

تعیین مشخصه‌های اپتیکی لایه‌های نازک هنگام فرایند لایه‌گذاری در خلأ

بدون اندازه‌گیری مستقیم ضرایب بازتاب یا عبور نور از نمونه

آ. پ. آوچرنکو، ارشمید نهال، اس. و. ماشکینا، ی. ای. پلاوسکایا، ی. آ. لویاشکو

بخش فیزیک اپتیک دانشکده فیزیک دانشگاه ایالتی خارکف، اوکراین

تاریخ دریافت نسخه نهایی فروردین ۷۵

تاریخ دریافت ۱۹ مرداد ۷۴

چکیده

در این مقاله مشخصه‌های اپتیکی لایه‌های نازک در حین فرایند لایه‌نشانی در خلأ بوسیله یک روش نسبتاً ساده اندازه‌گیری می‌شود. در این روش پیشنهادی با استفاده از نسبت مقدار سیگنال کمینه ضریب عبور (T_i) به مقدار بیشینه آن (T_a) یعنی $Gt = \frac{T_i}{T_a} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$ از طریق روابط فرنل بدون اندازه‌گیری مستقیم ضریب عبور می‌توان دیگر کمیت‌های مورد نیاز از قبیل ضریب شکست ماده و یا ضریب بازتاب در فصل مشترک لایه - زیر لایه را بدست آورد. این روش برای تعیین مشخصه‌های اپتیکی مواد ZnS ، MgF_2 ، PbF_2 ، Na_3AlF_6 و As_2S_3 انجام گردید. نتایج حاصل با نتایج روش طیف نورسنجی مقایسه شد و سازگاری خوبی تا دو رقم اعشار بدست آمد. کاربرد این روش برای ساخت سیستم‌های چند لایه‌ای حساس به نور ارائه می‌شود.

دی‌الکتریک، که برای آن ضریب جذب را می‌توان صفر فرض کرد، بررسی کنیم و مشخصه‌های اپتیکی آن را در حال لایه‌نشانی به دست آوریم. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از یک سیستم چندین لایه‌ای مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به فرمول فرنل می‌دانیم که بیشینه و کمینه ضرایب بازتاب انرژی تابشی از یک لایه، به ترتیب R_a و R_i ، را می‌توان از فرمولهای زیر به دست آورد:

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}}, \quad (1)$$

$$R_i = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2}}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2}}$$

که در آنها R_1 ، R_2 ضرایب بازتاب مرز اول و دوم لایه هستند. فرض می‌کنیم که محیط دی‌الکتریک یکنواخت و غیرجذب -

هنگام تهیه و ساخت پوششهای مختلف ساخته شده از لایه‌های مجزای دی‌الکتریک، فلز، یا نیمرسانا که به آنها سیستم‌های چندین لایه‌ای گفته می‌شود، این نیاز احساس می‌شود که بتوان مستقیماً در خلأ، هنگام فرایند لایه‌گذاری، مشخصه‌های مختلف اپتیکی این لایه‌ها، از قبیل ضریب بازتاب، عبور، ضریب شکست و مانند آنها را تعیین کرد.

مسئله تعیین این مشخصه‌ها در بسیاری از کارهای پژوهشگران مورد بحث و بررسی قرار گرفته است ولی اغلب آنها بر مبنای کاربرد نورسنجی دو پرتویی که مستقیماً ضریب بازتاب و یا عبور را اندازه‌گیری می‌کنند، موضوع را بررسی کرده‌اند [۱ و ۲]، در صورتی که بیشتر ایستگاههای خلأ که برای لایه‌گذاری استفاده می‌شوند به این نوع ابزارها مجهز نیستند. در عمل برای حل مسئله از نورسنجی تک پرتویی می‌توان استفاده کرد [۳ و ۴].

