

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Nondestructive testing with thermography /C. Ibarra-Castanedo, J. R.Tarpani, X. Maldague// European Journal of Physics.-2013ю- Vol. 34.- N. 6.- P.s91-s109.
2. Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons/ L. Lillo-Sánchez [et al.] // Solar Energy.-2021.- Vol. 222.- P. 84-94.
3. Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants/ W. Mühleisen [et al.] // Renewable Energy.-2019.- Vol. 134.- P. 321-329.
4. Carigiet F. Long-term power degradation analysis of crystalline silicon PV modules using indoor and outdoor measurement techniques/ F. Carigiet, Ch. J. Brabec, F. P. Baumgartner// Renewable and Sustainable Energy Reviews.-2021.-Vol. 144.- P. 111005.
5. Low-cost infrared thermography in aid of photovoltaic panels degradation research/ M.A. Dávila [et al.]// Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.- 2021.- № 101.- P.20-30.

## ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ И РЕТИКУЛЯРНОЙ ПЛОТНОСТИ ИСХОДНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

А. А. Омельченко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко

---

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А,  
220108, Минск, Беларусь  
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru.

Приведены результаты исследования методом спектральной эллипсометрии влияния быстрой термообработки (БТО) исходных кремниевых пластин (КДБ-12 ориентации  $\langle 100 \rangle$ , КДБ-10 ориентации  $\langle 111 \rangle$  и КДБ-0,005 ориентации  $\langle 100 \rangle$ ) различного уровня легирования и ретикулярной плотности на их оптические характеристики: коэффициенты преломления, поглощения. Подтверждено влияние ретикулярной плотности кремния на его оптические характеристики после БТО. Показано, уменьшение коэффициентов преломления и поглощения в центре зоны Бриллюэна для образцов кремния с высокой концентрацией бора после БТО по сравнению с низколегированным кремнием; в области пика максимума поглощения, соответствующего энергии выхода электрона с поверхности кремния (4.34 эВ) показатель преломления высоколегированного кремния становится выше, чем у низколегированного кремния, что обусловлено высокой концентрацией свободных носителей заряда на поверхности кремния в этом спектральном диапазоне.

Установлено, что спектральная область 3.59–4.67 эВ, определяемая работой выхода электронов с поверхности кремния, более информативно показывает различие оптических параметров кремния различной ориентации, а для оценки влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики наиболее информативен спектральный диапазон 3.32–4.34 эВ.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка; коэффициент поглощения; коэффициент преломления.

# EFFECT OF DOPING LEVEL AND RETICULAR DENSITY OF INITIAL SILICON WAFERS ON THEIR OPTICAL CHARACTERISTICS AFTER RAPID THERMAL PROCESSING

A. A. Omelchenko, V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko

---

*JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,  
Kazinka str., 121A, 220108, Minsk, Belarus*

*Corresponding author: A. A. Omelchenko (anna.omelchenko.13177@mail.ru)*

The investigation results are presented by means of the spectral ellipsometry method of the rapid thermal processing (RTP) influence on the initial silicon wafers (KDB12 orientation  $\langle 100 \rangle$ , KDB10 orientation  $\langle 111 \rangle$  and KDB0.005 orientation  $\langle 100 \rangle$ ) of the various level of doping and reticular density influence on their optical characteristics: refraction and absorption ratios. Influence was confirmed of the silicon reticular density on its optical characteristics after the rapid thermal processing. It was shown, that reduction of the refraction and absorption ratios in the center of the Brillouin zone for the silicon samples with the high Boron concentration after the rapid thermal processing as compared with the low doped silicon; in the area of the maximum absorption peak, corresponding to the energy of the electron exit from the silicon surface (4.34 eV) the refraction indicator of the high doped silicon becomes higher, than of the low doped silicon, which is determined by the high concentration of the vacant charge carriers on the silicon surface in this spectral range.

It was established, that the spectral area 3.59–4.67 eV, determined by the work of the electrons, exiting the silicon surface, in a more informative way shows the difference of the 3 optical parameters of silicon of the different orientation, and for evaluation of influence of the silicon doping level on its optical characteristics the most informative is the spectral range of 3.32–4.34 eV.

