

На правах рукописи



УДК 621.793/.795

Редька Дмитрий Николаевич

**Лазерная микрообработка
тонкопленочных солнечных модулей**

Специальность:

05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2016

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и оптико-электронных приборов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: Парфенов Вадим Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Официальные оппоненты: Вейко Вадим Павлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой лазерных технологий и систем,
руководитель подразделения Международная лаборатория "Лазерных микро-и нанотехнологий",
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Сандуленко Александр Витальевич,
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное Общество «Научно-Исследовательский и Технологический Институт Оптического Материаловедения Всероссийского Научного Центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «22» декабря 2016 года в 17 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте:
<http://www.eltech.ru/>.

Автореферат разослан «21» октября 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04,
доктор физико-математических
наук, профессор



Мошников В. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одним из стратегических направлений развития альтернативной энергетики является создание фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе различных полупроводниковых материалов, в том числе композитных наноструктурированных структур, ферритовых и сегнетоэлектрических пленок. Важной задачей повышения эффективности преобразователей является совершенствование технологического процесса изготовления солнечных модулей. Данная работа посвящена одной из ответственных операций технологического цикла производства солнечных модулей большой площади – лазерной микрообработке. В данном процессе лазерное излучение воздействует на многослойные структуры с различными физико-техническими свойствами. С одной стороны, лазерная микрообработка позволяет структурировать модули - формировать отдельные электрически связанные ячейки, при этом общая длина лазерной разметки может составлять десятки метров. Эта операция в производстве солнечных модулей получила название «лазерное скрайбирование». При среднем значении ширины ячейки 7 мм, уменьшение диаметра лазерного пучка на 100 мкм приводит к увеличению общей полезной площади ячейки на 1,5 %, следовательно, к повышению эффективности преобразователей. Поэтому исследование способов минимизации ширины реза при лазерной микрообработке является актуальной научно-технической задачей. Для ее решения требуется изучение влияния на результат обработки таких параметров лазерного излучения как уровни мощности, а также пространственно-энергетические характеристики лазерного пучка, вдобавок к уже изученным, таким как длина волны, длительность и частота следования импульсов.

С другой стороны, лазерная микрообработка может включать также лазерный отжиг слоев, входящих в состав модуля. Эта операция ответственна за формирование морфологии слоя, а также модификацию его электрических (сопротивление) и оптических (поглощение, степень рассеивания) свойств, что может использоваться для повышения эффективности ФЭП.

Технология лазерной микрообработки многослойных систем в настоящее время не отработана, и ее совершенствование применительно к производству тонкопленочных солнечных модулей (ТПСМ) на основе кремния позволяет увеличить эффективность их работы.

Целью работы являлась разработка процессов лазерной микрообработки структур тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей для повышения эффективности тонкопленочных солнечных модулей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. математическое моделирование тепловых процессов, происходящих в материалах, входящих в состав ТПСМ, под воздействием импульсного лазерного излучения;
2. экспериментальное исследование процессов абляции, происходящих в материалах, входящих в состав ТПСМ, под воздействием лазерного излучения для уменьшения их теплового влияния на области, прилегающие к зоне обработки.
3. исследование влияния параметров лазерного скрайбирования на эффективность ТПСМ.
4. исследование влияния лазерного отжига на оптические и электрические характеристики оксида цинка.

Научная новизна:

1. в работе предложены способы снижения отрицательных сопутствующих эффектов воздействия лазерной микрообработки на многослойные структуры солнечных модулей.
2. показано, что выбор режимов лазерного скрайбирования позволяет снизить электрические потери на коммутации ячеек тонкопленочного солнечного модуля.
3. в работе показана возможность управления оптическими свойствами токопроводящих пленок оксида цинка при помощи лазерного отжига.

Практическая значимость:

1. Продемонстрирована возможность повышения эффективности тонкопленочного солнечного модуля за счет совершенствования процессов лазерной микрообработки:
При лазерном скрайбировании пленок ZnO толщиной 1700 нм излучением с длиной волны 355 нм, длительностью импульса 30 нс, плотностью мощности $6,5 \cdot 10^8$ Вт/см² достигается уменьшение ширины зоны скрайбирования на 1-2 мкм по сравнению со значением этого параметра при использовании других параметров обработки. Полученные результаты позволяют снизить площадь, занимаемую зонами лазерного скрайбирования и увеличить эффективность модуля на 5 %.
2. Экспериментально подтверждено, что применение операции лазерного отжига позволяет увеличивать эффективность захвата светового потока за счет увеличения светорассеяния в структуре после лазерной обработки, и повышает эффективность модуля.
3. Разработано программное обеспечение для расчета активной площади тонкопленочного солнечного модуля (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618114). Показано, что изменение ширины реза на 10 мкм приводит к сокращению

площади тонкопленочного солнечного модуля, занятой разметкой и увеличивает полезную площадь модуля.

4. Разработаны методика и алгоритм трехмерной визуализации результатов лазерной микрообработки на основе автоматического преобразования исходного растрового изображения в зависимости от интенсивности оттенка каждой конкретной точки. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619589).