در این آزمایش سعی کرده‌ایم با استفاده از نسبت مقدار کمینه به بیشینه سیگنال کنترل، ساده‌ترین حالت را، یعنی یک لایه

کننده است. ضریب بازتاب برای چنین لایه‌ای از فرمول ایری (Airy) به دست می‌آید که در آن r_1 و r_2 مدولهای مرزهای اول و دوم و δ_{ij} تغییرات فاز بر اثر بازتاب از سطح جداکننده دو محیط است.

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2|r_1||r_2|\cos\left[-\delta_{12} + \delta_{23} - \frac{4\pi n t}{\lambda}\right]}{1 + r_1^2 + r_2^2 + 2|r_1||r_2|\cos\left[\delta_{12} + \delta_{23} - \frac{4\pi n t}{\lambda}\right]} \quad (2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب بازتاب، یک تابع دوره‌ای از nt (ضخامت اپتیکی) است، (t ضخامت هندسی لایه است). هنگام تغییر ضخامت اپتیکی لایه ضریب بازتاب مقادیر فرینی را اختیار می‌کند که از رابطه (۲) به دست می‌آیند [۵ و ۶]. این مقادیر برابرند با

$$R_{ext} = [r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2]^{-1} \quad (3)$$

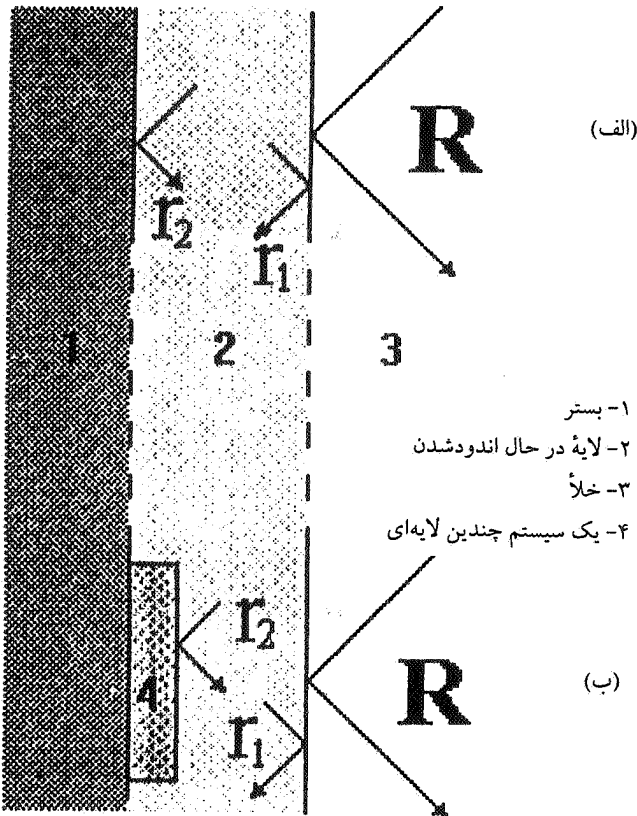
که در آن علامت منفی متناظر با مقدار کمینه R_i و علامت مثبت متناظر با مقدار بیشینه R_a برای ضریب بازتاب انرژی سیستم و $r_{1/2} = \sqrt{R_{1/2}}$ مدولهای ضریب بازتاب مرز اول و دوم لایه هستند

$$G_r = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{KI_o R_i}{KI_o R_a} = \frac{R_i}{R_a} = \left[\frac{(r_1 - r_2)(1 + r_1 r_2)}{(r_1 + r_2)(1 - r_1 r_2)} \right]^2 \quad (4)$$

در اینجا K ضریب تناسب که خود شامل چندین پارامتر است و I شدت اولیه سیگنال کنترل است. که در آن برای سطح جداکننده محیطهای دی الکتریک داریم

$$r_1 = \left| \frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2} \right|, \quad r_2 = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right| \quad (5)$$

