

کاربرد فناوری پردازش لیزری ماده در تولید سلول‌های خورشیدی

داود عروجی^{۱*}، سوزان ذوالریاستین^۲

چکیده:

ادامه زندگی نوع بشر و همچنین تولیدات صنعتی که در خدمت بشریت هستند، بدون تأمین منابع انرژی غیر ممکن است. از مهمترین منابع انرژی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای هستند. اما این سوخت‌ها دارای دو مشکل عمده آلودگی محیط زیست و تجدیدنپذیری می‌باشند. تحت این شرایط، استفاده از سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک به عنوان یک منبع انرژی جایگزین، پاک و تجدیدپذیر به‌طور فزاینده‌ای رو به افزایش است.

از سوی دیگر، امروزه استفاده از پرتوهای لیزری با توجه به قابلیت و توانایی‌های این پرتوها در حوزه تولید و پردازش مواد، امری اجتناب ناپذیر است. یکی از این حوزه‌های مهم، حوزه انرژی‌های پاک و تولید و پردازش سلول‌های خورشیدی است.

در این مقاله، ابتدا به تشریح برخی از این روش‌های پردازش‌های لیزری در تولید سلول خورشیدی می‌پردازیم و سپس پیامدهای هر یک از این روش‌ها را بررسی می‌کنیم. نتیجه این بررسی‌ها حاکی از آن است که به‌طور کلی، بهره‌گیری از پردازش لیزری در تولید سلول‌های خورشیدی، علی‌رغم برخی کاستی‌ها، باعث افزایش بهره‌وری سلول خورشیدی و کاهش هزینه تولید می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، پردازش لیزری، بهره‌وری سلول خورشیدی

۱. مقدمه

گرفته است. به همین جهت، استفاده از منابع تجدیدپذیری مانند انرژی خورشیدی، آب، باد و غیره، امری ضروری است. البته علی‌رغم سرعت رو به افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم این انرژی‌ها در تأمین انرژی مورد نیاز در حال حاضر بسیار اندک است.

در هر حال، امروزه استفاده از سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک به عنوان یکی از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر به‌طور فزاینده‌ای رو به افزایش است. از عمده دلایل توجه به صنعت فتوولتائیک، می‌توان به مواردی همچون الف) عدم نیاز به سوخت فسیلی، ب) قابلیت تولید در محل مصرف و کاهش هزینه‌های انتقال و توزیع و پ) طول عمر مفید و مقرون به صرفه اشاره کرد. با توجه به استانداردهای بین‌المللی، اگر میانگین انرژی

ادامه زندگی نوع بشر و همچنین تولیدات صنعتی که در خدمت بشریت هستند، بدون تأمین منابع انرژی غیر ممکن است. سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای، از مهمترین منابع انرژی مورد استفاده هستند. اما با توجه به آلودگی زیست‌محیطی که این منابع به همراه دارند، تلاش‌های علمی فراوانی به‌منظور کم کردن وابستگی به آنها صورت

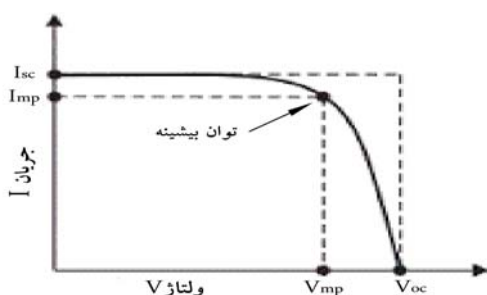
۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

dorujji@gmail.com

۲- استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه

آزاد اسلامی واحد تهران zoriasatain@gmail.com



شکل ۱. نمودار مشخصه جریان-ولتاژ در یک سامانه فتوولتاییک که در آن نقطه توان بیشینه نشان داده شده است [۵].

بازده نهایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی، η ، به عنوان نسبت ماکزیمم توان الکتریکی خروجی به توان نور فرودی تعریف می‌شود و از معادله زیر بدست می‌آید [۵ و ۸]:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (1)$$

که J_{sc} در آن چگالی فوتوجریان اندازه‌گیری شده در مدار کوتاه، V_{oc} ولتاژ مدار باز، FF ، عامل پرشدگی^۲ سلول و P_{in} شدت نور فرودی است به طوری که $FF \leq 1$ ، و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} J_{mp}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2)$$

که در آن $V_{mp} = V_m$ بر حسب (V) و $J_{mp} = J_m$ بر حسب (A/m^2) هستند.

به منظور افزایش بازده یک سلول، همه پارامترهای فتوولتاییک مانند (V_{oc} ، I_{sc} ، FF) می‌باید بیشینه باشند. قابل ذکر است که توان خروجی سلول‌های خورشیدی به عوامل محیطی مانند دما، زاویه تابش و شدت تابش وابسته است. با افزایش دما، توان خروجی و ولتاژ سلول-های خورشیدی، افت می‌کند، ولی جریان اتصال کوتاه

تابشی خورشید در روز بالاتر از ۳/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع باشد، استفاده از مبدل‌های انرژی خورشیدی، نظیر کلکتورهای خورشیدی یا سامانه‌های فتوولتاییک، از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. بنابراین، سرزمین ایران با متوسط انرژی تابشی خورشید در حدود ۴/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع شرایط بسیار مناسبی برای بهره‌گیری از سامانه‌های فتوولتاییک دارد [۴-۱]. از زمانی که فناوری لیزر شناخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است، صنعت فتوولتاییک نیز در تولید و افزایش بهره‌وری سلول‌های خورشیدی و حتی مونتاژ ماژول‌های پنل‌های خورشیدی از این فناوری مفید سود جسته است. سلول‌های خورشیدی که با استفاده از روش‌های پردازش لیزری ساخته می‌شوند، در مقایسه با روش‌های سنتی، راندمان بالاتر و قیمت کمتری دارند.