5. Методы снижения площади, занятой лазерной разметкой, данные по лазерному отжигу токопроводящих слоев оксида цинка внедрены в ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе», а также в учебный процесс в СПбГЭТУ, при изучении дисциплины «Технологические основы формирования тонкопленочных солнечных модулей», что подтверждено соответствующими актами.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При лазерной микрообработке многослойных систем сфокусированным импульсным лазерным излучением следует работать в области расфокусировки, обеспечивающей минимальный перепад значений энергии в поперечном сечении пучка и позволяющей уменьшить количество механических дефектов, вызванных неоднородностью нагрева материала в зоне обработки.
2. При селективном удалении кремния в многослойной структуре ZnO/Si/ZnO импульсным лазерным излучением, оптически прозрачным для граничных слоев, удаление материала происходит путем взрывного испарения центрального слоя.
3. При больших плотностях мощности импульсного лазерного излучения в системе ZnO/Si/ZnO происходит удаление оптически прозрачного слоя за счет тепловых механизмов, возникающих при абляции кремния.
4. Показано, что выбор плотности мощности при лазерном скрайбировании солнечных модулей позволяет повысить эффективность работы солнечного модуля за счет уменьшения последовательного сопротивления ячеек при их соединении.
5. Выбор параметров лазерного отжига пленок оксида цинка позволяет создавать условия для аморфизации кристаллитов пленки, в результате чего увеличивается коэффициент светорассеяния и повышается эффективность модуля.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались на отечественных и международных конференциях, симпозиумах и школах, в том числе: International Symposium “Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies” (FLAMN-13). June 24-28, 2013,

St.Petersburg, Pushkin; **Laser Optics**, 2014 International Conference, June 30 2014-July 4 2014; International Workshop "Modern Nanotechnologies" (**IWMN-2015**) , Екатеринбург, 27-29 августа 2015 года, ИЕН УрФУ, Екатеринбург; 2nd International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE." 2015 - St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" - St. Petersburg - Russia, 22 June – 03 July 2015; 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (**EUPVSEC**), Hamburg, 14-18 September 2015.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи, выборе параметров лазерной микрообработки отдельных слоев, входящих в состав модуля, исследовании их свойств с использованием современных диагностических методов (эллипсометрия, оптическая спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния, атомно-силовая микроскопия), а также исследовании характеристик сформированных на их основе фотоэлектрических преобразователей. Автор играл определяющую роль в экспериментальных исследованиях, анализе и обсуждении полученных результатов, публикациях научных статей по данным исследований.

Методы исследования. Образцы исследуемых пленок ZnO, a-Si:H и μ c-Si:H были получены на установках химического осаждения металлоорганических прекурсоров при пониженном давлении (ТСО 1-1200) и плазмохимического осаждения из газовой фазы КАИ-1200 (КАИ), размещенных в ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» (ООО «НТЦ ТПТ») в составе пилотной линии по производству тонкопленочных солнечных модулей. Свойства пленок до и после лазерной микрообработки исследовались методами спектральной эллипсометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния. Измерения электрических и оптических свойств пленок проводились на кафедре квантовой электроники и оптико-электронных приборов СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С использованием пленок, прошедших лазерную микрообработку, в ООО «НТЦ ТПТ» изготавливались однокаскадные и двухкаскадные тонкопленочные солнечные модули разного размера. Определение параметров ФЭП осуществлялось по результатам исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральных зависимостей квантовой эффективности.

Публикации.

Основные результаты работы опубликованы в 14 печатных работах, среди которых 4 научные статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи были опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базе Web of

Science и Scopus, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 5 - статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертационной работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 91 наименований. Работа содержит 128 страниц, включая 76 рисунков и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводятся данные по существующим технологиям лазерной микрообработки и основным областям их использования в производстве солнечных элементов и модулей, физических процессах при лазерной обработке. Выделяют два направления использования лазеров при создании фотоэлектрических преобразователей (ФЭП):

1. Лазерное структурирование (скрайбирование).
2. Лазерная модификация (отжиг) материалов светочувствительных элементов ФЭП.

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.;
- высокая точность позиционирования при обработке (десятки-сотни микрометров);
- возможность обработки изделий сложной формы.

Основной областью применения лазеров в производстве солнечных элементов является разметка и структурирование (скрайбирование) тонкопленочных солнечных модулей, которые проводятся для токопроводящих слоев, толщина которых составляет сотни нанометров. Данный тип фотопреобразователей активно развивался в последние годы, т.к. активные слои ТПСМ имеют толщины всего в несколько микрометров, что позволяет значительно снизить себестоимость ФЭП.

Типичная структура слоёв фотоэлектрического модуля после завершения лазерного скрайбирования представлена на рисунке 1.

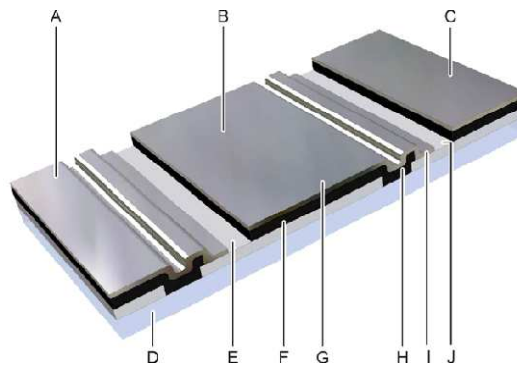


Рисунок 1 - Структура слоев тонкопленочного солнечного модуля на основе кремния.

