

цифровой форме. Выбор шага дискретизации по времени  $\Delta t$  при заданной ошибке квантования по уровню  $\Delta U$  является определяющим фактором для обеспечения высокой точности параметров преобразования.

Выбор требуемого шага дискретизации  $\Delta t$  проведен по критерию измерения скорости БЛА с заданной относительной погрешностью:

$$\delta_w = \frac{\Delta W}{W_p}, \quad (15)$$

где  $\Delta W$  – абсолютная погрешность измерения скорости (элемент разрешения по скорости).

Данную величину можно представить в виде:

$$\delta_w = \frac{A_D}{W_p \tau_f n_d} = \frac{1}{n_d}, \quad (16)$$

где  $n_d$  – требуемое число точек дискретизации с равномерным шагом  $\Delta t$  по длительности  $\tau_f$ .

В этой связи

$$\Delta t = \tau_f \delta_w. \quad (17)$$

Из (17) с учетом верхней граничной частоты сигналов ОВД  $f_{в.гр} = W_p / 0,35 A_d$  требуемый шаг дискретизации определяется уравнением:

$$\Delta t = \frac{\delta_w}{0,35 f_{в.гр}}, \quad (18)$$

при заданной погрешности  $\delta_w$  и апертуры ОВД  $A_d$ .

Полученные оценки обнаружительной способности и точности определения линейных размеров частиц опасных респираторных фракций: чувствительность – на уровне обнаружения одиночных частиц (счетных концентраций); погрешность определения линейных размеров частиц не более 5-7 %.

Разработанный метод открывает широкие возможности оперативной малозатратной диагностики микрофизических параметров твердофазного аэрозоля с БЛА, реализуется на БЛА малых классов с допустимой целевой нагрузкой 0,5-0,8 Кг и энергообеспечением на уровне 1,5-2 Вт.

### Литература

1. Моношкина В.Г., Суторихин И.А. Опасная респираторная фракция частиц приземного атмосферного аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана, 1996. – Т. 9. – № 06. – С. 843–845.
2. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change [Electronic resource] / R.A. Silva [et al] // Environmental Research Letters / 2013. – Vol.8, № 3. Mode of access: <http://iopscience.iop.org/article/10/1088/1748-9326/8/3/034005/pdf>.-Date of access:14.08.2018.
3. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск : Наука, 1982. – 242 с.
4. Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В. Многочастотное зондирование загрязненной атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции // Оптика атмосферы и океана, 2016. – Т. 29. – № 1. – С. 70–79.
5. Иванов В.И., Лазарчик А.Н. Низкокогерентная оптико-волоконная диагностика пароводяных потоков // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сб. докладов V Междунар. научно-практ. конф. РФ. Липецк, 2012. – С. 138–140.

УДК 621.382

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА КРЕМНИЙ-ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Изучение влияния быстрой термообработки на параметры границы раздела кремний-двуокись кремния проводилось путем анализа вольтфарадных характеристик и пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) такой системы. Первый из методов относится к традиционным методам характеристики полупроводниковых структур [1]. Анализ пространственного распределения КРП осуществлялся по методу сканирующего зонда Кельвина с использованием измерительной системы бесконтактной характеристики полупроводниковых пластин СКАН-2013 [2]. В качестве образцов для исследования использовались кремниевые пластины КЭФ 4,5 и КДБ 12 с пленкой двуоксида кремния, сфор-

мированной пирогенным окислением. Часть пластин перед этим проходила операцию предварительной термообработки. На данных пластинах, как прошедших предварительную обработку, так и без таковой, были проведены указанные исследования вольтфарадных характеристик и пространственного распределения КРП по их площади. После этого для пленки двуоксида кремния на всех пластинах была проведена операция быстрой термообработки при температуре 850 °С, после чего выполнена повторная характеристика электрофизических свойств их поверхности.

