می‌کنند و از آنجا که یک دوقطبی در حال نوسان، منبع ایجاد تشعشع الکترومغناطیس است، نورهای پراکنده‌ای از مولکول‌ها ساطع می‌شود.

میکروسکوپ تفرق نور ایستا^۱ یکی از روش‌های با ارزش برای مطالعه اندازه، شکل و ساختار مواد در مقیاس نانومتر است. تصویربرداری از جزئیات مواد ناهمگن (مانند بافت‌های زیستی یا ساختارهای بسیار ریز و گستره وسیعی از اشکال و جهت‌گیری‌ها)، به‌وسیله این دستگاه قابل انجام است. همچنین

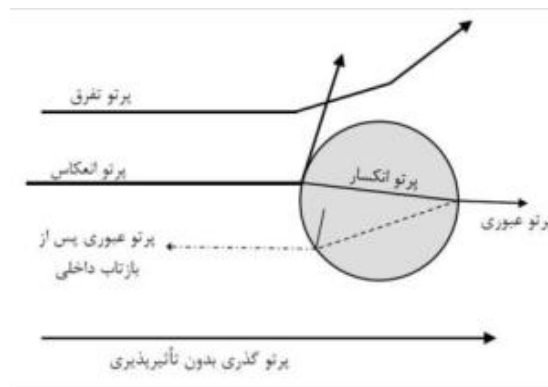
1 - Static Light Scattering Microscopy (SLS)

درک نوسان‌ها در ساختار نمونه‌های بافت نازک که برای مطالعات بافت‌شناسی مفید هستند، به وسیله روش SLS مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- میکروسکوپ پراکندگی نور ایستا

۲-۱- اثر متقابل بین نور و ذرات

در روش SLS از اثر متقابل بین نور و ذرات استفاده می‌شود. پرتوهای نوری هنگام برخورد با ذرات، دستخوش یکی از پدیده‌های انعکاس^۱، انکسار^۲، تفرق^۳ یا جذب^۴ می‌شوند. در شکل (۱)، طرحی از تقابل نور با یک ذره نشان داده شده است.



شکل ۱: طرح اثر متقابل پرتوهای نور با یک ذره

پرتوهای نور (با شدت و طول موج مشخص) به ذره کروی شکل تابانده شده‌اند. در یکی از پرتوها، فوتون‌ها به اندازه کافی از ذره دور هستند و بدون هیچ اثرپذیری از کنار ذره عبور می‌کنند. پرتوی دیگر تا اندازه‌ای به ذره نزدیک می‌شود و در اثر ایجاد تقابل با لبه‌های ذره، تفرق پیدامی‌کند. پرتو دیگر نور، کاملاً با ذره برخورد می‌کند، به طوری که بعضی فوتون‌ها منعکس می‌شوند و بقیه در سطح نفوذ می‌کنند و در نتیجه دچار شکست می‌شوند. پرتو انکسار یافته با لبه مقابل برخورد می‌کند و برخی از

-
- 1 - Reflection
 - 2 - Refraction
 - 3 - Diffraction
 - 4 - Absorption

فوتون‌های آن در سطح نفوذ می‌کنند و از ذره خارج می‌شوند و بقیه دچار انعکاس داخلی می‌گردند. در اینجا فرض شده است هیچ‌گونه اتلافی در انرژی فوتون‌ها صورت نمی‌گیرد و جذب نیز انجام نمی‌شود. شدت نور تفرق‌یافته تابعی از طول موج (λ)، زاویه پراکندگی (θ)، قطر ذره (d) و ضریب شکست نسبی ذره در محیط اطراف خود در درون ماده (n) است؛ یعنی

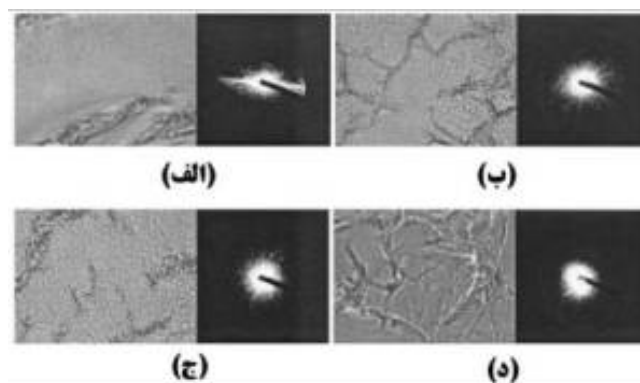
$$I_{sc} = I(\theta, \lambda, d, n)$$

زاویه پراکندگی (θ) نسبت به امتداد پرتو تابشی سنجیده می‌شود. در شکل (۱) پرتویی که دچار انحراف نشده است دارای زاویه تفرق صفر است و پرتو تفرق‌یافته، دارای زاویه تقریباً 45° است. با استفاده از میکروسکوپ پراکندگی نور ایستا، الگوهای پراکندگی نور بر حسب زاویه‌های پراکندگی یا بردار پراکندگی به دست می‌آید که تفسیر این الگوها، اطلاعات جالب توجهی از نمونه در اختیار قرار می‌دهد.