با توجه به شکل ۱، $n_3 = 1$ ضریب شکست نور برای خلأ و n_2 به ترتیب ضریب شکست نور برای لایه و زیرلایه هستند. از رابطه (۴) دیده می‌شود که با داشتن یک ضریب شکست مشخص (اغلب ضریب شکست زیرلایه)، این امکان وجود دارد که ضریب شکست لایه مورد نظر را تعیین کرد. چون در این حالت رابطه مربوط به تعیین n_2 که تابعی از n_1 ، n_3 و G_r است بسیار پیچیده است، بهتر است برای تعیین n_2 رابطه (۴) را با در نظر گرفتن رابطه (۵) حل کرد. در واقع از رابطه (۴) با اندازه‌گیری I_{\min}/I_{\max} هنگام لایه‌گذاری، و استفاده از روابط (۱)، پارامترهای اپتیکی لایه مورد نظر را بدون اندازه‌گیری مستقیم R_i و R_a می‌توان به دست آورد. در زیر خواهیم دید که اگر ضریب شکست نور برای ماده در



- ۱- بستر
- ۲- لایه در حال اندودشدن
- ۳- خلأ
- ۴- یک سیستم چندین لایه‌ای

شکل ۱. (الف) حالتی که فقط لایه مورد نظر مستقیم روی زیر لایه نشانده می‌شود (ب) حالتی که لایه مورد بررسی روی یک سیستم چند لایه‌ای دیگر که خود روی زیرلایه قرار دارد نشانده می‌شود.

حال لایه‌گذاری مشخص باشد، می‌توان از این روابط برای تعیین ضریب بازتاب R_p ، دومین مرز (سطح جداکننده) استفاده کرد. برای این منظور از رابطه زیر که از رابطه (۴) به دست می‌آید، استفاده می‌کنیم

$$r_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{f}{\gamma}\right)^2} - \frac{f}{\gamma} \quad (6)$$

که در آن

$$f = \left[\frac{1 - r_1^2}{r_1} \right] \left[\frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \right], \quad \gamma = \pm \sqrt{G_r} \quad (7)$$

در نتیجه در مواردی که تعیین ضریب شکست زیر لایه لازم است با معلوم بودن n_1 ، n_2 را به دست می‌آوریم. ولی معمولاً تعیین خود r_2 مهم است. بدین ترتیب با داشتن مقادیر r_1 و r_2 که از این طریق به دست می‌آیند، می‌توان با استفاده از رابطه (۳)، مقادیر فرین را برای ضریب بازتاب انرژی سیستم چندلایه‌ای مورد بحث بدون

انجام محاسبات طولانی و پیچیده به دست آورد.

هنگامی که فیلم قرار داده شده روی چنین سیستم چندلایه‌ای دارای ضخامت اپتیکی نیم طول موج باشد، ضریب بازتاب با ضریب بازتاب زیرلایه بدون فیلم، R_x ، برابر است. در حالت کلی مقدار R_x با مقدار R_{extr} تطابق ندارد ولی بعد از میزان کردن مقیاس دستگاه اندازه‌گیری می‌توان مقدار R_x را هم پیدا کرد.

به همین ترتیب هنگام کنترل عبور نور از نمونه، پیشنهاد می‌کنیم مقدار تجربی نسبت کمینه سیگنال عبور (I_{min}) به پیشینه (I_{max}) آن اندازه‌گیری و از آن، همانند حالت قبل، برای به دست آوردن پارامترهای لازم استفاده شود،

$$G_T = \frac{I_{min}}{I_{max}} = \frac{KI_o T_i}{KI_o T_a} = \frac{T_i}{T_a} = \left[\frac{(1-r_1 r_2)}{(1+r_1 r_2)} \right]^2, \quad (8)$$