Таблица 1 - обозначение индексам к рисунку 1

A	фотоэлемент n	F	Двухкаскадный слой a-Si:H/μc-Si:H
B	фотоэлемент (n+1)	G	Тыльной контактный слой (TCO BC)
C	фотоэлемент (n+2)	H	Лазерное структурирование (P1)
D	подложка	I	Лазерное структурирование (P2)
E	Лицевой контактный слой (TCO FC)	J	Лазерное структурирование (P3)

Основными задачами структурирования ТПСМ являются: разделение генерирующих ячеек и их последующая коммутация с целью получения требуемых значений токов и напряжений за счет последовательного и параллельного соединения отдельных элементов. Поскольку разделительные дорожки, формируемые при структурировании модулей, уменьшают эффективную площадь преобразователя энергии, становится актуальным вопрос об оптимизации ширины реза в пленках токопроводящих материалов. В научной литературе в настоящее время большое внимание уделяется вопросам оптимизации применения лазерных технологических процессов, как со стороны исследователей, так и производителей. В том числе, рассматриваются вопросы оптимизации существующих режимов обработки (включая выбор оптимального уровня мощности излучения, длительности воздействия, частоты следования импульсов, фокусировки излучения) в целях повышения качества обработки. Для производства ТПСМ данное направление исследований открывает дополнительные возможности совершенствования производственного процесса, позволяющего за счет изменения режимов лазерной обработки повысить эффективность преобразования солнечной энергии. Для достижения данной цели необходим анализ физических процессов лазерной микрообработки, выбор лазеров, расчет параметров лазерного излучения и выбор методик контроля качества лазерного скрайбирования.

По итогам проведенного анализа литературных данных конкретизируются задачи исследования.

Во второй главе приводятся результаты математического моделирования и экспериментальные данные по исследованию влияния параметров фокусировки излучения при обработке на ширину реза при лазерном скрайбировании на примере обработки фронтального контакта из оксида цинка.

Первой задачей исследования было определение параметров фокусировки, при которых обеспечивается удаление материала в зоне обработки. Для этого предварительно проводилось математическое моделирование тепловых процессов при лазерном скрайбировании ТПСМ. Моделирование проводилось в программном обеспечении Mathcad. Результаты моделирования сравнивались затем с полученными экспериментальными данными. Также для предварительной оценки площади, занимаемой разметкой, было разработано программное обеспечение для расчета площадей тонкопленочного солнечного модуля.

При описании процесса воздействия лазерного излучения на непрозрачные тела можно выделить три стадии: нагревание без фазовых переходов; плавление и испарение; ионизация испаряемого вещества и образование плазмы. Характер и результат этих процессов взаимодействия сильно зависят от коэффициента поглощения материала на длине волны излучения лазера, его пиковой мощности и длительности воздействия на материал. Изменение плотности лазерного потока по глубине описывается экспоненциальным законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$E(x) = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где $E(x)$ - световая энергия, проникающая на глубину x , A – поглощательная способность материала, E_0 – энергия, падающая на поверхность, α – линейный коэффициент поглощения обрабатываемого материала.

Поглощательная способность материала $A = (1-R)$, где R – коэффициент отражения, определяющая количество энергии падающего излучения поглощенное в материале в процессе нагрева. Количество энергии, поглощенной в слое толщиной Δx ,

$$|E(\Delta x)| = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha \Delta x} \quad (2)$$

Коэффициент α в выражении (1) характеризует толщину слоя вещества $\delta = \frac{1}{\alpha}$, после прохождения которого интенсивность света уменьшается в e раз. Значение коэффициента α сильно зависит от частоты падающего излучения ν , химической природы и состояния вещества и определяется как $\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$, где n, k – оптические характеристики материала, λ – длина волны падающего лазерного излучения.

Энергетический вклад лазерного излучения в различные технологические процессы определяют величины q и τ . Как известно:

$$E = p \cdot \tau = q \cdot s \cdot \tau, \quad (3)$$

где p – мощность поглощенного излучения, τ – время действия излучения, q – плотность мощности излучения, s – площадь облучения.

Поглощенная энергия распространяется в материале за счет процесса теплопроводности, в результате чего происходит нагрев обрабатываемого участка. Распространение тепла в пленке в процессе воздействия лазерного излучения описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \Delta T = \frac{f(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (4)$$

где T – температура в произвольной точке материала с координатами x, y, z в момент времени t ; ρc – удельная теплоемкость вещества.

Объемная плотность мощности лазерного излучения задается функцией:

$$f(x, y, z, t) = \alpha(x)q(x, y, z, t)\exp\left(-\int_0^x \alpha(x)dx\right) \quad (5)$$

где $q(x, y, z, t)$ – функция, характеризующая распределение плотности поглощения светового потока на поверхности материала и изменение его во времени.

