

لایه‌نشانی و تعیین خواص نوری نیتريد سيليسيم در محيط‌های آرگن و نيتروژن

نگین معنوی‌زاده^{۱*}، علیرضا خدایاری^۲ و ابراهیم اصل‌سلیمانی^۱

^۱دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه برق و کامپیوتر، آزمایشگاه تحقیقاتی لایه‌های نازک

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۶/۳/۲۳، تاریخ دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۳۸۶/۱۰/۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۶/۱۲/۲۳

چکیده لایه‌های نازک نیتريد سيليسيم بر روی زیرلایه بس کریستال سيليكون و شیشه نازک با استفاده از روش کندوپاش RF لایه‌نشانی شده‌اند. لایه‌نشانی یک‌بار در محیط گاز آرگن و بار دیگر در محیط گاز نیتروژن انجام شده است. با تغییر توان لایه‌نشانی نسبت نیتروژن و سيليكون موجود در لایه تغییر می‌کند و لایه‌هایی با خواص نوری متفاوت به دست می‌آید. تأثیرات ناشی از تغییرات توان RF بر روی خواص نوری و ترکیبات موجود در لایه‌ها بررسی شده است نسبت سيليكون به نیتروژن در ترکیب پوشش‌های ضد بازتاب نیتريد سيليكون بهینه و به کمک آنالیز RBS بررسی شده است. از آنالیز UV/VIS/IR برای بررسی خواص نوری این لایه‌ها استفاده شده است. لایه‌های نیتريد سيليكونی که در محیط آرگن با ضخامت 2000Å و با توان بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ وات لایه‌نشانی شده‌اند، درصد عبور نور بسیار بالای ۹۲٪ (در حدود شفافیت شیشه‌های نازک) در طیف وسیع ۳۰۰ تا 1200nm دارند. لایه‌های ضد بازتاب نیتريد سيليكون مذکور بازتاب سطح سلول‌های بس کریستال سيليكون را از ۱۲٪ به کمتر از ۲٪ کاهش می‌دهند.

کلمات کلیدی نیتريد سيليكون، کندوپاش RF، پوشش‌های ضد بازتاب، سلول خورشیدی.

Deposition and Determination of the Properties of Silicon Nitride Films in Argon and Nitrogen Atmospheres

N. Manavizadeh^{1,2}, A. Khodayari^{1,3} and E. Asle Soleimani¹

¹Thin film Lab, Electrical and Computer Department, Tehran University

²Electrical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology

³Mechanical Engineering Departments, K. N. Toosi University of Technology

Abstract Silicon nitride films were deposited on glass and polycrystalline silicon by RF sputtering using hot pressed ceramic Si_3N_4 target. Depositions were done in Argon and Nitrogen atmospheres. In order to optimize an antireflective coating for solar cells, sputtered silicon nitride thin films were grown with various RF power of deposition in two different atmospheres. The compositional, morphological and optical properties of film were investigated by RBS, SEM and UV/VIS/IR spectrophotometer analyses. Silicon nitride films (2000nm thickness) deposited with the RF power between 100-150W have exhibited high transparency $\approx 92\%$ for the spectral range between 300-1200nm. The silicon nitride antireflection coating deposited on the textured surface of multicrystalline silicon solar cells decreased the overall reflection of the cells from 12% to less than 2%.

Keywords Silicon Nitride, RF Sputtering, Antireflective Coating, Solar Cells.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق.

تلفن: ۰۹۱۲۱۰۱۲۸۹۸، دورنگار: ۰۲۱_۸۸۰۱۱۲۳۵، پیام‌نگار: manavizadeh@ee.knut.ac.ir

۱- مقدمه

لایه‌های نیتريد سيليكون از جهات متفاوتی در علم مواد اهمیت دارند. این لایه‌ها به واسطه خواص منحصربه‌فرد خود از جمله سختی زیاد [۱]، پایداری حرارتی بالا [۲]، خواص دی‌الکتريک مناسب [۳]، مقاومت الکتريکی بسیار بالا [۴] و ضریب انبساط حرارتی پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. لایه‌های نیتريد سيليكون، در موارد بسیاری از جمله دروازه دی‌الکتريک در ترانزیستورهای لایه نازک [۵]، در افزاره‌های فلز-نیتريد-اکسید-سيليكون (MNOS) [۶]، حافظه‌های تصادفی دینامیکی و به‌عنوان لایه‌های ضدبازتاب در سلول‌های خورشیدی [۷] کاربرد دارند.