۲-۲- اصول دستگاهی میکروسکوپ تفرق نور ایستا

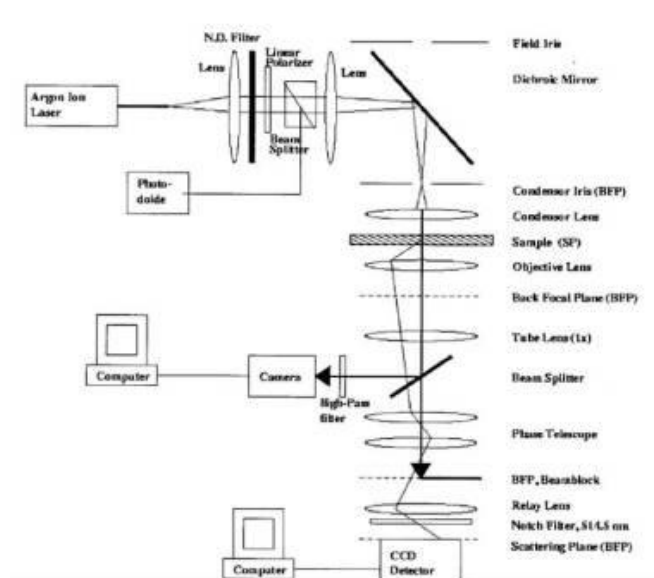
اصول فیزیکی و جزئیات دستگاهی میکروسکوپ SLS در شکل (۲) آورده شده است. منبع نور، یک پرتو لیزر یون Ar^+ است که در خلأ با طول موج $514/5$ نانومتر عمل می‌کند. پرتو از یک فیبر نوری تابیده می‌شود و به وسیله لنز متراکم‌کننده و یک سری از فیلترهای موسوم به فیلتر دانسیته خنثی^۱، شدت لیزر تا حد $50 \mu W$ ضعیف می‌شود. قسمتی از پرتو به سمت یک دیود نوری منحرف می‌شود تا شدت پرتو تابشی مورد بررسی قرار گیرد. پرتو لیزر در نقطه‌ای واقع بر یک دریچه (عنبنیه) منطبق بر فاصله کانونی پشتی لنز متراکم‌کننده، متمرکز می‌شود. در نتیجه این عمل، پرتویی موازی به قطر 70 میکرومتر، به نمونه تابیده می‌شود و پس از پراکنده شدن نور، پرتوهای عبوری، برای بررسی جمع‌آوری می‌شوند. پرتوهای پراکنده شده برای ایجاد الگوی پراکندگی به سمت آشکارساز CCD هدایت می‌شوند و بخشی از پرتوهای عبوری نیز برای ایجاد تصویر روی فیلم عکاسی، به سمت دوربین هدایت می‌گردند.

1- N.D.Filter



شکل ۲: طرح میکروسکوپ SLS

میکروسکوپ SLS برای مطالعه خصوصیات نواحی موضعی (در حد ۱۰ نانومتر) نمونه‌های ناهمگن مفید است. با آنالیز پرتوهای پراکندگی و پرتوهای عبوری از نمونه در این میکروسکوپ، می‌توان محتوا و ساختار نمونه را بررسی کرد. در این میکروسکوپ به‌طور هم‌زمان یک تصویر میدان روشن از پرتوهای عبوری و یک الگوی پراکندگی دوبعدی از پرتوهای تفرق یافته به‌دست می‌آید (شکل ۳).