که در آن در صورت نبودن اتلاف در سیستم لایه‌گذاری مقادیر کمینه (T_i) و بیشینه (T_a) ضریب عبور به صورت زیر به دست می‌آیند

$$T_a = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-r_1 r_2)^2}, \quad (9)$$

$$T_i = T_a \left[1 + \frac{4r_1 r_2}{(1-r_1 r_2)^2} \right]^{-1}$$

اگر اتلاف قابل ملاحظه، باشد برای به دست آوردن روابط مشابه فرمولهای دقیقتری وجود دارد [۴ و ۵]. در نمودار ۱ بستگی (R_1) G_T برای مقادیر $R_2 = 0.09$ تا $R_2 = 0.95$ با گام ۰.۱ نمایش داده شده است (منحنیهای ۱ تا ۱۰ در نمودار ۱). مقدار صفر G_T مربوط به حالت $R_1 = R_2$ است. چنین حالتی به ندرت اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه هنگام تهیه پوششهای ضدبازتابی چنین حالتی رخ می‌دهد، در نمودار ۲ بستگی (n_2) G_T برای ضریب شکست زیرلایه برابر با مقادیر ۵ و ۲ و ۵ و ۲ و ۵ و ۲ را (منحنیهای ۱ تا ۸) نمایش داده شده است. مقدار صفر G_T در این حالت مربوط به حالت $n_2 = \sqrt{n_1}$ است و $G_T = 1$ در $n_2 = n_1$ رخ می‌دهد. در حالت $G = 0$ و متناظر با آن در $R_i = 0$ تغییرات سیگنال کنترل می‌تواند زیاد باشد، ولی در این شرایط برای محاسبه کمینه برای مقدار سیگنال کنترل، دقت کمی وجود خواهد داشت که برای پرهیز از آن می‌توان عملاً با حالت‌های غیرواقعی و ایده‌آل $R_1 = 0$ یا $R_2 = 0$ متناظر است. مقدار ضریب شکست لایه در حال لایه‌گذاری (n_2) را می‌توان با معلوم بودن G_T و n_1 از رابطه زیر

