

3. Практическое решение вопросов по созданию отдельных элементов сетевых систем управления может быть обеспечено уже в настоящее время предприятиями отечественного оборонно-промышленного комплекса, являющимися системными интеграторами в области создания ресурсо- и наукоемких образцов вооружения и военной техники. В частности, ОАО «Концерн «РТИ Системы» совместно с Технопарком «Система-Саров» проводится разработка базовых технологий и технических решений для создания сетевых систем управления регионального уровня.

4. Для создания сетевых систем управления с приемлемыми экономическими затратами представляется целесообразной консолидация под руководством одного государственного заказчика большого количества разрозненных, концептуально и системно не объединенных работ, ведущихся в данном направлении различными предприятиями ОПК, в рамках ограниченного количества комплексных системных НИОКР и специальной целевой программы по отработке новейших технологий и элементной базы.

Таким образом, только в результате взвешенной и экономически выверенной государственной военно-технической политики в области создания принципиально новых средств вооруженной борьбы может быть обеспечен мощный асимметричный ответ новым угрозам национальной безопасности России в XXI в.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Слока В.К. Сетевые системы регионального уровня реального масштаба времени // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3.

Рахманов Александр Алексеевич

Открытое акционерное общество "Концерн «Радиотехнические и информационные системы».

E-mail: kantselariya@rtisystems.ru.

127083, г. Москва, ул. 8 марта, 10, стр. 1

Тел.: 84957847718.

Заместитель генерального директора; профессор.

Rakhmanov Alexander Alekseevich

Open joint-stock company "Concern" Radio Engineering and Information Systems».

E-mail: kantselariya@rtisystems.ru.

10, Street on March, 8th, str.1, Moscow, 127083, Russia.

Phone: +74957847718.

The Assistant to the General Director; Professor.

УДК 621.315.592

С.П. Малюков, Г.В. Калашников, В.В. Пташник

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОЗДАНИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается один из подходов применения лазерных технологий в создании солнечных элементов. Исследована и установлена область «критического воздействия» лазерного луча типа «топ-хэт» установки «LIMO 100-532» при отжиге пленки кремния, нанесенного на подложку из стекловидного диэлектрика. Эксперименты с различными значениями параметров лазерной установки «LIMO 100-532» (мощность излучения, длительность импульса, скорость передвижения образца) привели к выводу о возможности модификации свойств многослойных систем при лазерной обработке, так как имеется воз-

возможность селективного отжига отдельных слоев многослойных систем, что недоступно при традиционной термообработке.

Тонкопленочный солнечный элемент; стекловидный диэлектрик; область критического воздействия; лазерный отжиг; «топ-хэт».

G.V. Kalashnikov, V.V. Ptashnik

ABOUT ONE APPROACH OF APPLICATION LASER TECHNOLOGIES IN CREATION SOLAR CELLS

The article discusses one approach using laser technology to create solar cells. Investigated and established area of "critical impact" of a laser beam type "top hat" installed «LIMO 100-532» annealing of silicon films deposited on a substrate of vitreous dielectric. Experiments with different values of the parameters of the laser setup «LIMO 100-532» (radiated power, pulse duration, speed of the sample) led to the conclusion about the possibility of modifying the properties of multilayer systems, laser processing, as there is the possibility of selective annealing of the individual layers of multilayer systems, which is unattainable with conventional heat treatment.

Thin-film solar cell; glassy insulator; region of the critical impact; laser annealing; "top hat".

Введение. Успехи последних лет в технологии фотопреобразования и положительный практический опыт использования фотоэлектрических систем стали основой быстрого развития фотоэнергетики в мире. Основным материалом для получения солнечных элементов является кремний. Сейчас около 93,5 % производимых в мире солнечных фотоэлементов (СЭ) изготавливается на основе моно- и поликристаллического толстопленочного кремния, из них 38,3 % – на основе монокристаллического кремния, 55,2 % – на основе поли- или мультикристаллического кремния. При этом 90,6 % фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) производится в виде пластин моно- и мультикристаллического кремния и 2,9 % – в виде микрокристаллических кремниевых лент. Оставшаяся часть солнечных элементов производится в виде тонких пленок таких материалов как аморфный кремний, теллурид кадмия (CdTe), диселенид меди и индия (CIS), арсенид-галлия (GaAs) и других, нанесенных на различные подложки. Коэффициент полезного действия (КПД) большинства солнечных элементов невелик, он не превышает пока 25 %, за исключением арсенид-галлиевых солнечных элементов (табл. 1).