۲. سلول خورشیدی

سازوکار تبدیل انرژی نوری به انرژی الکتریکی را اثر فتوولتایی می‌گویند. مقدار جریانی که در سلول خورشیدی تولید می‌گردد، به طور مستقیم با شدت نور فرودی متناسب است، ولی اختلاف پتانسیل دو سر سلول به شدت نور وابسته نیست. بازده سلول‌های خورشیدی واقعی که به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند، حدود ۵٪ تا ۲۰٪ است. لذا افزایش بازده سلول‌ها یکی از مهمترین عرصه‌های تحقیق و توسعه در صنعت فتوولتاییک است.

سلول خورشیدی با توان خروجی ماکزیمم، متناظر با ولتاژ V_{mp} و جریان I_{mp} است (شکل ۱).

2) Fill Factor

1) mp: Maximum Power

مراحل پایانی، اضافه کردن صفحه شبکه‌ای فلزی به قسمت جلویی سلول جهت برقراری ارتباط الکتریکی با قسمت پشتی سلول است. اضافه کردن این شبکه فلزی و ریل‌های هادی، سطح فعال سلول را کاهش می‌دهد، همچنین امکان به وجود آمدن سایه روی سطح سلول وجود دارد که در هر دو صورت باعث کاهش بهره‌وری سلول و افزایش هزینه تولید می‌گردد [۲۷]. چنانچه بتوان ریل‌های هادی را در پشت سلول ایجاد نمود، بهره‌وری سلول افزایش می‌یابد. روش سوراخکاری لیزری که به دو صورت MWT^۱ و EWT^۲ می‌باشد این امکان را فراهم آورده است (شکل ۲).

در فناوری سوراخکاری لیزری به روش MWT، سوراخ‌هایی توسط لیزر در سطح سلول ایجاد می‌گردد که اتصال بین قسمت جلویی و پشتی سلول را برقرار می‌کند. سپس سطح داخلی این سوراخ‌ها توسط فلز آبرکاری می‌گردند. به این ترتیب، هر دو نیم‌رسانای p و n به قسمت پشتی سلول خورشیدی، متصل می‌شوند. بدین ترتیب با حذف اتصالات داخلی بین بخش جلو و پشت سلول، عامل پرشدگی افزایش می‌یابد و این امر به نوبه خود، افزایش بهره‌وری سلول خورشیدی را به دنبال دارد. همچنین، بهبود اتصال میان سلولی داخل ماژول‌ها و زیبا شدن سلول، از دیگر مزایای این فناوری هستند (شکل ۳).

در روش EWT سطح داخلی سوراخ‌ها در معرض فاز گازی فسفر بسیار گرم قرار گرفته و فرآیند پخش (نفوذ) فسفر در سطح داخلی سوراخ‌ها صورت می‌گیرد. به این ترتیب، سطح داخلی سوراخ‌ها از تراکم ناخالصی بالاتری برخوردار می‌شود که سبب افزایش رسانش آن می‌گردد (شکل ۴). به این ترتیب، سطح داخلی سوراخ‌ها به عنوان یک امیتر عمل می‌کند و لذا بهره‌وری سلول خورشیدی افزایش می‌یابد. این روش علاوه بر مزایای روش MWT،

افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش تابش خورشیدی، توان سلول، افزایش پیدا خواهد کرد. البته به دلیل نوع ساختار سلول‌ها، محدودیت‌هایی نیز در افزایش بهره‌وری آنها وجود دارد [۱۷-۱۵].

۳. فرآیندهای پردازش لیزری در تولید سلول -

های خورشیدی

پردازش لیزری در فرآیند تولید سلول‌های خورشیدی به صورت غیرتماسی انجام می‌شود. پرتوهای لیزر به دلیل خواصی مانند همدوسی، تکفامی، هم‌راستایی و نیز به علت پایدار بودن مشخصه‌ها (طول موج، شدت، زمان تپ و ...) در حوزه پردازش مواد منحصر به فرد هستند و می‌توانند به روش‌های متعدد در فرآیند تولید صنعتی سلول‌های خورشیدی به کار روند [۲۰-۱۸]. هر یک از این ویژگی‌ها می‌تواند در عملکرد پردازش لیزری بسیار مؤثر باشد. هنگام پردازش مواد با لیزر، می‌باید علاوه بر زمان پرتودهی و ویژگی‌های پرتوهای لیزر مورد استفاده، به خصوصیات ماده تحت پردازش نیز توجه نمود [۲۶-۲۱].

روش‌های پردازش لیزری سلول‌های خورشیدی را می‌توان در چند فرآیند اساسی سوراخکاری^۱، ایجاد شیار یا شکاف، عایق کاری لبه‌ها، ایجاد بافت و نهایتاً آرایش یا تغلیظ (اضافه کردن ناخالصی) طبقه‌بندی نمود. مطالعات نشان می‌دهند که سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری بیشترین نفع را از گسترش فناوری‌های لیزری برده‌اند. در ادامه به تشریح مختصر هر یک از این موارد می‌پردازیم.

۳-۱. سوراخکاری لیزری

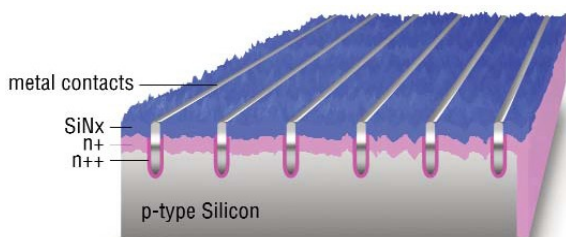
در روش تولید سلول خورشیدی به روش سنتی، یکی از

1) Metal Wrap Through (پوشش فلزی سراسری)

2) Emitter Wrap Through (پوشش سراسری امیتر)

3) Drilling

کاهش راندمان سلول خورشیدی می‌انجامد. فرآیند ایجاد اتصال شیاری دفنی به وسیله لیزر، به منظور کاهش اثرات سایه و افزایش سطح فعال سلول سیلیکونی بلوری در سلول خورشیدی به کار می‌رود. در این فرآیند، ریل‌های هادی را در شیارهای باریک و عمیقی که عمدتاً از طریق لیزر تپی ایجاد شده، قرار می‌دهند. عمق زیاد شیارها سبب بهبود اتصال می‌گردد، در حالی که به دلیل پهنای اندک شیارها، مساحت کوچکی از سطح جلویی سلول به اتصال اختصاص می‌یابد. این امر، افزایش سطح فعال و در نتیجه افزایش انرژی دریافتی توسط سلول و بهبود راندمان را در پی خواهد داشت (شکل ۵) [۲۸ و ۳۰].