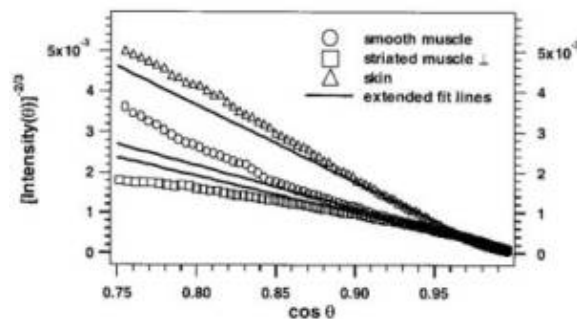
شکل ۳: تصویر فضای حقیقی (چپ) و الگوی پراکندگی (راست) چند نمونه بافت زنده

تصویر فضای حقیقی، ناحیه‌ای به عرض ۶۰ میکرومتر (قطر پرتو لیزر ورودی) را شامل می‌شود. الگوی پراکندگی شامل نقاط روشنی حاصل از پرتوهای پراکنده شده، همراه با توزیعی از شدت روشنی این نقاط است. در شکل (۳-الف) نمونه‌ای از یک بافت ماهیچه‌ای با شیارهای افقی نشان داده شده است و شکل (۳-ب)، مربوط به نمونه‌ای از یک بافت ماهیچه‌ای با شیارهای عمودی است. شکل (۳-ج)، یک بافت ماهیچه‌ای شامل تارهای جهت‌دهی شده در یک بافت صاف را نشان می‌دهد و شکل (۳-د)، بافت پوست را نشان می‌دهد. ضخامت نمونه‌ها ۲۰ میکرومتر است و روی لامل قرار داده شده‌اند. توزیع شدت (I) در الگوهای پراکندگی به صورت تابع $I(\theta)$ بیان می‌شود. فاصله شعاعی نور پراکنده از پرتو ارسال شده، δx است که به‌طور مستقیم متناسب با سینوس زاویه پراکندگی θ است و با استفاده از قانون براگ، ارتباط بین زاویه پراکندگی (θ) و موقعیت پرتوهای پراکنده شده (δx) بیان می‌گردد. n_G ضریب شکست نور ورودی در لنز، n_S ضریب شکست نور ورودی در نمونه و C ثابت کالیبراسیون است.

$$\theta = [\arcsin(\frac{n_G}{n_S} c \delta x)]$$

بنابراین به علت ایجاد پدیده پراکندگی در نور ورودی به نمونه، یک رابطه غیرخطی به دست می‌آید.

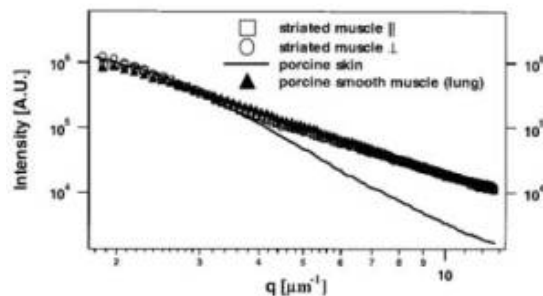
در شکل (۴)، شدت (I) بر حسب زاویه پراکندگی (θ) برای چند نمونه بافت زنده، رسم شده است.



شکل ۴: نمودار $I(\theta)$ برای چند نمونه بافت زنده

بردار پراکندگی موج به صورت $q = 4\pi n_s \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\lambda$ تعریف می‌شود. معمولاً در میکروسکوپ SLS،

تغییرات شدت (I) برحسب بردار پراکندگی موج (q) محاسبه می‌گردد. در شکل (۵)، I برحسب q برای چند نمونه بافت زنده آورده شده است.



شکل ۵: نمودار I(q) برای چند نمونه بافت زنده

پدیده انتشار نور از میان بافت، کاربردهای فراوانی در پزشکی دارد، مانند عمل جراحی به وسیله لیزر، بافت‌برداری نوری، درمان فتودینامیک و تعیین مقدار داروی جذب‌شده در لیزر درمانی. تلاش قابل توجهی در اندازه‌گیری جذب متوسط و ضرایب پراکندگی، صورت گرفته است، ولی کمتر به آثار ناهمگنی موضعی در بافت توجه شده است. قدرت میکروسکوپ SLS در تسهیل اندازه‌گیری‌های پراکندگی نور موضعی در نمونه‌های ناهمگن، دارای دقت نانومتری است. رمزی^۱ و همکارانش در بررسی رفتار ژلی شدن محلول‌های آبی، ناهمگنی‌هایی با اندازه حدود ۲۰ nm را به وسیله دستگاه SLS شناسایی کرده‌اند.

