

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЯ

В.А. Пилипенко¹⁾, В.А. Солодуха¹⁾, В.А. Горушко¹⁾,
А.А. Омельченко¹⁾, В.М. Анищик²⁾, В.В. Понарядов²⁾

¹⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Беларусь, office@bms.by

²⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, anishchik@bsu.by

Проведены исследования влияния быстрой термической обработки на оптические характеристики кремния в области Г-точки зоны проводимости в зависимости от типа проводимости кремниевых пластин, уровня их легирования, ковалентного радиуса легирующих примесей, а также ориентации поверхности пластины. Показано, что механическая шлифовка и полировка поверхности кремниевых пластин приводит к формированию на ней нарушенного слоя, изменяющего поверхностный деформационный потенциал и вызывающего изменение оптических характеристик поверхности кремния, наиболее проявляющееся в спектральной области расположения Г-точки зоны проводимости. Установлено, что проведение БТО образцов кремния с высокой концентрацией бора приводит к более значительному уменьшению коэффициента преломления и поглощения, из-за более значительного обеднения поверхности кремния бором в результате диффузионных процессов на границе кремний-двуокись кремния, чем в случае кремния с низкой его концентрацией.

Ключевые слова: быстрый термический отжиг; коэффициент поглощения; коэффициент преломления; твердофазная рекристаллизация.

INFLUENCE OF THE RAPID THERMAL TREATMENT ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF SILICON

V.A. Pilipenko¹⁾, V.A. Solodukha¹⁾, V.A. Gorushko¹⁾,
A.A. Omelchenko¹⁾, V.M. Anishchik²⁾, V.V. Ponaryadov²⁾

¹⁾JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, office@bms.by

²⁾Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, anishchik@bsu.by

Investigations were conducted of influence of the rapid thermal treatment on the optical characteristics of silicon in the region of the G-point of the conductance area in dependence on the conductance type of silicon wafers, level of their doping, covalent radius of dopants, as well as on orientation of the wafer surface. It was demonstrated, that the afore stated treatment of wafers from the non-working side by means of light pulses during 7 sec. in the argon atmosphere results in reduction of the absorption coefficient and increase of the refraction coefficient in the G-point absorption spectrum area of the conductance zone irrespective of the type of silicon wafers. This is determined by the process of the solid phase re-crystallization of the disrupted layer on the surface of the silicon wafer after the chemical-mechanical polishing of silicon and its purification from any other pollutants.

Keywords: rapid thermal treatment; absorption coefficient; refraction coefficient; solid phase recrystallization.

Введение

Состояние поверхности кремниевых пластин является одним из фундаментальных факторов, определяющих качество и надежность интегральных схем. В связи с этим большое внимание уделяется вопросам ее подготовки перед процессом их формирования. Одним из возможных путей улучшения поверх-

ностных свойств кремния является его твердофазная рекристаллизация после химико-механической полировки с использованием быстрой термической обработки импульсами секундной длительности. Важными параметрами, несущими информацию о состоянии поверхности кремниевой пластины, являются ее оптические характеристики, а именно, коэффициент

преломления и коэффициент поглощения, которые наиболее чувствительны к наличию на ней нарушенного слоя в спектральной области, соответствующей Γ -точке зоны проводимости, являющейся точкой сингулярности Ван Хофа, энергия которой составляет 3.43 эВ [1, 2].

Материалы и методы исследования

В качестве образцов использовались пластины кремния диаметром 100 мм КДБ12 ориентации $\langle 100 \rangle$, КДБ10 ориентации $\langle 111 \rangle$, КДБ0.005 ориентации $\langle 100 \rangle$ и КЭС 0.015 ориентации $\langle 100 \rangle$, прошедшие стандартную химико-механическую полировку.

Измерения коэффициента преломления и коэффициента поглощения данных образцов проводили в спектральном диапазоне 0.6-6.0 эВ (200-2100 нм) на спектральном эллипсометре UVISEL 2 (Horiba Scientific, Франция). Угол падения светового пучка на образец составлял 70° . Обработка спектров и их визуализация проводилась с использованием программы ORIGIN PRO 2017.