Таблица 1

КПД солнечных батарей различных типов, %

Материал солнечной батареи	КПД, %
Толстопленочные солнечные элементы	
Монокристаллический кремний	25
Поликристаллический кремний	20
Тонкопленочные солнечные элементы	
Арсенид галлия	35-40
Диселенид меди и индия	20
Теллурид кадмия	16
Аморфный кремний	10
Нанокристаллический кремний	8-10
Полимерный кремний	5

Тонкопленочные солнечные элементы на основе аморфного кремния (как более дешевые) имеют существенные преимущества по сравнению с СЭ на основе кристаллического кремния. Такие СЭ примерно в 100 раз тоньше, чем кристаллические СЭ и намного более эффективно могут принимать рассеянный и слабый солнечный свет. Тонкопленочные СЭ намного терпимее относятся к затенению и к высоким рабочим температурам, которые характерны для работы под ярким солн-

цем. Максимальная рабочая температура тонкопленочных солнечных батарей достигает $+1500^{\circ}\text{C}$, в отличие от $+700^{\circ}\text{C}$ у толстопленочных СЭ [1-4].

В последнее время широкое применение находят СЭ на основе аморфного кремния и использующие в качестве подложки стекловидный диэлектрик. Одним из основных преимуществ таких элементов является существенное снижение стоимости изготовления. Сформированные на подложке из стекловидного диэлектрика тонкопленочные СЭ весьма перспективны, что подтверждено в работе [5], где достигнут КПД такого СЭ – 9,26 % (рис. 1).

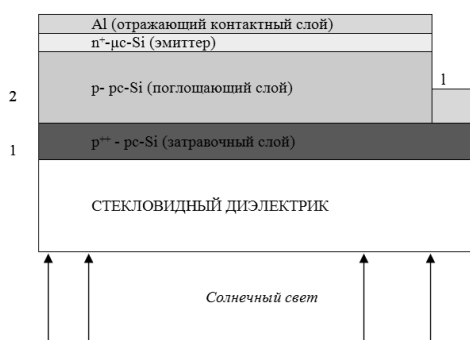


Рис. 1. Схематическое изображение тонкопленочных СЭ на основе аморфного кремния с применением стекловидного диэлектрика в качестве подложки

Непрерывное повышение уровня сложности изготовления солнечных элементов диктует необходимость уменьшения числа высокотемпературных операций, их длительности и температуры. Наиболее перспективным для этих целей является лазерная технология обработки полупроводниковых материалов, отличающаяся высокой локальностью, селективностью и импульсным характером воздействия на обрабатываемую поверхность. При производстве тонкопленочных СЭ лазерные технологии фактически не имеет альтернативы. В настоящее время технология производства представляет собой ряд шагов, последовательно чередующих процесс нанесения очередного слоя и его лазерного структурирования: нанесение на стеклянную подложку просветляющего покрытия (ТСО), на котором лазером с длиной волны 1,06 мкм создается контактная структура; нанесение аморфного кремния поверх структурированного слоя ТСО и структурирование лазером с длиной волны 0,53 мкм; нанесение металлизированного заднего контакта поверх слоя аморфного кремния, который также структурируется лазером [6,7].

Задачей исследований являлась отработка лазерных технологий с целью получения качественных слоев кремния на подложке из стекловидного диэлектрика для создания тонкопленочного солнечного элемента. В качестве подложки было выбрано боросиликатное стекло ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{R}_2\text{O} - \text{RO}$, где $\text{R}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{Li}_2\text{O}$ и $\text{RO} - \text{CaO}, \text{MgO}$). Выбор данного стекла в качестве подложки обусловлен согласованностью коэффициента линейного расширения, повышенной химической стойкостью (по ISO 719 – 1), высокой стойкостью к температурному воздействию (T_g 536 $^{\circ}\text{C}$, температура плавления 1070 $^{\circ}\text{C}$). 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 сам солнечный элемент, так как дорогостоящий промежуточный слой между стеклянным и прозрачным кремние-

вым слоем, такой как металлический электрод или буферный слой, служащий диффузионным барьером по отношению к примесным атомам, полученных из стеклянной подложки, является необязательным, но возможным. Это также применимо для просветляющего покрытия [8,9].