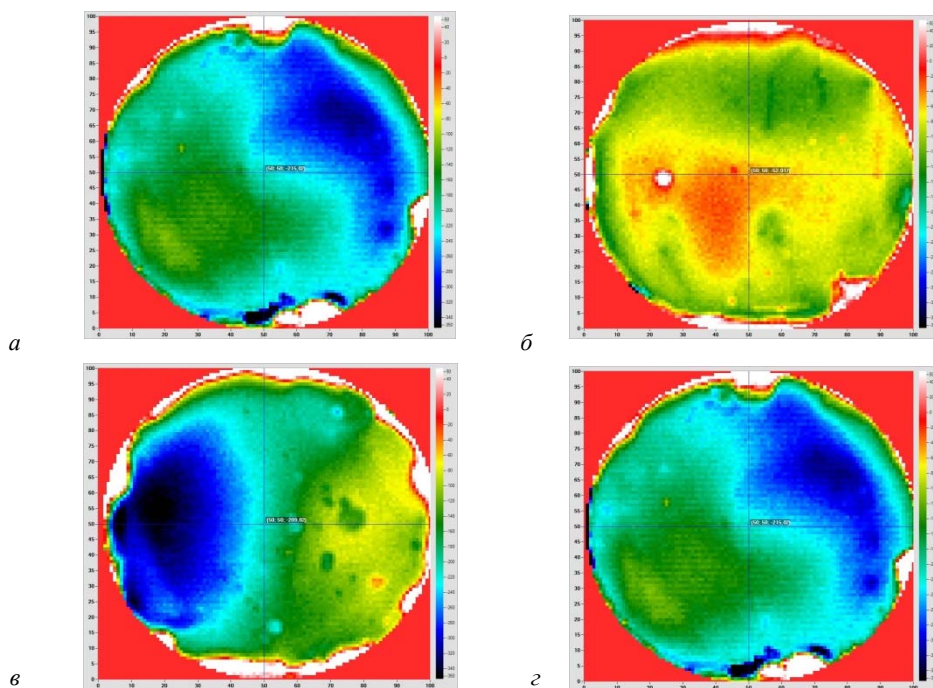
Анализ вольтфарадных характеристик МОП-структур на кремнии *p*-типа с предварительной быстрой термообработкой и без нее до и после

пирогенного термического окисления и тех же характеристик для кремния *n*-типа показал (табл.), что проведение быстрой термообработки приводит к уменьшению напряжения плоских зон от 20 до 60 раз для кремния КЭФ 4,5 и в 1,5 раза для

кремния КДБ 12. При этом плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния уменьшается для кремния КЭФ 4,5 от 2,6 до 3,7 раза и для кремния КДБ 12 от 3,2 до 4,3 раза.

Таблица – Параметры двуокиси кремния, выращенной на кремнии с его предварительной быстрой термообработкой и без таковой, после быстрой термообработки

Параметры двуокиси кремния		Тип пластины			
		КЭФ 4,5		КДБ 12	
		Без обработки	С обработкой	Без обработки	С обработкой
Толщина пленки, нм	Исходная	48,05	48,13	48,42	48,48
	После обработки	45,74	45,92	45,88	45,55
Напряжение плоских зон, В	Исходное	-0,331	-0,324	-1,837	-1,773
	После обработки	0,005	-0,017	-1,254	-1,187
Плотность заряда, см <sup>2</sup>	Исходная	$5,26 \cdot 10^{10}$	$3,41 \cdot 10^{10}$	$3,80 \cdot 10^{11}$	$3,52 \cdot 10^{11}$
	После обработки	$1,43 \cdot 10^{10}$	$1,33 \cdot 10^{10}$	$1,16 \cdot 10^{11}$	$8,16 \cdot 10^{10}$



*а* – для кремния КЭФ 4,5 без обработки, *б* – для кремния КЭФ 4,5 с обработкой, *в* – для кремния КДБ 12 без обработки, *г* – для кремния КДБ 12 с обработкой

Рисунок – Распределение КПП в системе SiO<sub>2</sub> – Si по площади пластины после быстрой термообработки на пластинах кремния с предварительной обработкой и без нее

Было обнаружено, что проведение быстрой термообработки кремния после окисления вызывает существенное изменение вольтфарадных характеристик. Как следует из их анализа, после такой обработки на поверхности окисленной пластины практически отсутствует инверсионный слой и наблюдается существенное снижение величины положительного заряда на границе раздела за счет его отжига. Это говорит о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-двуокись кремния, полученной его пирогенным окислением, после быстрой термообработки. Тем не менее, в окис-