در حال حاضر ۵۰ درصد سلول‌های خورشیدی با استفاده از بس‌کریستال‌های سيليكون ساخته می‌شوند، که ۵۵ درصد تولیدات صنایع فتوولتاییک جهانی را شامل می‌شوند و بازار مصرفی آنها در حال گسترش است. برای کاهش اتلاف ناشی از بازتاب سطح، سلول‌های خورشیدی بافت‌دار (Texture) می‌شوند. بافت‌دار شدن سطح این سلول‌ها معمولاً به کمک محلول KOH یا NaOH صورت می‌گیرد. در طی این فرآیند بازتاب سطح سلول‌های بس‌کریستال سيليكون از ۳۰٪ به ۱۰ تا ۱۵٪ کاهش می‌یابد [۹]؛ اگرچه در مراحل بعدی ساخت سلول‌های خورشیدی، برای افزایش بیشتر بازده از لایه‌های نازک ضدبازتاب استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱]. در فاصله طول موج ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ nm که سلول‌های خورشیدی در آن فعال‌اند، می‌توان از لایه‌های نیتريد سيليكون به‌عنوان لایه ضدبازتاب استفاده کرد [۸] و از آنجا که درصد عبور نور از لایه‌های نیتريد سيليكون در محدوده مذکور بسیار بالاست، می‌توان از این لایه‌ها به‌عنوان پوشش ضدبازتاب مناسب در سلول‌های خورشیدی استفاده کرد [۷].

لایه‌های نیتريد سيليكون با شیوه‌های متفاوتی از جمله

شیوه بخار شیمیایی با پلاسما افزایش یافته (PECVD) [۱۲-۱۴]، بخار شیمیایی با فشار پایین (LPCVD) [۱۵، ۱۶] و کندوپاش [۱۷، ۱۸] لایه‌نشانی می‌شوند. مزیت لایه‌نشانی به شیوه بخار شیمیایی در فشار پایین نسبت به سایر شیوه‌ها، خلوص بالای لایه‌های به‌دست آمده است؛ زیرا گازهای واکنش‌دهنده در معرض آلودگی محیط قرار نمی‌گیرند [۱۹].

با وجود نیاز به انرژی فعال‌سازی زیاد برای تبدیل مولکول‌های گازی به مولکول‌های تشکیل‌دهنده لایه، دمای معمول برای انجام فرآیند بیش از ۷۰۰°C است. چنین درجه حرارتی با بیشتر فرآیندهای ساخت میکروالکترونیک و الکترونیک نوری سازگار نیست و در نتیجه شیوه‌های کندوپاش و لایه‌نشانی به شیوه بخار شیمیایی با پلاسما افزایش یافته برای لایه‌نشانی لایه‌های نیتريد سيليكون در دمای پایین استفاده می‌شود. لایه‌نشانی به شیوه کندوپاش نسبت به دو شیوه دیگر مزایای زیادی از جمله لایه‌نشانی در دمای پایین‌تر، نرخ لایه‌نشانی بالا و قابلیت کنترل نسبت استوکیومتری لایه‌ها دارد. علاوه بر این موارد، سیستم کندوپاش در صنعت ساخت سلول‌های خورشیدی، هزینه کمتری دارد [۲۰، ۲۱].

در این مقاله، با استفاده از شیوه کندوپاش RF در محیط گاز آرگن و محیط گاز نیتروژن لایه‌های نازک نیتريد سيليكون لایه‌نشانی شده‌اند و شرایط بهینه با تغییر توان RF به‌دست آمده است.

۲- مراحل انجام لایه‌نشانی

در این مقاله، از دو نوع زیرلایه برای لایه‌نشانی استفاده شده است. از شیشه‌های نازک با ضخامت تقریبی ۱۵۰ μm برای بررسی شفافیت لایه و از زیرلایه‌های بس‌کریستال

سیلیکونی به مدت ۳۰ ثانیه در محلول HF ۱۰٪ قرار می‌گیرند. از سیستم کندوپاش RF و هدف سرامیکی Si_3N_4 (خریداری شده با خلوص ۹۹/۹۹) برای لایه‌نشانی استفاده شده است. پس از رسیدن فشار محفظه به میزان $10^{-6} \times 8 \text{ Torr}$ لایه‌نشانی لایه‌های نیتريد سیلیکون انجام می‌شود. برای لایه‌نشانی یک‌بار از پلاسمای آرگن و بار دیگر از پلاسمای نیتروژن (خلوص ۹۹/۹۹۹) استفاده شده و با کنترل آهنگ ورود گاز، فشار در حدود $10^{-3} \times 2/6 \text{ Torr}$ ثابت نگهداشته شده است. لایه‌نشانی لایه‌های نیتريد سیلیکون با تغییر توان RF در محدوده ۱۰۰-۵۰۰ وات و بدون گرمادهی زیرلایه صورت گرفته است. با توجه به زمان لایه‌نشانی و با اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها آهنگ لایه‌نشانی قابل محاسبه است. آهنگ لایه‌نشانی برحسب تغییر توان لایه‌نشانی برای نیتريد سیلیکون در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۲- بررسی خواص نوری لایه‌های نیتريد سیلیکون