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.

Для исследования было выбрано 6 образцов (10x10 мм) структуры «стекло-кремний», которые подвергались воздействию твердотельного Nd:YAG лазера (длина волны λ – 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 20-80 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.

Лазерный луч установки «LIMO 100-532» имеет плоскую вершину «топ хэт» (распределение энергетического потока по всей рабочей площади и автоматическое отслеживание этой функции) по короткой оси (рис. 2). При использовании такого вида луча лазера значительно увеличиваются области, эффективные для поликристаллизации при той же энергии импульса, а скорость перемещения образца может быть увеличена на 20 %. Также достигается большая глубина фокуса и повышение гомогенности луча до 95 %. Наблюдения подтвердили, что при использовании данного луча, средний размер зерен практически не изменился [10].

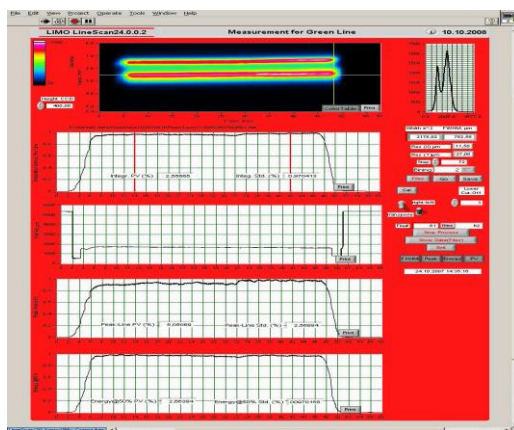


Рис. 2. Графическое отображение профиля топ-хэт полученного на лазерной установке «LIMO 100-532»

В ходе эксперимента исследовались следующие свойства пленок кремния на стекле: концентрация примеси в материале пленки, см^{-3} ; подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; удельное сопротивление материала, $\text{Ом}\cdot\text{см}$; проводимость, $1/(\text{Ом}\cdot\text{см})$; среднее значение коэффициента Холла, $\text{см}^3/\text{С}$; вольтамперные характеристики пленки; структура рельефа поверхности (исследование на СЗМ); шерохо-

ватость, нм. Исследования электрофизических свойств пленки производилось при помощи установки для измерения ЭДС Холла «ЕСОPIА HMS-300/1Т» и сканирующей зондовой нанолaborатория «Ntegra Vita».

Исследование образцов до лазерной обработки проводилось при помощи атомно-силового микроскопа на зондовой нанолaborатории NTEGRA VITA. Перепад высот составил 31,5325 nm, средняя шероховатость поверхности 5,24777 nm (рис. 3-5).

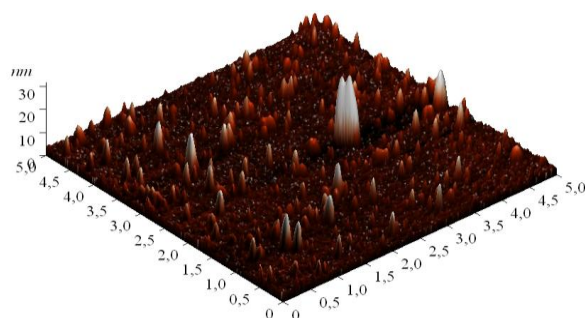


Рис. 3. 3D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний до воздействия лазерного излучения