پیدا کرد

$$n_2 = A \pm \sqrt{A^2 - n_1}, \quad (10)$$

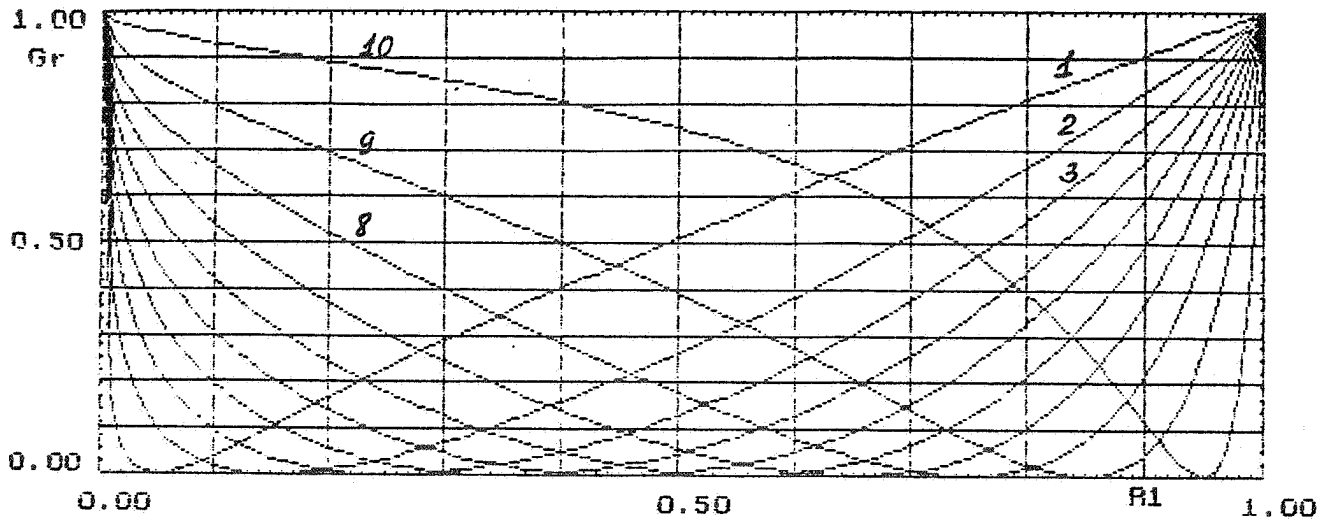
که در آن

$$A = \frac{n_1 + 1}{\gamma} G_i^{\pm 1/2} \quad (11)$$

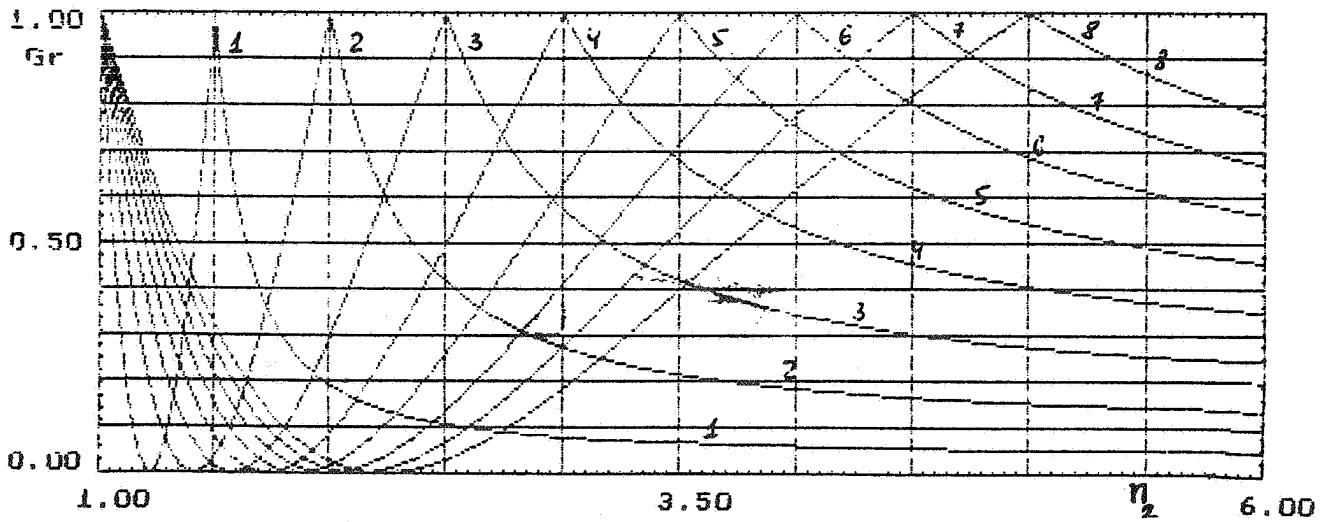
از این رابطه چهار مقدار برای n_2 به دست می‌آید. چون ضریب شکست مواد مورد استفاده در محدوده معلومی هستند از لحاظ عددی فقط دو تا از این چهار مقدار قابل قبول‌اند. دو مقدار باقی‌مانده با توجه به نمودارهای ۲ و ۳ یکی کمتر از n_1 و دیگری بیشتر از n_2 است، برای انتخاب جواب واقعی باید شرایط کار و نوع سیستم چندین لایه‌ای را در نظر گرفت. اگر سیستم چندین لایه‌ای ما یک فیلتر ضدبازتاب باشد مقدار کمتر و برای آینه‌ها مقدار بیشتر را اختیار می‌کنیم. این نتیجه را می‌شود از تحلیل تغییرات ضریب عبور T برای این سیستمها به دست آورد.

داشتن تجربه کافی در اینجا اهمیت دارد. از نمودارهای ذکر شده عملاً می‌شود برای تعیین ضرایب شکست و بازتاب لایه‌های سیستمهای چندین لایه‌ای استفاده کرد. اینگونه نمودارها را نوموگرام می‌نامند. محدودیت این روش در جایی است که G_T صفر می‌شود که در نتیجه خطای آزمایش زیاد می‌شود و باید از G_T استفاده کرد (همان‌طور که قبلاً گفته شد).