Далее исходные пластины КДБ12 $\langle 100 \rangle$, КДБ10 $\langle 111 \rangle$ и КЭС0.015 $\langle 100 \rangle$ подвергались химической обработке в растворе плавиковой кислоты, пластина КДБ0.005 $\langle 100 \rangle$ - в растворе плавиковой кислоты + КАРО ($t=(3\pm 1)$ мин). После химической обработки на данных образцах проводилась быстрая термическая обработка путем облучения световым импульсом с нерабочей стороны пластины в течение 7 с в среде Ar: КДБ12 $\langle 100 \rangle$, КДБ10 $\langle 111 \rangle$ при температуре отжига 1025°C , КДБ0.005 $\langle 100 \rangle$ - 1150°C , КЭС0.015 $\langle 100 \rangle$ - 1075°C . После завершения процесса быстрой термической обработки на образцах проводился повторный контроль оптических параметров.

Результаты и их обсуждение

Анализ оптических параметров исходных образцов кремния КДБ12 $\langle 100 \rangle$

и КДБ10 $\langle 111 \rangle$ с различной ориентацией поверхности в области Γ -точки зоны проводимости показал, что для кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ коэффициент поглощения больше, чем для кремния ориентации $\langle 100 \rangle$ (рис. 1, 2, табл. 1). Это объясняется тем, что плоскости $\{111\}$ обладают максимальной плотностью упаковки атомов, т. е. кремний ориентации $\langle 111 \rangle$ имеет более высокую ретикулярную плотность [2].

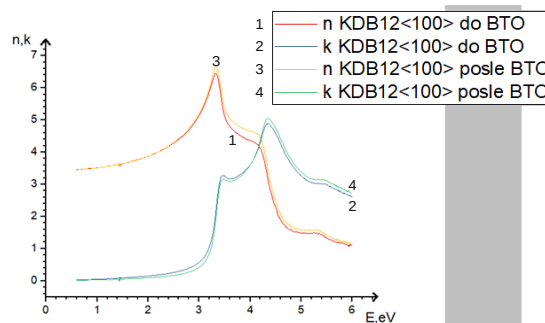


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения и преломления исходного кремния КДБ12 $\langle 100 \rangle$ до и после БТО

Fig. 1. Spectral dependence of the absorption and refraction coefficients of the initial silicon KDB12 $\langle 100 \rangle$ before and after rapid heat treatment

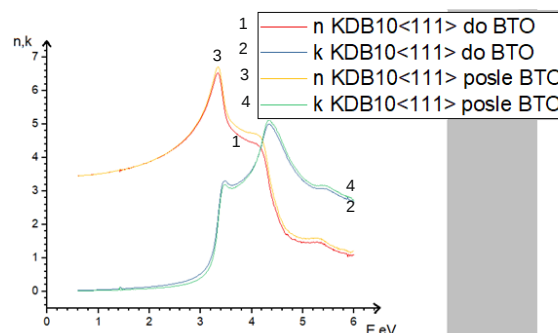


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения и преломления исходного кремния КДБ10 $\langle 111 \rangle$ до и после БТО

Fig. 1. Spectral dependence of the absorption and refraction coefficients of the initial silicon КДБ10 $\langle 111 \rangle$ before and after rapid heat treatment

Исследование поверхности кремниевых пластин после быстрой термической обработки позволило установить, что в области максимума поглощения, соответствующего Γ -точке зоны проводимости Ван Хофа M_1 , имеет место уменьшение коэффициента поглощения и увеличение коэффициента преломления по сравнению с их значениями до быстрой термообработки.

