

УДК 620.191:621.373.820

ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**В. М. АНИЩИК¹⁾, В. А. ГОРУШКО²⁾, В. А. ПИЛИПЕНКО^{1), 2)},
В. В. ПОНАРЯДОВ¹⁾, В. А. СОЛОДУХА²⁾, А. А. ОМЕЛЬЧЕНКО²⁾**

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования влияния быстрой термической обработки на оптические характеристики кремния в области Г-точки зоны Бриллюэна в зависимости от типа проводимости кремниевых пластин, уровня их легирования, ковалентного радиуса легирующих примесей, а также кристаллографической ориентации поверхности

Образец цитирования:

Анищик ВМ, Горушко ВА, Пилипенко ВА, Понарядов ВВ, Солодуха ВА, Омельченко АА. Изменение оптических параметров кремния после быстрой термической обработки. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2021;3:81–85.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-81-85>

For citation:

Anishchik VM, Harushka VA, Pilipenka UA, Ponariadov VV, Saladukha VA, Omelchenko AA. Variation of the silicon optical parameters after rapid heat treatment. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2021;3:81–85. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-81-85>

Авторы:

Виктор Михайлович Анищик – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела физического факультета.

Валентина Алексеевна Горушко – ведущий инженер государственного центра «Белмикросистемы» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета¹⁾, заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикросистемы» филиала НТЦ «Белмикросистемы»²⁾.

Владимир Васильевич Понарядов – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий учебной лабораторией кафедры физики твердого тела физического факультета.

Виталий Александрович Солодуха – доктор технических наук; генеральный директор.

Анна Александровна Омельченко – инженер 1-й категории государственного центра «Белмикросистемы» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Authors:

Victor M. Anishchik, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics, faculty of physics.

anishchik@bsu.by

Valiantzina A. Harushka, leading engineer at the state center «Belmicroanalysis», branch «Belmicrosystems».

office@bms.by

Uladzimir A. Pilipenka, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; professor at the department of physics of semiconductors and nanoelectronics, faculty of physics^a, and deputy director for scientific development, state center «Belmicroanalysis», branch «Belmicrosystems»^b.

office@bms.by

Vladimir V. Ponariadov, PhD (physics and mathematics), doцент; head of the training laboratory, department of solid state physics, faculty of physics.

ponariadov@bsu.by

Vitali A. Saladukha, doctor of science (engineering); general director.

vsaladukha@integral.by

Anna A. Omelchenko, engineer of the 1st category at the state center «Belmicroanalysis», branch «Belmicrosystems».

office@bms.by



пластины. Коэффициенты преломления и поглощения исходных образцов КДБ-12 ориентации $\langle 100 \rangle$, КДБ-10 ориентации $\langle 111 \rangle$, КДБ-0,005 ориентации $\langle 100 \rangle$ и КЭС-0,015 ориентации $\langle 100 \rangle$, имеющих диаметр 100 мм и прошедших стандартную химико-механическую полировку, измерялись до и после быстрой термической обработки на эллипсометре Uvisel 2 (*Horiba Scientific*, Франция) в спектральном диапазоне 0,6–6,0 эВ (200–2100 нм). Угол падения светового пучка на образец составлял 70° . Показано, что изменение оптических характеристик поверхности кремния в спектральной области расположения Г-точки зоны Бриллюэна после проведения быстрой термической обработки обусловлено снижением поверхностного деформационного потенциала за счет твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя. Установлено, что быстрая термическая обработка образцов кремния с высокой концентрацией бора приводит к более существенному уменьшению коэффициентов преломления и поглощения, чем у образцов кремния с низкой его концентрацией, вследствие обеднения бором приповерхностной области кремния в результате диффузионных процессов на границе кремний – двуокись кремния.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка; коэффициент поглощения; коэффициент преломления; твердофазная рекристаллизация.

