

УДК 621.383

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Ф.С. Егоров, В.А. Мукин, Г.П. Охоткин

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
РФ 428015, Чувашская Республика, Чебоксары, Московский пр-т, 15
тел.: +7(917)656-88-82; e-mail: egorovfs1990@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.012

Заключение совета рецензентов: 07.10.15 Заключение совета экспертов: 12.10.15 Принято к публикации: 19.10.15

В работе представлен механизм поглощения двухтактного импульсного лазерного излучения тонкой пленкой солнечного модуля на основе ZnO, a-Si:H.

Теоретически обоснована возможность использования двухтактного режима лазерного скрайбирования тонкопленочного солнечного модуля (ТПСМ) на этапе производства. Рассмотрена реализация двухтактного режима лазерного скрайбирования ТПСМ: двухтактность создается за счёт одного дополнительного канала задержки одноактного лазерного импульса, а каналом задержки служит оптоволокно.

Проанализировано поглощение первого и второго такта лазерного импульса тонкой пленкой ТПСМ. Первый такт импульса необходим для разогрева пленки, чтобы уменьшить градиент температуры во время поглощения второго такта импульса. Условия поглощения второго такта изменяются из-за подогрева первым. Изменение этого условия для второго такта лежит в диапазоне поглощения лазерного излучения.

Ключевые слова: тонкие пленки, двухтактное скрайбирование, солнечная энергетика, солнечные панели, оксид цинка, аморфный гидрогенизированный кремний.

OPTIMIZATION OF LASER SCRIBING IN MANUFACTURING OF THIN FILM SOLAR MODULES

F.S. Egorov, V.A. Mukin, G.P. Ohotkin

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov
15 Moskovsky ave., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015 Russian Federation
ph.: +7(917)656-88-82, e-mail: egorovfs1990@gmail.com

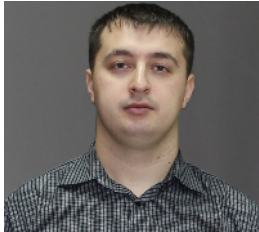
doi: 10.15518/isjaee.2015.19.012

Referred 7 October 2015 Received in revised form 12 October 2015 Accepted 19 October 2015

The paper presents the mechanism of absorption of dual laser pulse radiation by thin film of the ZnO, a-Si:H-based solar module. The authors of this paper theoretically justify the possibility of using mode of dual laser scribing of thin-film solar module (TFSM) at production stage and consider implementation of TFSM dual laser scribing. The duality is created by an additional channel of single laser pulse delay. Optic fiber serves as the delay channel.

Moreover, the authors analyze the absorption of the first and second cycle of the laser pulse by TFSM thin film. The first pulse cycle is required for heating up the film to reduce the temperature gradient during the second pulse cycle absorption. The conditions of the second cycle absorption change due to the heating up by the first one. The change of this condition for the second cycle is in the laser radiation absorption range.

Keywords: thin film, two-stroke scribing, solar energy, solar panels, zinc oxide, amorphous hydrogenated silicon.



Егоров Федор Сергеевич
Fedor S. Egorov

Сведения об авторе: аспирант, ассистент ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Образование: СПбГЭТУ.

Область научных интересов: взаимодействие лазерного излучения с веществом, вакуумное осаждение, динамика нелинейных систем в силовой электронике.

Публикации: 17.

Information about the author: graduate student, assistant, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Education: Saint-Petersburg Electrotechnical University.

Research area: interaction of laser beam with the material, vacuum deposition, nonlinear systems dynamics in power electronics.

Publications: 17.



Мукин Владимир Антонович
Vladimir A. Mukin

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Образование: физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.

Область научных интересов: физика горения и взрывов, физическая газодинамика, плазма и кинетические процессы в неравновесных средах.

Публикации: 93.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), assistant professor of Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Education: Physics department of M.V. Lomonosov Moscow State University.

Research area: physics of combustion and explosions, physical gas dynamics, plasma and critical processes in nonequilibrium media.

Publications: 93.



Охоткин Григорий Петрович
Grigoriy P. Okhotkin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Образование: ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Область научных интересов: динамика нелинейных систем в силовой электронике.

