اندازه‌گیری بازتابش نامنظم از سطوح مختلف فلزی و غیرفلزی

حسین گل‌نبی (استاد)
مرکز تحقیقات آب و انرژی ـ دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار به‌منظور بررسی استفاده از پدیده‌ی بازتابش نور برای اندازه‌گیری میزان بازتابش نامنظم[1] (پخشی)، ابتدا اساس کار و نظریه‌ی بازتابش منظم[2] (آینه‌یی) و نامنظم، و سپس ساختار سطح مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. در ادامه، طرح مورد نظر و قسمت‌های مختلف مورد نیاز آزمایش به‌صورت کلی شرح داده شده‌اند. یکی از اجزاء مورد نیاز آزمایش «تلسکوپ نوری» است که شرح مربوط به قسمت‌های مختلف آن در این نوشتار آمده است. مطالعات نشان می‌دهد که این طرح می‌تواند اطلاعات مفیدی راجع به ساختار سطوح مختلف فراهم سازد.

مقدمه

از آنجا که ما همه‌ی اجسام را براثر پدیده‌ی «بازتابش نور» مشاهده می‌کنیم و از این طریق می‌توانیم اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی اجسامِ مورد مطالعه کسب کنیم، این پدیده از سال‌های دور مورد توجه دانشمندان بوده است. بازتابش نور از یک جسم به دو روش صورت می‌گیرد که یکی از آنها (بازتابش منظم) از خاصیت هندسی نور و دیگری (بازتابش نامنظم) از خاصیت موجی‌بودن نور پیروی می‌کند. دانشمندانی چون اسنل و دکارت، بازتابش و شکست نور از سطوح مختلف دی‌الکتریک را بررسی، و فرمول‌های مورد نظر را ارائه کرده‌اند. دانشمندان دیگری مانند ماکسول، فرنل و لامبرت نیز بازتابش نور از سطوح را به‌صورت برخورد امواج الکترومغناطیسی بررسی و فرمول‌بندی کرده‌اند.

در اوایل قرن بیستم با طرح مسائلی چون مطالعه‌ی سطح کره‌ی زمین و سطح سیارات دیگر با استفاده از امواج الکترومغناطیسی و رادار، پدیده‌ی «بازتابش» اهمیت بیشتری پیدا کرد و کوشش‌های نظری برای توجیه بازتابش از سطوح زبر و ناصاف وسعت گرفت و تا پیش از دهه‌ی هشتاد نتایج جالبی در این زمینه به دست آمد. در این حالت روش بازتابش نور از سطح به‌عنوان راه حلی برای مطالعه‌ی زبری سطوح در نظر گرفته شد، و افراد زیادی علاقه‌مند به مطالعه‌ی سطوح اجسام و بررسی خاصیت زبری سطوح شدند.[1] به همین لحاظ در «علم مواد» و «متالورژی» که خاصیت سطوح اجسام اهمیت دارد، بازتابش نور می‌تواند منشاء اطلاعات مفیدی باشد. در این حوزه، برای بررسی سطوح اجسام غالباً از تابش اشعه‌ی X استفاده می‌شود.

از اوایل دهه‌ی شصت با توسعه‌ی سیستم‌های رایانه‌یی و ترکیب آن با طیف‌نمایی، شاخه‌ی دیگری برای کسب اطلاعات دقیق راجع به ساختار سطح گشوده شد. در این زمینه، کسب اطلاعات از طریق حس‌گرهای (سنسورهای) نوری انجام می‌شود که می‌تواند سطوح مختلف را شناسایی کند. اهمیت این رشته بیشتر در زمینه‌ی عکس‌برداری و تشکیل تصویر از اجسام است. بنابراین میزان و چگونگی بازتابش نور از اجسام در تصویربرداری و بررسی ساختار و اعوجاج سطوح ساخته شده اهمیت دارند. این رشته از مطالعات سطوح، اهمیت زیادی در تولید و ساخت مصنوعات دارد. همچنین با استفاده از اطلاعات به دست آمده از یک جسم می‌توان آن را شبیه‌سازی و با نمونه‌ی اصلی مقایسه کرد. این امر در کار ساخت و تولید قطعات و اجسام کاربرد فراوان دارد.

