



УДК 621.785.369

Д. Н. Редька, В. А. Парфенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Лазерная микрообработка в производстве тонкопленочных солнечных модулей

Представлен обзор лазерных технологий, применяемых в производстве солнечных модулей. Основное внимание уделено рассмотрению технологии лазерной микрообработки, используемой в производстве многокаскадных тонкопленочных солнечных модулей большой площади на основе аморфного и гидрогенизированного кремния.

Тонкопленочные солнечные модули, лазерная микрообработка, лазерный отжиг, лазерное скрайбирование, лазерное структурирование

Одной из наиболее динамично развивающихся областей электроники в последние годы становится фотовольтаика [1]. Вызвано это в первую очередь тем, что человечество, ввиду истощения ископаемых энергетических ресурсов, возлагает большие надежды на возобновляемые источники энергии, одним из которых является солнечная энергетика.

В настоящее время двумя основными областями применения лазеров при создании фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) являются:

1. Лазерное скрайбирование [2].

2. Лазерное структурирование (отжиг) поверхности светочувствительных элементов ФЭП [3].

Применение лазеров в перечисленных областях имеет ряд существенных достоинств по сравнению с другими видами обработки ФЭП:

- возможность качественной обработки изделий малых размеров;
- отсутствие механического контакта, приводящего к деформации структуры изделий;
- высокий уровень контроля технологического процесса при минимальном термическом воздействии;
- очень высокая точность позиционирования при обработке (десятки–сотни микрон);
- возможность обработки изделий сложной формы.

Одной из основных областей применения лазеров в производстве солнечных элементов является разметка и структурирование тонкопленоч-

ных солнечных модулей (ТПСМ), которая проводится для токопроводящих слоев, толщина которых составляет сотни нанометров [1]. Данный тип фотопреобразователей активно развивался в последние годы, так как активные слои ТПСМ имеют толщины всего в несколько микрон, что позволяет значительно снизить себестоимость ФЭП [4]. Пример использования лазерного скрайбирования в производстве тонкопленочного солнечного модуля на основе кремния при помощи лазерного скрайбирования представлен на рис. 1 [2].

Основными задачами структурирования ТПСМ являются: разделение генерирующих ячеек и их последующая коммутация с целью увеличения выходного напряжения за счет последовательного соединения отдельных элементов. Поскольку раздельные дорожки, формируемые при структурировании модулей, уменьшают эффективную площадь преобразователя энергии, становится актуальным вопрос об оптимизации ширины реза в пленках токопроводящих материалов. В полной мере решение этой задачи относится и к операции лазерного скрайбирования ТПСМ, которая имеет определенную специфику в зависимости от технологии производства модулей.

Основным отличием ТПСМ друг от друга является применение в их производстве различных материалов, что позволяет подразделить технологии создания модулей на три основные группы [1]:

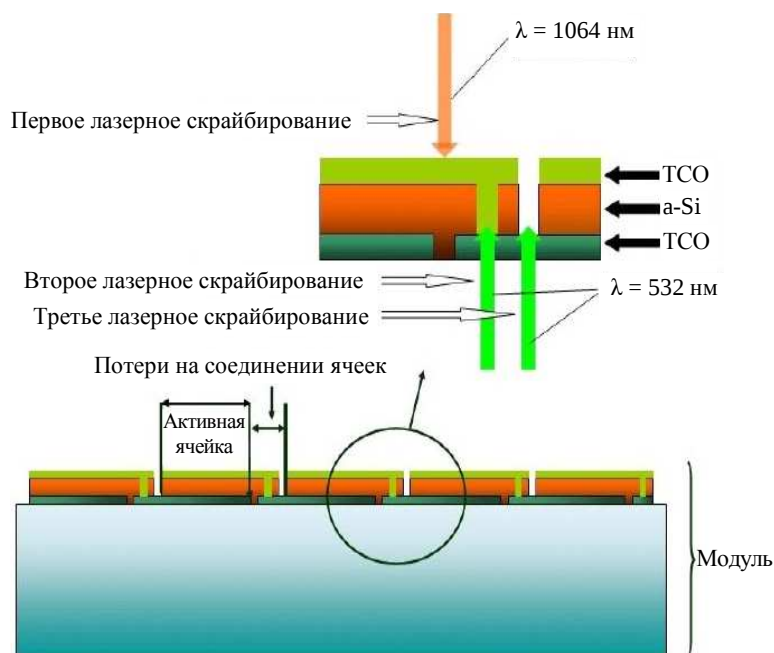


Рис. 1

- тонкопленочная нанотехнология CdTe;
- тонкопленочная технология CIGS (Copper-Indium-Gallium-Diselenide);
- тонкопленочная технология a-Si.