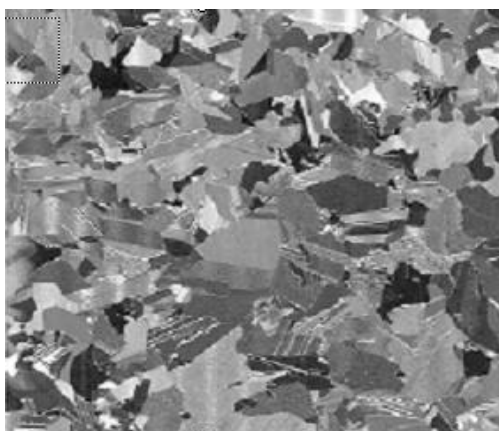
لایه‌های نیتريد سیلیکون با توان‌های متفاوت بر روی

سیلیکون n^+ با ضخامت تقریبی $300 \mu\text{m}$ (که پیش از لایه‌نشانی لایه اکسید روی آن با محلول HF ۱۰٪ زدوده شده) برای بررسی میزان بازتاب نور در سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. تصویری از این نوع ویفر با استفاده از میکروسکوپ نوری به اندازه $10 \times 10 \text{ cm}^2$ در شکل ۱a مشاهده می‌شود. نواحی کریستالی با جهت‌های متفاوت در شکل ۱b با استفاده از میکروسکوپ الکترونی SEM، شده‌اند.

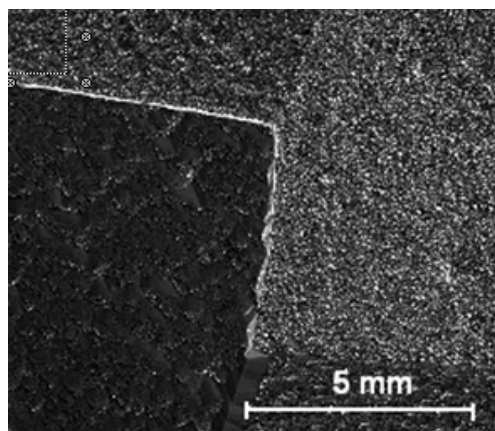
شکل ۲ تصویر SEM مربوط به نواحی مختلف ویفرهای بس کریستال سیلیکون را نشان می‌دهد، که با محلول قلیایی KOH بافت‌دار شده‌اند.

ساختارهای هرمی شکل بر روی سطح این ویفرها با استفاده از محلول KOH و ایزوپروپیل الکل، ایجاد شده است. با ایجاد چنین ساختارهایی، نوری که از روی سطح بازتابیده می‌شود، جمع‌آوری می‌شود و درون سلول به دام می‌افتد [۲۳، ۲۲].

قبل از لایه‌نشانی، زیرلایه‌ها با محلول شیمیایی RCA (آب یون‌زدایی شده DI، آمونیاک و پراکسید هیدروژن به نسبت ۵:۱:۱) تمیز می‌شوند و سپس برای زدودن اکسید سطح، ویفرهای



(a)

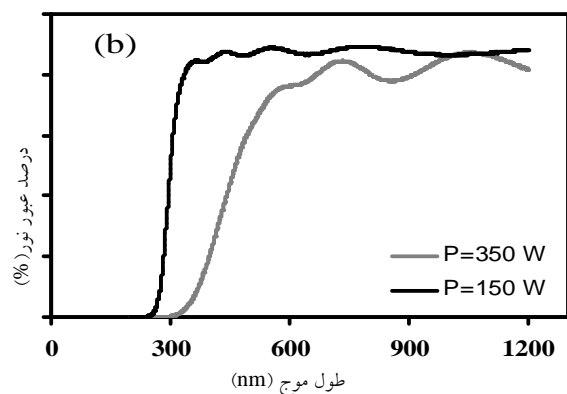
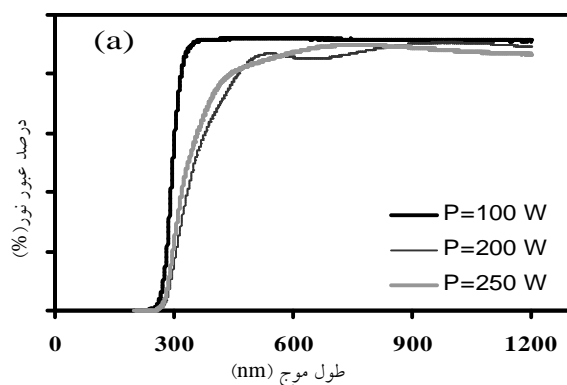


(b)

شکل ۱. (a) تصویر ویفر بس کریستال سیلیکون نوع n پس از بافت‌دار شدن، (b) نواحی کریستالی با جهت‌های متفاوت.