Для гауссова распределения плотности мощности излучения в фокусе распределение температуры, описывается зависимостью:

$$T(r, z, t) = \frac{2p}{\rho c(4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(t+\tau)\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a\tau} - \frac{r^2}{4a(t+\tau)}\right) d\tau \quad (6)$$

Температура в центре лазерного пучка на поверхности материала:

$$T_0(0,0, t) = \frac{p_0}{\pi \rho c a (4\pi a \tau)^{3/2}} \arctg\left(\frac{t}{\tau}\right)^{1/2} \quad (7)$$

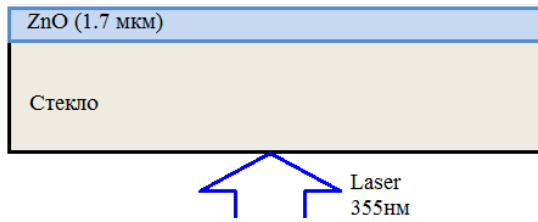
$p_0 = q \cdot s$ – мощность излучения, введенная в материал через площадку s ; $\tau = \frac{a}{4r_0^2}$,

где r_0 – радиус пятна излучения по уровню $1/e$ от максимальной интенсивности, c – коэффициент теплопроводности, t – текущее время.

После достижения участком температуры плавления происходит ее плавление и начинается распространение границы жидкой фазы. При дальнейшем облучении материала продолжается процесс нагрева и, при достижении температуры плавления, начинается процесс испарения вещества с обрабатываемого участка, сопровождающийся ионизацией поверхностных примесей и образованием плазмы. Для исключения эффекта экранирования падающего излучения облаком плазмы обработку материала производят со стороны стеклянной подложки.

Рассматриваемый в математической модели образец представляет собой слой оксида цинка ZnO толщиной 1,7 мкм, нанесенный на стеклянную подложку толщиной 20 мкм. Лазерное излучение поступает на нижнюю границу пленки ZnO, проходя через стекло, и поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной $h = \sqrt{a \cdot \tau}$, где a –

температуропроводность, τ – длительность импульса; диаметр пучка лазерного излучения 30 мкм, мощность $P = 2$ Вт.



При рассмотрении данной модели приняты следующие допущения и ограничения:

- материалы однородны по структуре, физические параметры, такие как теплоемкость c , температуропроводность a , коэффициент поглощения α постоянны и не зависят от температуры, т.е. задача теплопроводности сводится к линейной;

- тепловой контакт пленки с подложкой идеален, что означает равенство температур и тепловых потоков на границу их раздела;

- мощность тепловыделения в пленке равномерно распределена по сечению светового пучка, неизменна по толщине пленки и постоянна в течение всей длительности воздействия.

Распространение тепла в структуре описывается уравнением теплопроводности (4).

В данном случае рассматривается одномерная модель, поэтому уравнение (4) примет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} - a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{q_1(x,t)}{\rho_1 c_1}, \quad (8a)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} - a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{q_2(x,t)}{\rho_2 c_{1,2}}, \quad (8б)$$

где плотность поглощенного светового потока в пленке q_1 , равномерно распределено по ее толщине h , индекс «1» относится к пленке, «2» - к подложке, т.е. $q_1(x,t) = q_0 e^{-\alpha_2(x+h)}$, а в подложке - $q_2(x,t) = \frac{q_0 A}{h}$.

Начальные условия при $t=0$ будут $T_1(x) = T_2(x) = T_0$, граничные условия при $x=0$ $\frac{\partial T_1}{\partial x}(t) = 0$,

$$x=h \quad T_1(x) = T_2(x) \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}(t) = k_2 \frac{\partial T_1}{\partial x}(t)$$

В указанных условиях температура пленки меняется по закону:

$$T_1(t) = q_0 \frac{\sqrt{a_2 t}}{k_2} \left[A - D \frac{\varepsilon \varphi}{1 - \varepsilon \varphi} \right] - \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} + \varphi \right] + \frac{q_0 \cdot D_1}{a_2 k_2 (1 - \varepsilon \varphi)} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} + T_0 \quad (10)$$

где $\varepsilon = \alpha_2 \sqrt{a_2 t}$, $\varphi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 t}}$, α_2 – коэффициент ослабления излучения в материале подложки, A_1 – поглощательная способность материала пленки, D_1 – ее пропускание, a, k – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности соответственно; C – теплоемкость, ρ – плотность, T_0 – температура окружающей среды. По формуле (10) можно построить временную зависимость температуры тела во время действия импульса.

Значения физических величин, которые использованы в данной работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физическая величина	Единица измерения	ZnO	Стекло
Плотность, ρ	г/см ³	5.7	2.52
Удельная теплоемкость, c	Дж/кг·К	494	800
Температура плавл., $T_{пл}$	К	2248	1873
Температура испарения, $T_{и}$	К	4000	—
Коэф. Теплопроводн., k	Вт/м·К	29	—
Коэф. Температуропров., a	м ² /с	$1.03 \cdot 10^{-4}$	—
Скрытая теплота плавл., $L_{пл}$	Дж/кг	$9.7 \cdot 10^5$	—
Модуль Юнга, E	ГПа	0.41	72
Коэф. Пуассона, ν		0.35	0.22
Коэф. отражения 355 нм		2.1	1.518
Коэф. отражения 532 нм		2.03	1.50
Коэффициент расширения, κ	10 ⁻⁶ /К	5.9	8.6

В конечный момент времени воздействия лазерного импульса длительностью 50 нс температура достигает значения $T = 8500$ К, что вдвое превышает температуру испарения оксида цинка.