همان‌طور که یادآور شدیم، نور پس از برخورد با سطوح به دو طریق بازتابانده می‌شود. در حالت اول نور تحت زاویه‌ی خاصی به سطح جسم برمی‌خورد و بازتابیده می‌شود که به آن «بازتابش منظم» می‌گوییم. طبق قوانین فیزیکی در بازتابش منظم زاویه‌ی تابش و زاویه‌ی بازتابش با هم برابرند و جهت بازتابش با توجه به خط عمود بر سطح کاملاً مشخص و معلوم است. در مطالعه‌ی این حالت فرض بر این است که سطح مورد نظر یک سطح بازتابنده‌ی کامل (سطح آینه‌یی کامل) است و میزان بازتابش نامنظم آن در این صورت کوچک و قابل صرف نظر است. در حالت دوم بازتابش نور در یک جهت مشخص صورت نمی‌گیرد، بلکه در تمام جهات پخش می‌شود. در این حالت سطح بازتابنده یک تابع توزیع و یا شار تابشی در تمام جهاتِ فضا دارد. در بازتابش نامنظم فرض می‌شود که سطح مورد نظر سطحی است که نور را در فضای بالای سطح و در تمام جهات به‌طور مشخص و یکسان بازمی‌تاباند (بازتابش نامنظم یکنواخت). برای هر یک از این حالات یک توزیع شار تابش و یک منحنی مشخصه‌ی بازتابش تعریف می‌شود. در بازتابش نامنظم یکنواخت یک سطح کروی شار تابشی را

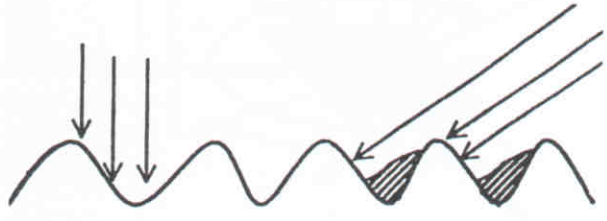
توزیع می‌کند، در حالی که در بازتابش نامشخص یک سطح بیضوی نشان‌دهنده‌ی منحنی مشخصه‌ی یک پخش غیریکنواخت است.

ساختار سطح

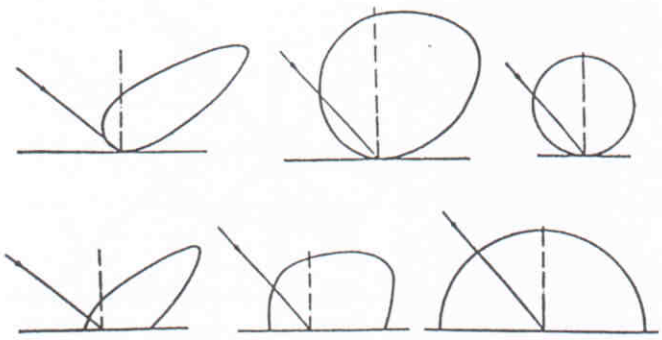
رفتار سطح در دو حالت ریزساختار ــ ساختاری که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیست ــ و بزرگ‌ساختار ــ ساختاری که ابعاد پستی و بلندی‌های آن بسیار بزرگ و قابل تشخیص است ــ بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شود. بر همین اساس، معمولاً سطح ریزساختار را سطح هموار، و سطح بزرگ‌ساختار را سطح خشن و زبر می‌نامند.[۲] از نظر فیزیکی نیز معیار مهم در توجیه ساختار سطح، مقایسه‌ی عمق و ابعاد پستی و بلندی‌ها با طول موج نور برخوردی است. اگر ابعاد پستی و بلندی‌های سطح مورد نظر بسیار بزرگ‌تر از طول موج نور باشد، سطح ما «زبر» است ولی اگر در حد طول موج نور برخوردی باشد سطح ما یک سطح «هموار» است.