۲-۳- تفاوت بین تفرق نور ایستا و تفرق نور پویا^۲

در روش تفرق نور ایستا، اطلاعات براساس تغییرات شدت مشخصات نور در الگوهای پراکندگی برحسب زوایای مختلف به دست می‌آید اما در روش تفرق نور پویا، ارتباط بین تغییرات شدت نور

1- A. Ramzi

2- Dynamic (or quasi-elastic) Light Scattering (QELS)

برحسب حرکات براونی^۱ ذرات، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این حالت، وقتی پرتو لیزر با بسامد معین به ذرات متحرک برخورد می‌کند، نور با بسامدهای متفاوت پخش می‌شود. میزان تغییر در بسامد نور پخش شده مشخصه‌ای برای حرکت ذرات و اندازه آنها است. اطلاعات به دست آمده در روش دوم، بسیار وابسته به عوامل محیطی بوده و نیازمند تحلیل و پردازش بیشتری است.

۳- انواع میکروسکوپ SLS

بر اساس اصول فیزیک نور، تنوعی از روش‌های تفرق ایستای نور لیزر، توسعه یافته‌است که در زیر به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

۳-۱- تفرق نور لیزر ایستا با زاویه کوچک ۲

برای اندازه‌گیری جرم مولی ماکرومولکول‌ها با استفاده از میکروسکوپ SLS، اغلب از روش زاویه کوچک استفاده می‌شود. در این روش، پرتوهای پراکنده با زاویه‌ای نزدیک به صفر (۷-۱۵ درجه) برای محاسبه انتخاب می‌شوند. از آنجا که پرتو تفرق یافته با زاویه کوچک، بسیار نزدیک به پرتو اصلی است و سیگنال ورودی حاصل از آن به آشکارساز، شدیداً تحت تأثیر شرایط محیطی است، از آن تنها برای محاسبه جرم مولی استفاده می‌شود و برای محاسبه شعاع ذره نامناسب است.

۳-۲- تفرق نور لیزر ایستا با زاویه مستقیم ۳

برای اندازه‌گیری جرم مولی ماکرومولکول‌ها، از روش SLS با زاویه مستقیم نیز استفاده می‌شود که در این روش، پرتوهای تفرق یافته با زاویه ۹۰ درجه برای محاسبه انتخاب می‌شوند. با این روش تعیین جرم مولی ماکرومولکول‌ها تا مقدار $100,000 \text{ g/mol}$ امکان پذیر است و برای مقادیر بالاتر، خطای محاسبات افزایش می‌یابد. این روش نیز برای محاسبه اندازه ذره مناسب نیست.

1 - Brownian Movement

1- Low Angle Static Laser Light Scattering (LALS)

3- Right Angle Static Laser Light Scattering (RALS)

۳-۳- تفرق نور لیزر ایستا دو زاویه‌ای ۱

در این روش، پرتوهای تفرق یافته با زاویه کوچک و زاویه مستقیم با هم انتخاب می‌شوند. داده‌های مربوط به این دو پرتو، در مختصاتی موسوم به "Zimm Plot" به وسیله دو نقطه مشخص می‌گردد که این نقاط یک خط مستقیم را تشکیل می‌دهند. از شیب این خط، اندازه ذره و از محل برخورد این خط با محور y ، جرم مولی به دست می‌آید. این روش برای تعیین مشخصات ماکرومولکول‌های بزرگ مناسب نیست.

۳-۴- تفرق نور لیزر ایستا چند زاویه‌ای ۲

در این روش اندازه و جرم مولی ماکرومولکول‌های کوچک و بزرگ و حتی نانو ذرات را می‌توان محاسبه کرد. داده‌های مربوط به دسته‌ای از پرتوهای تفرق یافته در مختصات "Zimm plot" رسم می‌شود و از شیب منحنی ایجاد شده در زاویه صفر درجه، اندازه ذره و از محل برخورد منحنی با محور y ، جرم مولی به دست می‌آید. روش تفرق نور لیزر ایستای چند زاویه‌ای در بین روش‌های گوناگون میکروسکوپ تفرق نور ایستا، تنها روشی است که جرم مولی و اندازه ذرات را برای ماکرومولکول‌های کوچک و بزرگ و نیز ذرات نانومتری، با دقت بسیار خوب مشخص می‌کند.

۳-۵- تلفیق دو روش تفرق نور لیزر ایستا و دینامیک

این روش که از آن با نام اسپکترومتری تفرق نور لیزر دینامیک سه بعدی^۳ نیز یاد می‌شود، جهت مطالعه سه بعدی نمونه‌های کلوئیدی کدر به کار می‌رود. اصول روش براساس مطالعه تغییرات بردارها و زوایای پراکندگی استوار است که در تعیین توزیع اندازه ذرات، شکل ذرات و جرم مولی کلوئیدهای کدر، نسبت به روش‌های فوق، مناسب‌تر است.

