

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.3.049.77:621.373.826
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

Поступило в редакцию 22.11.2017
Received 22.11.2017

Член-корреспондент В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко

Открытое акционерное общество «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

ТВЕРДОФАЗНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИ НАРУШЕННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Аннотация. 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 поверхностных свойств кремния может явиться его твердофазная рекристаллизация с использованием быстрой термической обработки импульсами секундной длительности. Цель работы заключалась в исследовании влияния быстрой термической обработки на структуру нарушенного слоя поверхности кремниевых пластин после химико-механической полировки. В качестве образцов использовались пластины кремния диаметром 100 мм марки КДБ 12 и КЭФ 4,5 ориентации <100> после химико-механической полировки, прошедшие быструю термическую обработку в течение 7 с, что обеспечивало их нагрев до 1100 °С и без обработки. Методами оже-спектроскопии, спектральной эллипсометрии, рентгеновской дифракции показано, что такая обработка приводит к увеличению структурного совершенства поверхностного слоя кремниевых пластин, за счет уменьшения глубины механически нарушенного слоя, обеспечивая получение атомарно-плоской поверхности.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, нарушенный слой, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, коэффициент преломления, коэффициент поглощения

Для цитирования: Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

**Corresponding Member Vladimir A. Pilipenko, Vitali A. Solodukha,
Valiantsina A. Gorushko, Anna A. Omelchenko**

Holding Managing Company "Integral", Minsk, Republic of Belarus

SOLID PHASE RECRYSTALLIZATION OF A MECHANICALLY DISRUPTED SILICON LAYER SUBJECTED TO RAPID THERMAL TREATMENT

Abstract. Quality and reliability of integrated circuits to a great extent depend on the surface condition of silicon wafers. In view of this, great attention is paid on the aspects of their preparation prior to their formation. It is of significant interest to study the possibility of applying rapid thermal treatment for solid phase re-crystallization of a mechanically disrupted layer of the wafer working side. The objective of this work was to establish the behavior regularities of a mechanically disrupted layer subjected to rapid thermal treatment with 2 s light pulses. As samples, there were used the silicon wafers with a diameter of 100 mm, grade KDB 12 and KEF 4.5, orientation <100> after chemical-mechanical polishing subjected to rapid thermal treatment during 7 s, which ensured their heating up to 1100 °C and without treatment. The application of the methods of Auger-spectroscopy, spectral ellipsometry, X-ray diffraction made it possible to state that such treatment increases the structural flawlessness of the surface layer of silicon wafers due to a decrease in the mechanically disrupted layer, thus ensuring obtaining the atomic-flat surface.

Keywords: rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase re-crystallization, diffraction ratio, absorption ratio

For citation: Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A., Omelchenko A. A. Solid phase recrystallization of a mechanically disrupted silicon layer subjected to rapid thermal treatment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 347–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

Введение. Одним из определяющих факторов создания надежных изделий микроэлектроники с воспроизводимыми электрофизическими параметрами является степень совершенства кристаллической решетки, микрорельеф и чистота поверхности кремниевых пластин перед их формированием. Поэтому обязательным условием получения бездефектных полупроводниковых изделий является отсутствие на поверхности пластин механически нарушенного слоя и каких-

либо загрязнений [1; 2]. Известно, что после механической шлифовки и полировки на поверхности кремниевой пластины остается нарушенный слой и различного рода загрязнения, которые существенным образом влияют как на дальнейшие технологические процессы (травление, окисление), так и в конечном счете на параметры полупроводниковых приборов, особенно с мелкими (менее 1 мкм) слоями. Поэтому контроль нарушенного слоя и способы его удаления, а также очистка поверхности представляют важную задачу в планарной технологии [3].

Одним из методов удаления механически нарушенного слоя является лазерная обработка поверхности кремниевых пластин импульсами наносекундной длительности, в результате которой при температуре плавления кремния в области нарушений кристаллической решетки идет полное ее восстановление [4]. Наиболее простым и эффективным методом удаления нарушенного слоя является полирующее травление поверхности кремния [5].

Для очистки поверхности от различного рода загрязнений применяют способы, которые состоят из ряда последовательных операций, каждая из которых предназначена для удаления одного или