В зависимости от технологии создания ТПСМ, лазерное скрайбирование токопроводящих слоев модулей может осуществляться по-разному. В одном случае последовательно чередуются нанесение и лазерное структурирование слоев токопроводящих и фотопреобразующих (активных) материалов модуля (такая технология характерна для создания ТПСМ из аморфного кремния [1]). В другом случае лазерное структурирование осуществляется уже после нанесения всех слоев (такой подход обычно используется при работе с металлическими или полимерными подложками) [5].

В зависимости от вида материала основы, на которой формируются солнечные модули, можно выделить солнечные модули на металлической, полимерной и стеклянной подложках. Во всех случаях используется одна и та же технология создания фотоактивных структур, однако с практической точки зрения наибольший интерес представляет формирование ФЭП на полимерной основе, так как такие устройства имеют существенно меньшую массу и легко монтируются фактически на любой поверхности. Это связано с тем, что они могут повторять форму поверхности подложки, а благодаря малой массе отпадает необходимость в усилении несущих конструкций. Подобная технология может найти применение при создании специальной ткани со

сформированным фотоэлектрическим преобразователем, которая может быть использована при изготовлении различных изделий (от предметов одежды до сложной техники) [6].

Одной из важных задач при разработке современных вариантов конструкции кристаллических фотоэлементов является снижение так называемого теневого эффекта из-за выступающей над поверхностью подложки системы контактов. Для решения этой задачи контакты можно заглублять в поверхность подложки или убирать на заднюю поверхность фотоэлемента. В обоих случаях необходимо создавать строго контролируемые по геометрическим параметрам канавки или прошивать огромное число отверстий в подложке. И то и другое может быть наиболее эффективно сделано при помощи лазерной обработки [5].

Как один из возможных вариантов, разрабатывается технология, предусматривающая использование в качестве основы пластиковой подложки, а в качестве рабочего слоя – аморфного полупроводника. На обе стороны гибкой пластиковой подложки наносятся слои металлов, один из которых – металлический электрод, а другой – задний электрод. Эти слои предотвращают газовыделение из подложки и предохраняют слои полупроводников от деградации. Лазерное структурирование по обеим сторонам подложки позволяет сформировать отдельные элементы, последовательно соединенные между собой. Формирование солнечных модулей на гибкой подложке возможно с использованием рулонной технологии [4].

Во всех видах солнечных модулей, помимо эффективности преобразования энергии излучения в электричество самим материалом модуля, важную роль играет структурирование поверхности модуля – создание развитой морфологии поверхности фотопреобразующего материала, направленно изменяющей ее технические свойства. Одним из принципиально новых применений лазеров в производстве ТПСМ является технология поверхностного структурирования проводящих слоев, позволяющая изменять фотоэлектрические свойства материалов. Размеры элементов таких структур обычно составляют несколько микрометров [7]. Пример изменения морфологии поверхности после лазерного отжига представлен на рис. 2, где *а* – пикосекундная абляция; *б* – пикосекундная абляция + наносекундный отжиг [3].