مطابق شکل ۱، هنگامی که تابش به‌صورت عمودی باشد هر یک از نقاطی که در پستی و بلندی قرار گرفته‌اند، نور را به‌صورت یکنواخت دریافت و بازمی‌تابانند. در این صورت منحنی مشخصه‌ی تابش دارای تقارن محوری است. در تابش مایل نیز همان‌طور که در شکل نشان داده شده است تنها نقاطی که در بلندی‌ها قرار دارند و با پرتوهای تابش نور برخورد می‌کنند نورانی می‌شوند، اما نقاط دیگر که در پستی قرار دارند تاریک‌اند (ناحیه‌ی هاشور خورده‌ی شکل ۱). با این توصیف، شکلِ منحنیِ مشخصه‌ی تابشِ سطح به عمق و ابعاد پستی و بلندی‌های سطح بستگی دارد و بنابراین می‌تواند جزء مناسبی برای مطالعه‌ی پستی و بلندی‌های سطح باشد. در عمل پستی‌های عمیق و بلندی‌های تیز سطح باعث بازتابش بیشتر نور و پخش آن می‌شوند که منجر به ظهور پدیده‌ی بازتابش نامنظم می‌شود، در حالی که پستی‌های کم‌عمق و بلندی‌های تخت‌تر نور را بیشتر در جهت آینه‌یی سطح بازمی‌تابانند و پدیده‌ی بازتابش منظم را به وجود می‌آورند.

از آنجا که هیچ یک از دو شیوه‌ی بازتابش منظم و بازتابش نامنظم به‌طور کامل و ایده‌آل صورت نمی‌گیرد، در تحلیل و بررسی‌ها باید ترکیبی از این دو نوع بازتابش را در نظر بگیریم. در شکل ۲ منحنی مشخصه‌های بازتابش نامنظم ایده‌آل و بازتابش ترکیبی (منظم و



شکل ۱. نمایش پستی و بلندی‌های یک سطح زبر و تابش نور.



شکل ۲. منحنی مشخصه‌یی بازتابش نامنظم کامل و بازتابش ترکیبی.[۳]

نامنظم) نشان داده شده‌اند. گفتیم که در عمل، هیچ یک از دو بازتابش نامنظم ایده‌آل یا بازتابش منظم کامل را نداریم و سطوح طبیعی ترکیبی از این دو نوع بازتابش را نشان می‌دهند که این موضوع کار تجزیه و تحلیل را مشکل می‌سازد.

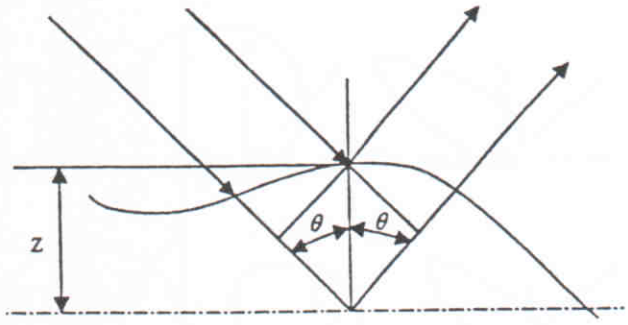
در فرایند برخورد نور به یک فصل مشترک سه پدیده‌ی مهم ممکن است اتفاق بیفتد. این پدیده‌ها عبارتند از: «بازتابش نور»، «شکست نور» و «جذب نور» در محیط. اگر محیط دوم فلزی باشد دو پدیده‌ی بازتابش و جذب نور اتفاق می‌افتند و میزان شکست نور ناچیز است. در مورد دو محیط شفافِ دی‌الکتریک بازتابش و شکست نور نقش مهم‌تری دارند و میزان جذب نور در چنین محیط‌هایی قابل چشم‌پوشی است. هنگام بررسی این پدیده‌ها در دو محیط دی‌الکتریک ضریب شکست محیط‌ها به‌صورت حقیقی تعریف می‌شوند، در حالی که در مورد بازتابش از سطوح فلزی ضریب شکست این سطوح به‌صورت مختلط تعریف می‌شود. بخش موهومی آن نشان‌دهنده‌ی میزان جذب نور در فلز است و بخش حقیقی آن پخش و انتشار نور را توضیح می‌دهد. در بازتابش موج از سطوح، معمولاً دو نوع موج با قطبش‌های S و P در نظر گرفته می‌شوند. میزان توان بازتابش و عبور برای این دو نوع موج در کتب مختلف ارائه شده‌اند.[۳]