1- Dual Angle Static Laser Light Scattering (DALS)
2 - Multi Angle Static Laser Light Scattering (MALS)
3 - 3DDLS Spectrometer



شکل ۶: تصویر شماتیک دستگاه اسپکترومتري 3DDLS

۴- کاربردهای میکروسکوپ SLS

از میکروسکوپ SLS برای موارد زیر می‌توان استفاده کرد:

- * امکان بررسی تغییرات شدت پراکندگی نور، برحسب زاویه پراکندگی یا برحسب بردار پراکندگی؛
- * ایجاد تصویر میدان روشن و الگوی پراکندگی نور در نمونه، به‌طور همزمان؛
- * مطالعه رفتارهای پلیمریزاسیون؛
- * مطالعه فرایند جوانه‌زنی در تبلور؛
- * تعیین وزن مولکولی؛
- * بررسی توزیع اندازه دانه؛
- * بررسی پایداری کلوئیدها؛
- * تشخیص تجمع زنجیره‌ای مولکول‌ها؛
- * مطالعه شکل و فاکتورهای ساختاری ذرات؛
- * بررسی جرم مولی.

میکروسکوپ SLS برای بررسی خواص سیستم‌های کلوئیدی، مانند سیستم‌های دارای پراکندگی یکنواخت، امولسیون و ژل، بسیار مفید است.

۵- بررسی توزیع اندازه ذرات با استفاده از میکروسکوپ SLS

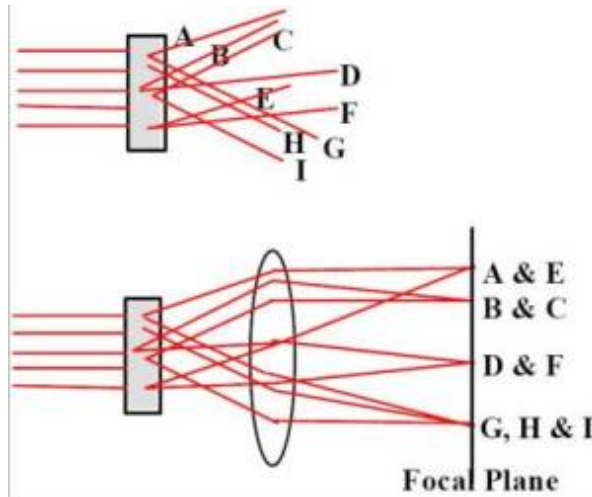
نور در اثر برخورد با ذره می‌تواند در تمام جهات پراکنده شود، اما پراکندگی نور در بعضی زاویه‌ها بیشتر به چشم می‌خورد. الگوی تفرق نور به وسیله ذرات، به تغییرات کوچک اندازه و ضریب شکست نور در ذره، بسیار حساس است. اصول تعیین توزیع اندازه ذرات به وسیله پدیده پراکندگی نور، بر پایه تئوری Mie استوار است. براساس این تئوری، رابطه بین اندازه ذره (x)، طول موج (λ) و میزان تغییر مکان پرتو پراکنده شده نسبت به مسیر اولیه در امتداد شعاع (r)، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$X=2\pi(r/\lambda)$$

این معادله برای یک ذره ایزوتروپ و کروی شکل به دست آمده است. برای بررسی توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های کلوئیدی، نمونه باید کاملاً بدون حباب باشد؛ حضور حباب، موجب پراکندگی نور و ایجاد خطا در الگوی پراکندگی می‌گردد. همچنین ذرات در نمونه باید تا حد امکان جدا از یکدیگر بوده و از تجمع آنها جلوگیری شود. الگوی پراکندگی نور برای نمونه‌ای با پراکندگی یکنواخت ذرات نسبت به نمونه تجمع یافته، متفاوت است و توزیع متفاوتی از اندازه ذرات، برای هر یک از نمونه‌ها به دست می‌آید. کنترل تجمع برای نمونه‌های جامد یا نمونه‌های مخلوط با گاز و هوا^۱ نسبت به نمونه‌های کلوئیدی، مشکل‌تر است و جلوگیری یا به حداقل رساندن تجمع در این نمونه‌ها باید انجام شود.