Публикации: 115.

Information about the author: DSc (engineering), professor of Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Education: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Research area: nonlinear systems dynamics in power electronics.

Publications: 115.

Введение

В данной работе исследуется возможность уменьшения размеров кратеров в тонкоплёночных солнечных модулях (ТПСМ) путём двухтактного воздействия в ходе лазерного скрайбирования. Для этого очередной импульс делится на две части и оказывает на выжигаемую площадь двухтактное воздействие. Небольшое смещение не влияет на ширину скрайба, поскольку происходит вдоль полосы разделения. Первый такт импульса разогревает выжигаемую площадь, но сублимации не происходит. А второй такт сублимирует этот участок, формируя кратер и унося выжигаемое вещество. Поскольку выжигание в однократном режиме происходит при достаточно большом градиенте температуры выжигаемого вещества, то оно в условиях фазового перехода сопровождается микровзрывом в образующемся кратере, что увеличивает его размеры, а следовательно, и размеры ширины скрайба. Авторы данной статьи полагают, что двухтактное воздействие позволяет

избежать микровзрыва, поскольку градиент температуры при фазовом переходе сублимируемого вещества незначителен.

Целью исследования является теоретическое обоснование использования двухтактного режима и разработка идеи обеспечения этого режима с использованием элементов силовой электроники в технологии скрайбирования ТПСМ.

Кроме того, особый интерес представляет взаимодействие импульсного лазерного излучения с веществом в технологических условиях лазерного скрайбирования при изготовлении ТПСМ, а также двухтактный режим воздействия импульсного лазерного излучения на скрайбируемый материал для разработки принципа регулирования длительности тактов в автоматическом режиме подслеживания за обработкой с помощью устройств силовой электроники.

Актуальность проведения НИР обусловлена расширением практического использования альтернативных источников энергии в виде ТПСМ и состоит в уменьшении стоимости генерируемой электроэнер-



гии. В этой сфере имеются различные проекты, нацеленные на повышение КПД ТПСМ в производственном масштабе, которые требуют миллиарды рублей, что приведёт к увеличению стоимости генерируемой электроэнергии. В данной работе исследуется возможность снижения её стоимости с применением двухтактного лазерного скрайбирования. Для этой цели по ходу лазерного излучения ставится оптический блок, в котором происходит пространственно-временное разделение лазерного импульса, при этом сохраняется совокупная энергетическая характеристика. Новизна исследования заключается в решении задачи увеличения КПД ТПСМ с минимальными материально-ресурсными затратами, путём исключения из процесса скрайбирования микровзрывов, вызывающих сильное расширение кратеров взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым веществом.

Получение двухтактного режима с помощью одноимпульсного оптического генератора

Для выжигания разделительной полосы (скрайба) на плёнке ТПСМ от оптического квантового генератора (ОКГ) идут импульсы с определённым интервалом, связанным со скоростью подачи головки, фокусирующей луч на материал, который не перемещается. От жёсткости их корреляции зависит качество скрайба. При этом практически одновременно происходят два фазовых перехода: вещество сначала

переходит из твёрдого состояния в жидкое, а потом из жидкого состояния – в парообразное. Процесс завершается уносом вещества с разогреваемой зоны. В некоторых случаях наблюдается сублимация, т.е. унос вещества, минуя фазовые переходы. Главной проблемой в этом процессе является микровзрыв, происходящий вследствие большого градиента температуры на участке выжигания. Он приводит к росту кратера, образующегося ввиду уноса вещества, что увеличивает ширину скрайбирования. Предложенный в работе принцип двухтактного воздействия на вещество, как ожидается, должен позволить уменьшить эффект взрыва или вовсе его избежать, поскольку в таком режиме уменьшается градиент температуры, ответственный за эффект взрыва. Предлагается разделить импульс, используемый в обычном режиме, на два импульса с помощью оптических приспособлений (рис. 1).