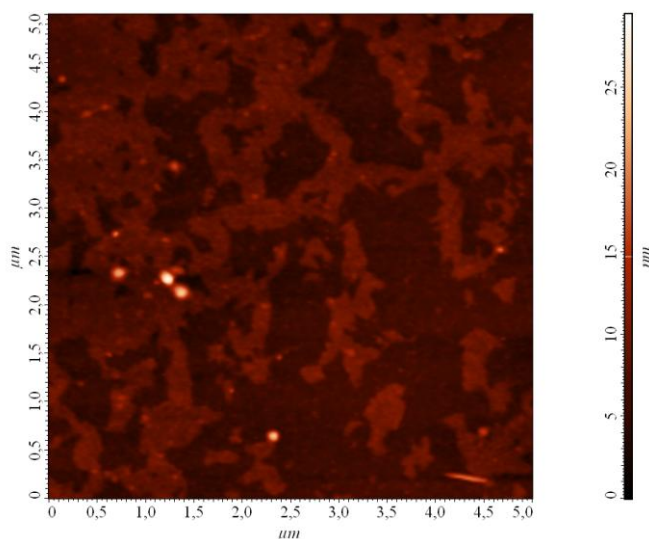


Рис. 4. 2D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний до воздействия лазерного излучения

После лазерного облучения средняя шероховатость составила 4,0329 nm, перепад высот 13,407 nm. (рис. 6-8). На указанных снимках видно, что воздействие лазерного излучения на образцы привело к существенным перестройкам в пленке кремния, уменьшению перепадов высот и средней шероховатости.

При лазерной обработке поверхности аморфного кремния на подложке из боросиликатного стекла вероятнее всего происходит фазовый переход кремния в поликристаллическое состояние. Вследствие этого наблюдалось увеличение коэффициента пропускания для пленки кремния. В зависимости от того, какая часть энергии лазерного луча была поглощена образцом, и происходит фазовый переход.

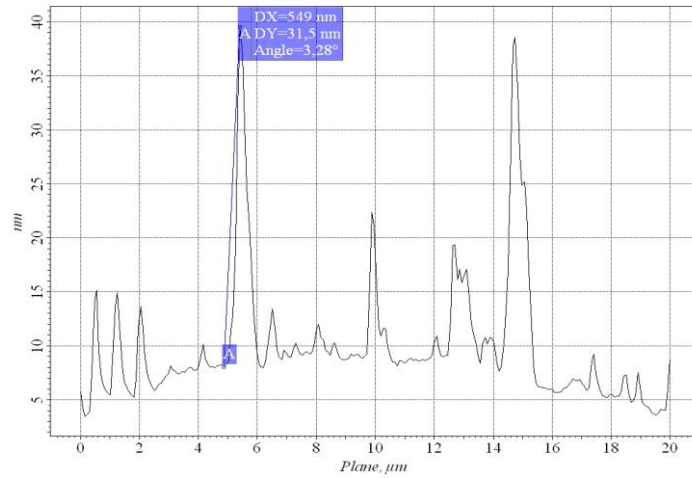


Рис. 5. Графическое изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний до воздействия лазерного излучения

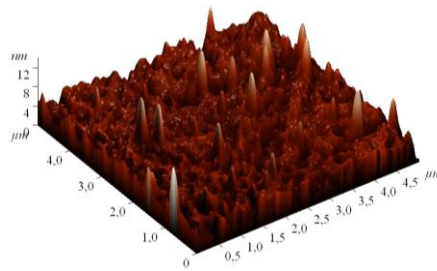


Рис. 6. 3D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний после воздействия лазерного излучения

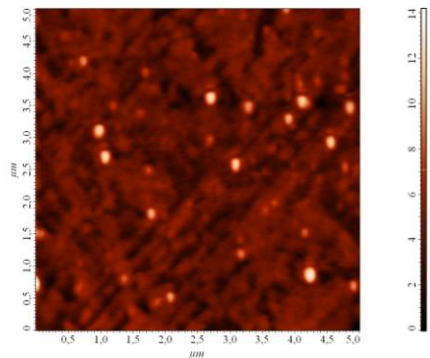


Рис. 7. 2D изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний после воздействия лазерного излучения

Существует три режима плавления: частичный, почти полный и полный. Данные режимы зависят от степени поглощения лазерного излучения образцом. Так называемое «критическое воздействие», находится в очень узком энергетическом интервале между режимом частичного плавления и режимом почти полного плавления [11]. В этом интервале находятся наиболее оптимальные значения

мощности лазерного излучения, при которых происходит кристаллизация пленок аморфного кремния. В ходе экспериментов нами было установлено, что для установки «ЛМО 100-532» это интервал находится при мощности излучения от 60 до 65 Вт. Полученные результаты согласуются с моделью, описанной в работе [11], где была представлена модель, описывающая фазовый переход кремния из аморфного состояния в поликристаллическое.