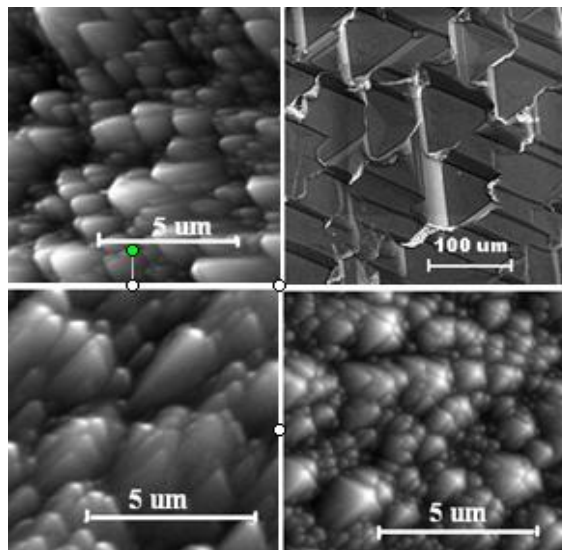
شکل a4 درصد عبور نوری این لایه ها را که با توان های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ وات و ضخامت 2000 \AA در محیط آرگن لایه نشانی شده اند، نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود، درصد عبور نور از لایه هایی که با توان ۱۰۰ وات لایه نشانی شده اند، در محدوده طول موج 300 nm تا 1200 nm در حدود ۹۲٪ است. این درصد عبور نور تقریباً با درصد عبور نور از شیشه های نازک برابر است.

در شکل b4 نمودار عبور لایه های نیتريد سيليكون که در

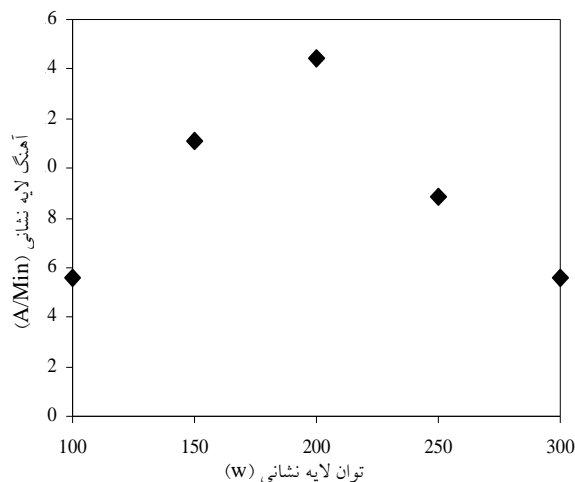


شکل 4. نمودار درصد عبور نوری از لایه های نیتريد سيليكون به ضخامت تقریبی (a) 2000 \AA و (b) 6000 \AA که با توان های مختلف در محیط آرگن بر روی شیشه لایه نشانی شده اند.

زیرلایه شیشه لایه نشانی شده اند و خواص نوری آنها به کمک آنالیز UV/VIS/IR بررسی شده است. لایه های نیتريد سيليكون با تغییر توان لایه نشانی خواص نوری متفاوتی از خود نشان می دهند.

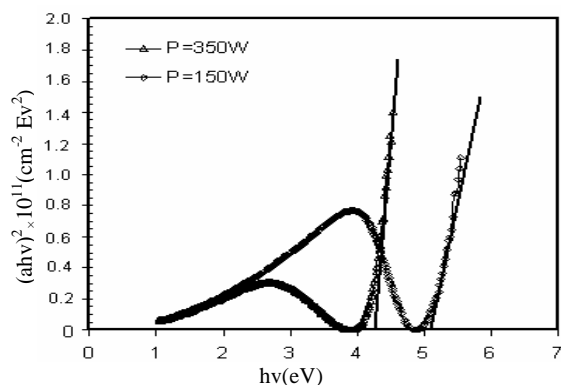
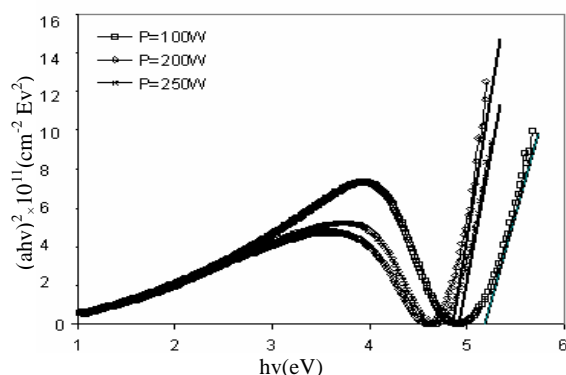


شکل ۲. تصویری از نواحی مختلف ویفر بس کریستال سیلیکون نوع n پس از بافت دارشدن.



شکل ۳. آهنگ لایه نشانی نیتريد سيليكون بر حسب توان لایه نشانی.