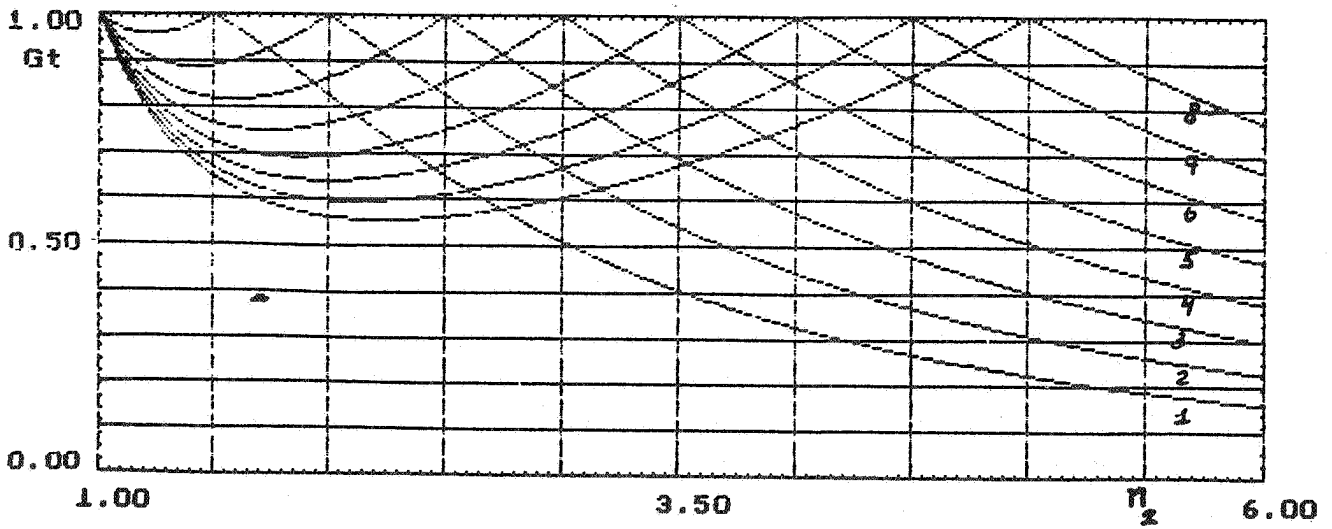
در آزمایشی که برای امتحان این نمودارها برای لایه ساخته‌شده از NaF انجام شد ضریب شکست در محدوده ۱.۳۵-۲.۵ را به دست آمد که با مقدار داده شده در جداول استاندارد که برابر ۱.۳۵ است سازگاری مناسبی دارد (تحت شرایط بهینه لایه‌گذاری). در این آزمایش ضریب شکست زیرلایه، $n_1 = 1.5$ (در این حالت سیگنال مزاحم ناشی از بازتاب مکرر در زیرلایه از I_{max} ۰.۲ تجاوز نکرد)، و در آزمایشی دیگر $n_1 = 1.75$ به دست آمد. برای حذف و جداکردن بازتاب مزاحم از سطح دوم زیرلایه، لایه‌گذاری را روی وتر یک منشور انجام دادیم تا بدین ترتیب نور بازتابی از سطح دوم زیرلایه در جهتی دیگر غیر از جهت نورسنج بازتابد. ضمناً به طور موازی با این روش، از طریق طیف سنجی مشخصه‌های اپتیکی لایه‌ها را اندازه‌گیری کردیم. برای یک آینه دی‌الکتریک، ضریب بازتاب را در خلأ با مقدار اندازه‌گیری شده نظر را بدون اندازه‌گیری مستقیم R_i و R_a می‌توان به دست آورد. در زیر خواهیم دید که اگر ضریب شکست نور برای ماده در برای ضریب عبور از طریق طیف سنجی مقایسه کردیم. طبق اصل