Эксперимент по изучению влияния фокусировки на ширину реза проводился на установке LSS 1200. Пленки обрабатывались излучением Nd:YAG на длине волны 355 нм с длительностью импульса 50 нс и изменением начальной мощности излучения от 0,5 до 2 Вт. Диаметр пучка 3,5 мм, в фокусе - 20 мкм. Схема экспериментальной установки для исследования влияния фокусировки на ширину резов изображена на рисунке 3.

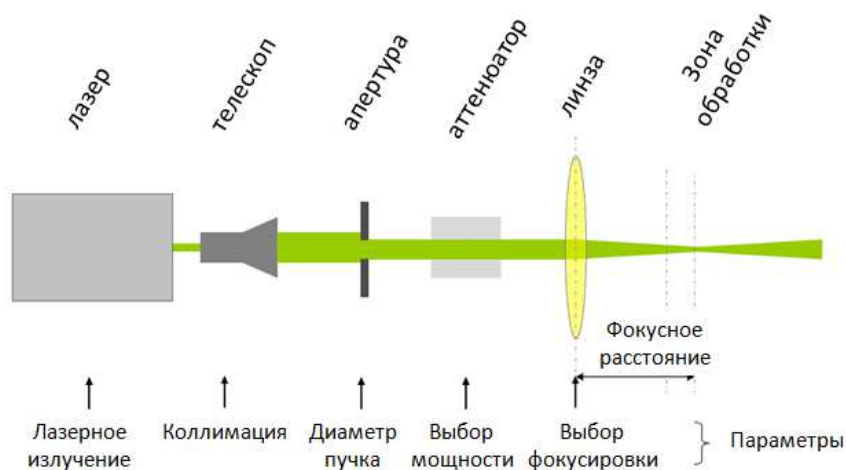


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки для исследования влияния фокусировки излучения на результат обработки

В зависимости от плотности мощности излучения могут наблюдаться структурные дефекты (рисунок 4). Осложняется данный факт дополнительно тем, что сама

обрабатываемая пленка может быть неравномерна по толщине, вследствие этого может меняться степень воздействия лазерного излучения в зоне обработки.



Рисунок 4 - Дефекты скрайбирования, вызванные нарушением фокусировки излучения на поверхности пленки

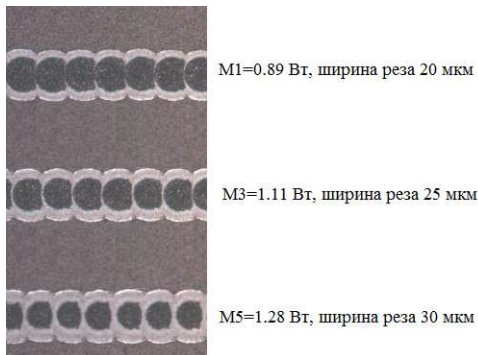


Рисунок 5 - Экспериментальные данные по исследованию влияния фокусировки на ширину реза

В результате расчета было получено достаточное для испарения материала значение плотности мощности лазерного излучения $6,5 \cdot 10^8$ Вт/м² (1,2 Вт).

При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных были выбраны параметры лазерного излучения, позволяющие достигать уменьшения ширины реза на 1-2 мкм, что, в свою очередь, приводит к увеличению эффективности солнечного модуля за счет снижения площади, занятой лазерной

разметкой. Полученные в ходе математического моделирования данные хорошо соотносятся с экспериментальными данными по процессу лазерного скрайбирования P1 (рисунок 5). Выбор значений плотности мощности для удаления материала на основе расчетных данных может быть использован, в том числе, при создании модулей на основе других материалов.

Современные программные средства обработки данных позволяют анализировать данные, полученные при исследовании образцов различными методами. Например, среди методов диагностики известны оптическая микроскопия и атомно-силовая микроскопия (АСМ). По результатам АСМ мы получаем микрофотографию поверхности высокого разрешения, а также объемную модель рельефа поверхности. В ходе работы была разработана оригинальная методика построения объемных моделей резов для анализа их качества только по фотоизображению, без проведения АСМ, что значительно ускоряет процесс анализа результатов обработки. Для этого необходимо преобразовать полученное при помощи оптического микроскопа фотоизображение реза в двумерный массив данных, где элементами матрицы являются отдельные пиксели изображения. Каждый матричный элемент несет в себе информацию о местоположении и интенсивности пикселя. Темные и светлые области соответствуют участкам минимальной и максимальной высоты. По данным профилометрии задаются численные значения минимальной и максимальной

высоты рельефа. Затем полученный массив данных визуализируется в трехмерном пространстве. Проводить оперативный контроль резов таким образом возможно непосредственно на управляющем компьютере установки, не производя извлечение образца, что значительно экономит временные и финансовые затраты на производстве. Графическое изображение данных, получаемых при помощи описанной методики, представлено на рисунке 6.