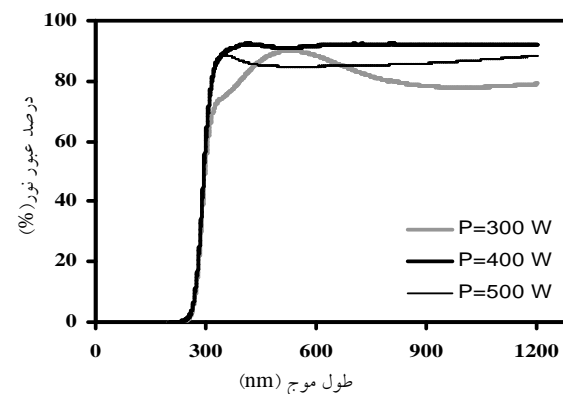
نیتريد سيليكون از طيف نوري آن و با استفاده از رابطه تاؤك $\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/n}$ به دست مي آيد [۲۴]. در اين رابطه α ضريب جذب، A عددي ثابت، $h\nu$ انرژی فوتون E_g باند ممنوع نوري است. توان α ، n مربوط به نوع گذار است که برای گذار مستقيم $1/2$ است. برای به دست آوردن باند ممنوع نوري لایه های نیتريد سيليكون، قسمت خطی نمودارهای $(ah\nu)^2$ امتداد می يابد تا محور $h\nu$ را در $\alpha=0$ قطع کنند. گاف انرژی برای لایه های نیتريد سيليكون که با توان های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ وات لایه نشانی شده اند به ترتيب $0.5/19$ eV، $0.8/15$ eV و $0.9/2eV$ به دست می آيد. شکل ۶b نیز نمودار α^2 را برحسب انرژی فوتون ها



شکل ۶. نمودار $(ah\nu)^2$ برحسب $h\nu$ برای تعیین باند ممنوع مستقيم لایه های نیتريد سيليكون که با توان های متفاوتی در محیط آرگن بر روی شیشه لایه نشانی شده اند.

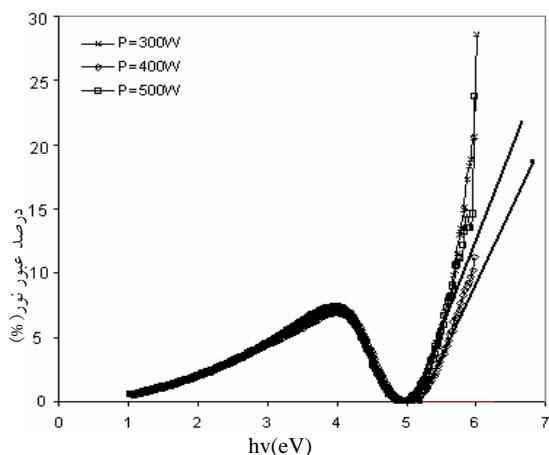
محیط آرگن با توان های ۱۵۰ و ۳۵۰ وات و ضخامت 6000 \AA لایه نشانی شده اند، مشاهده می شود. به طور کلی لایه های نیتريد سيليكونی که با توان ۱۰۰ تا ۱۵۰ وات در محیط گاز آرگن لایه نشانی شده اند، درصد عبور بالایی نشان می دهند و جذب پایه ای این لایه ها در طول موج های کمتر از 300 nm رخ می دهد. شکل ۵ نمودار عبور لایه های نیتريد سيليكونی را نشان می دهد که در محیط نیتروژن با توان های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات لایه نشانی شده اند. با توجه به این شکل لایه نیتريد سيليكونی که در توان ۴۰۰ وات لایه نشانی شده است، در محدوده طول موج های 300 nm تا 1200 nm درصد عبور نوري تقريباً 92% را نشان می دهد.

شکل ۶a نمودار α^2 (ضريب جذب لایه) برحسب انرژی فوتون ها ($h\nu$) برای لایه های نیتريد سيليكون را نشان می دهد که با توان های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ وات در محیط آرگن لایه نشانی شده اند. برای محاسبه α از رابطه $\alpha = (1/t) \ln [T/(1-R)^2]$ استفاده می شود که در آن ضخامت لایه نشانی شده، T درصد عبور و R میزان بازتاب از سطح است. باند ممنوع نوري لایه های

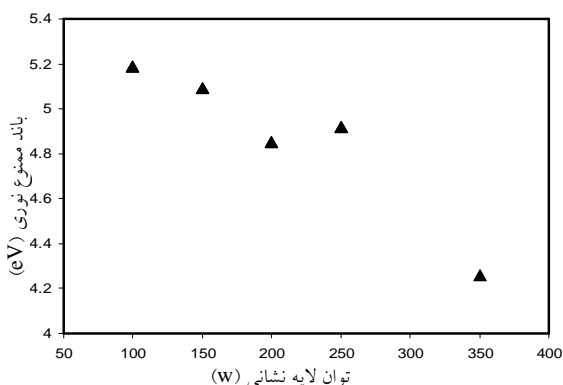


شکل ۵. نمودار درصد عبور نوري از لایه های نیتريد سيليكون به ضخامت تقريبی 2000 \AA که با توان های مختلف در محیط نیتروژن بر روی شیشه لایه نشانی شده اند.