Реализация разделения лазерного импульса на два импульса, представляющие собой два такта одного удара, осуществляется с помощью разделителя лазерного луча РЛ. Один импульс попадает в блок с варьируемой длиной оптоволоконна (рис. 1), а другой без задержки попадает в место обработки, где образуется «двугорбый» импульс со скважностью между двумя максимумами от 10 нс до 120 нс. Получается, что первым доходит лазерный импульс, который прошел через Аттенюатр 2, а вторым – через оптоволоконно и Аттенюатр 1.

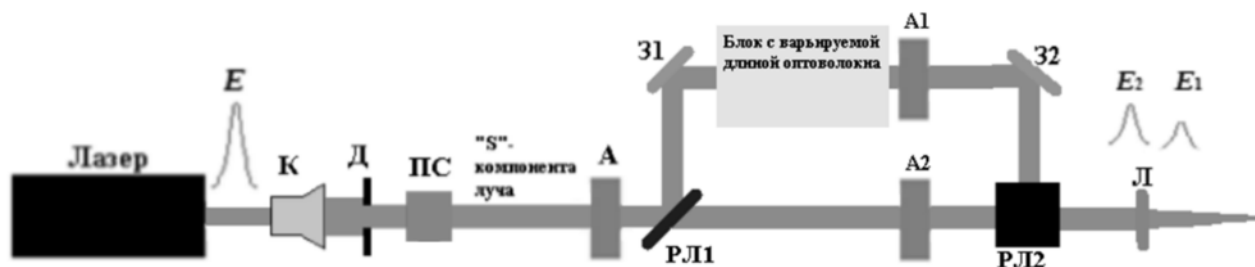


Рис. 1. Схема реализации двухтактного лазерного излучения: РЛ1, РЛ2 – разделители луча; 31 и 32 – зеркала; К – коллиматор;

Д – диафрагма; ПС – поляризационный светоделитель; А, А1, А2 – аттенюаторы; E , E_1 и E_2 – энергия лазерных импульсов
 Fig. 1. The scheme of realization of the two stroke cycle of the laser radiation: РЛ1, РЛ2 – the beam splitter; 31, 32 – mirror; К – the collimator; Д – diaphragm, ПС – polarizing beam splitter; А, А1, А2 – attenuators; E , E_1 and E_2 – energy laser pulses

Из практики использования лазерного излучения известно, что двухимпульсное воздействие на материал применялось в области спектроскопии, например, в 1984 г. для обнаружения атомов Na, K, Mg и Ca в водном растворе [1]. Сегодня в этой области накоплен большой опыт [2, 3], но генерирование двух импульсов представляет собой достаточно сложный процесс с ограниченными возможностями варьирования скважности импульсов. В том варианте скрайбирования, который предлагают авторы настоящей статьи, эти ограничения снимаются, и, более того, не требуются дополнительные затраты на энергетическое обеспечение.

Механизм двухтактного импульсного воздействия на материал ТПСМ

Для достижения обозначенной в данной работе цели предлагается принципиально новый подход к процессу скрайбирования, суть которого заключается в двухтактном режиме лазерного облучения для формирования одного отверстия, что кратко можно описать как скрайбирование двумя тактами, идущими с очень коротким (примерно 30 нсек) интервалом. Первый в таком случае прогревает материал до температуры близкой к температуре плавления, но ниже (для ZnO и для *a*-Si температура плавления 2248 К и



1 420 К соответственно [4]). Второй прожигает до нужной глубины, не провоцируя микровзрыв, поскольку, с одной стороны, происходит выжигание при небольшом градиенте температуры, недостаточном для микровзрыва, с другой, – энергия импульса пропорционально меньше.

Условия поглощения двух частей лазерного импульса в двухтактном режиме разные. Если рассматривать выжигание одного отверстия, то при поглощении первого импульса температура поглощаемого слоя имеет комнатную температуру $T_1=20\text{ }^\circ\text{C}$, и оптические свойства поглощаемой пленки будут соответствовать данной температуре. После поглощения первого импульса оптические свойства пленки изменятся, и условия поглощения второго импульса бу-

дут другими. Прежде всего изменятся те параметры, которые зависят от температуры: коэффициент поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, ширина запрещенной зоны E_g и др.