شکل ۵. شکل طرح‌وار سلول با شیارهای دفنی [۲۸].

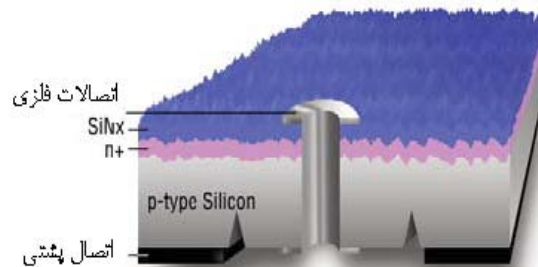
۳-۳. عایق کاری لبه‌ها^۲

در سلول‌های خورشیدی به منظور افزایش میزان انرژی جذب شده توسط سلول، روی سطح جلویی را با رسوب یک لایه ضد بازتاب می‌پوشانند. سپس سطح جلویی ویفر در معرض فاز گازی ناخالصی فسفر بسیار گرم قرار می‌گیرد. در نتیجه یک لایه نازک از ناخالصی فسفر به سطح جلویی سلول اضافه می‌گردد و بدین صورت ویفرهای نوع p به وسیله یک لایه خارجی نوع n، پوشیده می‌شوند. به این ترتیب پیوندگاه P-N تشکیل می‌گردد. اما در اینجا مسئله این است که لایه نازک آلاینده‌ها کل ویفر را پوشش می‌دهد و در نتیجه ممکن است سطوح جلویی و پشتی سلول را به هم متصل کرده و در عملکرد

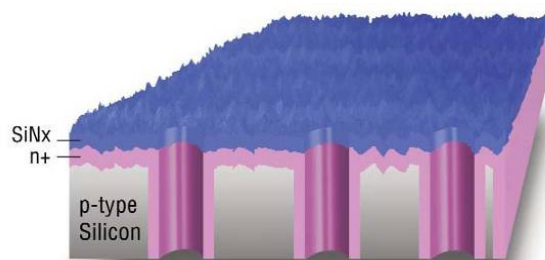
سبب تسهیل اتصال میان سلول‌های پشت-تماسی در داخل ماژول می‌گردد [۲۸ و ۲۹].



شکل ۲. ویفر سیلیکونی با ضخامت $200\ (\mu\text{m})$ با سوراخ‌هایی به قطر $50\text{--}60\ (\mu\text{m})$ سوراخ شده‌اند [۲۸].



شکل ۳. شکل طرح‌وار سلول MWT [۲۸].

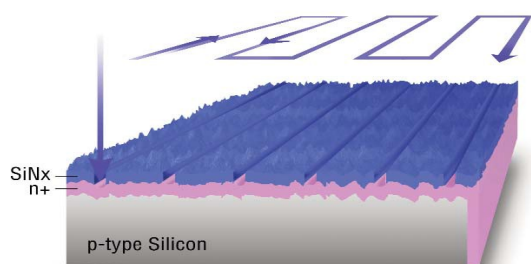


شکل ۴. شکل طرح‌وار سلول EWT [۲۸].

۳-۲. ایجاد اتصال شیاری دفنی به وسیله لیزر^۱
چنانکه پیش از این گفته شد، اضافه نمودن ریل‌های هادی به‌طور سنتی، با اشکالاتی همراه است که به

1) Laser Edge Isolation

3) Laser Grooved Buried Contacts



شکل ۶. بعد از رسوب لایه ضد بازتاب، سطح جلویی به وسیله لیزر اسکن شده و با توجه به الگوی شبکه‌ای قسمت جلویی سلول، لایه ضد بازتاب را از بین می برد [۲۸].

۳-۵. فناوری ایجاد بافت یکنواخت توسط لیزر^۱

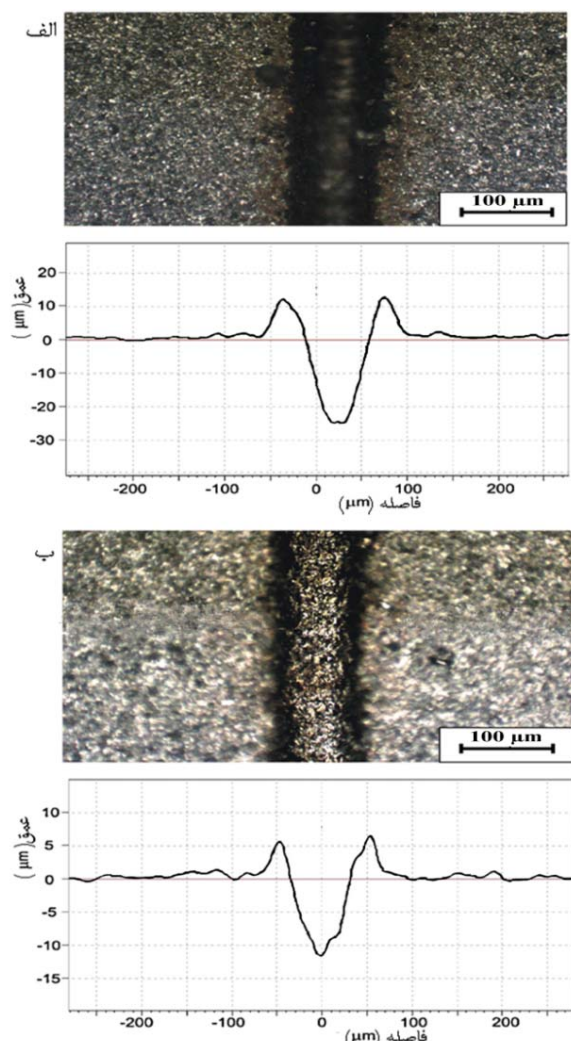
یکی از حیاتی‌ترین عوامل در افزایش جذب تابش خورشیدی، بافت سطح جلویی سلول است. امروزه عامل بافت سطح، در تولید سلول‌های خورشیدی تک‌بلوری به خوبی تحت کنترل درآمده است [۳۳]. اما این نوع سلول‌ها گران هستند. از زمانی که هزینه ساخت سلول چندبلوری در مقایسه با سلول تک‌بلوری، حدود دو برابر ارزان شده است، سهم سلول‌های چندبلوری در بازار رو به افزایش است. اما متأسفانه مشاهدات بلورگرافی نشان می‌دهند که در تولید این سلول‌ها، استفاده از روش‌های مرسوم شیمیایی و الکتریکی منجر به ایجاد یک بافت سطحی یکنواخت نمی‌گردد. از سوی دیگر، روش مکانیکی ایجاد بافت هم به علت آسیب‌های وارده به سلول (مانند ایجاد ترک و شکستگی سلول) رضایت‌بخش نیست. بنابراین نیاز به یک فرآیند مناسب که توانایی تولید یک لایه بافت منظم و یکدست را داشته باشد، واقعاً احساس می‌شود. خوشبختانه، روش ایجاد بافت به وسیله لیزر از این قابلیت برخوردار است و یک فناوری موثر در سلول‌های تک‌بلوری و چندبلوری است [۲۵ و ۳۴]. ویژگی‌های مختلف پرتوهای لیزر، مانند توان، مد، طول موج و مدت زمان تابش، روی بافت ایجاد شده اثر می‌گذارد.