لایه‌های نیتريد سليكون به عنوان پوشش ضد بازتاب در سلول‌های خورشیدی بس کریستال سليكون با استفاده از سیستم کندوپاش RF لایه‌نشانی شده‌اند. تأثیر توان RF خواص نوری این لایه‌ها بررسی شده است. لایه‌های نیتريد سليکونی که در محیط آرگن به ضخامت 2000 \AA و با توان ۱۰۰ تا ۱۵۰ وات



شکل ۷. نمودار $(ahv)^2$ برحسب hv برای تعیین باند ممنوع مستقیم لایه‌های نیتريد سليکون که با توان‌های متفاوتی در محیط نیتروژن لایه‌نشانی شده‌اند.



شکل ۸. تغییرات باند ممنوعه نوری بر حسب توان لایه‌نشانی برای لایه‌هایی که در محیط آرگن لایه‌نشانی شده‌اند.

($h\nu$) برای لایه‌هایی نشان می‌دهد که در توان‌های ۱۵۰ و ۳۵۰ وات در محیط آرگن لایه‌نشانی شده‌اند. با توجه به این نمودار انرژی باند ممنوع نوری برای لایه‌هایی که با توان‌های ۱۵۰ و ۳۵۰ وات لایه‌نشانی شده‌اند به ترتیب $5/09 \text{ eV}$ و $5/26 \text{ eV}$ است.

شکل ۷ نیز نمودار α را برحسب انرژی فوتون‌ها ($h\nu$) برای لایه‌هایی نشان می‌دهد که با توان‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات در محیط نیتروژن لایه‌نشانی شده‌اند. با توجه به این نمودار مقدار باند ممنوع نوری برای این لایه‌ها به ترتیب $5/09 \text{ eV}$ ، $5/26 \text{ eV}$ و $5/09 \text{ eV}$ به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش توان لایه‌نشانی برای لایه‌هایی که در محیط آرگن لایه‌نشانی شده‌اند، باند ممنوع نوری کاهش می‌یابد. با افزایش توان از ۱۰۰ تا ۱۵۰ وات باند ممنوع نوری به مقدار باند ممنوع نوری لایه نیتريد سليکون نزدیک می‌شود.

شکل ۹ درصد بازتاب نور از سطح زیرلایه‌های بس کریستال سليکون بافت‌دار شده، پس از لایه‌نشانی نیتريد سليکون را نشان می‌دهد. شکل ۹a مربوط به لایه‌های نیتريد سليکونی است که در محیط آرگن با توان ۱۵۰ وات لایه‌نشانی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از لایه‌نشانی لایه‌های نیتريد سليکون بازتاب سطح این سلول‌ها از حدود ۱۲٪ (به طور میانگین) به کمتر از ۲٪ کاهش می‌یابد. شکل ۹b مربوط به لایه‌های نیتريد سليکونی است که با توان ۴۰۰ وات در محیط نیتروژن لایه‌نشانی شده‌اند.

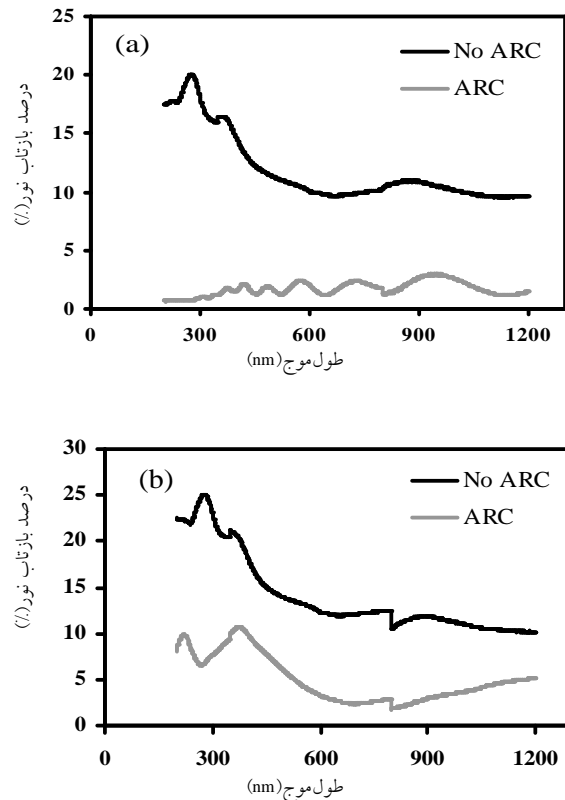
شکل ۱۰ طیف RBS مربوط به لایه‌های نیتريد سليکون را نشان می‌دهد که در محیط آرگن با توان ۱۵۰ وات لایه‌نشانی شده‌اند. براساس داده‌های به دست آمده نسبت نیتروژن و سليکون در این لایه به صورت $N=0/9$ و $Si=0/1$ است.