Таблица 1. Сравнение результатов измерений оптических параметров кремниевых пластин до и после БТО

Table 1. Comparison of the results of measurements of the optical parameters of silicon wafers before and after rapid heat treatment

До БТО				
Образец	$k_{\max}$ x	$n_{\max}$	$E_{\max}$, eV	d, Å
КДБ12 <100>	3.28 1	5.413	3.46	17.585
КДБ10 <111>	3.31 1	5.348	3.48	15.283
КДБ0.005 <100>	3.29 5	5.331	3.46	20.069
КЭС0.015 <100>	3.28 3	5.222	3.48	19.285
После БТО				
Образец	$k_{\max}$	$n_{\max}$	$E_{\max}$, eV	d, Å
КДБ12 <100>	3.168	5.495	3.48	9.949
КДБ10 <111>	3.193	5.549	3.48	8.810
КДБ0.005 <100>	3.102	5.454	3.51	8.691
КЭС0.015 <100>	3.170	5.461	3.49	10.036

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 куба и любое искажение кристаллической решетки за счет ее деформации под действием напряжений будет приводить к нарушению ее симметрии, а, следовательно, к изменению поглощения кремния в спектральном диапазоне, близком к 3.43 eV, что соответствует прямым переходам сингулярности Ван Хова зоны проводимости. В нашем случае уменьшение коэффициента поглощения в данной области говорит о том, что быстрая термообработка приводит к улучшению структуры поверхностного слоя с рабочей стороны пластины за счет уменьшения действующих в нем напряжений, а, следовательно, и деформации кристаллической решетки. Следует отметить, что данные

изменения более существенны для кремниевых пластин ориентации <111> (табл. 2) из-за ее более высокой ретикулярной плотности.

Таблица 2. Результаты изменений оптических параметров кремниевых пластин

Table 2. Results of changes in the optical parameters of silicon wafers

Образец	Количественное изменение параметров			
	$\Delta k_{\max}$ x	$\Delta n_{\max}$	$\Delta E_{\max}$, eV	$\Delta d_{\max}$, Å
КДБ12 <100>	-0.113	0.082	0.02	-7.636
КДБ10 <111>	-0.118	0.201	0	-6.473
КДБ0.005 <100>	-0.193	0.123	0.05	-11.378
КЭС0.015 <100>	-0.113	0.239	0.01	-9.249

Сравнительный анализ оптических параметров исходных образцов кремния КДБ12 <100> и КДБ0.005 <100> с различной концентрацией легирующей примеси и одинаковой ориентацией поверхности кремния в области Г-точки зоны проводимости показал, что коэффициент поглощения у кремния, высоколегированного бором, больше чем у кремния с низкой концентрацией бора, что обусловлено увеличением деформации кристаллической решетки кремния с ростом дозы его легирования и высоким содержанием точечных дефектов при большой концентрации примеси бора в кремнии.

После проведения быстрой термической обработки данных образцов имеет место уменьшение значений оптических параметров с увеличением концентрации легирующей примеси. Это обусловлено диффузией бора к поверхности, а также обеднением поверхностного слоя из-за его частичного ухода в окружающую среду при высокой температуре. Соответственно для кремния с высокой его концентрацией, несмотря на обеднение поверхностного слоя, деформация кристаллической решетки будет выше а, следовательно, оптические па-

параметры ниже, чем для кремния с более низкой концентрацией бора (рис. 1, 3, табл. 1).

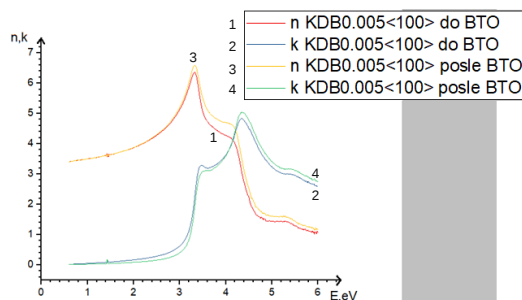


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения и преломления исходного кремния КДВ0.005<100> до и после БТО
Fig. 3. Spectral dependence of the absorption and refraction coefficients of the initial silicon KDB0.005 <100> before and after rapid heat treatment

Анализ оптических параметров в области Г-точки зоны проводимости исходных образцов кремния КДВ0.005<100> и КЭС0.015<100>, легированных бором и сурьмой, имеющих различную концентрацию легирующей примеси и различный ковалентный радиус показал, что коэффициенты поглощения и преломления у кремния, легированного бором, больше чем у кремния, легированного сурьмой (рис. 3, 4).