Схема тепловой модели попадания двухтактного лазерного импульса в обрабатываемую область для случаев P1, P2 и P3 представлена на рис. 2. В случае P1 используется длина волны лазерного излучения 355 нм, оптически прозрачная для стекла, и без больших потерь энергии импульса доходит до слоя ZnO, у которого коэффициент поглощения на данной длине волны составляет порядка 10^5 см^{-1} . В случае P2 и P3 длина волны лазерного излучения составляет 532 нм; для стекла и ZnO она оптически прозрачна, но активно поглощается слоями кремния.

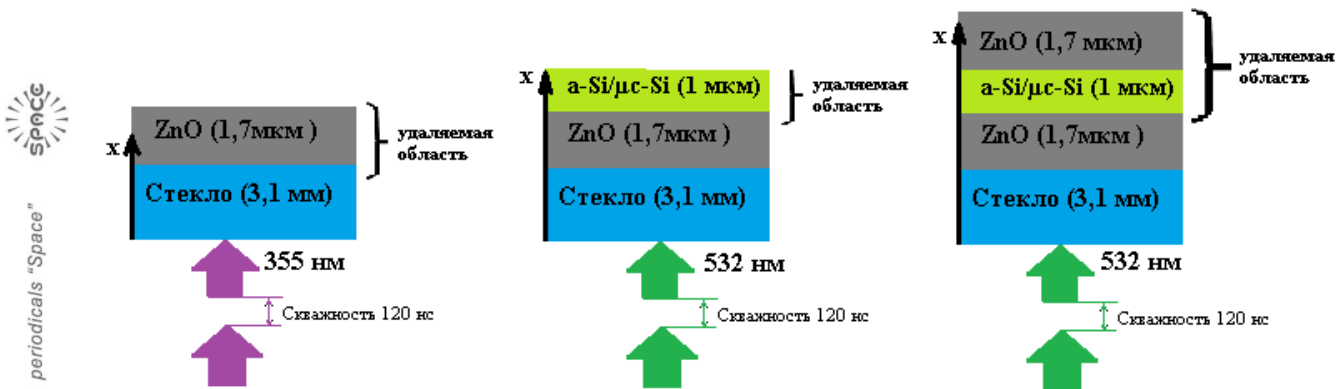


Рис. 2. Схема тепловой модели для случаев P1, P2 и P3
Fig. 2. Scheme of the thermal model for P1, P2 and P3 cases

Оптимизация механизма воздействия лазерного излучения на площадку солнечного модуля с целью уменьшения размера кратера, формирующего скрайб

Тепловая модель нагрева при поглощении первого импульса можно описать по формуле из работы [4]:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum(x, t), \tag{1}$$

где; c_1 , λ – теплоемкость и теплопроводность пленки; ρ_1 – плотность пленки; t – длительность лазерного импульса. Формула (1) справедлива, когда облучаемый материал нагревается до температуры, близкой температуре плавления $\leq T_2$, при которой не происходит удаления вещества, и материал имеет твердую фазу. Для случая P1 (рис. 3) слагаемое $\sum(x, t)$ является пространственно-временным источником лазерного излучения:

$$\sum(x, t) = (1 - R_{bc})(1 - R_{cZnO})\alpha_{ZnO} q_0 \exp(-\alpha_{ZnO}(x - \Delta X_C)),$$

где R_{bc} – коэффициент отражения от границы воздуха и стекла; R_{cZnO} – коэффициент отражения от границы стекла и пленки ZnO; q_0 – мощность падающего излучения; α_{ZnO} – коэффициент поглощения пленки ZnO; ΔX_C – толщина стекла.