ле остается остаточный фиксированный заряд небольшой величины. На пластинах, прошедших предварительную быструю термообработку, заряд на границе раздела до 1,5 раза меньше, чем на пластинах, не проходивших такой обработки. Это указывает на то, что зарядовые свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник на пластинах, не проходивших предварительной быстрой термообработки, определяются как нарушенной микроструктурой верхнего слоя двуокиси кремния, так и несовершенной структурой остального объема диэлектрика из-за низкой температуры процесса окисления.

При таких температурах (850 °С) формируются слои, имеющие напряженные связи Si-O, оборванные связи Si не заполненные кислородом, уменьшенную силу связей Si-O, измененные углы связей Si-O по сравнению со слоями диэлектрика, получаемого путем термического окисления кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С и выше [3].

Данные исследования распределения КРП по площади пластины показали, что после проведения быстрой термической обработки как на пластинах, проходивших предварительную термообработку, так и без нее наблюдается равномерное распределение КРП по площади пластины (рис.). При этом имеет место значительное повышение КРП (поверхностного потенциала) на границе раздела кремний-диоксид кремния. Так, на пластинах КЭФ 4,5, не проходивших предварительной обработки после быстрой термообработки диоксида кремния, КРП повысилась с минус 1,211 до минус 0,215 В, а для пластин, прошедших обработку, она повысилась с минус 1,134 до минус 0,052 В. В случае пластин КДБ 12 эти величины составили с минус 0,725 до минус 0,210 В и с минус 0,359 до минус 0,284 В соответственно. Можно утверждать о значительном

улучшении свойств границы раздела кремний-диоксид кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры диоксида кремния по всей ее толщине.

#### Литература

1. Gorban, A.P. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method / A.P. Gorban, V.G. Litovchenko, P.Ch. Peikow // Phys. State Sol. (a). – 1972. – V. 10, № 1. – P. 289–292.
2. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Воробей Р.И., Жарин А.Л., Гусев О.К., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.
3. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // ФТП. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.

УДК 621.384.3

### МЕТОД СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь*

Повышение эффективности обнаружения и распознавания различных удаленных объектов, включая малококонтрастные объекты и объекты с нулевой контрастностью, является основной задачей разработки и создания современных лазерно-локационных систем видения и автоматизированного «машинного» распознавания [1, 2]. Приоритетным направлением в этой задаче является создание трехмерных лазерных локаторов (3D-лидаров), обеспечивающих получение дальностных трехмерных изображений объектов [3, 4].

В таких системах дальностные трехмерные изображения объектов получают в виде матрицы (карты) расстояний до каждого из N элементов поверхности объекта. В качестве фотодетекторов в таких системах используются высокочувствительные многоэлементные фотодетекторы «мгновенного» действия с независимыми выходами всех фотодетекторов, обеспечивающие адекватное представление временной информации о моментах прихода отраженного сигнала на каждый из фотодетекторов путем времяпролетных «старт-стопных» измерений. Это позво-

ляет реализовать метод лазерной стереометрии, а именно, прямой метод измерения трехмерной формы объекта наблюдения в полярных координатах (угол-угол-дальность).

Основная сложность практической реализации данного подхода заключается в необходимости пропорционального увеличения числа времяизмерительных каналов с увеличением дискретной размерности матрицы  $N = N_x N_y$ . Так, например, даже при относительно небольшой размерности  $N = 64 \times 64$  элемента требуется 4096 времяпролетных измерительных каналов. Кроме того, также требуется N аналого-цифровых измерительных каналов для получения полутонных изображений объекта или отдельная ПЗС-матрица с элементами обработки сигналов.

В 3D-лидарах зарубежного производства для этой цели используются специальные высокоинтегрированные 3D-камеры [3, 4].

Решение данной задачи с использованием гибридных технологий [5, 6] существенно ограничивает быстродействие и возможность получения трехмерных изображений без механического сканирования с высоким пространственным раз-