سلول خورشیدی اختلال ایجاد نماید. برای قطع این اتصال، لبه‌های سلول تراش داده می‌شود (عایق کاری). با آنکه می‌توان این کار را به صورت مکانیکی، استفاده از جت‌آب، حکاکی شیمیایی و حکاکی پلاسمایی انجام داد، اما استفاده از لیزر در این زمینه مناسبتر است، زیرا از مزایایی نظیر سرعت بالای فرآیند، کاهش ضایعات و افزایش سطح فعال سلول، برخوردار است. همچنین تحقیقات نشان داده است که این فرآیند می‌تواند تا ۲/۴٪ راندمان سلول را افزایش دهد [۲۸ و ۳۱].

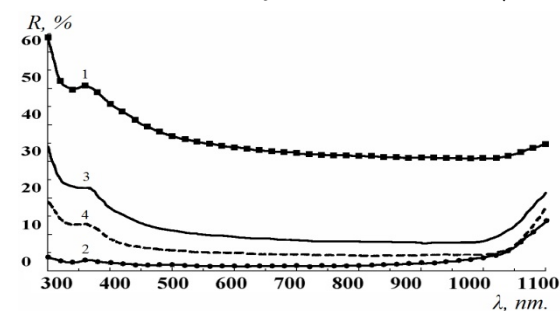
۳-۴. سایش لیزری لایه ضد بازتاب

یکی از روش‌های افزایش بهره سلول، به حداقل رساندن میزان بازتاب سطح جلویی سلول است. این عمل توسط اضافه کردن لایه‌هایی به عنوان لایه ضد بازتاب، با استفاده از نیتريد سیلیکون و به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها، سایش لیزری لایه ضد بازتاب است که روشی نوین، ساده و موثر برای چاپ ریل‌های هادی و اتصالات سطحی سلول خورشیدی است. بدین ترتیب که بعد از رسوب نیتريد سیلیکون، سطح جلویی سلول به وسیله لیزر اسکن می‌گردد و لایه ضد بازتاب را براساس الگویی که قرار است ریل‌های هادی و میله‌های اتصال اضافه شوند، می‌ساید.

سپس جهت تکمیل شدن فرآیند، ریل‌های هادی و میله‌های اتصال که از طریق چاپ صفحه‌ای اضافه شده‌اند، در کوره پخت می‌گردند. این عمل باعث اتصال مستقیم میله‌های اتصال با لایه n^+ می‌گردد و به این ترتیب اتصال الکتریکی با کیفیت بهتری برقرار می‌شود (شکل ۶) [۲۸ و ۲۹]. بیان این نکته ضروری است که دو مشخصه مهم پرتو لیزر یعنی طول موج و توان، در این فرآیند نقش اساسی دارند [۳۲].



شکل ۷. میکروگرافی نوری و ترسیم برش عرضی یک تک شیار با مشخصات (الف) $v = 20 \text{ mm/s}, f = 3 \text{ kHz}, \text{TEM}_{03}$ (ب) $v = 50 \text{ mm/s}, f = 3 \text{ kHz}, \text{TEM}_{03}$ [۳۳].



شکل ۸. بازتاب طیفی نمونه‌ها (۱) سلول mc-Si فاقد بافت (۲) سطحی که با لیزر دارای بافت شده است. (۳) سلول c-Si که با فرآیند شیمیایی دارای بافت شده است. (۴) سلول mc-Si که پس از مرحله اسیدشویی (به مدت ۵۵ دقیقه)، دارای بافت لیزری شده است [۳۶].

بررسی تجربی تأثیر مدهای مختلف پرتو لیزر بر کیفیت بافت سطحی بیانگر آن است که استفاده از مد پایه (با توجه به توان پایینی که دارد)، شیارهای باریکی با عمق کم ایجاد می‌نماید. در مدهای بالاتر، توان پرتوهای لیزر افزایش می‌یابد و بنابراین، استفاده از مدهای بالاتر باعث افزایش عمق و عرض شیارها می‌شود (شکل ۷). لذا جهت تولید یک بافت سطحی مناسب و دلخواه، رعایت تعادل بین مرتبه مد عرضی و توان موثر پرتو لیزر، بسیار مهم است [۳۳].