۳- نتیجه‌گیری

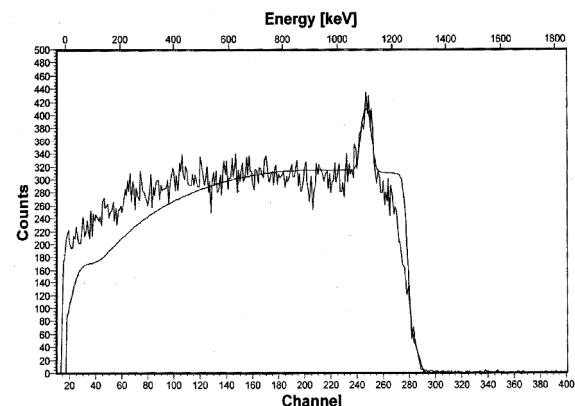
لایه‌نشانی شده‌اند، درصد عبور میانگینی در حدود ۹۲٪ (در حدود شفافیت شیشه‌های نازک) در طول موج‌های ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ nm را نشان می‌دهند. لایه‌های ضد بازتاب نیتريد سيليكون، بازتاب نور را از سطح سلول‌های مولتی کریستال سيليكون از ۱۲٪ به کمتر از ۲٪ کاهش می‌دهند. ترکیب لایه‌های مذکور به کمک آنالیز RBS بررسی شده و نسبت نیتروژن و سيليكون در این لایه‌ها به صورت $N=0.1$ و $Si=0.9$ است. به این ترتیب لایه‌هایی که در محیط آرگن و با توان ۱۰۰-۱۵۰ وات و لایه‌های نیتريد سيليكونی که در محیط نیتروژن با توان‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات لایه‌نشانی می‌شوند، باند ممنوع نوری در حدود باند ممنوعه نوری توده نیتريد سيليكون (۵eV) دارند. همچنین در توان‌های پایین (تا ۲۰۰ وات) آهنگ لایه‌نشانی افزایش می‌یابد و از آن به بعد افت خواهد داشت. پس می‌توان لایه‌هایی از نیتريد سيليكون را که در توان‌های پایین در محیط پلاسما آرگن و آهنگ لایه‌نشانی بالاتر، لایه‌نشانی می‌شوند، در مقایسه با لایه‌هایی که در محیط نیتروژن با توان بالاتری لایه‌نشانی می‌شوند، به عنوان لایه‌های بهینه معرفی کرد.

مراجع

1. Ulrich, S., Theel, T., Schwan, J. and Ehrhardt, H., "Magneton-Sputtered Super Hard Materials", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 97 (1997) 45-59.
2. Laidani, N., Capelletti, R., Elena, M. and et al., "Spectroscopic Characterization of Thermally Treated Carbon-Rich $Si_{1-x}C_x$ Films", *Thin Solid Films*, Vol. 223 (1993) 14.
3. Li, W. T., McKenzie, D., McFall, W. and Ziang, Q. C., "Effect of Sputtering-Gas Pressure on Properties of Silicon Nitride Films Produced by Helicon Plasma Sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 384 (2001) 46.
4. Ohring, M., *The Material Science of Thin Films*, Academic Press, (1992).
5. Powell, M. J., Easton, B. C. and Hill, O. F., "Amorphous Silicon-Silicon Nitride Thin-Film Transistors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 38 (1981) 794.
6. Chang, J. J., "Theory of MNOS Memory Transistor", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 24 (1977) 511-518.



شکل ۹. نمودار درصد بازتاب نور از لایه‌های نیتريد سيليكون که (a) با توان ۱۵۰ وات در محیط آرگن و (b) با توان ۵۰۰ وات در محیط نیتروژن بر روی زیرلایه‌های مولتی کریستال لایه‌نشانی شده‌اند.



شکل ۱۰. طیف RBS مربوط به لایه‌های نیتريد سيليكون که در محیط آرگن با توان ۱۵۰ وات لایه‌نشانی شده‌اند.