Слагаемое $\sum(x, t)$ для случаев P2 и P3 будет считаться одинаковым, так как условия попадания лазерного импульса в место поглощения одинаковое, различие только в значении энергии импульса. В случае P3 нужно немного больше энергии, так как удаляется сразу два слоя a-Si:H/μc-Si:H и ZnO, а в случае P2 удаляется только слой a-Si:H/μc-Si:H. Слагаемое $\sum(x, t)$ из формулы (1) примет вид для случая P2 и P3:

$$\sum(x, t) = (1 - R_{bc})(1 - R_{cZnO})(1 - R_{ZnOa-Si:H})\alpha_{a-Si:H} q_0 \times \exp(-\alpha_{a-Si:H}(x - \Delta X_C - \Delta X_{ZnO})) \times \exp(-\alpha_{a-Si:H} \Delta X_{ZnO}),$$

где $R_{ZnOa-Si:H}$ – коэффициент отражения от границы пленок ZnO и a-Si:H; $\alpha_{a-Si:H}$ – коэффициент поглощения a-Si:H; ΔX_{ZnO} – толщина пленки ZnO. Коэффициент отражения находится по формуле Френеля. Данные коэффициенты преломления для стекла, ZnO

и *a*-Si:H при комнатной температуре и длине волны излучения 355 нм и 532 нм имеются в работе [5].

До момента прихода второго импульса локальный участок пленки нагревается до нужной температуры. В процессе нагрева этого участка уменьшается ширина его запрещенной зоны, которую можно считать по формуле:

$$E_g = E_g(T = 300K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (2)$$

где α и β константы; T – температура. Для ZnO при комнатной температуре ширина запрещенной зоны $E_g = (T = 300K) = 3,4$ эВ, при нагреве до 800 К она уменьшается на ~350 мэВ из-за механизмов теплового расширения и увеличения электронно-фононного взаимодействия. В результате нагрева ZnO лазерным импульсом изменяется оптический коэффициент поглощения α согласно формуле: $\alpha = \text{const}(h\nu - E_g)^{1/2}$.

При облучении *a*-Si:H наносекундным лазерным импульсом происходит эффузия водорода [6], которая приводит к образованию шероховатостей на поверхности пленки [7]. Эффект эффузии водорода наблюдается при температуре 623 К [8]. При изменении концентрации водорода в пленке изменяется и ширина запрещенной зоны [9], что в свою очередь влияет на коэффициент оптического поглощения α , определяемый из соотношения Тауца [10]:

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = \text{const}(h\nu - E_g). \quad (3)$$

Таким образом, при поглощении первого лазерного импульса плёнка нагревается, вследствие чего происходит эффузия водорода, и тем самым изменяется ширина запрещенной зоны E_g , соответственно, меняется оптический коэффициент поглощения (3).

Повышение температуры приводит к изменению коэффициентов отражения R_{ZnO} и $R_{\text{ZnOa-Si:H}}$. Поскольку они связаны с коэффициентами преломления, изменение ширины запрещенной зоны E_g также приводит к изменению коэффициента преломления [11]:

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{A}{E_g(T) + B} \right)^2}, \quad (4)$$

где $A = 13,6$ эВ; $B = 3,47$ эВ [12, 13]. Авторы [12] утверждают, что данная модель в оптическом диапазоне длин волн имеет маленькую погрешность для элементов из группы III-V, I-VII таблицы Менделеева. В работе [14] при температуре от 20 °С до 300 °С и длине волны 633 нм коэффициент преломления ZnO линейно изменяется от 1,91 до 2,004.

Для сильно поглощающих пленок закон выделения тепла по глубине отличается от закона поглощения света, если длина свободного пробега электрона в пленке l соизмерима с ее толщиной h [15]. Пространственное распределение источников тепла в пленке толщиной $h \sim 100l$ принимают неравномерным по толщине, что приемлемо для ZnO. Длина свободного пробега для ZnO определяется по следующей формуле:

$$l = \left(\frac{h}{e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu, \quad (5)$$

где h – постоянная планка; e – заряд электрона; n – концентрация электронов; μ – подвижность.

При толщине пленки ZnO $1,7 \times 10^{-6}$ м и длине свободного пробега электронов $\sim 10^{-9}$ м [16] источники тепла при поглощении лазерного импульса распределены по толщине неравномерно, так как она на 10^3 раза больше, чем длина свободного пробега электрона. При нагреве лазерным тактом, начиная от комнатной температуры (рис. 3), подвижность носителей уменьшается из-за увеличения поперечного сечения объема колебаний атомов решетки, что приведет к уменьшению длины свободного пробега электронов согласно (5).

