

Раздел V. Моделирование сложных систем

УДК 519.633; 621.383

С.П. Малюков, И.В. Куликова, Г.В. Калашников

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ-СТЕКЛОВИДНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК»

На основе численных методов разработана нестационарная двумерная модель воздействия лазерного излучения, для получения качественных эпитаксиальных слоев кремния на подложке из боросиликатного стекла. Модель позволяет учитывать неравномерность оптических и физических параметров полупроводниковых структур и параметры лазерного излучения. Программное обеспечение на основе разработанной модели позволило подобрать оптимальный режим обработки выбранной структуры, а также позволяет определить оптимальные значения лазерного излучения и оптимизировать процесс «лазерного отжига» кремния на подложке из боросиликатного стекла.

Моделирование; лазерное излучение; тонкопленочный солнечный элемент; стекло-видный диэлектрик; лазерный отжиг.

S.P. Maljukov, I.V. Kulikova, G.V. Kalashnikov

SIMULATION OF LASER ANNEALING STRUCTURES "SILICON-DIELECTRIC VITREOUS"

On the basis of numerical methods developed transient two-dimensional model of the laser light to obtain high-quality epitaxial silicon layers on a substrate of borosilicate glass. The model takes into account the unevenness of optical and physical parameters of semiconductor structures and parameters of laser radiation. The software on the basis of the developed model has allowed to select the optimal treatment regimen chosen structure, as well as to determine the optimal values of the laser radiation and to optimize the process of "laser annealing" silicon on a substrate of borosilicate glass.

Modeling; laser radiation; thin-film solar cell; glassy insulator; laser annealing.

Введение. Развитие лазерной техники привело к широкому использованию лазерных технологий практически во всех областях микро- и нанoeлектроники. Наиболее важными из лазерных технологических процессов обработки являются «лазерная рекристаллизация» и «лазерный отжиг», которые позволяют получить высококачественные полупроводниковые структуры. Это достигается за счет локальности, импульсного характера и селективности лазерного излучения [1], что является важным шагом на пути к созданию тонкопленочных солнечных элементов [2].

На сегодняшний день широко применяются не только экспериментальные исследования лазерных технологических операций, но и моделирование, которое позволяет значительно сократить время и стоимость исследований и рассчитать оптимальные параметры данной технологической операции.

Целью данной работы является разработка на основе численных методов нестационарной двумерной модели воздействия лазерного излучения, для получения

качественных эпитаксиальных слоев кремния на подложке из боросиликатного стекла ($B_2O_3-ZnO-R_2O-RO$) с промежуточным слоем диоксида кремния (SiO_2) при воздействии Nd:YAG лазера для разработки тонкопленочных солнечных элементов. Разработанная модель должна позволять учитывать неравномерность оптических и физических параметров полупроводниковых структур и параметры лазерного излучения.

Описание эксперимента. В качестве подложки было выбрано боросиликатное стекло ($B_2O_3 - SiO_2 - R_2O - RO$, где $R_2O - K_2O, Na_2O, Li_2O$ и $RO - CaO, MgO$). Выбор данного стекла в качестве подложки обусловлен повышенной химической стойкостью (по ISO 719 – 1) и высокой стойкостью к температурному воздействию ($T_g 536\text{ }^\circ\text{C}$, температура плавления $1070\text{ }^\circ\text{C}$). Наличие бора в данном типе стекла может использоваться для легирования (или, по крайней мере, для частичного легирования) затравочного слоя или поглощающего слоя при создании солнечных элементов. Таким образом, сама конструкция солнечного элемента избавляется от диффузионных барьеров в отношении подложки. Использование подложки из боросиликатного стекла также заметно удешевляет производство солнечного элемента [3,4].

Нанесение пленки аморфного кремния происходило при помощи установки электронно-лучевого напыления ВУ-2М с одновременным фотометрическим контролем толщины покрытия. Давление в камере составляло 45×10^7 мм рт. ст., скорость осаждения – 1–10 нм/сек. Толщина пленки аморфного кремния составила 1 мкм.

Исследование образцов до лазерной обработки проводилось при помощи атомно-силового микроскопа на зондовой нанолaborатории NTEGRA VITA.

Для исследования было выбрано 6 образцов (10×10 мм) структуры «стекло-кремний» с промежуточным слоем диоксида кремния (SiO_2), которые подвергались воздействию твердотельного Nd:YAG лазера (длина волны $\lambda - 532$ нм, длительность импульса – 30–45 нс, энергия импульса – 1 мДж/см, частота следования импульсов – 10 кГц). Оптическая система лазерной установки «LIMO 100-532» позволяла формировать зону облучения в виде узкой полоски шириной 10 мкм и длиной 60 мм, гомогенность излучения составляла 98,5 %. Мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне 20–90 Вт, скорость передвижения «столика для образцов» составляла 5 мм/с. При выборе режимов обработки учтено условие, при котором подложка при импульсной обработке не должна влиять на характеристики рекристаллизуемого слоя. Поскольку это может привести к его подлегированию примесями из подложки и изменению электрофизических свойств пленки кремния.