بازتابش منظم و نامنظم

بازتابش نور از یک سطح ناهموار، چنان که در شکل ۳ نشان داده شده است، را در نظر می‌گیریم. طبق قوانین نورشناخت (اپتیک) هندسی می‌دانیم که اختلاف راه نوری بین دو پرتو در هر نقطه از این شکل برابر است با:

$$\Delta r = 2z\ cos\theta \qquad (1)$$

که در آن z بلندی یا عمق آن نقطه از سطح متوسط است. رابطه‌ی ۱ نشان می‌دهد که اگر زاویه‌ی برخورد θ به $\pi/2$ برسد، Δr به سمت صفر خواهد رفت و به‌وضوح اگر z نیز صفر شود همین اتفاق می‌افتد. اگر توزیع احتمال بلندی‌ها در ارتفاع z برابر $W(z)$ باشد، کل توان بازیابی برابر است با:



شکل ۳. بازتابش نور از یک سطح ناهموار.

$$\int_{-\infty} W(z)exp\left[\frac{i4\pi cos\theta}{\lambda}\right]dz$$

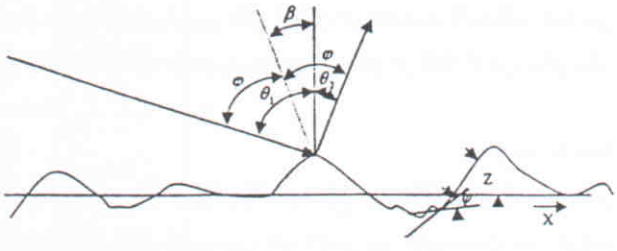
که تبدیل فوریه‌ی شدت احتمال است. شدت بازتابی متناسب با مجذور مدول فوریه خواهد بود. اندازه‌گیری‌ها شدت مدول را می‌دهد اما فاز تبدیل فوریه را نمی‌دهد. از این رو تعیین توزیع احتمال بلندی زبری تنها از اندازه‌گیری‌های نورشناختی امکان‌پذیر نیست. اما امتحان این که با نظریه‌ی پیشنهادشده سازگاری دارد یا نه امکان‌پذیر است.

مدلی که بیشتر رواج دارد گوسی است (معادله‌ی ۲). تبدیل فوریه آن نیز گوسی است. به‌طوری که شدت آینه‌یی متناسب است با:

$$exp(-16\pi^2\sigma^2cos^2\theta/\lambda^2) \qquad (2)$$

که در آن σ انحراف استاندارد زبری است. از این رو در این مدل رسم لگاریتم شدت در برابر $cos^2\theta$ خطی مستقیم با شیب $(-16\pi^2\sigma^2)/\lambda^2$ می‌دهد. اگر توزیع بلندی زبری سطح گوسی نباشد نمودار به صورت یک منحنی خواهد بود. اما می‌توان نشان داد که شیب اولیه‌اش در $cos\theta = 0$ هنوز $(-16\pi^2\sigma^2)/\lambda^2$ است و در این حالت انحراف استاندارد زبری را می‌توان از نتایج نورشناختی به دست آورد.

یک سطح خیلی زبر که عناصر زبری‌اش در مقیاس با طول موج بزرگ هستند در نظر می‌گیریم. جهات بازتابش با نورشناخت هندسی تعیین می‌شود. اگر شیب سطح ψ باشد (شکل ۴) نور بازتابی از جهت آینه‌یی به‌اندازه‌ی 2ψ منحرف می‌شود. در این حالت شدت بازتابی در این جهت متناسب چگالی احتمال توزیع شیب‌های سطح در شیب ψ



شکل ۴. بازتابش پخشی نشان‌دهنده‌ی نمادهای z، بلندی سطح، σ انحراف استاندارد z، ψ شیب سطح، $\sigma\psi$ انحراف استاندارد شیب سطح، θ_1 زاویه‌ی برخورد، θ_2 زاویه‌ی بازتابش، $\beta=(\theta_1-\theta_2)/2$ (برای بازتابش منظم صفر است) و $\phi=(\theta_1-\theta_2)/2$

است. اندازه‌گیری‌های توزیع شدت مستقیماً توزیع احتمال شیب سطح را می‌دهد.

براساس نظریه‌ی بکمن تقریب نورشناخت هندسی وقتی کاربرد می‌یابد که $[4\pi(\frac{\sigma}{\lambda})cos\phi cos\beta]^2$ به‌اندازه‌ی کافی بزرگ مثلاً بزرگ‌تر از ۱۰ باشد. برای برخورد زاویه‌ی صفر و طول موج $\lambda = 0/6328\mu m$ مقدار $\sigma > 0/16\mu m$ است که بیان می‌کند که اپتیک هندسی برای تمام سطوح به‌غیر از سطوح خیلی هموار کاربرد دارد.