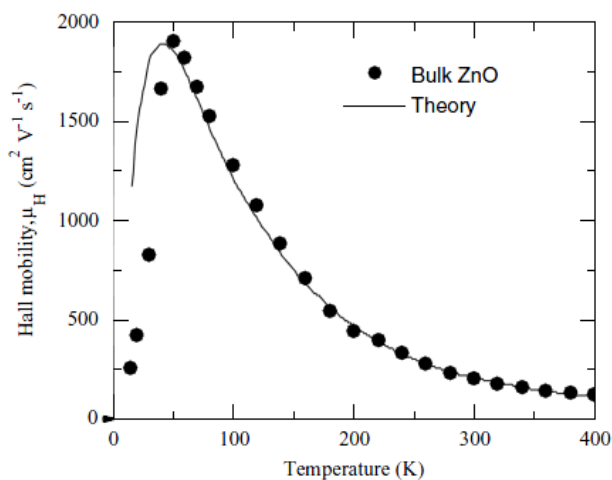


Рис. 3. Экспериментальные (кружки) и теоретические (непрерывная линия) данные подвижности в зависимости от температуры ZnO [17]
 Fig. 3. Experimental (circle) and theoretical (solid line) data of mobility versus temperature

В случае *a*-Si:H длина свободного пробега электрона на порядки меньше, чем ZnO из-за малой подвижности электронов (рис. 4). Учитывая большой коэффициент поглощения $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ и длину свободного пробега, нагрев будет неравномерный по толщине.

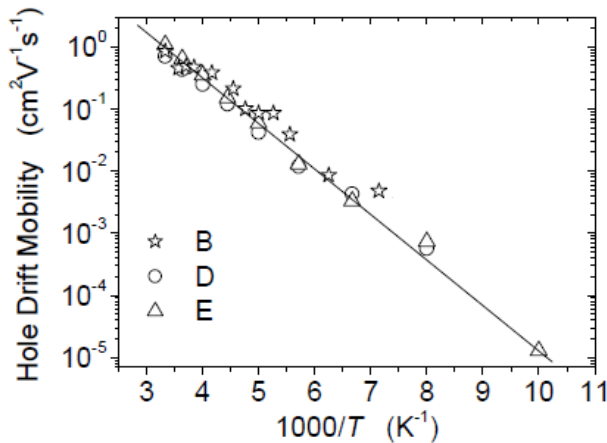


Рис. 4. Подвижность электронов в a-Si: B, D, E – образцы с рамановским соотношением 0,71; 0,6 и 0,61 и толщинами 4; 3,4 и 4,3 мкм соответственно [18]
Fig. 4. The mobility of electrons in the a-Si: B, D, E – samples with Raman ratio 0.76; 0.6 and 0.61

При поглощении однократного лазерного импульса пленками ZnO и a-Si:H/ μ c-Si:H происходит неравномерный нагрев по толщине, что приводит к большому градиенту температуры. Большой градиент температуры создает условие для микровзрыва из-за высокой температуры на границе интерфейса со стеклом для случая P1, а в случае P2 и P3 на границе с ZnO, при этом облучение идет со стороны подложки (стекла). Противоположная сторона пленки не успевает нагреться за время импульса до температуры на границе интерфейса. Это вызывает испарение облучаемого вещества на границе интерфейса, а от взаимодействия лазерного импульса с веществом образуется плазма. Поскольку плазма имеет большое давление, она выдавливает верхний слой. Температура нагрева тонкой пленки определяется выражением [15]: $T = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 c_1 \Delta X} + T_0$, где A_1 – по-

глощательная способность пленки; T_0 – комнатная температура. Подставляя вместо q_0 закон поглощения по толщине (закон Бугера – Ламберта – Бера), можно вычислить разницу температур между двумя границами пленок ZnO и a-Si:H. Численные решения показывают, что для пленки ZnO разница температур составляет 3 500 K, а для пленки a-Si:H/ μ c-Si:H 4 700 K.