VARIATION OF THE SILICON OPTICAL PARAMETERS AFTER RAPID HEAT TREATMENT

V. M. ANISHCHIK^a, V. A. HARUSHKA^b, U. A. PILIPENKA^{a, b},
V. V. PONARIADOV^a, V. A. SALADUKHA^b, A. A. OMELCHENKO^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^b«Integral» – Holding Management Company, 121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: V. V. Ponariadov (ponariadov@bsu.by)

The results of the effect of rapid heat treatment on the optical characteristics of a silicon wafer surface in the region of the G-point in the Brillouin zone are presented for different types of silicon wafers conductivity, their doping level, the covalent radii of dopants and the crystallographic orientation of the wafer surface. The absorption coefficient and refractive index of the initial 100 mm diameter samples KDB-12 $\langle 100 \rangle$, KDB-10 $\langle 111 \rangle$, KDB-0.005 $\langle 100 \rangle$ and KES-0.015 $\langle 100 \rangle$, underwent standard chemical-mechanical polishing, was measured on a Uvisel 2 ellipsometer (*Horiba Scientific*, France) in the spectral range 0.6–6.0 eV (200–2100 nm) before and after rapid heat treatment. The incidence angle of the light beam was 70° relative to the sample plane. It is shown that the changes in the optical characteristics of the silicon surface in the spectral region of the location of the G-point in the Brillouin zone after rapid heat treatment is due to a decrease in the surface deformation potential due to solid-phase recrystallisation of the mechanically damaged layer. It has been established that carrying out the rapid heat treatment of silicon samples with a high boron concentration leads to a more significant decrease in the refractive index and absorption compared with silicon with a low boron concentration, due to an increase in the depletion of the silicon surface with boron as a result of diffusion processes at the silicon – silicon dioxide interface.

Keywords: rapid heat treatment; absorption coefficient; refractive index; solid-phase recrystallisation.

Введение

Состояние поверхности кремниевых пластин – один из фундаментальных факторов, определяющих качество и надежность интегральных схем. В связи с этим вопросам ее подготовки перед процессом формирования последних уделяется большое внимание. После химико-механической полировки, являющейся завершающей стадией механической обработки кремниевых пластин, на их поверхности имеется нарушенный слой. Его наличие оказывает влияние на оптические характеристики пластин. Одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния является его твердофазная рекристаллизация с использованием быстрой термической обработки (БТО) импульсами секундной длительности, что приводит к повышению структурного совершенства рабочей поверхности кремниевых пластин в результате уменьшения дефектности и толщины нарушенного слоя. Важными параметрами, несущими информацию о состоянии поверхности кремниевой пластины, выступают коэффициент преломления и коэффициент поглощения, которые наиболее чувствительны к наличию на ней нарушенного слоя в спектральной области, соответствующей Г-точке зоны Бриллюэна, являющейся точкой сингулярности Ван Хофа, энергия которой составляет 3,43 эВ [1; 2]. Наиболее чувствительный метод контроля оптических параметров поверхностных слоев кремния – эллипсометрия, основанная на анализе характеристик отраженного поляризованного излучения. Учитывая, что эллипсометрический анализ должен проводиться в широком спектральном диапазоне, в качестве оборудования для исследований был



выбран спектральный эллипсометр Uvisel 2 (*Horiba Scientific*, Франция), который позволяет работать в спектральном диапазоне от 190 до 2100 нм и получать результаты с высокими точностью, разрешением и отличным соотношением сигнала и шума.

В данной работе исследовалось влияние БТО на оптические характеристики кремния в области Г-точки зоны Бриллюэна в зависимости от типа проводимости кремниевых пластин, уровня их легирования, ковалентного радиуса легирующих примесей, а также ориентации поверхности пластины.

Методика эксперимента

В качестве образцов использовались пластины кремния диаметром 100 мм, в частности КДБ-12 ориентации $\langle 100 \rangle$ (далее – КДБ-12 $\langle 100 \rangle$), КДБ-10 ориентации $\langle 111 \rangle$ (далее – КДБ-10 $\langle 111 \rangle$), КДБ-0,005 ориентации $\langle 100 \rangle$ (далее – КДБ-0,005 $\langle 100 \rangle$) и КЭС-0,015 ориентации $\langle 100 \rangle$ (далее – КЭС-0,015 $\langle 100 \rangle$), прошедшие стандартную химико-механическую полировку.

Измерения их коэффициентов преломления и поглощения проводились в спектральном диапазоне 0,6–6,0 эВ (200–2100 нм) на эллипсометре Uvisel 2. Угол падения светового пучка на образец составлял 70° . Обработка спектров и их визуализация осуществлялись с использованием программы *Origin Pro 2017*.