انواع مختلفی از بافت می‌تواند بر روی سطح سلول ایجاد شود که از آن جمله می‌توان به بافت‌هایی با سطح مقطع دایروی، مربعی، مستطیلی، مثلثی و همچنین بافت هرمی، هرمی وارونه و لانه زنبوری اشاره کرد. قابلیت هر یک از این بافت‌ها در به دام اندازی انرژی خورشیدی متفاوت است. به عنوان مثال، نتیجه آزمایشی که بر سطح سیلیکون چندبلوری به وسیله پرتو مستقیم لیزر (DiLaT) انجام شده است، نشان می‌دهد که بافت لانه زنبوری در مقایسه با بافت هرمی وارونه، قابلیت بهتری در تله‌اندازی نور دارد [۳۵].

همچنین استفاده از پرتوی لیزر با جریان تناوبی انرژی می‌تواند منجر به ایجاد بافت سطحی شود که بازتاب سطحی آن در حد قابل توجهی کاهش یافته است (شکل ۸) [۳۶ و ۳۷].

نتایج برخی از آزمایش‌ها نشان داده‌اند که طول موج پرتوهای لیزر نیز می‌تواند روی بافت سطح اثر بگذارد. به ازای طول موج‌های فرابنفش، بافت سطحی موج‌دار و بدون ترک بدست می‌آید و در صورت ادامه تابش لیزر، شکل‌های مخروطی با شیب تند تشکیل می‌شود. اما پرتوهای لیزر مادون قرمز، منجر به ایجاد بافت سطحی ترک‌دار می‌گردند [۳۸] و عیوب شبکه‌ای بیشتری نسبت به لیزرهای با طول موج کوتاه‌تر ایجاد می‌کنند [۳۹].

۳-۶. فناوری تغلیظ (آلایش) لیزری

سلول های خورشیدی استاندارد معمولاً یک روکش به نام امیتر سطحی دارند که دارای عمق و میزان آلایش مناسب برای تولید توان بهینه است. غلظت بالای ناخالصی ها در این ناحیه، از یک سو باعث افزایش مراکز بازترکیب و کاهش طول پخش حامل های اکثریت می گردد و از سوی دیگر، کاهش مقاومت اتصال بین میله های اتصال قسمت جلویی را سبب می شود. بنابراین، تراکم ناخالصی در ناحیه امیتر باید چندان زیاد نباشد که باعث کاهش مدت عمر حامل ها و کارکرد نامناسب سلول شود. لذا برای رفع مشکلات ناشی از میزان آلایش بالا، اخیراً از روش تغلیظ امیتر انتخابی توسط لیزر^۱ استفاده می شود که می تواند برای بهبود بخشیدن ساختار اتصال قسمت جلویی سلول نیز به کار رود. تطبیق پذیری بسیار بالای فرآیند تغلیظ لیزری، توانایی تغلیظ سلول های نوع n و p را ایجاد کرده است [۴۱ و ۴۰ و ۳۸].

امیتر انتخابی یک ناحیه کم عمق و به شدت آلاینده است که فقط در زیر اتصالات فلزی جلویی قرار دارد. تراکم بالا، مقاومت اتصال را کاهش می دهد و از آنجایی که این تراکم به ناحیه زیر اتصالات محدود است، تأثیر کمی در میزان جذب بقیه سلول دارد. بدین ترتیب، اثرات منفی مربوط به تراکم بالا به حداقل رسیده و راندمان سلول افزایش می یابد [۴۴-۴۲]. مراحل انجام فناوری تغلیظ لیزری امیتر انتخابی شامل اضافه کردن مواد ناخالصی از نوع n به ویفر و سپس سایش لایه ضد بازتاب است به طوری که یک منطقه امیتر کم عمق بسیار آلاینده (n) ⁺⁺ به وسیله لیزر ایجاد شود. در تغلیظ لیزری مواد زیرلایه ای به طور سریع ذوب شده و سپس منجمد می گردند. در خلال انجماد اتم های ناخالصی به هم می پیوندند. فرآیند تغلیظ با بسیاری از انواع پرتوهای لیزری قابل انجام است [۴۵]. افزودن ناخالصی می تواند از

راه های مختلف صورت گیرد، که از آن جمله می توان به روش های استفاده از منبع گازی (GILD)^۲، مایع و یا جامد اشاره کرد.

در فناوری فرآیند شیمیایی لیزری (LCP)^۳، یک جریان جت مایع که عرضی در حدود تار موی انسان دارد، از یک نازل مخصوص با فشار بالا، بر روی سطح سلول پمپ می شود. در ادامه پرتوی لیزر با این جریان مایع، جفت شده و به سوی سطح سلول هدایت می گردد. وقتی که لیزر به سطح سلول اصابت می کند، باعث ایجاد حرارت و ذوب سیلیکون و از بین بردن پوشش آن می گردد. در ادامه سیلیکون مذاب به وسیله ناخالصی هایی که همراه جریان جت مایع است، تغلیظ می گردد. با این روش می توان به راندمانی در حدود ۲۰٪ دست یافت.

همچنین فرآیند تغلیظ لیزری امیتر را می توان از طریق ذوب القایی لایه پیش رسوب ناخالصی ها (LIMPID)^۴ انجام داد. در این فرآیند، منبع ناخالصی به صورت یک لایه نازک در زیر سطح بستر قرار گرفته و از لیزر برای ذوب این لایه نازک و سطح بستر استفاده می گردد.

در روش تغلیظ لیزری می توان عمق پیوندگاه ها را در حد بسیار زیادی کاهش داد و به پیوندگاه های بسیار کم عمق دست یافت. با افزایش طول موج، عمق پیوندگاه نیز افزایش می یابد. استفاده از پرتوهای لیزر فرابنفش منجر به ایجاد پیوندگاه های با عمق صدها نانومتر می گردد و در صورت کاربرد لیزر سبز، به پیوندگاه هایی با عمق تقریبی یک میکرومتر دست می یابیم و در مورد لیزر فرورسرخ و فرورسرخ نزدیک نیز پیوندگاه های عمیق تری با عمق صدها میکرومتری حاصل می شود [۳۹]. در تغلیظ امیترهای کم عمق، پیوندگاه هایی با عمق کمتر یک میکرومتر مطلوب هستند.