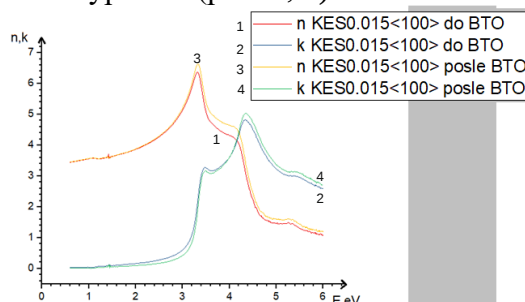


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения и преломления исходного кремния КЭС0.015<100> до и после БТО
Fig. 4. Spectral dependence of the absorption and refraction coefficients of the initial silicon КЭС0.015 <100> before and after rapid heat treatment

Данный факт обусловлен более высокой концентрацией бора в кремнии ($N = 2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) по сравнению с сурьмой ($N = 2.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), что вызывает в первом случае более высокую деформацию кристаллической решетки кремния, а,

следовательно, и более высокие значения коэффициента поглощения и преломления кремния. Несмотря на то, что у сурьмы более высокий ковалентный радиус, его влияние на оптические характеристики кремния значительно ниже, чем влияние концентрации легирующей примеси (ковалентный радиус $r(\text{B}) = 84.3 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, $r(\text{Sb}) = 139.5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$). Кроме того, кремний, легированный бором, из-за его высокой концентрации имеет более плотную структуру по сравнению с кремнием, легированным сурьмой.

Сравнение оптических параметров в области Г-точки зоны проводимости данных образцов после проведения БТО при температуре порядка 1100°C показало, что коэффициенты поглощения и преломления у кремния, легированного сурьмой, выше, чем у кремния, легированного бором. Данный факт обусловлен тем, что после проведения БТО происходит перераспределение легирующих примесей, и, следовательно, изменение концентрации примеси на границе раздела фаз кремний – естественный окисел. Так как атом бора имеет меньший в 1.6 раз ковалентный радиус, чем атом сурьмы, а также, соответственно, меньшую массу и коэффициент диффузии у бора гораздо выше, чем у 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°C), то при нагреве атомы бора будут сегрегироваться преимущественно на поверхности границы раздела, частично в естественном окиселе и уходить в окружающую среду. Это будет приводить к уменьшению 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, а, следовательно, выше и его оптические характеристики.

Заключение

Исследование влияния быстрой термической обработки на оптические характе-

ристики кремния показало, что в области максимума поглощения, соответствующего Г-точке зоны проводимости Ван Хова M_1 , имеет место уменьшение коэффициента поглощения по сравнению с его величиной до быстрой термообработки. Кроме того, для всех образцов наблюдается увеличение коэффициента преломления и уменьшение толщины естественного окисла (почти в 2 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 О.Ю. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. В 3 т. Т. 1. Минск: Интегралполиграф, 2013. 704 с.
2. Звероловлев В.М., Лейкин В.Н., Петров В.Б., Эйдельман Б.Л., Чистяков Ю.Д., под ред. Зи С. Технология СБИС, 2 кн., 1 т., Москва, 1986. С. 404.

References

1. Nalivaiko O.Yu. Basic Technological Processes of Fabrication of Semiconductor Devices and Integrated Circuits on Silicon In 3 volumes, Vol.1. Minsk: Integralpoligraph, 2013. 704 p. (In Russian).
2. Zverolovlev V.M., Leikin V.N., Petrov V.B., Eidelman B.L., Chistyakov Yu.D., under edition of Zi S. VLSI Process Technology, in 2 volumes, Vol. 1, Moscow, 1986. P. 404. (In Russian).