Далее исходные пластины КДБ-12 $\langle 100 \rangle$, КДБ-10 $\langle 111 \rangle$ и КЭС-0,015 $\langle 100 \rangle$ на протяжении (3 ± 1) мин подвергались химической обработке в растворе плавиковой кислоты, пластина КДБ-0,005 $\langle 100 \rangle$ – в растворе плавиковой кислоты и КАРО. После этого на данных образцах проводилась БТО путем облучения световым импульсом с нерабочей стороны пластины в течение 7 с в среде Ar (КДБ-12 $\langle 100 \rangle$, КДБ-10 $\langle 111 \rangle$ при температуре отжига 1025°C , КДБ-0,005 $\langle 100 \rangle$ – 1150°C , КЭС-0,015 $\langle 100 \rangle$ – 1075°C). По завершении процесса БТО на образцах выполнялся повторный контроль оптических параметров.

Результаты и их обсуждение

Исследование оптических параметров поверхности исходных кремниевых пластин КДБ-12 $\langle 100 \rangle$ и КДБ-10 $\langle 111 \rangle$ с различной ориентацией в области Г-точки зоны Бриллюэна показало, что у кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ коэффициент поглощения больше, чем у кремния ориентации $\langle 100 \rangle$. Это обусловлено тем, что плоскости $\{111\}$ обладают максимальной плотностью упаковки атомов, т. е. кремний ориентации $\langle 111 \rangle$ имеет более высокую ретикулярную плотность.

После проведения БТО данных образцов наблюдаются снижение коэффициента поглощения, увеличение коэффициента преломления и уменьшение толщины естественного окисла в области максимума поглощения, соответствующего Г-точке (точке сингулярности Ван Хова M_1) зоны Бриллюэна (см. таблицу). Поскольку кремний имеет гранецентрированную кубическую решетку, то ее обратная решетка является объемноцентрированной кубической с первой зоной Бриллюэна в форме усеченного октаэдра. В такой структуре Г-точка обладает полной симметрией кубической структуры, и любое искажение кристаллической решетки за счет ее деформации под действием напряжений будет приводить к нарушению симметрии, а следовательно, к изменению поглощения кремния в спектральном диапазоне, близком к 3,43 эВ, что соответствует прямым переходам на сингулярности Ван Хова зоны Бриллюэна. В нашем случае уменьшение коэффициента поглощения в данной области говорит о том, что БТО обеспечивает улучшение структуры поверхностного слоя с рабочей стороны пластины за счет уменьшения действующих в нем напряжений, а значит, и деформации кристаллической решетки. Следует отметить, что эти изменения более существенны для кремниевых пластин ориентации $\langle 111 \rangle$ из-за ее более высокой ретикулярной плотности.

Сравнение результатов измерений оптических параметров кремниевых пластин до и после БТО

Comparison of the results of measuring the optical parameters of silicon wafers before and after rapid heat treatment

Образец	До БТО				После БТО			
	k_{\max}	n_{\max}	E_{\max} , эВ	d , Å	k_{\max}	n_{\max}	E_{\max} , эВ	d , Å
КДБ-12 $\langle 100 \rangle$	3,281	5,413	3,46	17,585	3,168	5,495	3,48	9,949
КДБ-10 $\langle 111 \rangle$	3,311	5,348	3,48	15,283	3,193	5,549	3,48	8,810
КДБ-0,005 $\langle 100 \rangle$	3,295	5,331	3,46	20,069	3,102	5,454	3,51	8,691
КЭС-0,015 $\langle 100 \rangle$	3,283	5,222	3,48	19,285	3,170	5,461	3,49	10,036

Примечание. k_{\max} – максимальный коэффициент поглощения; n_{\max} – максимальный коэффициент преломления; E_{\max} – максимальная энергия поглощения в Г-точке зоны Бриллюэна; d – толщина естественного окисла.



Исследование влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики в области максимума поглощения, соответствующего Г-точке зоны Бриллюэна, проводилось на исходных и термообработанных кремниевых пластинах КДБ-12 <100> и КДБ-0,005 <100>, имеющих одинаковую ориентацию и различную степень легирования. Сравнительный анализ оптических параметров исходных образцов кремния до и после обработки показал, что коэффициент поглощения у исходного кремния с высокой концентрацией бора больше, чем у кремния с низкой концентрацией, что связано с увеличением деформации его кристаллической решетки при высоких дозах легирования и, соответственно, высоким содержанием точечных дефектов. После проведения БТО данных образцов имеет место уменьшение значений оптических параметров с увеличением концентрации бора. 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 высокой температуре. У кремния с высокой концентрацией примеси, несмотря на обеднение поверхностного слоя, деформация кристаллической решетки будет выше, а следовательно, оптические параметры оказываются ниже, чем у слаболегированного кремния (см. таблицу).