В момент попадания второго лазерного импульса пленка будет иметь температуру выше комнатной. С учетом этого тепловая модель нагрева будет отличаться от формулы (1) наличием слагаемого $L_m \delta(T_3 - T_m)$ [4], где L_m – скрытая теплота плавления, T_m – температура плавления, T_3 – температура испарения. Тепловая модель нагрева пленки вторым импульсом будет иметь вид:

$$(c_p \rho + L_m \delta(T_3 - T_m)) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum(x, t). \quad (6)$$

Данная модель позволяет учитывать фазовый переход тонкой пленки из твердого состояния в жидкое при поглощении второго такта лазерного импульса. Здесь (6) последнее слагаемое будет отличаться от (1), так как в момент поглощения второго такта коэффициенты поглощения и отражения будут другими из-за повышенной температуры.

Заключение

В данной работе предложена схема генерирования двухтактного лазерного импульса от одного импульса. Эта схема позволяет регулировать энергию каждого импульса, что даёт возможность выбрать оптимальный режим для того, чтобы уменьшить диаметр кратера, получаемого от двух импульсов. Проанализировано воздействие лазерных импульсов, первого и второго, на пленки (ZnO, a-Si:H/ μ c-Si:H). Сделан вывод о том, что в результате поглощения первого импульса изменяются оптические и физические свойства пленок (ZnO, a-Si:H/ μ c-Si:H), а также условия для поглощения второго импульса.

Работа поддержана фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договором 4238ГУ2/2014 от 16.12.2014

Список литературы

1. Cremers D.A., Radziemski L.J., Loree T.R. Spectrochemical analysis of liquids using the laser spark // Applied Spectroscopy. 1984. Vol. 38, No 5. P. 721–729.
2. Weidman M. Nd: YAG-CO₂ double-pulse laser induced breakdown spectroscopy of organic films // Opt Express. 2010. Vol. 18, No 1. P. 259–266.
3. Babushok V.I. Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement // Spectrochimica Acta Part B: At. Spec. 2006. Vol. 61, No 9. P. 999–1014.
4. Bovatsek J. Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials // Thin Solid Films. 2010. Vol. 518, No 10. P. 2897–2904.
5. RefractiveIndex.info. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=ZnO&page=Bond-o> (дата обращения: 26.03.2015).
6. Adikaari A.A.D.T., Silva S.R.P. Thickness dependence of properties of excimer laser crystallized polycrystalline silicon // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97, No 11. Article number 114305.
7. Форш П.А. Оптические и электрические свойства систем, содержащих ансамбли кремниевых нанокристаллов: дис... док. физ.-мат. наук. М., 2014. С. 41–43.

8. Афанасьев В.П. Влияние термообработки на структуру и свойства пленок *a*-Si:H, полученных методом циклического осаждения // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36, № 2. С. 238–244.

9. Голикова О.А. Структурная сетка кремния в пленках *a*-Si:H, содержащих упорядоченные включения // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, № 5. С. 600–604.

10. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.

11. Humayun Q., Kashif M., Hashim U. Structural, Optical, Electrical, and Photoresponse Properties of Postannealed Sn-Doped ZnO Nanorods // Journal of Nanomaterials. 2013. Vol. 2013, No 160. P. 1–8.

12. Degheidy A.R., Elkenany E.B. Theoretical Investigation of the Energy Gaps Temperature Dependence in Zinc-Blende GaP and InP Semiconductors at Normal Pressure // The African Review of Physics. 2012. Vol. 7, No 14. P. 145–163.

13. Herve P., Vandamme L.K.J. General relation between refractive index and energy gap in semiconductors // Infrared Phys. Technol. 1994. Vol. 35, № 4. P. 609–615.

14. Лапшинов Б.А., Магунов А. Н. Установка для измерения температурной зависимости показателя преломления твердых тел // Приборы и техника. 2010. № 1. С. 159–164.

15. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр., отд-ние, 1986.

16. Jianha Hu, Gordon R.G. Chemical vapor deposition of highly transparent and conductive boron doped zinc oxide thin films // MRS Proceedings. 1992. Vol. 242. P. 737–743.