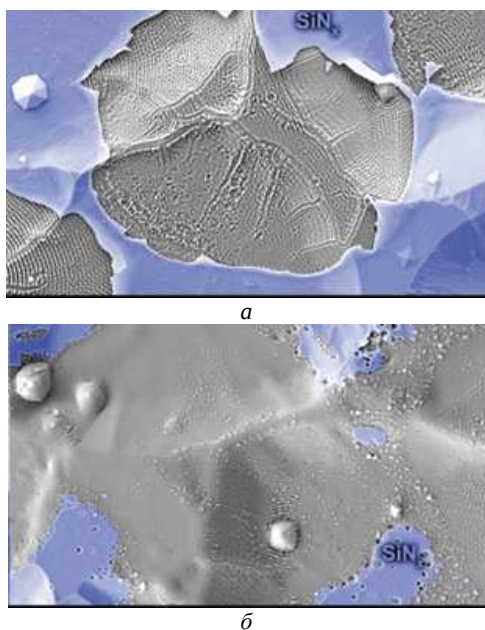


Рис. 2

Одним из примеров таких работ является получение так называемого черного кремния [8] путем облучения стандартного кремния фемтосекундными лазерными импульсами в серосодержащей атмосфере. При этом кремний абсорбирует молекулы серы, в результате чего материал приобретает характерный черный цвет. В обычных кремниевых фотоэлементах инфракрасная составляющая падающего на них излучения не обладает энергией, достаточной для возбуждения электронов в зоне проводимости, что необходимо для генерации электрической энергии. Однако с включением молекул серы в атомной решетке кремния формируется средний энергетический уровень, который позволяет осуществить перевод электронов в зону проводимости [8].

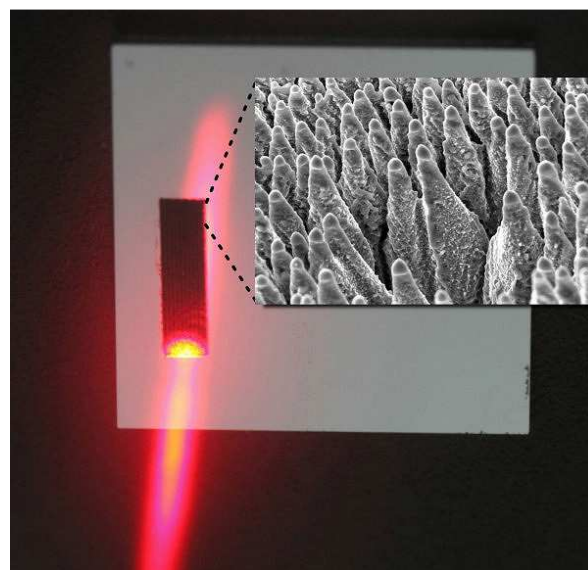


Рис. 3

После обработки фемтосекундными лазерными импульсами поверхность фотоэлемента становится неоднородной: конусообразные возвышения снижают вероятность отражения света и потери его энергии (рис. 3) [8].

Отдельным направлением научных исследований в области применения лазеров в фотовольтаике является лазерный отжиг пленок, входящих в состав ФЭП (рис. 4, где *а* – лазерное скрайбирование пленки; *б* – лазерный отжиг). В [9]–[11] указывается на реконфигурацию связи и структуры SiC:H-пленок после лазерной обработки по сравнению с первоначально осажденными пленками. Структура пленок изменяется от аморфной фазы в смешанные фазы кремния и аморфного карбида кремния. Изменение структуры пленок вызывает изменение механизма проводимости. В результате при комнатной температуре темновая проводимость облученных пленок составляет около $10^{-7} \dots 10^{-6}$ См/см, что на 6–7 порядков больше, чем у исходных пленок. Лазерное облучение пленок позволяет не только получить широкозонные структуры с высокой проводимостью, но и избежать повреждений подложек, встречающихся при обычном термическом отжиге.

Важно отметить, что помимо разработки новых технологий для производства солнечных модулей большое внимание уделяется также оптимизации уже существующих режимов обработки (включая выбор оптимального уровня мощности излучения, длительности воздействия, частоты следования импульсов, фокусировки излучения) с целью улучшения качества обработки. Для производства ТПСМ это открывает дополнительные