Анализ оптических параметров поверхности исходных образцов КДБ-0,005 <100> и КЭС-0,015 <100>, имеющих различающиеся значения концентрации и ковалентных радиусов легирующей примеси, показал, что коэффициенты поглощения и преломления у исходного кремния, легированного бором, выше, чем у кремния, легированного сурьмой. Это обусловлено более высокой концентрацией бора в кремнии ($2,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) по сравнению с сурьмой ($2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), что в первом случае приводит к повышенной деформации кристаллической решетки кремния, а следовательно, и более высоким значениям коэффициентов поглощения и преломления. Несмотря на то что сурьма имеет больший ковалентный радиус ($139,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, тогда как ковалентный радиус бора составляет $8,43 \cdot 10^{-10} \text{ м}$), он оказывает значительно меньшее влияние на оптические характеристики кремния, чем более низкая концентрация легирующей примеси. Кроме того, кремний, легированный бором с более высокой концентрацией, обладает более плотной структурой по сравнению с кремнием, подвергнутым слабому легированию сурьмой, что также гораздо существеннее влияет на оптические параметры.

После проведения БТО при температуре около $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициенты поглощения и преломления у кремния, легированного сурьмой, выше, чем у кремния, легированного бором. Последнее можно связать с перераспределением легирующих примесей и, следовательно, изменением их концентрации на границе раздела фаз кремний – естественный окисел. Так как атомы бора имеют меньшие значения ковалентного радиуса (в 1,6 раза) и массы, а также повышенный коэффициент диффузии по сравнению с атомами сурьмы ($\text{B} - 4,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$; $\text{Sb} - 3,6 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2/\text{с}$ при $900 \text{ }^\circ\text{C}$), то при нагреве они будут сегрегировать преимущественно на поверхности границы раздела и частично в естественном окисле, приводя к снижению деформационного поверхностного потенциала кремния, а следовательно, уменьшению его оптических характеристик. В случае сурьмы, которая остается в структуре кремния и на поверхности границы раздела кремний – естественный окисел, деформационный поверхностный потенциал выше, соответственно, выше и оптические характеристики кремния.

Заключение

Исследование влияния БТО на оптические характеристики кремния показало, что в области максимума поглощения, соответствующего Г-точке (точке сингулярности Ван Хова M_1) зоны Бриллюэна, имеет место снижение коэффициента поглощения по сравнению с его величиной до БТО. Кроме того, для всех образцов наблюдается рост коэффициента преломления и уменьшение толщины естественного окисла в 1,7–2,0 раза, что свидетельствует об уменьшении толщины нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины после химико-механической полировки в процессе твердофазной рекристаллизации при БТО и очистке кремния от различного рода загрязнений.

Библиографические ссылки

1. Наливайко ОЮ, Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Колос ВВ, Белоус АИ, Липинская ТИ и др. *Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Том 1.* Турцевич АС, редактор. Минск: Интегралполиграф; 2013. 703 с.
2. Пирс К, Адамс А, Кац Л, Цай Д, Сейдел Т, Макгиллис Д. *Технология СБИС. Книга 1.* Зи С, редактор; Звероловлев ВМ, Лейкин ВН, Петров ВБ, Эйдельман БЛ, переводчики. Москва: Мир; 1986. 404 с.



References

1. Nalivaiko OYu, Saladukha VA, Pilipenka UA, Kolos VV, Belous AI, Lipinskaya TI, et al. *Bazovye tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem na kremnii. Tom 1* [Basic technological processes of fabrication of semiconductor devices and integrated circuits on silicon. Volume 1]. Turtsevich AS, editor. Minsk: Integralpoligraf; 2013. 703 p. Russian.
2. Sze SM, editor. *VLSI technology*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1983. 654 p.
Russian edition: Pirs K, Adams A, Kats L, Tsai D, Seidel T, Makgillis D. *Tekhnologiya SBIS. Kniga 1*. Sze S, editor; Zverolovlev VM, Leikin VN, Petrov VB, Eidel'man BL, translators. Moscow: Mir; 1986. 404 p.

Получена 07.09.2021 / исправлена 08.09.2021 / принята 22.09.2021.
Received 07.09.2021 / revised 08.09.2021 / accepted 22.09.2021.