تابع توزیع بازتابندگی

شکل ۵ را که قسمت کوچکی از یک سطح فرضی را نشان می‌دهد، در نظر می‌گیریم. شیوه‌ی محاسبه‌ی توزیع بازتابندگی از یک سطح، که اولین بار توسط برتلد و همکاران معرفی شد[4] روشی قابل قبول برای تعیین بازتابندگی سطح است. کمیت به دست آمده در این روش کسری است که میزان تابندگی[3] پرتو بازتابی به تابندگی سطح برخورد را نشان می‌دهد و برابر است با:

$$f=\frac{dL_r}{dE_i} \qquad (3)$$

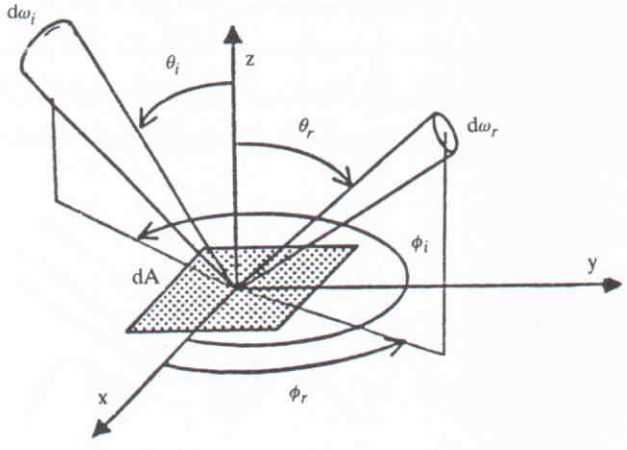
چنان که در شکل ۵ نشان داده شده است θ و ϕ یک راستای برداری را نشان می‌دهند. i نشانگر پرتو تابش و r نشانگر پرتو بازتابی است.

مطابق شکل، یک پرتو در زاویه‌ی فضایی $d\theta_i$ تحت زاویه‌ی (ϕ_i, θ_i) به عنصر کوچک dA برخورد می‌کند و در زاویه‌ی فضایی $(\phi_r\theta_r)$ بازتابش می‌کند. بنابراین L_r و E_i تابعی از جهت برخوردی و بازتابش می‌باشند و می‌توان نوشت:

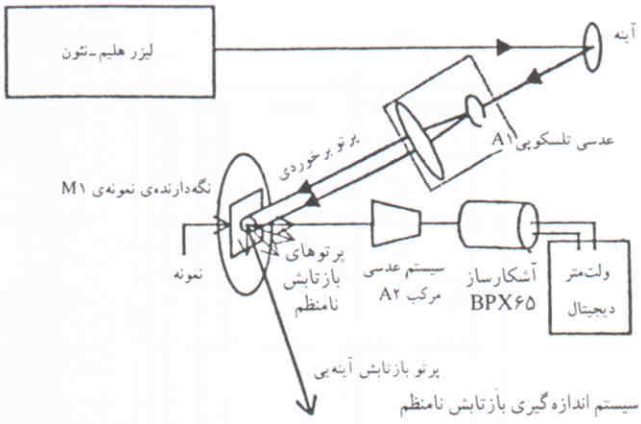
$$d\phi_i=dE_i\ dA \qquad (4)$$

رابطه‌ی ۴ را می‌توان برای شار تابشی در زاویه‌ی فضایی $d\theta_r$ نوشت و بدین ترتیب f دارای واحد عکس استرا رادیان است. این تابع امکان مطالعه‌ی توزیع بازتابندگی در کل فضا را از طریق انتگرال‌گیری روی زوایا ممکن می‌سازد.

همان‌طور که مطرح شد، صفحه‌یی با توزیع لامبرتی صرف‌نظر از



شکل ۵. نمایش برخورد و بازتابش نور از یک عنصر سطح جسم.



شکل ۶. نمودار قالبی آزمایش مورد نظر.

نحوه‌ی برخورد نور به آن، نور را در تمام جهات به‌صورت یکسان بازمی‌تاباند. بازتابندگی در این حالت همسان‌گرد[۴] است (L برای تمام جهات ثابت و یکسان است)، و انتگرال بازتابندگی روی نیم‌کره‌ی بالای سطح نیز باید مساوی تابندگی به سطح (E) باشد. اگر بازتابندگی از سطح با پخش کامل و لامبرتی در نظر گرفته شود میزان f برابر $\frac{1}{\pi}$ است.