В ходе эксперимента исследовались следующие свойства пленок кремния на стекле: концентрация примеси в материале пленки, подвижность носителей заряда, удельное сопротивление материала, проводимость, среднее значение коэффициента Холла, вольтамперные характеристики пленки; структура рельефа поверхности (исследование на СЗМ); шероховатость. Исследования электрофизических свойств пленки производилось при помощи установки для измерения ЭДС Холла «ЕСОPIA HMS-300/1Т» и сканирующей зондовой нанолaborатория «Ntegra Vita».

До воздействия лазерного излучения перепад высот поверхности составил 31,5325 нм, средняя шероховатость поверхности 5,24777 нм (рис. 1,2).

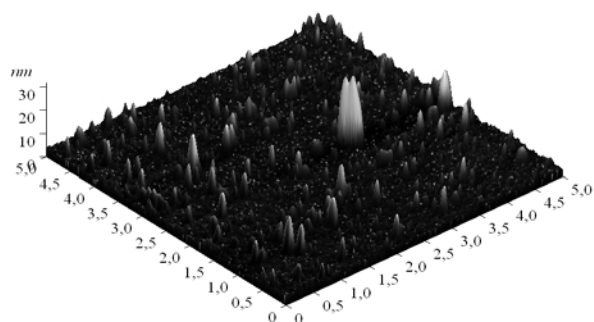


Рис. 1. 3D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний до воздействия лазерного излучения

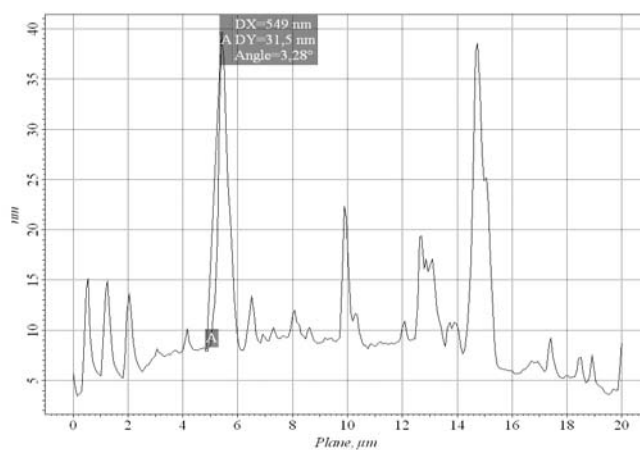


Рис. 2. Графическое изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний до воздействия лазерного излучения

После лазерного облучения средняя шероховатость составила 4,0329 nm, перепад высот 13,407 nm. (рис. 3,4). На рис. 3,4 видно, что воздействие лазерного излучения на образцы привело к существенным перестройкам в пленке кремния, уменьшению перепадов высот и средней шероховатости.

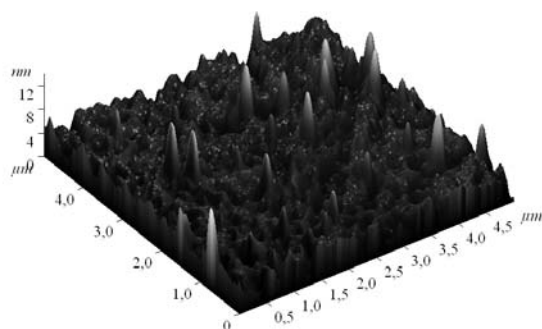


Рис. 3. 3D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний после воздействия лазерного излучения

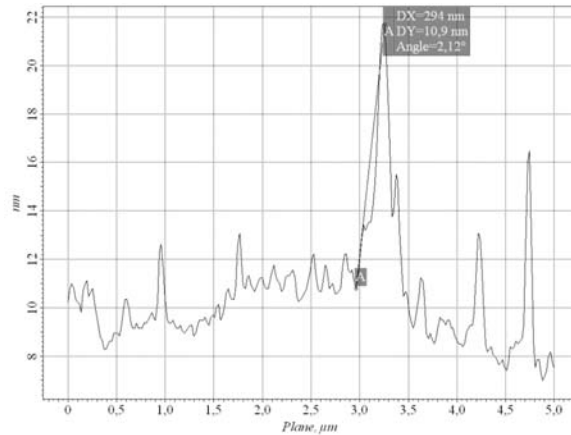


Рис. 4. Графическое изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний после воздействия лазерного излучения

Описание модели. В большинстве случаев применение лазерного излучения основано на тепловом воздействии света на обрабатываемую полупроводниковую структуру. При этом под воздействием тепла в материале происходят те или иные физические процессы такие как изменение фазового состояния, изменение структуры, химические реакции. Поэтому распределение температуры является одним из основных параметров при лазерной обработке.