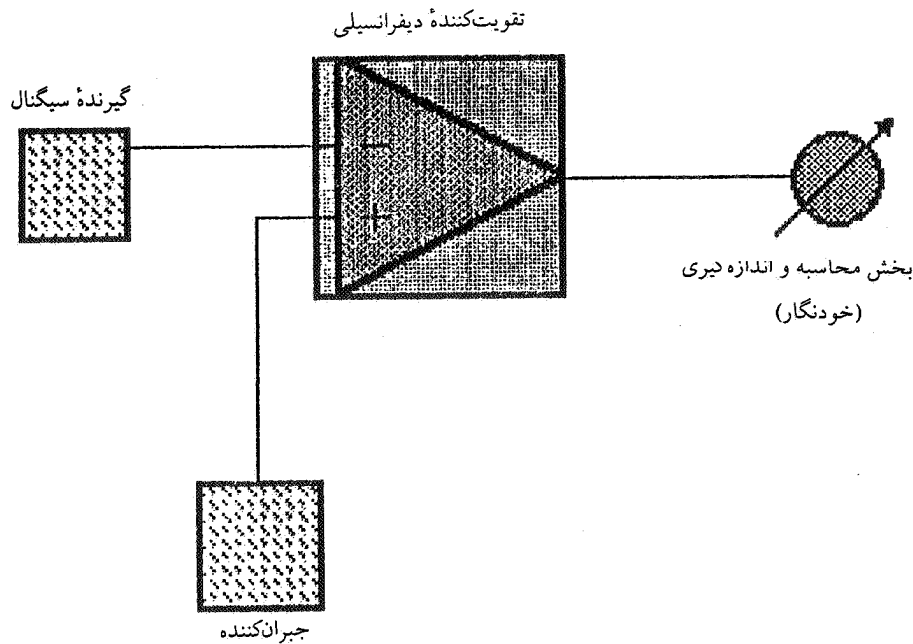
نمودار ۱. تغییرات Gr بر حسب R_1 برای مقادیر مختلف R_2



نمودار ۲. تغییرات Gr بر حسب n_2 برای مقادیر مختلف ضریب شکست زیرلايه



نمودار ۳. تغییرات Gt بر حسب n_2 برای مقادیر مختلف ضریب شکست زیرلايه



T_i لازم است که اختلاف پتانسیل جبرانی U_k را در نظر گرفت،

$$U_k = T_i (T_a - T_i)^{-1} U_s, \quad (12)$$

که در آن U_s حد اندازه‌گیری مقیاس دستگاه اندازه‌گیری است. حال اگر مقدار اولیه سیگنال از طریق تغییر شار نور به مقدار بیشینه خود در دستگاه اندازه‌گیری برسد، آنگاه در فرایند لایه‌گذاری تمام مقیاس آن برای کنترل استفاده خواهد شد. بنابراین همیشه با تغییر دادن پتانسیل جبرانی می‌توان کاری کرد که تغییرات سیگنال عبوری یا بازتابی که برای کنترل ضخامت لایه مورد استفاده قرار می‌گیرد، در محدوده مقیاس دستگاه اندازه‌گیری باشد و کنترل به‌سهولت انجام گیرد.

آزمایش نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تمام نکات فنی و شرایط لازم مقادیر به دست آمده n_p ، r_p و R با جداول استاندارد مربوطه با دقت ۰.۱ سازگاری خوبی دارند. این آزمایشها برای مواد ZnS و MgF_2 و PbF_2 و Na_3AlF_6 و As_2S_3 انجام شد. در عمل، به خاطر وجود تابش زیرلایه گذاشته شده، نوبه زمین و مسائلی از این قبیل این عدم دقت ۳ تا ۴ برابر می‌شود. برای تمام نمونه‌های ساخته شده که در بالا ذکر کردیم مشخصه‌های اپتیکی را از راه روشهای کلاسیک و طیف‌سنجی (هر کدام حداقل ۲ بار) اندازه‌گیری و تعیین کردیم که با اعداد و نتایج به دست آمده در این روش تا دو رقم اعشار داشتند. واضح است که یک کامپیوتر متصل به دستگاه کنترل، سرعت و دقت عملیات را افزایش می‌دهد و در هر لحظه از فرایند لایه‌گذاری پارامترهای مورد نظر را می‌توان تعیین کرد.

