

ячеек 0.5-1.2 мкм). Электронно-пучковая обработка литых образцов при указанных параметрах пучка электронов приводит к формированию в поверхностном слое поликристаллической структуры (размер зерен 50-800 мкм) с пластинчатой внутризеренной субструктурой. Механические испытания, выполненные путем растяжения плоских образцов, показали, что наиболее высоким сочетанием прочности и пластичности обладают образцы, полученные методом послойного селективного электронно-пучкового спекания с последующим облучением интенсивным импульсным электронным пучком. Основной причиной низкого уровня механических свойств образцов титанового сплава VT6, сформированных методами АМ-технологии, является высокий уровень пористости материала.

### Список литературы

1. Evans B. Practical 3D printers: The science and art of 3D printing. New York: Apress, 2012. 306 p.
2. Campanelli S.L. et. al. // Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>.
3. Louvis E. et. al. // Journal of Materials Processing Technology. 2011. V. 211. № 2. P. 275-284.
4. Yasa E. et. al. // Rapid Prototyping Journal. 2011. V. 17. № 5. P. 312-327.
5. Yasa E., Kruth J. // Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management. 2011. V. 6. № 4. P. 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4\\_259-270.pdf](https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf)
6. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 90-94.
7. Баева Л.С., Маринин А.А. // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7-12.
8. Additive Manufacturing. 2016. Режим доступа: <http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing> (дата обращения 31.05.2016).
9. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Известия ВУЗов. Физика. 2008. № 5. С. 60-70.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF VT6 ALLOY OBTAINED BY TRADITIONAL METHODS AND FORMED BY LAYER-BY-LAYER SELECTIVE ELECTRON-BEAM SINTERING POWDER

Elizaveta Petrikova<sup>1)</sup>, Anton Teresov<sup>2)</sup>, Yurii Ivanov<sup>3)</sup>  
*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
 2/3 Akademicheskyy ave., 634055 Tomsk, Russia,  
<sup>1)</sup>elizmarkova@yahoo.com, <sup>2)</sup>tad514@yandex.ru, <sup>3)</sup>yufi55@mail.ru*

Work is directed to identification and the analysis of regularities of formation of structure and properties of alloy samples based on titanium VT6, obtained by traditional metallurgy methods and formed by layer-by-layer selective electron-beam sintering in vacuum of titanium powder grade VT6 with a particle size of 40-100 μm. Additional modification of the samples was carried out by irradiating the surface with an intense pulsed electron beam. It is shown that the impact of a pulsed electron beam on the surface of the samples formed by layer-by-layer selective electron-beam sintering leads to a significant decrease in the roughness and porosity of the material surface layer, the formation of a polycrystalline structure (grain size 15-60 μm) in the surface layer with a substructure in the form of the crystallization cells (the size of the cells 0.5-1.2 μm). Mechanical tests realized by stretching flat samples showed that the highest combination of strength and plasticity have samples obtained by layer-by-layer selective electron-beam sintering followed by irradiation with an intensive pulsed electron beam.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА Si-SiO<sub>2</sub> С ПОМОЩЬЮ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В.А. Пилипенко, В.А. Солодуха, В.А. Горушко, В.А. Филипеня  
 ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
 ул. Казинца И.П. 121А, 220108 Минск, Беларусь, office@bms.by

Показано, что проведение быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин и пленок двуокиси кремния, выращенных на их поверхности, позволяет стабилизировать зарядовые свойства границы раздела такой системы из-за уменьшения толщины нарушенного слоя в исходных кремниевых пластинах и совершенствования структуры выращенных пленок.

### Введение

Межфазная граница раздела полупроводник-диэлектрик является составной частью большинства современных полупроводниковых приборов, от которой зависит их надежность работы и устойчивость характеристик по отношению к различного рода внешним воздействиям. Именно переходной слой подзатворного диэлектрика определяет такие его характеристики, как энер-

гия образования поверхностных состояний, плотность и положение кулоновских центров относительно границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>, параметры микрорельефа поверхности кремния, стойкость к воздействию горячих носителей.

Для стабилизации зарядовых свойств подзатворного окисла и его границы раздела применяются различные технологические приемы. Наибольшее распространение для нейтрализа-

ции заряда поверхностных состояний получили низкотемпературные отжиги при 350-550°C в среде водорода, отжиг в инертной атмосфере, который позволяет уменьшить величину фиксированного заряда. Значительное снижение величины фиксированного заряда на границе раздела кремний – термическая двуокись кремния и плотности быстрых поверхностных состояний достигается также путем лазерной обработки поверхности кремния перед окислением импульсами наносекундной длительности.