17. Look D.C. Electrical properties of bulk ZnO // Solid State Communications. 1998. Vol. 105, No 6. P. 399–401.

18. Schiff E.A. Transport, Interfaces, and Modeling in Amorphous Silicon Based Solar Cells // NREL. 2008. SR-520-44101.

References

1. Cremers D.A., Radziemski L.J., Loree T.R. Spectrochemical analysis of liquids using the laser spark. *Applied Spectroscopy*, 1984, vol. 38, no. 5, pp. 721–729 (in Eng.).

2. Weidman M. Nd: YAG-CO₂ double-pulse laser induced breakdown spectroscopy of organic films. *Opt Express*, 2010, vol. 18, no 1, pp. 259–266 (in Eng.).

3. Babushok V.I. Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement. *Spectrochimica Acta Part B: At. Spec.*, 2006. vol. 61, no. 9, pp. 999–1014 (in Eng.).

4. Bovatsek J. Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 10, pp. 2897–2904 (in Eng.).

5. RefractiveIndex.info. Available at: Режим доступа: <http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=ZnO&page=Bond-o> (data obrašeniâ: 26.03.2015) (in Eng.).

6. Adikaari A.A.D.T., Silva S.R.P. Thickness dependence of properties of excimer laser crystallized nanopolycrystalline silicon. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 97, no. 11. Article number 114305 (in Eng.).

7. Forsh P.A. Optičeskie i električeskie svojstva sistema, soderžaših ansamblu kremnievyh nanokristallov: DSc thesis (physics and mathematics). Moscow, 2014, pp. 41–43 (in Russ.).

8. Afanas'ev V.P. Vliânie termoobrabotki na strukturu i svojstva plenok *a*-Si:H, polučennyh metodom cikličeskogo osaždeniâ. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2002, v. 36, no. 2, pp. 238–244 (in Russ.).

9. Golikova O.A. Strukturnaâ setka kremniâ v plenkah *a*-Si:H, soderžaših uporađočennye vključeniâ. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2001, vol. 35, no. 5, pp. 600–604 (in Russ.).

10. Afanas'ev V.P., Terukov E.I., Sherchenkov A.A. Tonkoplenočné solnečné elementy na osnove kremniâ. SPb.: Izd-vo SPbGËTU «LËTI» Publ., 2011 (in Russ.).

11. Humayun Q., Kashif M., Hashim U. Structural, Optical, Electrical, and Photoresponse Properties of Postannealed Sn-Doped ZnO Nanorods. *Journal of Nanomaterials*, 2013, vol. 2013, no. 160, pp. 1–8 (in Eng.).

12. Degheidy A.R., Elkenany E.B. Theoretical Investigation of the Energy Gaps Temperature Dependence in Zinc-Blende GaP and InP Semiconductors at Normal Pressure. *The African Review of Physics*, 2012, vol. 7, no. 14, pp. 145–163 (in Eng.).

13. Herve P., Vandamme L.K.J. General relation between refractive index and energy gap in semiconductors. *Infrared Phys. Technol.*, 1994, vol. 35, no. 4., pp. 609–615 (in Eng.).

14. Lapshinov B.A., Magunov A. N. Ustanovka dlâ izmereniâ temperaturnoj zavisimosti pokazatelâ prelomleniâ tverdyh tel. *Pribory i tehnika*, 2010, no. 1, pp. 159–164 (in Russ.).

15. Vejko V.P. Lazernaâ obrabotka plenočnyh materialov. Leningrad: Mašinstroenie Publ., Leningr., otdnie, 1986 (in Russ.).

16. Jianha Hu, Gordon R.G. Chemical vapor deposition of highly transparent and conductive boron doped zinc oxide thin films. *MRS Proceedings*, 1992, vol. 242, pp. 737–743 (in Eng.).

17. Look D.C. Electrical properties of bulk ZnO. *Solid State Communications*, 1998, vol. 105, no. 6, pp. 399–401 (in Eng.).

18. Schiff E.A. Transport, Interfaces, and Modeling in Amorphous Silicon Based Solar Cells. *NREL*, 2008, SR-520-44101 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