اساس طرح مورد نظر

نمودار قالبیِ این طرح در شکل ۶ آمده است. برای انجام چنین آزمایشی یک منبع نوری مورد نیاز است ــ یک لیزر هلیوم ـ نئون که نور آن در ناحیه‌ی طیفی قرمز است. نور خروجی پس از بازتابش توسط یک آینه‌ی تخت از تلسکوپی عبور داده می‌شود. اندازه‌ی پرتو اولیه‌ی لیزر در حدود ۱/۵ میلی‌متر است که پس از عبور از تلسکوپ ۱۰ برابر بزرگ می‌شود و سطح مقطعی به‌قطر حدود ۱۵ میلی‌متر ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، نور خروجی از این تلسکوپ که به‌عنوان موازی‌کننده عمل می‌کند، به شکل پرتوهای موازی‌اند.[۵]

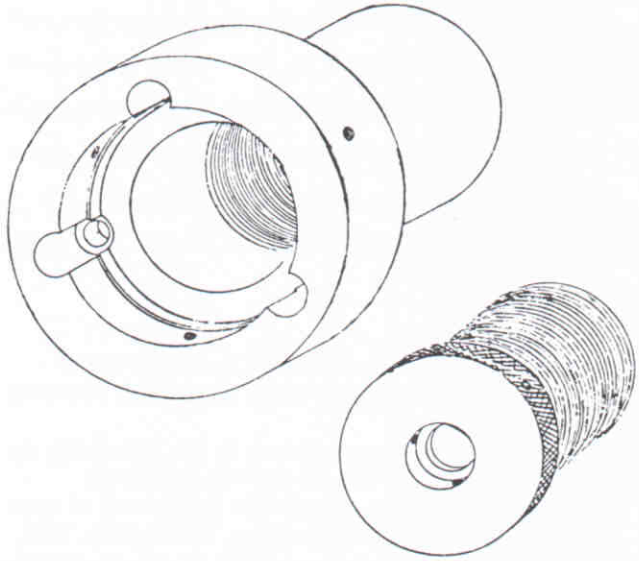
نور لیزر که به سطح نمونه‌ی مورد نظر برخورد می‌کند دارای بازتابش منظم و نامنظم است. بازتابش منظم آن در جهت خاصی است ولی بازتابش نامنظم آن در تمام جهات در فضای مقابل سطح نمونه است. برای سهولت در این آزمایش جهت را عمود بر سطح مورد نظر فرض می‌کنیم و بازتابش نامنظم را در همین راستا اندازه‌گیری خواهیم کرد. با استفاده از یک مجموعه عدسی، نور حاصل از بازتابش جمع‌آوری، و سپس بر روی یک آشکارساز فوتونی متمرکز می‌شود. می‌توان از یک آشکارساز سیلیکونی برای تبدیل فوتون‌ها به سیگنال الکتریکی استفاده کرد. سیگنال حاصل از این آشکارساز سپس توسط یک ولت‌متر رقمی خوانده می‌شود.