**Key words:** rapid thermal processing; absorption ratio; refraction ratio.

## ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором, влияющим на качество и надежность современных интегральных схем, является состояние поверхности исходных кремниевых пластин. В связи с этим большое внимание уделяется вопросам подготовки поверхности кремния. Известно, что одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния является твердофазная рекристаллизация поверхностного слоя кремния после химико-механической полировки с использованием быстрой термической обработки (БТО) импульсами секундной длительности [1, 2]. Важными параметрами, несущими информацию о состоянии поверхности кремниевой пластины, являются ее оптические характеристики, а именно, коэффициенты преломления, поглощения и отражения, которые наиболее чувствительны к наличию нарушенного слоя, имеющегося на поверхности кремниевых пластин после химико-механической полировки [3]. Однако в литературе ссылок не найдено, где бы изучался вопрос зависимости оптических характеристик пластин кремния от ее ориентации и степени легирования в широком спектральном диапазоне от видимого света до глубокого ультрафиолета после БТО.

Целью данной работы являлось исследование влияния уровня легирования и ректикулярной плотности исходных кремниевых пластин на их оптические характеристики методом спектральной эллипсометрии после проведения БТО.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве образцов использовались пластины исходного кремния диаметром 100 мм, в частности КДБ12 ориентации  $\langle 100 \rangle$  (далее – КДБ12  $\langle 100 \rangle$ ), КДБ10 ориентации  $\langle 111 \rangle$  (далее – КДБ10  $\langle 111 \rangle$ ) и КДБ-0,005 ориентации  $\langle 100 \rangle$  (далее – КДБ0,005  $\langle 100 \rangle$ ), прошедшие стандартную химико-механическую полировку. Затем на данных образцах проводилась БТО путем облучения световым импульсом с нерабочей стороны пластины в течение 7 с в среде Ag (температура отжига 1100 °С). После завершения процесса БТО на исходных образцах проводился контроль оптических параметров.

Измерения коэффициента преломления и коэффициента поглощения исходных образцов проводили на спектральном эллипсометре UVISEL 2 (фирма, HoribaScientific, Франция в спектральном диапазоне 0.6–6.0 эВ (2100–200 нм.)). Угол падения светового пучка на образец составлял 70°. Обработка спектров и их визуализация осуществлялись с использованием программного обеспечения UVISEL 2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

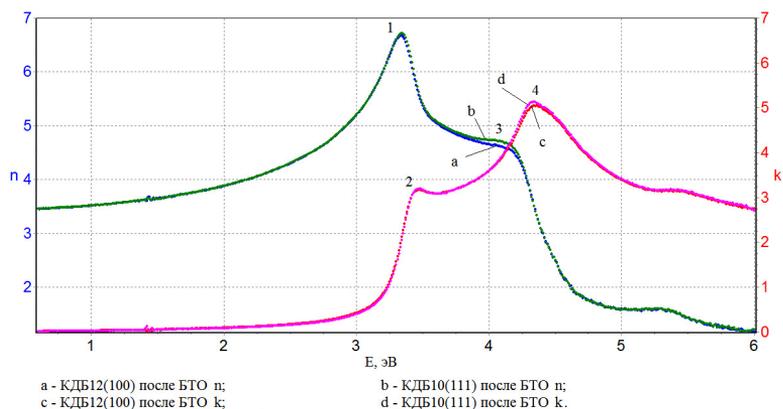
Поскольку кремний в ИК области прозрачен, то наибольший интерес представляют результаты исследования оптических характеристик поверхности кремния в УФ и видимом диапазоне спектра 1.6–6 эВ (760–200 нм). Анализ данных результатов показал, что в спектральном диапазоне от 1.6 до 3.33 эВ для образцов кремния различной ориентации и концентрации легирования наблюдается «нормальная дисперсия», т.е. имеет место увеличение коэффициента преломления кремния с уменьшением длины волны излучения. При переходе в УФ область спектра происходит резкое уменьшение коэффициента преломления, т.е. имеет место «аномальная дисперсия» коэффициента преломления. Обычно она наблюдается в областях частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения света в данной среде, что в данном случае и имеет место. Это обуславливается тем, что при воздействии УФ излучения происходит увеличение концентрации носителей заряда за счет разрывов связей Si-Si (энергия связи Si-Si равна 2.3 эВ). Это и приводит к тому, что в спектральной области от 3.33 до 6 эВ «аномальная дисперсия» коэффициента преломления кремния имеет место вблизи максимумов поглощения, соответствующих (см. рис. 1, 2):

– Г-точке (точке сингулярности Ван Хова M1) центра зоны Бриллюэна с энергией 3.46–3.48 эВ (энергия прямого перехода 3.43 эВ) (см. рис. 1, 2, точка 2, кривые *c*, *d*, *h*);