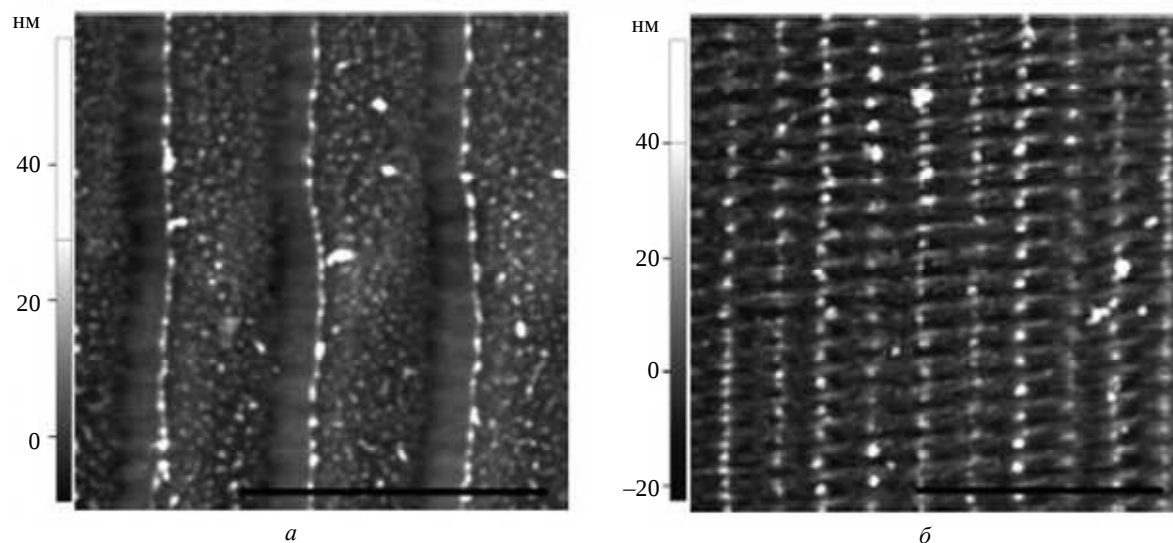


Рис. 4

возможности совершенствования производственного процесса, так как за счет изменения режимов лазерной обработки можно повысить эффективности преобразования солнечной энергии.

Для достижения данной цели необходим анализ физических процессов лазерной микрообработки [12], выбор лазеров, расчет параметров лазерного излучения и выбор методик контроля качества лазерного скрайбирования.

Вопросам оптимизации применения лазерных технологических процессов в настоящее время уделяется пристальное внимание как со стороны исследователей, так и производителей.

В работах авторов статьи основное внимание уделялось оптимизации выходных параметров лазеров для устранения возможных дефектов токопроводящих соединений (разрывов, шунтирования и т. д.), возникающих в результате обработки. В результате были получены значения фокусировки и мощности импульсов лазерного излучения, обработка с применением которых способна обеспечить получение резов правильной геометрической формы, геометрические размеры которых практически не зависят от неравномерности толщины осажденного на стеклянной подложке токопроводящего слоя (с погрешностью 0.5 мкм), с минимальным количеством сколов и отсутствием шунтирующих элементов. Готовый тонкопленочный ТПСМ, полученный с использованием оптимальных параметров лазерного излучения при микрообработке, имеет меньшее число шунтирующих элементов и больший выходной ток за счет уменьшения площади, занимаемой лазерной разметкой (по сравнению с типовыми ТПСМ, производимыми по тонкопленочной технологии) [13].

Также авторами было экспериментально исследовано влияние лазерного отжига на электрические и оптические свойства пленок оксида цинка (ZnO), нанесенных на стеклянную подложку методом плазмохимического осаждения при пониженном давлении LPCVD. С помощью эллипсометра, мультиметра, спектрофотометра были предварительно исследованы такие параметры образца, как толщина, поверхностное сопротивление, пропускание и Haze-фактор.

Пленки обрабатывались излучением с длиной волны 355 нм с мощностью 40...200 мВт. Структура пленок исследовалась методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Оптические исследования показали, что лазерный отжиг пленок ZnO позволяет управлять электрическими и оптическими свойствами материала. Возможно уменьшение поверхностного сопротивления и увеличение светорассеяния, что положительно влияет на эффективность работы ФЭП. Выявлено, что увеличение светорассеяния обусловлено аморфизацией кристаллитов пленки оксида цинка [14].