2) Gas-Immersion Laser Doping
3) Laser Chemical Processing
4) Laser Induced Melting of Predeposited Impurity Doping

1) Laser Doping of Selective Emitter

نیز از این امر مستثنی نیستند. مزایایی چون حذف اتصال بین قسمت جلو و پشت سلول، ساده تر شدن اتصال بین سلولی ماژولها برای روشهای سوراخکاری لیزری، افزایش سطح فعال سلول و کاهش اثرات سایه برای روش اتصال شیاری دفنی، قابلیت تکرار بالا و کاهش ضایعات بی مصرف سیلیکون برای روش عایق-کاری لبه‌ها، ساده و سریع بودن فرایند و کاهش تلفات مقاومتی امیتر برای روش سایش لیزری لایه ضد بازتاب، کاهش بازتاب سطح سلول، کاهش آسیب‌های وارده به سطح سلول مانند ترک خوردگی، به دام اندازی بهتر نور و ایجاد یک بافت منظم برای روش ایجاد بافت توسط لیزر و تطبیق پذیری بسیار بالا، کاهش اثرات منفی مربوط به تراکم بالای حامل‌ها، کاهش عمق پیوندگاه‌ها، کاهش مقاومت اتصال بین فلز-سیلیکون، ایجاد حرارت موضعی توسط لیزر و امکان استفاده از ویفرهای با درجه خلوص پایین تر برای روش تغلیظ لیزری امیتر، از جمله مزایای استفاده از انواع فرایندهای پردازش لیزری هستند که در صنعت فتوولتاییک کاربرد دارند [۵۱-۲۷].

در روش‌های پردازش مبتنی بر لیزر ذکر این نکته ضروری است که پردازش لیزری ذاتاً، در بستر تغییر ایجاد می‌نماید و توانایی آسیب رساندن به عملکرد سلول را (در حد زیاد یا گاهی ناچیز) دارد. در برخی از کاربردها، آسیب‌ها از حد بحرانی کمتر هستند. اما به هر حال، آسیب سطحی از هر نوع، باعث ایجاد نقص در شبکه بلوری سیلیکون می‌گردد، به طوری که این محل‌های آسیب می‌توانند به عنوان مراکز باز ترکیب، کاهش قابل ملاحظه عمر حامل‌ها و راندمان سلول را در پی داشته باشند. بنابراین جلوگیری از آسیب‌های لیزر در حین انجام فرایندها از جمله ایجاد بافت و تغلیظ لیزری، مهم هستند [۵۲ و ۴۵]. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، یکی از این روش‌های پیش‌گیری، استفاده از پرتو خطی شکل^۲ [۵۳] (با یک توزیع شدت نوری

می‌توان از لیزر اکسایمر^۱ و لیزر تپی برای ایجاد ناخالصی استفاده کرد. نتیجه مقایسه بین این دو روش آن است که کاربرد لیزر تپی باعث افزایش بیشتر دما و رسانش حرارتی در بخش‌های عمیق تر سطح سیلیکونی سلول می‌شود [۴۶ و ۳۸].

حال که بطور مختصر با فناوری‌های مرتبط با پردازش لیزری سلول‌های خورشیدی آشنایی ایجاد شده است، می‌توان فرایندهای فوق را از نظر وضعیت آنها در صنعت فتوولتاییک به طریق زیر دسته بندی نمود:

الف) فناوری‌های عایق کاری لبه‌ها و ایجاد اتصال شیاری دفنی در مرحله بلوغ صنعتی،
 ب) فناوری‌های EMT، MWT، سایش لایه ضد بازتاب و تغلیظ در مرحله نیمه بلوغ و
 ج) فناوری ایجاد بافت یکنواخت، در مرحله تحقیق و توسعه قرار دارند [۴۸ و ۴۷].

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه گفته شد، آشکار است که استفاده از فناوری پردازش لیزری سبب بهبود قابل ملاحظه عملکرد سلول‌های خورشیدی می‌گردد و لذا کاربرد آن، امری اجتناب‌ناپذیر است. تولیدکنندگان و محققان توانسته‌اند با بهره‌گیری از انواع روش‌های پردازش لیزری، راندمان تولید خود را در سطوح آزمایشگاهی و تجاری، بالا ببرند و حتی در مواردی هزینه‌های تولید را کاهش دهند.

روش‌های پردازش مبتنی بر پرتوهای لیزر، فرایندی نوین است که هنوز به طور عمده در مرحله تحقیقاتی است. با این وجود برخی از آنها به روش‌های متداول در صنعت فتوولتاییک تبدیل شده‌اند. افزودن به مزایای یک فرایند و کاستن از معایب آن جزو جدایی‌ناپذیر چرخه تولید است. به همین دلیل فرایندهای پردازش لیزری

۱) ای است متشکل از دو مولکول یا اتم یکسان که، مجموعه Excimer (۱)
 فقط زمانی پایدار است که یکی از آنها در حالت برانگیخته باشد.