### Основная часть

Исследования проводились на пластинах КЭФ-4.5 и КДБ-12 ориентации (100) диаметром 100 мм, на которые путем пирогенного окисления наносился подзатворный диэлектрик толщиной 42.5 нм. Часть исходных кремниевых пластин перед окислением проходила быструю термообработку. После термического окисления все пластины подвергались быстрой термической обработке, которая проводилась в естественных атмосферных условиях некогерентным излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев до температуры 1100°C.

Анализ вольт-фарадных характеристик данных структур показал (таблица 1, 2), что проведение быстрой термообработки приводит к уменьшению от 20 до 60 раз напряжения плоских зон 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.

На рисунке 1 приведены вольт-фарадные характеристики МОП-структур на кремнии р-типа с предварительной быстрой термообработкой и без нее, а на рисунке 2 те же характеристики для кремния n-типа.

Поведение характеристик свидетельствуют о том, что проведение такой обработки после окисления вызывает существенное их изменение. На поверхности окисленной пластины практически отсутствует инверсионный слой для кремния р-типа проводимости и наблюдается снижение величины положительного заряда на границе раздела за счет его отжига. Данный результат гово-

Таблица 1. Параметры границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки, выращенной на кремнии КЭФ-4.5 с его предварительной быстрой термообработкой и без нее

Параметры двуокиси кремния		Без обработки	С обработкой
Толщина пленки, нм	исходная	48.05	48.13
	после обработки	45.74	45.92
Напряжение плоских зон, В	исходная	-0.331	-0.324
	после обработки	0.005	-0.017
Плотность заряда, см <sup>-2</sup>	исходная	5.26 10 <sup>10</sup>	3.41 10 <sup>10</sup>
	после обработки	1.43 10 <sup>10</sup>	1.33 10 <sup>10</sup>

Таблица 2. Параметры границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки, выращенной на кремнии КДБ-12 с его предварительной быстрой термообработкой и без нее

Параметры двуокиси кремния		Без обработки	С обработкой
Толщина пленки, нм	исходная	48.42	48.48
	после обработки	45.88	45.55
Напряжение плоских зон, В	исходная	-1.837	-1.773
	после обработки	-1.254	-1.187
Плотность заряда, см <sup>-2</sup>	исходная	3.80 10 <sup>11</sup>	3.52 10 <sup>11</sup>
	после обработки	1.16 10 <sup>11</sup>	8.16 10 <sup>11</sup>

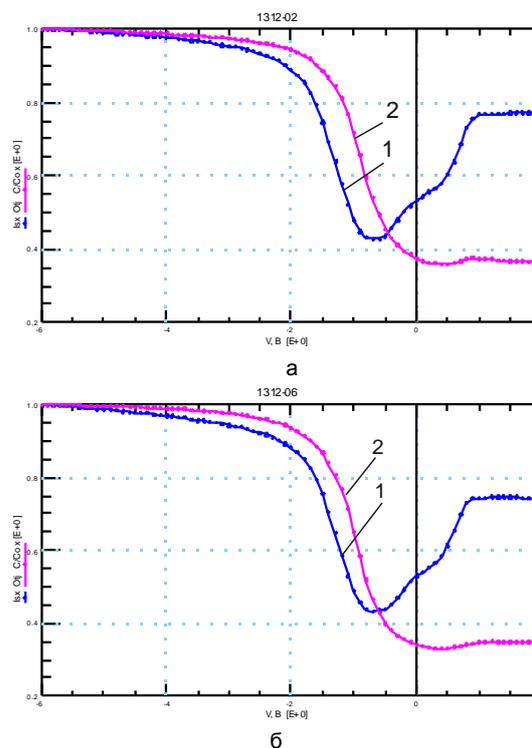


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КДБ-12 до (1) и после (2) быстрой термообработки: а - с предварительной быстрой термообработкой перед окислением; б – без термообработки

рит о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-двуокись кремния, полученной его пирогенным окислением после быстрой термообработки. Тем не менее, в окисле остается остаточный фиксированный заряд небольшой величины. При этом на пластинах, прошедших предварительную быструю термообработку перед окислением, заряд на границе раздела в 1.5 раза меньше, чем без нее. Это указывает на то, что зарядовые свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник на пластинах, не проходивших предварительную быструю термообработку перед окислением, определяются как нарушенной микроструктурой верхнего слоя двуокиси кремния, так и несовершенной структурой

ее объема из-за низкой температуры процесса окисления. В ранее проведенных работах было установлено, что при температуре окисления 850°C 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, полученного путем термического окисления кремния в сухом кислороде при температуре 1000°C и выше [1].