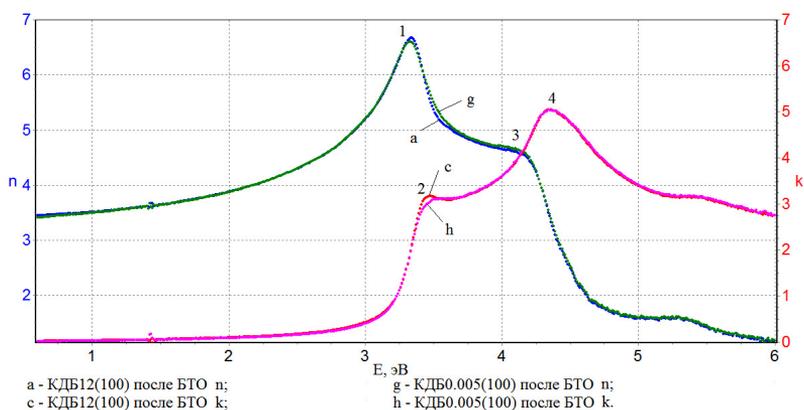
– максимуму поглощения, который соответствует энергии выхода электронов с поверхности кремния 4.34 эВ (работа выхода электрона для Si равна 3.59–4.67 эВ) (см. рис. 1, 2, точка 4, кривые *c*, *d*, *h*);

– максимуму поглощения, соответствующего энергии выхода электронов с поверхности естественного окисла, за счет разрыва связей Si-O около 5.42 эВ (энергия связи Si-O равна 4.79 эВ).

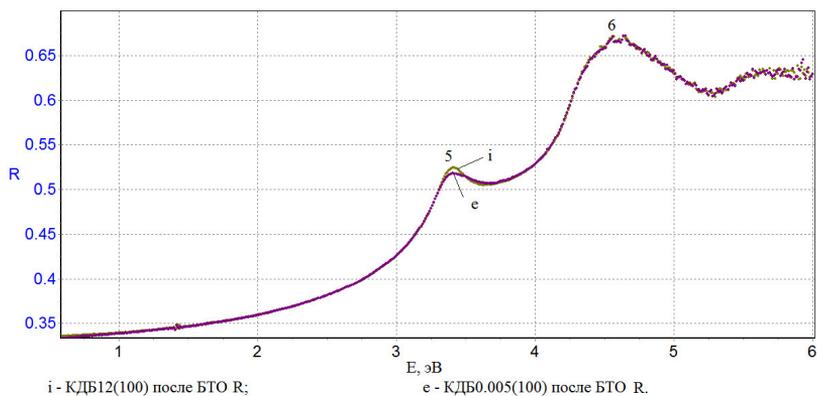
Спектральная зависимость коэффициента отражения *R*, как правило, слабо зависит от энергии фотона, и спектральные изменения интенсивности отраженного луча связаны главным образом с изменениями коэффициента поглощения.



**Рисунок 1.** Спектральная зависимость коэффициентов поглощения  $k$  и преломления  $n$  исходного кремния КДБ12<100> и КДБ10<111> после БТО



**Рисунок 2.** Спектральная зависимость коэффициентов поглощения  $k$  и преломления  $n$  исходного кремния КДБ12<100> и КДБ0.005<100> после БТО



**Рисунок 3.** Спектральная зависимость коэффициентов отражения  $R$  исходного кремния КДБ12<100> и КДБ0.005<100> после БТО

Таким образом, спектральная зависимость коэффициента отражения  $R$  имеет аналогичный вид зависимости коэффициента поглощения. При этом она характеризуется пиками максимального отражения в области 3.42 эВ (вблизи  $\Gamma$ -точки центра зоны Бриллюэна) (см. рис. 3, точка 5, кривые  $i$ ,  $e$ ), 4.6 эВ (соответствующего работе выхода электрона с поверхности кремния) (см. рис. 3, точка 6, кривые  $i$ ,  $e$ ) и около 5.75 эВ (соответствующего энергии разрыва связей Si-O) (см. рис. 3) [4, 5].

Сравнительный анализ оптических параметров образцов кремния КДБ12<100> и КДБ10<111> с различной ориентацией поверхности, т.е. имеющих различную ретикулярную плотность, показал (см. рис. 1), что после БТО в области максимумов коэффициента преломления, соответствующих энергии 3.33–3.34 эВ (см. рис. 1, точка 1), 4.1 эВ (см. рис. 1, точка 3), а также в области максимумов поглощения, соответствующих  $\Gamma$ -точке (точке сингулярности Ван Хова M1) центра зоны Бриллюэна (см. рис. 1, точка 2) и энергии выхода электронов с поверхности кремния 4.34 эВ (см. рис. 1, точка 4) для кремния ориентации <111> коэффициенты поглощения, преломления и отражения больше чем для кремния ориентации <100>.