2) Line-shaped beam

۵. مراجع

- یکنواخت) است که سبب کاهش عمق نفوذ و تنش های حرارتی می گردد.
- شاید یکی از مهمترین مشکلات در صنعت فتوولتائیک، تهیه سیلیکون با خلوص بالا است که تقریباً نیمی از هزینه تولید سلول، مربوط به تولید ویفر سیلیکون است [۵۴]. لذا پیشنهاد می گردد از قابلیت ها و توانایی های پرتوهای لیزر در راستای تولید سیلیکون خالص استفاده گردد تا هزینه تولید سلول به طور قابل توجهی کاهش یابد.
- با توجه به گاف انرژی سیلیکون (eV) ۱/۱۱ و گالیم آرسناید (eV) ۱/۴۳ که از عناصر اصلی در تولید سلول های خورشیدی هستند، در روش های پردازش لیزری بهتر است از پرتوهای لیزری استفاده شود که طول موج تابشی آنها در محدوده ۸۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر باشند. زیرا با توجه به مشخصه های لیزر که قبلاً گفته شد، طول موج های بلندتر یا کوتاهتر، امکان تغییر ساختار در محل پردازش را دارند. همچنین با توجه به اینکه پرتوهای لیزر پارامترهای فرآیندی موثرتری در اختیار محققان قرار می دهد، می توان با تولید ماشین های مخصوص با قابلیت کنترل بالا و سرعت و دقت کافی، گامی مهم در کاهش هزینه های تولید سلول های خورشیدی برداشت.
- علی رغم محدودیت های ساختاری در افزایش بهره وری سلول های خورشیدی، می توان از طریق به کارگیری پردازش لیزری در چرخه تولید این سلول ها، از قسمت اعظمی از طیف انرژی خورشیدی استفاده کرد و اقدامی اساسی در تولید انرژی پاک و حفظ منابع انرژی برای نسل های بعدی و همچنین کاهش خطرات زیست محیطی انجام داد.
- [1] U.S Department of Energy, 2015 *Renewable Energy Data Book*, DOE/GO-102016-4904, Nov. 2016.
- [۲] کارشناس محمود، « انرژی خورشیدی قابل دسترس در ایران و مدل های پیش بینی کننده آن»، دانشگاه شیراز، ۱۳۷۷.
- [۳] صفایی بتول، خلجی اسدی مرتضی، تقی زاده حبیب، جیلایوی افسانه، طالقانی گیتی، دانش ماندانا، « برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن»، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۳.
- [۴] عابدینی یوسفعلی، « بررسی انرژی تابش خورشیدی و کاربردهای آن در ایران»، اولین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۰.
- [5] Soga, T., (Editor), *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion (Fundamentals of Solar Cell)*, Elsevier Science B.V., 2006.
- [۶] وورفل پیتر، « فیزیک سلول خورشیدی»، ترجمه مقبلی مصطفی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۹۳.
- [۷] اشکرافت نیل، مریم دیوید، « فیزیک ماده چگال»، جلد اول، مترجمین خانلری محمد رضا، پورقاضی اعظم، چاپ پنجم، تهران، دانش نگار، صفحه ۶۹-۴۱، ۱۳۹۳.
- [8] Fonash, J. S , *Solar Cell Device Physics, Second Edition*, USA, Elsevier Science B.V., 2010.
- [9] Hochbaum, I. Allon, Yang, P, *Semiconductor Nanowires for Energy*

خشک، سال پنجم، شماره ۱۹، صفحه ۶۹-۵۵،
۱۳۹۴.

Conversion, Chem. Rev.110, 2010, pp.
527-546

[17] Wolfe, M, *Efficiency in Solar Cells*,
Department of Physics and Astronomy,
Drexel University, 2013.

[۱۰] یانگ ادوارد اس، «مبانی قطعات نیم‌رسانا»،
ترجمه تجبر ناصر، چاپ سوم، تهران، مرکز نشر
دانشگاهی، صفحه ۱۸۸-۱۱، ۱۳۸۸.

[18] Carlson, D. E., *Laser Processing of
Solar Cells*, Carlson PV, 217 Yorkshire
Drive, Williamsburg, VA USA 23185-
3912, Updated 2012.

[۱۱] برجی اشکان، نیازی محمد، «بررسی و مدل
سازی سلول خورشیدی تحت تأثیر دما، زاویه تابش
و پارامترهای داخلی آن»، دومین همایش سراسری
محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، ۱۳۹۳.

[19] Brown, M, Arnold, C. B., *Fundamentals
of Laser-Material Interaction and
Application to Multiscale Surface
Modification*, In: eds. Sugioka, K, et al.,
Laser Precision Microfabrication,
Springer, Chapter 4, 2010.

[۱۲] ایجاد حسنی، حاجی‌زاده امین، «ردیابی حداکثر
توان خورشیدی بر پایه تقریبگر فازی تابع ولتاژ
نقطه کار با شدت تابش»، سامانه‌های هوشمند در
مهندسی برق، سال سوم، شماره دوم، ۱۳۹۱.

[20] A.R. Jha, *Solar Cell Technology and
Applications*, Auerbach Pub. Taylor &
Francis Group, 2010.

[۱۳] بهرامی الهه، عباسپورثانی کمال، «تعیین زاویه
بهینه آرایه‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی
کرج»، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۵، شماره ۲،
۱۳۹۱.

[21] Krane, Kenneth S., *Modern Physics*,
third edition, John Wiley & Sons Inc,
2012, pp.248-252.

[۲۲] سوولتو اوراسیو، «اصول لیزر»، ترجمه حریری
اکبر، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۹۰.

[۱۴] گزانه امید، بیگلری مجتبی، «ارزیابی ردیاب
خورشیدی و زاویه بهینه برای سامانه‌های
فتوولتاییک»، دهمین دوره همایش بین‌المللی
انرژی، تهران، ۱۳۹۴.

[۲۳] آقای امید، «لیزر به زبان ساده»، چاپ اول،
انتشارات فنی حسینیان، ۱۳۹۲.

[۱۵] رجایی معراج، مسکوب بهنوش، «ساختار انکساری
مبتنی بر لنز شبه فرزنل و روش ردیابی خورشید
جهت افزایش بازدهی پنل‌های فتوولتاییک»،
چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی گناباد، ۱۳۹۱.

[24] Weber, M. J., *Handbook of laser
wavelength*, CRC Press laser and optical
science and technology series, ISBN 0-
8493-3508-6, 1999.

[25] Wang, H-J, Cheng, H, Xie, K-W, Lu, F-
Y, Du, Y-C, *Applications of Laser
Precisely Processing Technology in
Solar Cells*, Optoelectronics letters,
Vol.3, No.5, 2007.