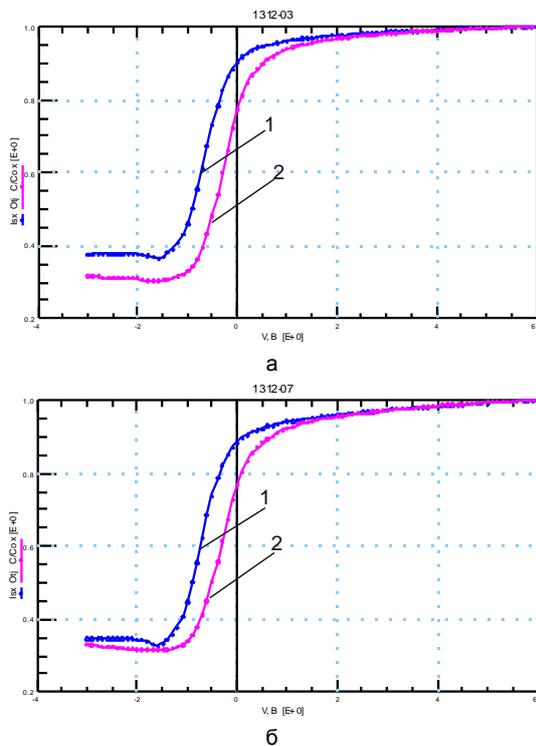


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КЭФ-4.5 до (1) и после (2) быстрой термообработки: а - с предварительной быстрой термообработкой перед окислением; б – без термообработки

Следует отметить, что заряд, обусловленный неоднородной структурой нарушенного поверхностного слоя двуокиси кремния, остается практически неизменным после быстрой термообработки. В то время как заряд, обусловленный несовершенством структуры диэлектрической пленки из-за низкой температуры окисления, значительно уменьшается. Подтверждением этого является его поведение на границе раздела в

случае проведения предварительной быстрой термообработки исходных пластин кремния перед окислением, в процессе которой происходит рекристаллизация нарушенного слоя кремния, приводящая к уменьшению величины фиксированного заряда.

На этих же образцах был проведен анализ распределения поверхностного потенциала по площади пластины. Данные исследования показали, что после проведения быстрой термической обработки двуокиси кремния на пластинах как проходивших предварительную термообработку, так и без нее наблюдается равномерное его распределение по ее площади. При этом имеет место значительное снижение поверхностного потенциала на границе раздела кремний-двуокись кремния. Так, на пластинах КЭФ-4.5, не проходивших предварительной обработки после быстрой термообработки двуокиси кремния, поверхностный потенциал уменьшился с -1.21080 до -0.21502 В, а для пластин, прошедших обработку - с -1.13370 до -0.05202 В. В случае пластин КДБ-12 эти величины составили: с -0.7247 до -0.20982 В и с -0.35922 до -0.28418 В соответственно. Учитывая данные результаты, можно утверждать о значительном улучшении свойств границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры двуокиси кремния по всей ее толщине.

### Заключение

Проведение быстрой термообработки исходных кремниевых пластин перед окислением приводит к уменьшению в 1.5 раза величины заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния по сравнению с пластинами, не проходившими предварительную термообработку перед окислением. Это обусловлено структурным совершенством поверхности кремния перед процессом окисления.

Быстрая термообработка пленок двуокиси кремния, сформированных путем его пирогенного окисления, приводит к уменьшению напряжения плоских зон, величины поверхностного потенциала и заряда на границе раздела кремний - двуокись кремния, что связано с перестройкой микроструктуры диэлектрической пленки в процессе такой обработки.

### Список литературы

1. Зи. С.М. Технология СБИС. М.: Мир, 1986. Т. 1. 404 с.

## STABILIZATION OF THE Si-SiO<sub>2</sub> INTERFACE PARAMETERS BY MEANS OF RAPID THERMAL TREATMENT

V.A. Pilipenko, V.A. Solodukha, V.A. Gorushko, V.A. Filipenya

JSC "INTEGRAL" – Holding Managing Company, 121A Kazintsya str., 220108 Minsk, Belarus, office@bms.by

It is shown, that performance of the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers and films of silicon dioxide, grown on their surface, makes it possible to stabilize the charge properties of the interface of such system owing to reduction of the disrupted layer thickness in the initial silicon wafers and perfecting the structure of the grown films.