Это имеет аналогичное объяснение, как и в случае исходных образцов: плоскости {111} обладают максимальной плотностью упаковки атомов, т.е. кремний ориентации <111> имеет более высокую ретикулярную плотность [6, 7], а, соответственно, в результате твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя после БТО меньший деформационный потенциал и более плотный естественный окисел.

В максимуме поглощения с энергией 4.34 эВ показатель преломления кремния ориентации <100> незначительно больше на  $\Delta n = 0,004$ , чем для кремния ориентации <111>. Данный результат можно объяснить влиянием высокой концентрацией свободных носителей заряда на поверхности кремния в этом спектральном диапазоне [8].

Причем для спектральной области вблизи максимума коэффициента преломления с энергией 4.1 эВ наблюдается более значительная разница  $\Delta n = 0,098$ , а в максимуме поглощения с энергией 4.34 эВ разница по коэффициенту поглощения также растет и составляет  $\Delta k = 0,077$ . Исходя из этого следует, что спектральная область 3.59–4.67 эВ, определяемая работой выхода электронов с поверхности кремния, более информативно показывает различие оптических параметров кремния различной ориентации.

Исследование влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики на образцах КДБ-12 <100> и КДБ-0,005 <100>, имеющих одинаковую ориентацию и различную степень легирования, показало (см. рис. 2), что в области максимумов поглощения, соответствующих  $\Gamma$ -точке (точке сингулярности Ван Хова M1) центра зоны Бриллюэна (см. рис. 2, точка 2) и энергии выхода электронов с поверхности кремния 4.34 эВ (см. рис. 2, точка 4) для кремния с высокой концентрацией бора КДБ-0,005 <100> наблюдаются более низкие значения оптических параметров, чем для кремния КДБ-12 <100>. Аналогично - в области максимума коэффициента преломления, соответствующего энергии 3,32–3.33 эВ (см. рис. 2, точка 1).

Для слаболегированного кремния КДБ-12 <100> это можно объяснить обеднением поверхностного слоя бором вследствие его диффузии к поверхности и последующего частичного ухода в окружающую среду при высоких температурах БТО. У кремния с высокой концентрацией примеси, несмотря на обеднение поверхностного слоя, деформация кристаллической решетки будет выше, т.к. имеется значительное

содержание точечных дефектов, а следовательно, оптические параметры оказываются ниже, чем у слаболегированного кремния.

Рост концентрации ионизированных акцепторов высоколегированного кремния КДБ-0,005 <100> при высоких температурах БТО приводит к увеличению и эффекту уширения поглощения в области Г- точки зоны проводимости, что объясняет смещение пика Г-точки к 3.51 эВ (см. рис. 2, точка 2, кривые  $\epsilon$ ,  $h$ ) [9].

Следует также отметить, что в области максимума коэффициента преломления с энергией 4.1 эВ для кремния с высокой концентрацией бора КДБ-0,005 <100> наблюдаются более высокие значения оптических параметров, чем для кремния КДБ-12 <100>. Так, в максимуме поглощения с энергией 4.34 эВ (см. рис. 2, точка 4) показатель преломления высоколегированного кремния больше на  $\Delta n = 0,043$ , чем у КДБ-12 <100>. Полученный результат можно объяснить тем, что в данном спектральном диапазоне имеет место более высокая концентрация свободных носителей заряда на поверхности кремния, приводящая к его диффузии в окружающую среду при высоких температурах нагрева. Это означает, что после БТО поверхностный слой обедняется свободными носителями заряда, а, следовательно, в соответствии с [8, 10] и должно иметь увеличение оптических характеристик кремния.

Для спектральной области вблизи максимума коэффициента преломления с энергией 3.32–3.33 эВ наблюдается следующее изменение оптических характеристик:  $\Delta k = 0,143$ ,  $\Delta n = 0,072$ ,  $\Delta R = 0,006$ . В тоже время в максимуме поглощения с энергией 4.48–3.51 эВ разница по коэффициенту поглощения более значительна ( $\Delta k = 0,066$ ) нежели на энергии 4.34 эВ.

Это означает, что для оценки влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики наиболее информативен спектральный диапазон 3.32–4.34 эВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом спектральной эллисометрии исследовано влияние уровня легирования и ретикулярной плотности исходных кремниевых пластин на их оптические характеристики после быстрой термообработки.