طراحی و ساخت تلسکوپ نوری

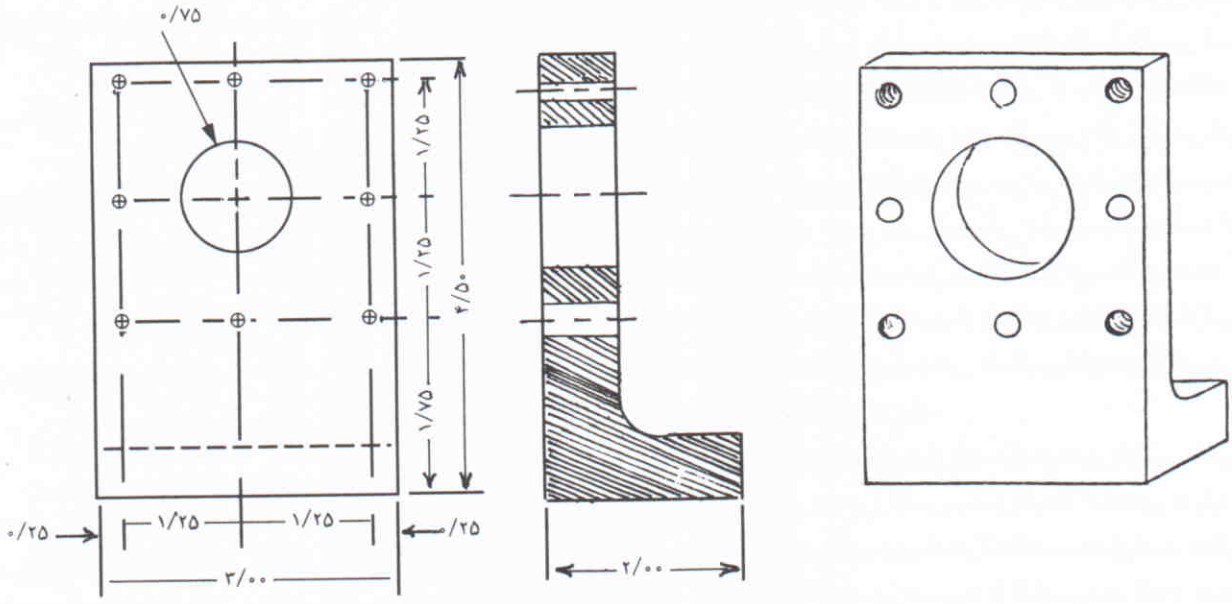
تلسکوپ نوری وسیله‌یی است که دو کاربرد مهم دارد. کاربرد اول در افزایش سطح مقطع نور لیزر است و کاربرد دوم موازی کردن پرتوهای نور است. سطح مقطع لیزر هلیوم ـ نئون مورد نظر تقریباً دایره‌یی است به‌قطر ۱/۵ میلی‌متر که می‌تواند نقطه‌ی کوچکی از سطح مورد مطالعه را روشن کند. برای این که وسعت بیشتری از سطح مورد نظر را روشن کنیم لازم است سطح مقطع نور بزرگ‌تر شود. این امر از طریق یک سیستم تلسکوپی امکان‌پذیر است. دومین ویژگی تلسکوپ این است که همزمان به‌صورت موازی‌کننده عمل می‌کند. یعنی نور خارج شده از آن که به صورت پرتوهای موازی است از بازشدن پرتو لیزر جلوگیری می‌کند، بدین ترتیب که اگر بزرگ‌نمایی تلسکوپ M باشد واگرایی پرتو لیزر به‌اندازه‌ی $1/M$ کاهش می‌یابد.

این سیستم تشکیل شده است از پایه، نگه‌دارنده‌ی عدسی چشمی و نگه‌دارنده‌ی عدسی جسمی. عدسی جسمی توسط صفحه‌یی به پایه ــ که می‌تواند توسط پیچ‌های مربوطه حرکت کند ــ متصل است. شکل ۷ نمای ساده‌یی از نگه‌دارنده‌ی عدسی‌ها را نشان می‌دهد که از جنس آلومینیوم و برنج‌اند. مشخصات فنی صفحه‌یی که تلسکوپ روی آن نصب می‌شود در شکل ۸ آمده است. قطعه‌ی حامل عدسی چشمی در داخل آن پیچ می‌شود و از این طریق می‌توان طول لوله‌ی تلسکوپی را تغییر داد. می‌توان از مهره‌یی برای قفل‌کردن طول لوله استفاده کرد.

بزرگ‌نمایی تلسکوپ نوری از رابطه‌ی $(f_1)/(f_2)$ به دست می‌آید که در آن f_1 فاصله‌ی کانونی عدسی چشمی و f_2 فاصله‌ی کانونی عدسی جسمی است. در این سیستم تلسکوپی f_1 و f_2 طول متغیر لوله را تعیین می‌کنند. بنابراین می‌توان بزرگ‌نمایی‌های مختلفی را ایجاد کرد. از نکات مهم در تنظیم این وسیله، تعیین دقیق طول لوله‌ی تلسکوپی است که از طریق طرح مورد نظر امکان‌پذیر است. در تلسکوپ مورد نظر ــ باتوجه به عدسی‌های موجود ــ میزان بزرگ‌نمایی برابر ۱۰ است.



شکل ۷. نمای ساده‌یی از نگه‌دارنده‌ی عدسی‌های چشمی و جسمی در تلسکوپ.