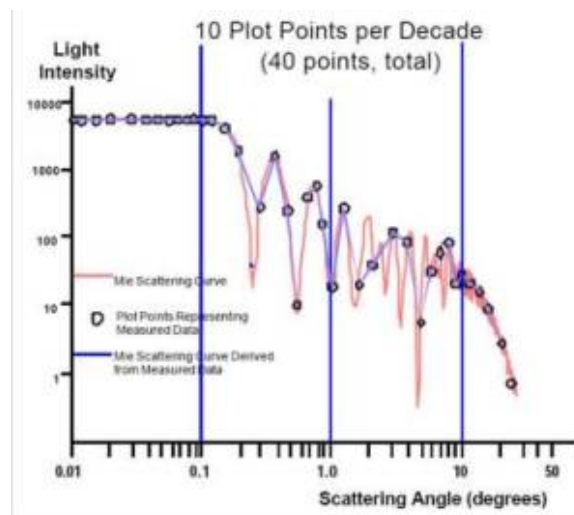
در شکل (۷)، به صورت نمادین، پرتوهای ورودی و پرتوهای پراکنده خروجی از نمونه، در میکروسکوپ SLS نشان داده شده است. پرتوهای پراکنده خروجی به وسیله یک لنز جمع می‌شوند و دسته پرتوهای

موازی بعد از پراکندگی، در یک نقطه نورانی، روی صفحه کانونی، متمرکز می گردند. از مجموع این نقاط، الگوی پراکندگی نور نمونه به دست می آید.



شکل (۷): طرح نمادین پراکنده شدن نور ورودی، به وسیله نمونه و ایجاد نقاط نورانی روی صفحه کانونی

در شکل (۸)، نمودار شدت برحسب زاویه پراکندگی برای یک نمونه کلوئیدی مشخص شده است. زاویه پراکندگی تا ۳۶ درجه، اندازه گیری شده است.



شکل ۸: نمودار شدت برحسب زاویه پراکندگی، در یک نمونه کلوئیدی

از نمودارهای شدت برحسب زاویه پراکندگی یا غلظت، منحنی‌های "Zimm plot" به دست می‌آیند. برای این منظور، نور لیزر آرگون به عنوان منبع نور همسان با شدت بالا استفاده می‌شود (نور ورودی به عنوان یک موج در نظر گرفته شده است) و حجم استوانه‌ای کوچکی (Vs) را در محلول تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به ماهیت الکترومغناطیسی نور، معادله موج میدان الکتریکی (E_i) برای نور لیزر به صورت زیر است:

$$E_i = E_0 \exp(\omega t - k_i x)$$

که E_0 و E_i عمود بر جهت انتشار نور و $k_i = \frac{2\pi}{\lambda}$ است.

میدان الکتریکی نور ورودی در موقعیت مشخص x (فاصله مکانی)، باعث ایجاد جنبش الکترونی و تغییر دانسیته الکترون در نوار انرژی ذرات موجود در محلول می‌شود. این تغییرات در دانسیته الکترون که باعث ایجاد دوقطبی لحظه‌ای متناسب با اعمال میدان الکتریکی لحظه‌ای (E_i) در مولکول‌های ذره می‌شود، به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P = \alpha E = \alpha E_0 \exp(i(\omega t - k_i x))$$

اگر α_s قابلیت قطبش حلال و α' قابلیت قطبش ذره باشد، α (قابلیت قطبش اضافی)¹ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \alpha' - \alpha_s$$

α می‌تواند مثبت یا منفی باشد. برای ایجاد پدیده تفرق نور، α باید مخالف صفر باشد. برای تعیین شدت نور تفرق یافته، فوتون‌های پرتو تفرق، به کمک یک تقویت کننده در فاصله r از پرتو ورودی

1 -Excess Polarizability

جمع می‌شوند و به وسیله آشکارساز نوری، مشخص می‌گردد. متوسط میزان شدت پرتو پراکنده شده را نیز، رابطه زیر بیان می‌کند:

$$I_s = I_0 16\pi^4 \alpha^2 n_0^4 / r^2 \lambda^4$$

مجموع شدت (I_t ؛ پرتوهای پراکنده شده) به تعداد نقاط پراکنده کننده نور مرتبط است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_t = NI_s = NI_0 16\pi^4 \alpha^2 n_0^4 / r^2 \lambda^4$$

از طرفی ضریب Rayleigh (R_θ) به صورت $R_\theta = I_t r^2 / I_0 V_s$ تعریف می‌شود که برای موقعیت‌های تصادفی ایجاد پراکندگی نور، R_θ مستقل از زاویه پراکندگی است. R_θ به α ، λ و دانسیته تعداد مولکول‌ها در حجم V_s (N/V_s) وابسته است.