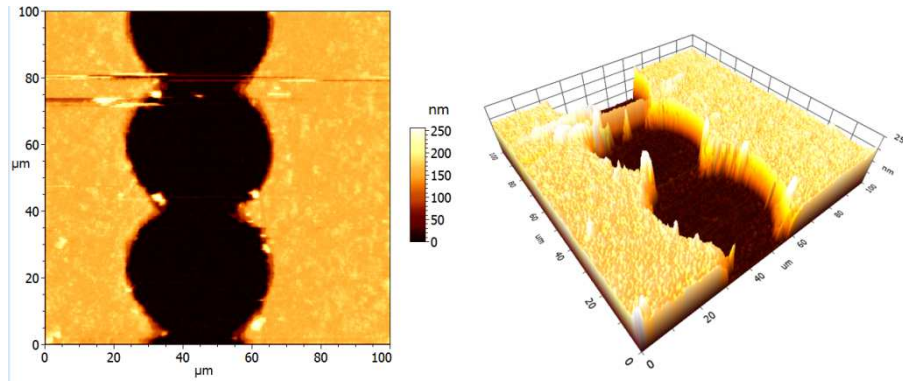


Рисунок 6 - Микрофотография реза и построенное на основе нее трехмерное изображение.

В третьей главе изложены результаты исследования влияния используемых уровней плотности мощности излучения при лазерном скрайбировании на выходные характеристики тонкопленочного солнечного модуля (рабочие токи, напряжения, коэффициент полезного действия).

На рисунке 7 представлены экспериментальные данные зависимости выходных характеристик ТПСМ от уровня плотности мощности лазерного излучения. В роли выходных характеристик контролируемым параметром выбиралась величина последовательного сопротивления и эффективность модуля. При этом варьировалась только плотность мощности третьего лазерного скрайбирования, остальные параметры оставались неизменными и типовыми.

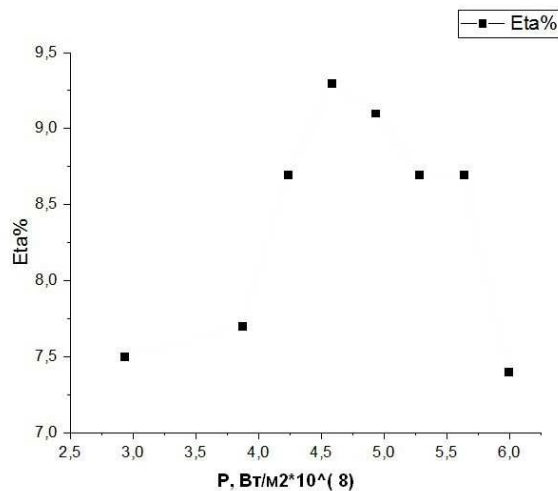


Рисунок 7 - Зависимость итоговой эффективности Eta, % от плотности мощности P при третьем лазерном скрайбировании.

Контроль профилей резов при помощи контактной профилометрии показал, что при значениях плотности мощности излучения ниже 20 кВт/см^2 не происходит удаления материала. При уровнях плотности мощности выше 45 кВт/см^2 происходит утоньшение толщины слоя оксида цинка, в связи с чем увеличивается его последовательное сопротивление и, как следствие, возрастают электрические потери на коммутации соседних ячеек.

Обобщая результаты экспериментальных исследований зависимости выходных характеристик ТПСМ от используемых уровней плотности мощности лазерного излучения можно сделать заключение о том, что лазерное скрайбирование солнечных модулей излучением с уровнем плотности мощностью в диапазоне от 25 до 40 кВт/см^2 позволяет повысить эффективность солнечного модуля на $1,5\%$ за счет уменьшения последовательного сопротивления при соединении ячеек.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния лазерной модификации слоев, входящих в состав модуля, на примере лазерного отжига оксида цинка. Как было показано в третьей главе, при исследовании зависимости выходных характеристик ТПСМ от используемых плотностей мощности при третьем скрайбировании было замечено, что излучение воздействует также на нижележащий слой оксида цинка, увеличивая его электрическое сопротивление. Принимая во внимание, что площадь оксида цинка, подвергнувшегося такому воздействию, довольно значительна (может достигать $5-10 \text{ см}^2$ на площади в $1,43 \text{ м}^2$), было решено исследовать возможность изменений характеристик пленок оксида цинка под воздействием лазерного излучения и, если они будут обнаружены, их влияние на работу ТПСМ.

Экспериментально исследовалось влияние лазерного отжига на электрические и оптические свойства пленок оксида цинка ZnO , нанесенных на стеклянную подложку методом плазмо-химического осаждения при пониженном давлении LPCVD. С помощью эллипсометра, мультиметра, спектрофотометра было произведено предварительное исследование таких параметров образца, как толщина, поверхностное сопротивление, пропускание и Назе-фактор. Пленки обрабатывались излучением твердотельного Nd:YAG лазера с длиной волны 355 нм и плотностью мощности $15...20 \text{ кВт/см}^2$. Результаты исследования структуры пленок методом рамановской спектроскопии представлены на рисунке 8 (метод традиционно служит для анализа химического состава веществ, но он может быть использован для выявления структурных изменений в материалах [1]). После обработки (рисунок 8, кривая 2) интенсивность полосы A1(LO) увеличилась, что указывает на увеличение структурных дефектов [1]. Дальнейшие исследования показали, что лазерный отжиг пленок оксида цинка позволяет управлять оптическими свойствами