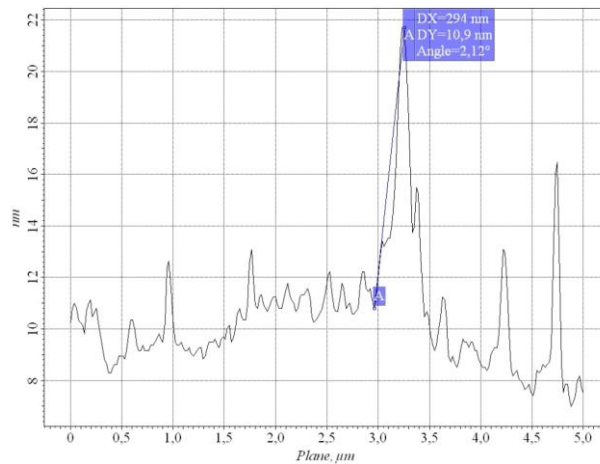


Рис. 8. Графическое изображение результатов исследования образцов структуры стекло-кремний после воздействия лазерного излучения

Стоит отметить, что под переплавленным слоем нами были обнаружены отдельные кристаллиты со средним размером ~ 5 нм, окруженные кремнием. Обычные скорости твердофазного роста не могут обеспечить образования кристаллических зерен таких размеров за время пребывания в высокотемпературном состоянии, поэтому было сделано предположение, что ускоренная рекристаллизация обусловлена механическими напряжениями в слое.

Заключение. В зависимости от параметров лазерного излучения существует возможность улучшения качества поверхности кремния за счет рекристаллизации аморфных слоев Si. Эксперименты с различными значениями параметров лазерной установки «ЛМО 100-532» (мощность излучения, длительность импульса, скорость передвижения образца) привели к выводу о возможности модификации свойств многослойных систем при лазерной обработке, так как имеется возможность селективного отжига отдельных слоев многослойных систем, что недоступно при традиционной термообработке.

Воздействие лазерного излучения на образцы привело к существенным перестройкам в пленке кремния, а также к значительному уменьшению перепадов высот и средней шероховатости поверхности пленки. Изучение воздействия лазерной обработки на полупроводниковые структуры позволяет определить характеристики их структуры дефектов.

В ходе экспериментов была установлена область «критического воздействия» для установки «ЛМО 100-532» при лазерном отжиге структуры кремний на стекловидном диэлектрике. Эта область находится при мощности излучения от 60 до 65 Вт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д.* Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 8. – С. 937-948.
2. *Макушин М.* Есть ли место Солнцу в будущем российской энергетики? // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 112-119.
3. *Николаенко Ю.Е.* Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Энергетическая микроэлектроника НПП “КараТ”, НУ “Львовская политехника”. Технология и конструирование электронной аппаратуры. – 2001. – № 3. – С. 21-30.
4. *Хамакава Й.* Аморфные полупроводники и приборы на их основе / Пер. с англ. – М: Металлургия. (Y. Hamakawa Amorphous Semiconductor Technologies & Devices 1983, North-Holland (OHMSHA)). – 1986. – С. 375.
5. *Bergmann R.B., Rinke T.J.* Thin film solar cells on glass by transfer of monocrystalline Si films // International journal of photoenergy. – 1999. – Vol. 1. – P. 89-93.
6. *Homburg O., Harten P.* Innovative Laser Materials Processing for Photovoltaics: Top Hat Profiles Improve Process Stability and Reduce Costs Compared to Gaussian Profiles // Laser Technik Journal. – 2009. – Vol. 6. – P. 38-40.
7. *Matt H.* Saving Money with Laser Processing // Photonics Spectra. – 2008. – Vol. 42. – P. 34-36.
8. *Andra G., Plentz J.* Advances in Multicrystalline LLC-Si Thin Film Solar Cells // Proc. 22nd Europ. PVSEC, Milan. – 2007. – P. 1967-1970.
9. *Малюков С.П.* Стекловидные диэлектрики в производстве магнитных головок. – Таганрог, 1998. – С. 45-86.
10. *Luffler J., Wipliez L.A.* Depth-Selective Laser Ablation for Monolithic Series Interconnection of Flexible Thin-Film Silicon Solar Cells // Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg. – 2009. – 3AV.2.42. – P. 2704-2706.
11. *Zhijun Yuan, Qihong Lou, Jun Zhou, Jingxing Dong.* Opt. Laser Technol. – 2009. – Vol. 41. – P. 380.