- Enhanced Chemical Vapor Deposition For Antireflection Coating”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 216 (1997) 77-82.
23. Jeon, Y. C., Lee, H. Y. and Joo, S. K., “IV Characteristics of Electron-Cyclotron-Resonance Plasma-Enhanced Chemical-Vapor-Deposition Silicon Nitride Thin Film”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 75 (1994) 979.
 24. Savall, C. and Bruyere, J. C., *Thin Solid Films*, Vol. 285 (1995) 1.
 25. Schmidt, J. F., Schuurmans, M., Sinke, W. C., Glunz, S. W. and Aberle, A. G., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71 (1997) 252.
 26. Lapeyrade, M., Besland, M. P., Mevaa, C., Sibai, A. and Hollinger, G., “Silicon Nitride Thin Films Deposited by Electron Cyclotron Resonance Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition”, *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 17 (1999) 433.
 27. Arnoldbik, M., Maree, C. H., Maas, A. J. and Van der Boogard, M. J., *Phys. Rev.*, Vol. B. 48 (1993) 5444.
 28. Löbl, H. P. L. and Huppertz, M., “Thermal Stability Of Nonstoichiometric Silicon Nitride Films Made By Reactive Dc Magnetron Sputter Deposition”, *Thin Solids Films*, Vol. 317 (1998) 153.
 29. Awan, S. A., Gould, R. D. and Gravano, S., “Electrical Conduction Processes in Silicon Nitride Thin Films Prepared by R. F. Magnetron Sputtering Using Nitrogen Gas”, *Thin Solids Films*, 335-356 (1999) 456-460.
 30. Soh, M. T. K., Musca, C. A. and Savvides, N., et al., “Evaluation of Plasma Deposited Silicon Nitride Thin Films for Microsystems Technology”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 14 (2005) 971-977.
 31. Vila, M., Martin-Gago, J. A., Mnoz-Martin, A., Prieto, C. and Miranzo, P., et al., “Compositional Characterization of Silicon Nitride Thin Films Prepared By RF-Sputtering”, *J. Vacuum*, Vol. 67 (2002) 513-518.
 32. Guruvanket, S., Ghatak, J., Satyam, P.V. and Mohan Rao, G., “Characterization of Bias Magnetron-Sputtered Silicon Nitride Films”, *Thin Solid Films*, Vol. 475 (2005) 256-260.
 33. Arndt, R.A., Allison, J.F., Hayson, J. G. and Meulenberg, A., *Proceedings of 11th IEEE International Photovoltaic Specialists Conference*, New York, (1975) 40.
 34. Verlinden, P., Evrard, O., Muzy, E. and Crahay, A., “The Surface Texturization of Solar Cells: A New Method using V-Grooves with Controllable Sidewall Angles”, *Sol Cells Sol Energy Mater*, Vol 71-78 Issue 26 (1992) 71-78.
 35. Bauer, J., *Phys. Statue Solidi*, Appl. Res., Vol. 39 (1977) 411.
 7. Standbery, B. J., Chen, W. S., Mickelson, R. A., Collins, G. J., Emery, K. A. and et al., *Solut. Cells*, Vol. 14 (1985) 289.
 8. Wright, D. N., Marstein, E. S. and Holt, A., “Double Layer Anti-Reflective Coating for Silicon Solar Cells”, *IEEE* (2005).
 9. Macdonald, D. H., Cuevas, A., Kerr, M. J., Samundsett, C. and Ruby, D., “Texturing Industrial Multicrystalline Silicon Solar Cells”, *Solar Energy* Vol. 76 (2004) 277-283.
 10. Richards, B. S., “Single-Material TiO₂ Double-Layer Antireflection Coatings”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 79 No. 3 (2003) 369-390.
 11. Martinet, C., Paillard, V., Gagnaire, A. and Joseph, J., “Deposition of SiO₂ and TiO₂ Thin Films by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition for Antireflection coating”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 216 (1997) 77-82.
 12. Theel, S. T., Schwan, J. and Ehrhardt, H., “Magnetron-Sputtered Super Hard Materials”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 97 (1997) 45-59.
 13. Laidani, N., Capelletti, R. and Elena, M., et al., “Spectroscopic Characterization of Thermally Treated Carbon-Rich Si_{1-x}C_x Films”, *Thin Solid Films*, Vol. 223 Issues 1-3 (1993) 14.
 14. Li, W. T., McKenzie, D., McFall, W. and Ziang, Q.-C., “Effect of Sputtering-Gas Pressure on Properties of Silicon Nitride Films Produced by Helicon Plasma Sputtering”, *Thin Solid Films*, Vol. 384 (2001) 46.
 15. Ohring, M., *Material Science of Thin Films*, Academic Press, (2002) 277-355.
 16. Powell, M. J., Easton, B. C. and Hill, O. F., “Amorphous Silicon-Silicon Nitride Thin-Film Transistors”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 38 (1981) 794.
 17. Chang, J. J., “Theory of MNOS Memory Transistor”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 24 (1977) 511-518.
 18. Standbery, B. J., Chen, W. S., Mickelson, R. A., Collins, G. J. and Emery, K. A., et al., *Solut. Cells*, Vol. 14 (1985) 289.
 19. Wright, D. N., Marstein, E. S. and Holt, A., “Double Layer Anti-Reflective Coating for Silicon Solar Cells”, *IEEE*, (2005).
 20. Macdonald, D. H., Cuevas, A. M., Kerr, J., Samundsett, C. and Ruby, D., “Texturing Industrial Multicrystalline Silicon Solar Cells”, *Solar Energy*, Vol. 76 (2004) 277-283.
 21. Richards, B. S., “Single-Material TiO₂ Double-Layer Antireflection Coatings”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 79 No. 3 (2003) 369-390.
 22. Martinet, C., Paillard, V., Gagnaire, A. and Joseph, J., “Deposition of SiO₂ and TiO₂ Thin Films By Plasma