Ряд работ других авторов, выполненных в последние годы, посвящен исследованию возможности применения ультракоротких импульсов [15], [16], а также управления пространственным распределением светового поля в поперечном сечении пучка в целях оптимизации геометрии реза [17].

Так, например, в [18] исследуются возможности лазерной абляции тонких пленок при помощи лазерного излучения пикосекундной длительности. Преимущества лазерной микрообработки пленок импульсами пикосекундной длительности

продемонстрированы на примере фотоэлементов из a-Si, а также CIGS солнечных элементов на гибких подложках. Ультракороткие лазерные импульсы обеспечивают высокую скорость ввода энергии в материал, поэтому возможно осуществить испарение или отслаивание слоев проводящего материала, не оказывая влияния на материал подложки. Выбор подходящей длины волны лазера при этом помогает поддерживать накопление энергии в строго ограниченном объеме на границе раздела слоев, и это может быть использовано для достижения селективного удаления слоев даже в случае облучения со стороны проводящего слоя, например, для производства солнечных батарей на гибких подложках.

Геометрическое преобразование и иные способы гомогенизации лазерного пучка представляют интерес для оптимизации различных методов лазерной обработки, в том числе для исследований механизмов взаимодействия лазерного излучения с материалами. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) играют важную роль в обеспечении процесса формирования лазерного

луча. В [17] показана возможность формирования светового поля лазерного луча с использованием ДОЭ компании-производителя TOPAG Lasertechnik GmbH (Германия). Гауссов пучок был преобразован в пучок квадратной формы с плоской вершиной профиля интенсивности в фокальной плоскости объектива. Сформированный таким образом лазерный луч применялся для прямой лазерной абляции металлической пленки на стеклянной подложке, а также сверления микроотверстий в кремниевой пластине, скрайбирования тонкопленочных солнечных элементов и других видов обработки материалов. Этот метод позволил значительно улучшить качество лазерной обработки материалов.

Представленный в статье краткий обзор применения лазеров в производстве солнечных модулей показывает значительные возможности оптимизации технологии их производства за счет использования лазерной обработки. Это открывает перспективы повышения эффективности работы и снижения себестоимости элементов солнечной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.
2. Scribing of ITO coatings using a Q-switched Nd:YAG laser / Siu Chung Tam, Yihong Chen, Hong Yu Zheng, W. L. Chen // Singapore: Microelectronic Packaging and Laser Processing. 1997. P. 186.
3. Nanosecond laser annealing to decrease the damage of picosecond laser ablation of anti-reflection layers on textured silicon surfaces / Andreas Arnold Brand*a, Annerose Knorza, Ralf Zeidler, Jan-Frederik Nekardaa, Ralf Preua. Laser Material Processing for Solar Energy, edited by Edward W. Reutzel // Proc. of SPIE. San Diego, California, USA. 2012. Vol. 8473, 84730D. P. 1–10.
4. Schubert Markus B., Werner Jürgen H. Flexible solar cells for clothing // Materials Today. Texas, Georgia, USA. June 2006. Vol. 9, iss. 6. P. 42–50.
5. Сапрыкин Д. Л. Лазеры в производстве солнечных элементов // Ритм машиностроения. М., 2010. № 2. С. 14–16.
6. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells / R. Søndergaard, M. Hösel, D. Angmoet, L. -O. Thue Trofod, F. C. Krebs // Materials Today. Texas, Georgia, USA. 2012. Vol. 15, № 1–2. P. 36–49.
7. Сайт производителя TRUMPF. URL: <http://www.ru.trumpf.com/ru/produkcija/lazery/tehnologicheskiereshenija/oblasti-primenenija/mikroobrabotka.html> (дата обращения 17. 05. 2016).
8. Kontermann S. Solar cells made from black silicon // Fraunhofer Research News. Munich, Germany, 2012. Vol. 10. P. 5–6.
9. Crystallization of hydrogenated amorphous silicon-carbon films by means of laser treatments / G. Ambrosone, U. Coscia, S. Lettieri, P. Maddalena, C. Minarini, V. Parisi, S. Schutzmann // Appl. Surf. Sci. Breda, Netherlands. 2005. Vol. 247, № 1–4. P. 471–476.
10. Ultrathin amorphous Si layer formation by femtosecond laser pulse irradiation / Y. Izawa, Y. Izawa, Y. Setsuhara, M. Hashida, M. Fujita, R. Sasaki, H. Nagai, M. Yoshida // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90, № 4. P. 044107.
11. Properites of hydrogenated amorphous silicon carbide films irradiated by excimer pulse laser / Wang Li, Ma Tian-fu, Huang Xin-fan, Xu Jun, Li Qi-liang, Wu Zhuang-chun, Chen Kun-ji // Acta Physica Sinica (Overseas Edition) 1998. Vol. 7, № 12. P. 930–935.
12. Predictive Modeling for Glass-Side Laser Scribing of Thin Film Photovoltaic Cells / Huade Tan, Y. Lawrence Yao, Hongqiang Chen, Magdi N. Azer // Proc. of NAMRI/SME. 2012. Vol. 40. P. 24–33.
13. Redka D. N., Parfenov V. A. Optimization of structuring of silicon-based thin film solar modules by means of laser scribing // Intern. Symp. «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-13), St. Petersburg, Pushkin, Russia, June 24–28, 2013. P. 98.
14. Levitskii V. S., Redka D. N., Terukov E. I. Optical and structural properties of ZnO thin films after laser treatment // Ferroelectrics. Taylor&Francis, USA. 2016. Vol. 496, iss. 1. P. 163–169.