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, корпус «Е».

Тел.: 88634371603.

Кафедра конструирования электронных средств; заведующий кафедрой, профессор; член-корреспондент РАЕН.

Калашников Глеб Валерьевич

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

Кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Пташник Виталий Владимирович

E-mail: VitPtashnik@gmail.com.

Кафедра ТМиНА; аспирант.

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, building “E”, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634371603.

The Department of Electronic Apparatuses Design; Head the Department; Professor, Corresponding Member RANS.

Kalashnikov Gleb Valerievich

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

The Department of Electronic Apparatuses Design; Postgraduate Student.

Ptashnik Vitaliy Vladimirovich

E-mail: VitPtashnik@gmail.com

The Department Technology of Micro and Nano Devices; Postgraduate Student.

УДК 51-74

Я.С. Коровин, М.В. Хисамутдинов

**МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВЫСОТЫ ИЗДЕЛИЙ В СИСТЕМЕ
БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВЫСОТНОСТИ ТВС
АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА***

Рассматривается новый метод вычисления координат высоты видимых ТВС, используемый в системе бесконтактного определения разнорысотности ТВС в активной зоне реактора. Применены алгоритмы цифровой обработки изображения, проведен ряд математических преобразований. Проведено моделирование системы и построена графическая модель реакторного помещения. Система на основе данного метода прошла апробацию на первом энергоблоке Волгодонской АЭС.

Активная зона; тепловыделяющая сборка (ТВС); телевизионная камера; 3D модель.

Y.S. Korovin, M.V. Khisamutdinov

**METHOD OF CALCULATION OF COORDINATES OF HEIGHT OF
PRODUCTS IN SYSTEM OF CONTACTLESS DEFINITION OF
RAZNOVYSOTNOSTI TVC OF THE ACTIVE ZONE OF THE REACTOR**

In this paper a new method for calculating the coordinates of the visible height of FA used in the system of non-contact height detection in the reactor core is depicted. Digital image processing algorithms, number of mathematical transformations are applied. The system emulation is proceeded, a 3D model of the reactor building is worked out. The system on the basis of the given method has passed approbation on the first power unit of the Volgodonsk atomic power station.

Active zone; fuel assembly (FA); 3D model.

Введение. В данной статье рассмотрен метод вычисления координат высоты видимых ТВС (тепловыделяющих сборок – далее изделий). Данный метод применяется в системе бесконтактного определения разнорысотности ТВС активной зоны атомного реактора типа ВВЭР-1000. Система исключает механических контакт с изделиями, повышает безопасность контроля технологических операций с топливом, проводимых в период ППР (планово-перегрузочных работ). Исходными данными являются фотографии активной зоны реактора, а также данные о положении камеры с терминала оператора перегрузочной машины. Снимки активной зоны реактора проходят несколько алгоритмов фильтрации изображения, по полученным данным вычисляются координаты высоты видимых изделий.

В методе [1] предлагается решение данной задачи с помощью классической фотограмметрии, т.е. съемки одного и того же объекта с различных ракурсов [2]. В реальных производственных условиях это неприемлемо, потому что определение разнорысотности бесконтактным методом осуществляется в процессе инвен-

* Работа выполнена при поддержке: РФФИ (грант № 10-08-01290-а).