В основу модели лазерной обработки положено нестационарное двумерное уравнение теплопроводности для анизотропной среды [5]. Источником тепла является лазерное излучение, которое частично отражается от поверхности, поглощается материалом и проникает в него и описывается законом Ламберта:

$$q_{laser}(y) = q_0(1-R)e^{-\alpha y}, \quad (1)$$

где $q_{laser}(y)$ – плотность мощности лазерного луча с учетом затухания; q_0 – плотность мощность лазерного луча; R – коэффициент отражения; α – поглощательная способность среды; y – координата направленная вглубь материала от обрабатываемой поверхности.

Излучательный и конвекционный процессы отвода тепла с обрабатываемой поверхности будут описываться следующими выражениями;

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

$$q_{conv} = h(T - T_0), \quad (3)$$

где T – температура на поверхности структуры; ε – коэффициент излучения (0,68 [6]), σ – постоянная Стефана-Больцмана, h – конвективный коэффициент ($5 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}$ [6]), q_{rad} , q_{conv} – плотность теплового потока за счет излучения и конвекции соответственно, T_0 – температура окружающей среды.

Суммарный тепловой поток q_{comb} с поверхности будет описываться выражением:

$$q_{comb} = h_{comb}(T - T_0), \quad (4)$$

где $h_{comb} = h + \varepsilon\sigma(T + T_0)(T^2 + T_0^2)$ – суммарный коэффициент теплопередачи.

В начальный момент времени структура имеет температуру окружающей среды.

Оптико-тепловая модель в частных производных будет следующей:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q, \quad (5)$$

$$q_{laser}(y) = q_0 (1 - R) e^{-\alpha y}, \quad (6)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{comb} (T - T_0), \quad (7)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h_{comb} (T - T_0), \quad (8)$$

где c – удельная теплопроводность; ρ – плотность; t – время; k – коэффициент теплопроводности.

Для решения системы уравнений (5)-(8) был использован конечно-разностный метод [7].

Результаты моделирования. Система уравнений (5)-(8) в конечно разностном виде представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для решения СЛАУ и визуализации результатов решения была использована система MathLab. Результаты моделирования приведены на рис. 5,6.

Результаты были получены для структуры и параметрах лазера, описанных выше.

На рис. 5,а,б представлены зависимости плотности мощности лазерного луча и поглощенная энергия структурой. Как видно из рисунков, поглощенная энергия лазерного излучения максимальна на поверхности, зависит от оптических свойств и толщины слоя.

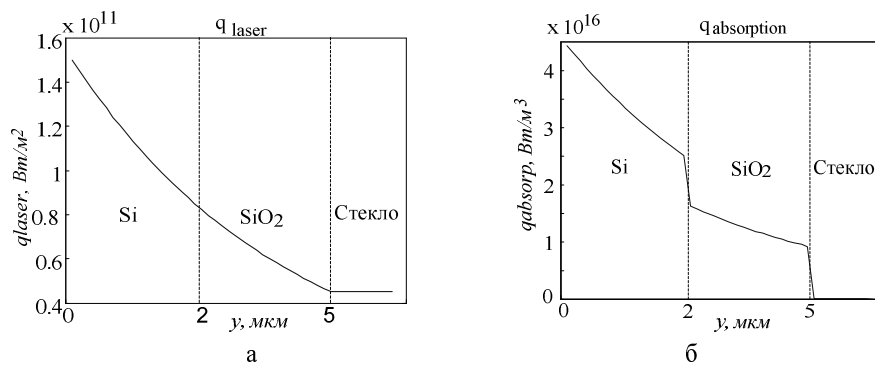


Рис. 5. Распределение мощности лазерного луча (а), распределение мощности поглощенного структурой излучения (б)

На рис. 6 представлено распределение температуры в обрабатываемой структуре, на рис. 6,б распределение температуры дано в большем масштабе для наглядности.