[۱۶] فیروز مجرد، فتح‌نیا امان‌الله، رجایی سعید، «
برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در
استان کرمانشاه»، مطالعات جغرافیایی مناطق

- [26] Fraas, L, Partain, L, (Edited by), *Solar Cells and Their Applications*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [27]Xakalashé, B.S, Tangstad, M, *Silicon processing from quartz to crystalline silicon solar cells*, Southern African Pyrometallurgy, 2011.
- [28]Manufacturing c-Si Solar Cells with Lasers, from:URL:http://www.spectra-physics.com/assets/client_files/files/documents.
- [29] Löffler, J, Wipliez, L, Soppe, W, Keijzer, M, Bosman, J, Lamers, M, Mewe, A, Weeber, A, Bennett, I, Jong, P, *Laser processing for advanced solar cells*, The 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Germany, 2010.
- [30] H.J. Booth, *Recent applications of pulsed lasers in advanced materials processing*, Elsevier Science B.V., DOI:10.1016/j.tsf.2003.11.130, 2003.
- [31]T. M, Pletzer, M, Thorel, S, Suckowl, B, Mayerl, J, van Mölkenl, A, Safieil, H, Windgassenl, R, Bleidiessel, H, Kurz, *Efficiency increase of lossy solar cells by laser post-processing and detailed analysis of the current-voltage characteristics*, Germany, 2011.
- [32] Schoonderbeek, A, Viktor Schutz, V, Oliver Haupt, O, Stute, U, *Laser Processing of Thin Films for Photovoltaic Applications*, JLMN Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 5, No. 3, 2010.
- [33] L.A. Dobrzański, A. Drygała, *Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cells*, Journal of Materials Processing Technology 191, 2007, pp. 228-231
- [34]Abbott, M, Cotter, J, *Optical and Electrical Properties of Laser Texturing for High-efficiency Solar Cells*, Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [35]Zielke, D, Sylla, D, Neubert, T, Brendel, R, Schmidt, J, *Direct Laser Texturing for High-Efficiency Silicon Solar Cells*, IEEE Journal of photovoltaics, 2012.
- [36] Zuev, D. A., Novodvorsky, O. A., Lotin, A. A., Shorokhova, A. V., Khramova, O. D., Untila, G. G., et al, *Application of laser texturing method for mc-Si solar cells fabrication*, Advanced Laser Technologies, Switzerland, 2012.
- [37] Zuev, D. A, Lotin, A. A, Novodvorsky, O. A, Shorokhova, A. V, Khramova, O. D, *Application of Lasers in Solar Cell Technologies*, ISSN 1062_8738, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, Vol. 76, No.10, 2012, pp. 1119–1122.
- [38]Jillian J. W, *Characterization and Optimization of Laser-Doped Selective Emitters for application Solar Cells*, The Pennsylvania State University, 2011.
- [39]Oesterlin, P, Büchel, A, *Increasing photovoltaic efficiency*, <http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/increasing-photovoltaic-efficiency-100001819/209/#ixzz4A3gU2sDg>.
- [40]Young, R.T, Wood, R.F, Jellison, G.E, Jr., Christie, W.H, *Laser Processing for High Efficiency Solar Cells*, Solid State Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37830, W, Palz(ed), Photovoltaic Solar Energy Conference, Brussels and Luxemborg, 1981.
- [41] Meseth, M, Lamine, K, Dehnen, M,

- Kayser, S, Brock, W, Behrenberg, D, et al, *Laser-Doping of Crystalline Silicon Substrates using Doped Silicon Nanoparticles*, University of Duisburg-Essen, Germany, 2012.
- [42] Masmitja, G, Ortega, P, Martín, I, López, G, Voz, C, Alcubilla, R, *IBC c-Si(n) solar cells based on laser doping processing for selective emitter and base contact formation*, 6th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV, 2016.
- [43] Tomizawa, Y, Ikeda, Y, Shiro, T, *Development of n-type selective emitter silicon solar cells by laser doping using boron-doped silicon paste*, 6th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV, 2016.
- [44] Sugianto, A, Bovatsek, J, Wenham, S, Budi, T, Xu, G, Yao, Y, et al, *18.5% Laser-Doped Solar Cell on CZ P-Type Silicon*, Published at the IEEE 35th PVSC Conference, 2010.
- [45] Trusheim, D, Schulz-Ruhtenberg, M, Baier, T, Krantz, S, Bauer, D, Das, J, *Investigation of the Influence of Pulse Duration in Laser Processes for Solar Cells*, Physics Procedia 12, 2011, pp. 278–285.
- [46] Arnold, C. B., Aziz, M. J., Stoichiometry issues in pulsed-laser deposition of alloys grown from multicomponent targets, Appl. Phys. A69 [Suppl.], 1999, pp. 23-27.
- [47] Niyibizi, A, Ikua, B. W., Kioni, P. N., Kihato, P. K. , *Laser Material Processing in Crystalline Silicon Photovoltaics*, ISSN 2079-6226: Proceedings of the 2012 Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation, Volume 4, 2012.
- [48] Booth, H, *Laser Processing in Industrial Solar Module Manufacturing*, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 5, No. 3, 2010.
- [49] weber, k, *Laser Doping Using Laser Chemical Processing Technology for Advanced Silicon solar Cells*, The Australian National University, 2014.
- [50] Duran, C, Eisele, S. J., Buck, T., Kopecek, R., Köhler, J. R., Werner, J. H., *Bifacial Solar Cells with Selective B-BSF by Laser Doping*, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany, 2009.
- [51] Dahlinger, M, Bazer-Bachi, B, Röder, T. C., Köhler, J. R., Zapf-Gottwick, R, Werner, J. H., *Laser-Doped Back-Contact Solar Cells* , IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5, NO. 3, 2015.
- [52] Barhdadi, A, Hartiti, B, Muller, J-C, *Active Defects Generated in Silicon by Laser Doping Process*, The African Review of Physics 6:0027, 2011.
- [53] Wang, C-Y., Tan, Q-C. , Guo, R-H., *Design and Optimization of a linear laser beam*, Lasers in Eng., Vol. 27, 2014.
- [54] Goetzberger, A, Luther , J, Willeke, G, *Solar cells past, present, future*, Solar Energy Materials & Solar Cells 74, 2002, pp. 1–11.