نظر را بدون اندازه‌گیری مستقیم R_i و R_a می‌توان به دست آورد. در زیر خواهیم دید که اگر ضریب شکست نور برای ماده در پایداری انرژی چون $R + T = 1$ ، که در آن T ضریب عبور و R ضریب بازتاب انرژی تابشی است، می‌توان این مقایسه را انجام داد. هنگام لایه‌گذاری برای فیلمهای ضدبازتاب ($n_p \leq n_1$) مقدار G_1 می‌تواند حداقل مقدار T_i ، و حداکثر، وقتی $n_1 = n_p$ است، مقدار یک را اختیار کند. ولی در عمل گاهی مقادیر $G_i < T_i$ به دست می‌آید. این بدان خاطر است که ضریب شکست زیرلایه مقداری نبوده است که ما برای آن در نظر گرفته‌ایم. دلایل این تغییرات هنوز دقیقاً مشخص نیست. یکی از علتها می‌تواند کاملاً تمیز نبودن زیرلایه و یا کاملاً هموار نبودن سطح آن باشد. در واقع در اینجا باید از ضریب شکست مؤثر صحبت به میان آورد. وقتی n_p معلوم باشد در حالت $n_p = \sqrt{n_1}$ (برای پوششهای ضدبازتاب) اگر ضریب شکست مؤثر زیرلایه را با n'_1 نشان دهیم رابطه $n'_1 \geq n_1$ برقرار است.

برای افزایش دقت اندازه‌گیری در خلأ از روش جبرانی محاسبه استفاده کردیم [۷ و ۸]. در این روش از دستگاه کنترل ایستگاه خلأ، شامل فوتوسلی که سیگنال بازتاب را ثبت می‌کند، پتانسیل‌سنج خودنگار به جای دستگاه ثبت و محاسبه، یک فوتوسل اضافی دوم که سیگنال عبوری را از طریق تقویت‌کننده دیفرانسیلی اندازه‌گیری می‌کند، و جبران‌کننده استفاده کردیم (شکل ۲).

در نتیجه مثلاً هنگام تغییرات مورد نظر برای رفتن از T_a به

مراجع

5. G. V. Rosenberg, "Thin film's Optics", *GIFML* (1958) (In Russian).
6. J. R. Reitz, F. J. Milford and R. W. Christy, "*Foundations of Electromagnetic Theory*", Addison-Wesley Pub. Co. (1979).
7. A. M. Manolesgu, A. Manolesgu, and A. Panait, "Apparatus for the optical monitoring of multilayer films.", *Review Romanian Physics*, vol. 14, No.10 Bucarest (1969) 1275-1279.
8. E. A., Lupashko, A. P. Ovcharenko, and A., Bartoshova, "Study of optical characteristic of multilayer thin films with help of control method", *Zh. prikladnoy spektroskopii*", vol. 46, No. 4, (1987) 669-673 (In Russian).
1. J.M. Siqueiros, L. E. Regalado and R. Machorro, "Determination of (n,k) for absorbing thin films using reflectance measurements.", *Applied Optics*, vol. 27, N. 20, (1988).
2. A. English and J. Ebert, "Refractive index measurement during the deposition of dielectric coatings.", *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, vol. 401 (1983) 17-24.
3. Sh. A. Furman, "Thin-film optical coatings", *Mashinostroenie*, (1974) (In Russian).
4. E. A. Lupashko, V.V. Mussil, and A. P. Ovcharenko, "About dynamics of photoinduced process at structure Ag - As₂S₃ - mirror.", *Quant, Electronica (Kiev)*, vol. 45 (1993) 104-108 (In Russian).