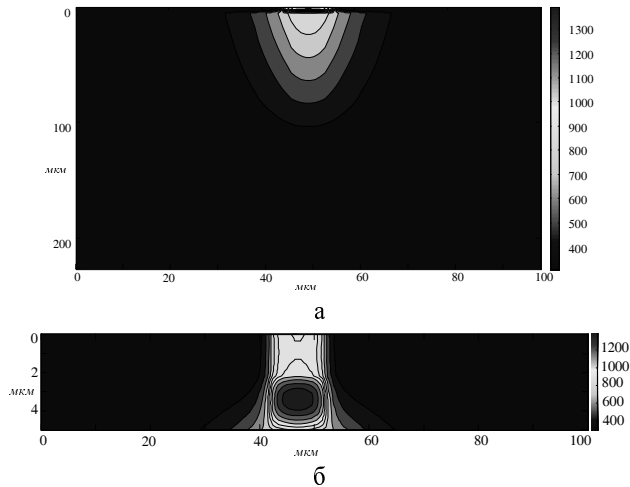


Рис. 6. Распределение температуры в структуре (а), распределение температуры в двух верхних слоях структуры (б)

Заключение. Разработанная на основе численных методов, нестационарная двумерная модель воздействия лазерного излучения, для получения качественных эпитаксиальных слоев кремния на подложке из боросиликатного стекла при воздействии Nd:YAG лазера с целью разработки тонкопленочных солнечных элементов, правильно показывает основные направления «лазерного отжига».

Программное обеспечение на основе разработанной модели позволило подобрать оптимальный режим обработки выбранной структуры, что позволило рекристаллизовать пленку кремния и, соответственно, уменьшить перепады высот и среднюю шероховатость поверхности.

Модель позволяет определить оптимальные значения лазерного излучения и оптимизировать процесс «лазерного отжига» кремния на подложке из боросиликатного стекла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Берегов М.Е., Киселев Н.А.* Корректировка топологии фотошаблона методом локального лазерно-химического осаждения // *Электронная промышленность*. – 1987. – Вып. 4. – С. 26-27.
2. *Пилипенко В.А., Попов Ю.П.* Использование фотонных технологических процессов при изготовлении биполярных ИС // *Электронная промышленность*. – 1988. – Вып. 5. – С. 3-9.
3. *Andra G., Plentz J.* Advances in Multicrystalline LLC-Si Thin Film Solar Cells // *Proc. 22nd Europ. PVSEC, Milan*. – 2007. – P. 1967-1970.
4. *Малюков С.П.* Стекловидные диэлектрики в производстве магнитных головок // *Таганрог*, 1998. – С. 45-86.
5. *Kulikova I.* Laser technologies in the nanoelectronics. German-Russian interdisciplinary workshop for students and young scientists “Nanodesing: Physics, Chemistry and Computer modeling” 16-17 December. – Rostov-on Don, 2010. – 35 с.
6. *Venkadeshwaran K., Das S., Misra D.* Finite element simulation of 3-D laser forming by discrete section circle line heating. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2, № 4. – 3. 163-175. URL: <http://www.ijest-ng.com>.
7. *Самарский А. А., Вабищевич П. Н.* Вычислительная теплопередача. – Изд-во: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Малюков Сергей Павлович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: malyukov@fep.tti.sfedu.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371603.

Кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАЕН; заведующий кафедрой.

Куликова Ирина Владимировна

E-mail: cuttlefish99@mail.ru.

Кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Калашников Глеб Валерьевич

E-mail: gleb@fep.tti.sfedu.ru

Кафедра конструирования электронных средств; инженер 2-й категории.

Malyukov Sergey Pavlovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”

E-mail: malyukov@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634371603.

The Department of Electronic Apparatuses Design; Dr. of Eng. Sc.; Professor; Corresponding Member RANS; Head the Department.

Kulikova Irene Vladimirovna

E-mail: cuttlefish99@mail.ru

The Department of Electronic Apparatuses Design; Cand. of Eng. Sc.; Associate professor.

Kalashnikov Gleb Valerievich

E-mail: gleb@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Electronic Apparatuses Design; Post-graduate Student.

УДК 621.3.049.771.14

С.В. Гаврилов, О.Н. Гудкова, А.Н. Щелоков

**АНАЛИЗ ДЕГРАДАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ ВО ВРЕМЕНИ
НА ЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЕ***

С переходом на техпроцессы с проектной нормой 130 нм и ниже на деградацию временных параметров транзисторов доминирующее влияние оказывает эффект температурной нестабильности при отрицательном смещении (НВТИ). Данная статья посвящена исследованию влияния НВТИ-эффекта на характеристики цифровых КМОП-схем на логическом уровне. В работе предложена параметрическая модель для анализа деградации порогового напряжения транзистора во времени вследствие НВТИ-эффекта, учитывающая влияние переходных процессов. Для корректного вычисления вероятности напряженного состояния р-транзисторов в КМОП венти́ле предложен алгоритм, учитывающий корреляций сигналов и анализирующий стрессовые пути.

Анализ надежности; эффекты деградации; температурная нестабильность при отрицательном смещении; НВТИ-эффект; пороговое напряжение; статический временной анализ.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-07-00211-а).