материала. При облучении лазерным излучением с плотностью мощности 20 кВт/см^2

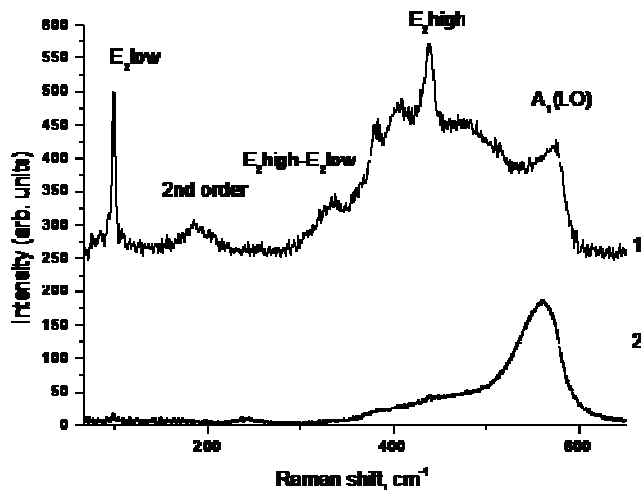


Рисунок 8 - Рамановские спектры пленки ZnO:
1 – до модификации; 2 – после модификации.

значением фактора Хаза увеличивается на 2,5 %, отражение от поверхности уменьшается на 13 %. Увеличение светорассеяния обусловлено аморфизацией кристаллитов пленки оксида цинка. В результате повышается эффективность захвата светового потока в структуре солнечного модуля после лазерной обработки и увеличивается эффективность готового модуля.

Исследование микрорельефа образцов проводилось на атомно-силовом микроскопе Ntegra Therna (NT-MDT), результаты представлены на рисунке 9. Выявлено, что с ростом уровня падающей на образец мощности излучения шероховатость поверхности повышается и это приводит к увеличению фактора Хаза. При последующем увеличении мощности, происходит уменьшение размеров неоднородностей и снижение коэффициента светорассеяния.

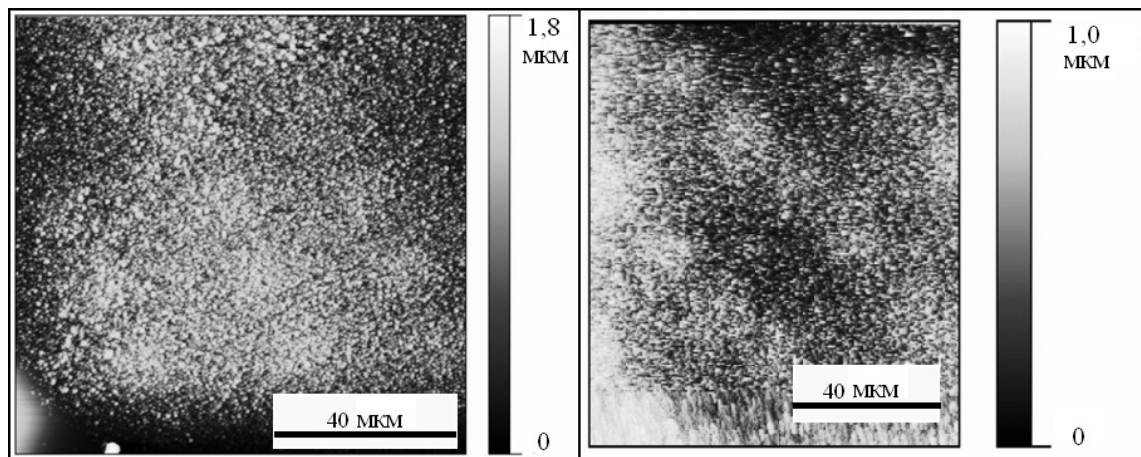


Рисунок 9 - Изображение поверхности образцов с большим (слева) и меньшим (справа) размером неоднородностей, полученное на атомно-силовом микроскопе.

Для исследования влияния изменения электрических и оптических свойств пленок ZnO на выходные характеристики солнечного модуля на основе экспериментальных образцов были изготовлены минимодули размером $40 \times 50 \text{ мм}^2$. Также были изготовлены минимодули без проведения лазерного отжига для сравнения их выходных параметров с параметрами минимодулей с обработанным фронтальным слоем оксида цинка. Средние значения выходных параметров каждого из образцов представлены в таблице 2, где W -

мощность, P - плотность мощности, V_{oc} - напряжение холостого хода, I_{sc} - ток короткого замыкания, J_{sc} - плотность тока короткого замыкания, FF - фактор заполнения, η - эффективность, V_{mpp} - напряжение в точке максимальной мощности, I_{mpp} - ток в точке максимальной мощности, P_{mpp} - значение максимальной мощности.

Таблица 2

N обр.	W, мВт	P, Вт/см ²	V_{oc} [В]	I_{sc} [мА]	J_{sc} [мА/см ²]	FF [%]	η [%]	R_p [кОм]	V_{mpp} [В]	I_{mpp} [мА]	P_{mpp} [мВт]
1(2)	0,88	0.125	1,27	9,94	9,94	72,04	9,12	7,58	1,02	8,98	9,13
2(8)	0,131	0.185	1,27	9,55	9,55	72,51	8,8	185,88	1,01	8,69	8,81
3(9)	0,139	0.197	1,25	9,81	9,81	70,87	8,69	12,67	0,99	8,8	8,69
1'(0)	0,00	0	1,29	10,02	10,02	72	9,31	8,96	1,03	9,03	9,31