15. Račiukaitis G., Gečys P. Scribing of a-Si thin-film solar cells with picosecond laser // Appl. Physics, EDP Sciences. 2010. № 51 (3). P. 33209.

16. Račiukaitis G., Gečys P. Picosecond-Laser Structuring of Thin Films for CIGS Solar Cells // Proc. of LAMP2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Osaka University, Japan, 2009. P. 72030R.

17. Laser Processing by Using Diffractive Optical Laser Beam Shaping Technique / G. Račiukaitis, E. Stankevičius, P. Gečys, M. Gedvilas, C. Bischoff, E. Jäger, U. Umhofer, F. Völklein // Laser Micro/Nanoengineering. Osaka, 2011. Vol. 6, № 1. P. 37–43.

18. Selective Ablation of Thin Films with Picosecond-Pulsed Lasers for Solar Cells / G. Račiukaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, K. Regelskis, B. Voisiat // Santa Fe, New Mexico, AIP Conf. Proc, AIP Publishing, 2010. P. 800–811.

D. N. Redka, V. A. Parfenov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

LASER MICROPROCESSING IN THE THIN FILM SOLAR MODULES PRODUCTION

Review of laser technologies used in the manufacture of solar modules. Main attention is paid to laser microprocessing technology employed in the manufacturing of thin film solar modules based on amorphous silicon.

Thin-film solar modules, laser microprocessing, laser annealing, laser scribing, laser structuring

УДК 535.41; 53.083; 681.787; 519.688

В. М. Цаплев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

И. В. Гончар

Северо-Западный открытый технический университет

А. В. Болдырев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Сравнительный анализ алгоритмов детектирования и подсчета экстремумов при интерференционных измерениях

Предложен метод детектирования и подсчета экстремумов при проведении различных интерференционных и резонансных измерений. Проведен сравнительный анализ некоторых наиболее эффективных алгоритмов метода, реализован цифровой алгоритм, показаны преимущества его применения при измерениях толщины тонких пленок

Детектирование и подсчет экстремумов, интерференционные измерения, резонансные измерения, толщина пленки, алгоритм подсчета экстремумов, метод разделенных разностей, метод конечных разностей

Во многих современных исследованиях и решениях задач науки и техники требуется нахождение экстремальных значений функций, описывающих тот или иной наблюдаемый процесс [1]. В ряде случаев необходим подсчет количества максимумов и минимумов таких функций. От-

дельным классом задач, решаемых с помощью поиска и подсчета количества экстремумов, являются задачи нахождения толщин пленочных материалов и слоев, прозрачных в выделенной области электромагнитного излучения при бесконтактных оптических методах измерений.