Подтверждено влияние ретикулярной плотности кремния различной ориентации на его оптические характеристики после БТО. Установлено значительное уменьшение коэффициентов преломления и поглощения в центре зоны Бриллюэна для образцов кремния с высокой концентрацией бора после БТО по сравнению с низколегированным кремнием из-за более значительного обеднения поверхности кремния бором в первом случае в результате диффузионных процессов на границе кремний-двуокись кремния. В области пика максимума поглощения, соответствующего энергии выхода электрона с поверхности кремния, с энергией 4.34 эВ показатель преломления высоколегированного кремния становится выше чем у низколегированного кремния, что обусловлено высокой концентрацией свободных носителей заряда на поверхности кремния в этом спектральном диапазоне, приводящей к диффузии бора в окружающую среду при высоких температурах нагрева.

Установлено, что спектральная область 3.59–4.67 эВ, определяемая работой выхода электронов с поверхности кремния, более информативно показывает различие оптических параметров кремния различной ориентации, а для оценки влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики наиболее информативен спектральный диапазон 3.32–4.34 эВ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. / Наливайко О.Ю., Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Колос В.В., Белоус А.И., Липинская Т.И. и др. Турцевич А.С., редактор. Минск: Интегралполиграф. Том 1. - 2013. С. 703 стр
2. Солодуха В.А., Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке. / Солодуха В.А. [и др.] // Печат. Доклады Национальной академии наук Беларуси. - 2018. - Т.62, №3. - С.7. 6 стр.
3. Characteristic Features of Heating Semiconductor Silicon Structures during the Rapid Thermal Processing in the VLSI Technology. / V.Bondarev, [et al.] // High Temperature Material Process. - 2018. - Vol. 22, №1. - P. 1-6.
4. Толстой В. П., Введение в оптическую абсорбционную спектроскопию наноразмерных материалов / В. П. Толстой - Санкт-Петербург, изд. СОЛО. - 2014. - 21, 39-48 с.
5. Постников В. С., Оптическое материаловедение. / В. С. Постников. - Пермь, изд. Пермского национального исследовательского политехнического университета. - 2013. - 22-38 с.
6. Орлов А. М., Б. М. Костишко, А. А. Скворцов, Физические основы технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. М. Орлов. - Ульяновск, УлГУ. - 2014. - 33-35 с.
7. Ворошилов Ю. В., В. И. Павлишин, Основы кристаллографии и кристаллохимии. Рентгенография кристаллов / Ю. В. Ворошилов. - Украина, ТОВ "КНТ". - 2011. - 80-84 с.
8. Кононенко В. В., Возбуждение электронной подсистемы кремния с помощью фемтосекундного лазерного облучения / В. В. Кононенко [и др.] // Квантовая электроника - 2012. - том 42, номер 10. - С. 925–930.
9. Пихтин А. Н., Край собственного поглощения полупроводниковых твердых растворов с прямой структурой энергетических зон / А. Н. Пихтин, Х. Х. Хегази // Физика и техника полупроводников. - 2009. - том 43, вып. 10. - С. 1301–1307.
10. Хируненко Л. И., Оптические свойства кремния с высоким содержанием бора / Л. И. Хируненко, Ю. В. Помозов, М. Г. Соснин // Физика и техника полупроводников. - 2013. - том 47, вып. 2 - С. 233–238.

## КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: СИНТЕЗ, МИКРОСТРУКТУРА

**В. В. Паньков, Ю. С. Гайдук, Л. В. Махнач, Д.°В.°Ивашенко**

---

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030Minsk, Belarus,  
Corresponding author: V. V. Pankov (pankov@bsu.by)*

Разработан масштабируемый способ получения порошкообразного керамического материала в системе Cr-Si-Fe-Ca-Al-Cu-O для генерации импульсного инфракрасного излучения дальнего диапазона. Методами энергодисперсионного рентгеновского и рентгенофазового анализа установлено образование метастабильных фаз, расположенных на границах раздела зёрен, которые, скорее всего, участвуют в генерации излучения. Показано, что рассматриваемая керамика состоит из фазы оксида кремния и фаз на основе твёрдых растворов оксидов хрома и железа типа корунда. Оказалось, что эти фазы дополнительно включают метастабильные твёрдые растворы с катионами кальция, алюминия и меди. Проведенные испытания с первичным источником энергии свидетельствуют о возможности генерации импульсного инфракрасного излучения.