شکل ۸. نمای ساده‌یی از قطعه‌ی نگه‌دارنده‌ی لوله‌ی تلسکوپ به‌ابعاد ۵×۱۱/۲۵×۷/۵ cm.

به هر حال این طرح با انتخاب زوج عدسی‌های مناسب و طول لوله‌ی مناسب ایجاد بزرگ‌نمایی‌های متفاوتی را ممکن می‌سازد. تنظیم دستگاه تلسکوپی بدین ترتیب است که اگر بخواهد به‌صورت یک موازی‌کننده‌ی دقیق عمل کند باید تصویر واضحی از یک جسم در فاصله‌ی بی‌نهایت را فراهم سازد. بنابراین با این سیستم جسمی را در فاصله‌ی دور مشاهده می‌کنیم و سپس طول لوله‌ی تلسکوپی برای این وسیله میزان می‌شود. طرح مکانیکی طوری است که طول لوله توسط یک پیچ قفل می‌شود و امکان تغییر اتفاقی آن وجود ندارد.

در این سیستم تلسکوپی از عدسی‌های موجود در آزمایشگاه استفاده شده است. فاصله‌ی کانونی یکی از این عدسی‌ها که به‌صورت عدسی چشمی عمل می‌کند حدود ۱۰ میلی‌متر و فاصله‌ی کانونی عدسی جسمی حدود ۱۰۰ میلی‌متر است و یک روزنه‌ی ۳۵ میلی‌متری دارد. این مجموعه‌ی نورشناسی (اپتیکی) توانایی بزرگ‌نمایی حدود ۱۰ برابر را دارد که برای آزمایش مورد نظر کافی است.

تنظیم اولیه‌ی تلسکوپ به‌روش ذکر شده انجام می‌شود ولی تنظیم دقیق‌تر آن در حین عمل و با لیزر امکان‌پذیر است. لازم به یادآوری است که به‌منظور استفاده در ساختار کلی این آزمایش، قسمت‌های مختلف این تلسکوپ طراحی و ساخته شده، عملاً مورد آزمایش قرار گرفته است.

نتیجه گیری

مطالب و نظریه‌های مربوطه نشان می‌دهند که شیوه‌ی اندازه‌گیری بازتابش امواج الکترومغناطیسی از سطوح می‌تواند اطلاعات مفیدی فراهم سازد. در این راستا با استفاده از نور لیزر می‌توان اطلاعات خوبی راجع به ساختار سطح مورد مطالعه به دست آورد. با استفاده از نور لیزر و مطالعه‌ی بازتابش آن می‌توان میزان هر دو مؤلفه‌ی بازتابش منظم و نامنظم را اندازه‌گیری کرد. میزان نور بازتابشی به زاویه‌ی تابش، زاویه‌ی پخش نور، نوع قطبش نور و ساختار سطح مورد نظر بستگی دارد. با توجه به این که میزان بازتابش نامنظم نسبت به بازتابش منظم خیلی کم‌تر است، انجام این آزمایش نیاز به دقت خاصی دارد. انتظار می‌رود بازتابش منظم در سطوح فلزی بیشتر از سطوح غیرفلزی باشد، همان‌طور که بازتابش نامنظم برای سطوح مات و زبر بیشتر است.[۶]

پانوشت‌ها

1. diffuse reflection
2. mirror reflection
3. Radiance
4. isotropic

منابع

1. Creath, K. and Wyant, J. C. "Absolute measurement of surface roughness", *Appl. Opt.*, **29**, pp. 3823-3827 (1990).
2. Sailard and Maystre "Scattering from metalic and dielectric rough surfaces", *J. Opt. Soc. Am. A*, **7**, pp. 982-990 (1990).
3. Klein. M. V. and Furtale, T. E. Optics, Johon Wiely, New York, (1986).
4. Berthold, K. Horn, P. and Sjoberg R. W. "Calculating the reflectance map", *Appl. Opt.*, **18**, pp. 1770-1779 (1979).
5. Tanner L. H. "The use of laser light in the study of metal surfaces", *Opt. and laser Technology*, pp. 113-116 (June, 1976).
6. Wolff L. B. "Diffuse refreltance model for smooth dielectric surfaces", *J. Opt. Soc. Am A*, **11**, pp. 2956-2968 (1994).