Debye پیشنهاد کرد که α را می‌توان با اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست با غلظت، به صورت زیر به دست آورد:

$$\alpha = \frac{(dn/dc)c}{2\pi n_0 N/V_s}$$

همچنین وزن مولی ذرات M (g/mol) در محلولی با غلظت C (mas/vol) می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$M = N_A C / (N/V_s)$$

که N_A عدد آووگادرو است.

با تلفیق سه معادله اخیر، معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_\theta = [4\pi^2 (dn/dc)^2 n_0^2 / N_A \lambda^4] CM$$

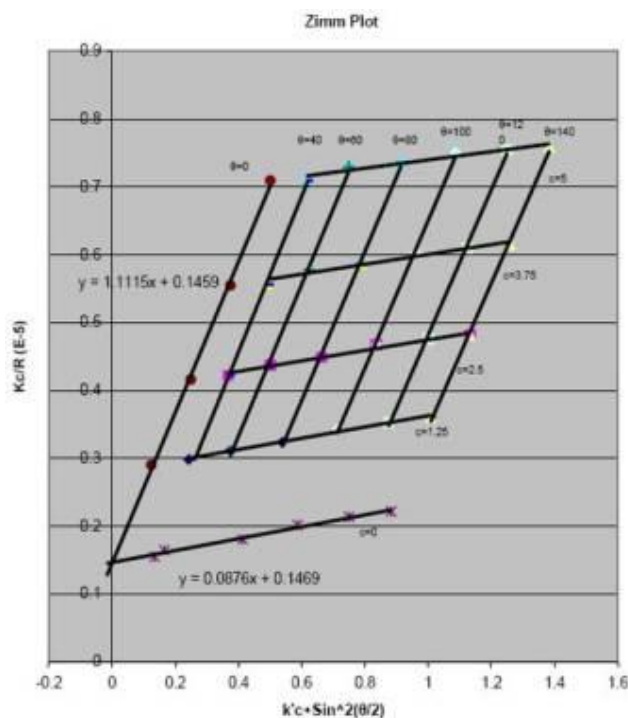
ثابت نوری K که مستقل از C ، θ و M است، در معادله فوق جایگزین شده است:

$$KC/R_{\theta} = 1/M$$

این معادله، اساس رسم الگوی "Zimm plot"، برای محاسبه مقدار M است. برای غلظت‌های مختلف محلول و زوایای مختلف پراکندگی، الگوهای مختلفی به دست می‌آید. با برون‌یابی الگوهای به دست آمده، می‌توان وزن مولی متوسط و اندازه ذرات را به دست آورد.

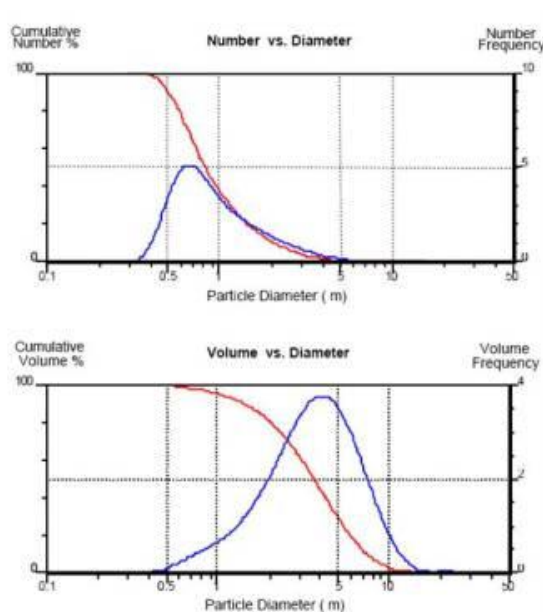
در یک "Zimm plot"، KC/R_{θ} بر حسب $\sin^2(\theta/2) + k'c$ رسم می‌شود.

k' ، ثابتی قراردادی است و برای تسهیل در عمل برون‌یابی، وارد عبارت شده است. در یک الگوی "Zimm plot" دو نوع منحنی به دست می‌آید؛ یک دسته منحنی در زاویه پراکندگی ثابت و یک دسته منحنی، در غلظت ثابت رسم می‌شود. در شکل (۹)، منحنی‌های "Zimm plot" برای چهار محلول پلی استیرن در حلال تولوئن با غلظت‌های متفاوت رسم شده است.



شکل ۹: منحنی‌های "Zimm plot" برای چهار محلول پلیمری با غلظت‌های مختلف.