Таким образом, продемонстрирована возможность управления оптическими характеристиками пленок оксида цинка при помощи лазерного отжига и определены уровни плотности мощности лазерного излучения, при которых наблюдаются наиболее значительные изменения характеристик пленок.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе предложенного алгоритма рассчитаны значения плотности мощности излучения лазера для удаления пленки материала известной толщины при лазерном скрайбировании. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными на примере скрайбирования оксида цинка. В результате получены параметры фокусировки и плотности мощности лазерного излучения, обработка с применением которых способна обеспечить получение резов с минимумом структурных дефектов и практически не зависящих от неравномерности толщины осажденного на стеклянной подложке токопроводящего слоя.
2. Исследовано влияние режимов лазерного скрайбирования на выходные характеристики солнечных модулей и на 5 % уменьшена пассивная площадь солнечного модуля, занятая лазерной разметкой и не участвующая в преобразовании энергии.
3. Разработана компьютерная программа для расчета активной площади тонкопленочного солнечного модуля и методика 3D-визуализации резов при скрайбировании для оперативного контроля зон обработки.
4. Экспериментально исследовано, что лазерный отжиг пленок оксида цинка позволяет управлять оптическими свойствами материала. В результате лазерной обработки повышается эффективность захвата светового потока за счет увеличения светорассеяния в структуре солнечного модуля после лазерной обработки. Показано, что увеличение светорассеяния обусловлено аморфизацией кристаллитов пленки оксида цинка.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Афанасьев В.П., Лобанова Е.Г., Редька Д.Н., Гришканич А.С. / Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия в системах беспроводной передачи энергии // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 7-11.
2. Егоров Ф.С., Охоткин Г.П., Мукин В.А., Редька Д.Н., Кукин А.В. / Увеличение эффективности тонкопленочного солнечного модуля при лазерном скрайбировании фронтального контакта из оксида цинка // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 59-65.
3. Афанасьев В. П., Мухин Н. В., Редька Д. Н., Шарипова И. А. / Влияние лазерного отжига на структуру, оптические и электрические свойства тонких пленок оксида цинка // Известия вузов России. Радиоэлектроника 2016. Вып. 3. С.32-35
4. Редька Д.Н., Мухин Н.В., Захаров И.Г. / Изменение оптических и структурных свойств пленок оксида цинка после лазерной обработки // Журнал технической физики, №11-2016. С. 140-141.

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в базы Web of Science/Scopus:

5. Levitskii, V.S., Redka, D.N., Terukov, E.I. / Optical and structural properties of ZnO thin films after laser treatment // (Conference Paper), Ferroelectrics, Volume 496, Issue 1, pp. 163-169.
6. Redka D. N. / Research of the Laser Treatment of Zinc Oxide // Smart Nanocomposites, Volume 7, Number 1, Nova Science Publishers, Inc., N.Y., 2016, pp. 41-54.
7. Redka D.N., Parfenov V.A., Afanasjev V.P., Kukin A.V., Grishkanich A.S., Egorov F.S. / Optimization of structuring silicon-based thin film solar modules using means of laser scribing // Proceedings - 2014 International Conference Laser Optics, LO 2014, 2014. С. 6886327.

Свидетельства об интеллектуальной собственности:

8. «Расчет площадей тонкопленочного солнечного модуля»: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ: Божко Д.Ю., Редька Д.Н., Чернышова Ю.С., Шаповалов П.И.; заявитель и патентообладатель Редька Д.Н.. - № 2016618114; заявл. 31.05.2016; выд. 21.07.2012.
9. «Разбивка облака по интенсивности»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Редька Д.Н., Кипреев Е.В., Цветков К.В., Гришканич А.С., Колмаков Е.А.; Заявитель и правообладатель Колмаков Е.А. №2015619589; заявл. 08.09.2015; выд. 08.09.2015.

Публикации в других изданиях:

10. Редька Д.Н., Парфенов В.А. / Исследование влияния параметров лазерного скрайбирования на эффективность работы тонкопленочного солнечного модуля // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» Материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. Ответственные редакторы - В.Э.Гасумянц, Д.Д.Каров. 2015. С. 121-125.
11. Редька Д.Н. / Анализ режимов лазерного скрайбирования многослойных тонкопленочных солнечных модулей // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике Сборник научных трудов. 2013. С. 93-94.
12. Егоров Ф.С., Охоткин Г.П., Афанасьев В.П., Редька Д.Н., Кукин А.В. / Скрайбирование оксида цинка на стекле для тонкопленочного солнечного модуля // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике, материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. 2014. С. 216-222.
13. Егоров Ф.С., Охоткин Г.П., Афанасьев В.П., Редька Д.Н., Кукин А.В. / Определение оптимальной мощности лазерного излучения для одновременного удаления слоев кремния и оксида цинка при скрайбировании тонкопленочного солнечного модуля // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. 2014. С. 225-229.
14. Редька Д.Н., Парфенов В.А. / Лазерная микрообработка в производстве тонкопленочных солнечных модулей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016, №. 8 С.24-29.

Список цитируемой литературы:

1. Levitskii, V.S., Redka, D.N., Terukov, E.I. / Optical and structural properties of ZnO thin films after laser treatment // (Conference Paper), Ferroelectrics, Volume 496, Issue 1, Pages 163-169.