مشاهده می‌شود که با برون یابی هریک از منحنی‌های به‌دست آمده، روی الگوی "Zimm plot"، دو معادله خط، یکی در $C = 0$ و دیگری در $\theta = 0$ به‌دست آمده است که از محل برخورد این دو خط با محور y ها، وزن مولکولی و از شیب خط با شرایط $C = 0$ ، اندازه ذره محاسبه می‌شود. در شکل (۱۰)، منحنی توزیع اندازه ذرات، به‌صورت درصد عددی و همچنین درصد حجمی آورده شده‌است.



شکل ۱۰: منحنی توزیع اندازه ذرات به صورت درصد عددی و درصد حجمی

۶- محدودیت ها

محدودیت اصلی استفاده از روش SLS، آماده سازی نمونه مورد آزمایش است. در این روش نمونه باید بسیار نازک (کمتر از ۲۰ میکرومتر) باشد تا اشعه نور لیزر از نمونه عبور کرده و تصویری با کیفیت مطلوب دریافت گردد. این ضخامت برای نمونه های مواد مختلف می‌تواند متغیر باشد. برای بعضی مواد با سختی بالا مانند سرامیک‌های بسیار سخت، نمونه‌سازی خسته‌کننده بوده و گاهی ممکن است دستیابی به یک نمونه مناسب چندین روز طول بکشد.

همچنین، برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرات باید با استفاده از یک حلال مناسب محلولی کاملاً دیسپرس (ذرات پراکنده) تهیه کرد در غیر این صورت جوابها دقیق و قابل اعتماد نیست.

۷- جمع بندی

میکروسکوپ تفرق نور ایستا (SLS) یکی از روش‌های مفید برای مطالعهٔ اندازه، شکل، ساختار مواد و همچنین بررسی توزیع اندازه ذرات یک محلول، در مقیاس نانومتر است. در این روش از اثر متقابل بین نور و ذرات استفاده می‌شود. خاطرنشان می‌شود که روش SLS علاوه بر کاربرد در بررسی توزیع اندازه ذرات، برای مطالعهٔ میزان ذرات حل‌نشده در محلول، وجود حباب در محلول و انواع خواص کلوئیدها که بر الگوی پراکندگی نور تأثیر گذارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۸- منابع

1. M. T. Valentine, A. K. Popp and D. A. Weitz, " Microscope-based static light-scattering instrument" , J. Optic Letters, Vol.26, No. 12, (2001) 890 – 892.
2. A. Ramzi, M. Sutter, W.E. Hennink, W. Jiskoot, "Static Light Scattering and Small-Angle Neutron Scattering Study on Aggregated Recombinant Gelatin in Aqueous Solution", J. Pharmaceutical Sciences, Vol. 95, NO. 8, (2006) 1703 – 1711.
3. A. K. Popp, M. T. Valentine, P. D. Kaplan, and D. A. Weitz, " Microscopic origin light-scattering in tissue", Applied Optics, Vol. 42, No. 16,(2003) 2871-2880.
4. L. Magnus Bergström, Luis A. Bastardo, Vasil M. Garamus, " A Small-Angle Neutron and Static Light Scattering Study of Micelles Formed in Aqueous Mixtures of a Nonionic Alkylglucoside and an Anionic Surfactant", J. Phys. Chem. Vol.109, No 25, (2005) 12387 – 12393.
5. P. A. Webb, "A Primer on Particle Sizing by Static Laser Light Scattering", Micromeritics Instrument Corp, Technical Workshop Series: Introduction to the Latest, ANSI/ISO Standard for Laser Particle Size Analysis, January 2000.
6. N. C. Santos and M. A. R. Castanho, " Teaching Light Scattering Spectroscopy: The Dimension and Shape of Tobacco Mosaic Virus", J. Biophysical, Volume 71, (1996),1641-1646

7. F. M. Pedrero, M. T. Miranda, A. Schmitt, J. C. Fern´andez, " Aggregation of magnetic polystyrene particles: A light scattering study ", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 270–271 (2005) 317–322.
8. Zetasizer Nano Series,"Molecular Weight theory", Chapter 15, page 15.1-15.5.
9. P. Sh. Ling Hsu, R. Kumar, " Light Scattering Experiment ", Polymer Characterization Lab, PSE 602, (2003).
10. G. Berth, H. Dautzenberg, B. E. Christensen, "Static Light Scattering Studies on Xanthan in AqueousSolutions" Macromolecules, Vol.29, (1996), 3491-3498.