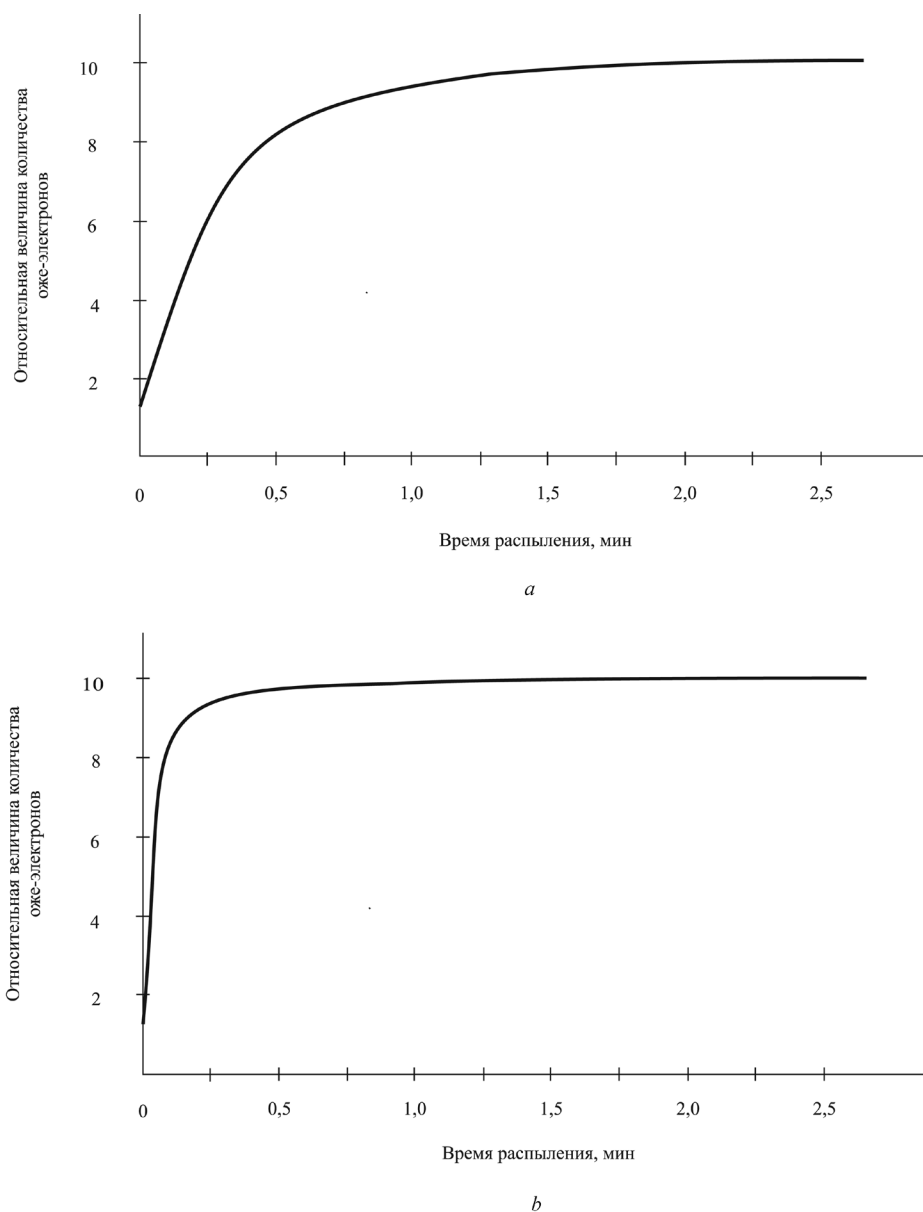


Рис. 1. Зависимость количества оже-электронов от времени распыления кремниевой пластины до (а) и после (б) быстрой термообработки

Fig. 1. Dependence of the quantity of Auger-electrons on the sputtering time of the silicon wafer prior to (a) and after (b) the rapid thermal treatment

нескольких видов загрязнений. Каждый из методов улучшения характеристик поверхности кремниевых пластин имеет определенные преимущества и недостатки. Одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния может явиться его твердофазная рекристаллизация с использованием быстрой термической обработки (БТО) импульсами секундной длительности, обеспечивающими нагрев пластины до 1000 °С. Использование данной обработки обусловлено простотой, относительной легкостью изменения параметров облучения, высокой скоростью протекания процессов перестройки дефектной структуры, увеличением скорости твердофазных реакций.

Материалы и методы исследования. Влияние быстрой термообработки на структуру нарушенного слоя исследовалось с использованием методов оже-спектроскопии, электронной микроскопии, кривых дифракционного отражения, спектральной эллипсометрии. С помощью оже-спектроскопии с прецизионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов с поверхности кремния снималась зависимость количества выходящих электронов от времени распыления и определялась глубина нарушенного слоя. Методом электронной микроскопии и кривых дифракционного отражения (КДО) проводились исследования структуры поверхности исходных кремниевых пластин до и после быстрой термической обработки. Оптические характеристики поверхности кремниевых пластин исследовались методом спектральной эллипсометрии. В качестве образцов применялись пластины кремния диаметром 100 мм марки КДБ 12 и КЭФ 4,5 ориентации $\langle 100 \rangle$ после химико-механической полировки, прошедшие быструю термическую обработку в течение 7 с, что обеспечивало их нагрев до 1100 °С, и без обработки.

Результаты и их обсуждение. Анализ зависимости выхода оже-электронов от времени распыления кремниевой пластины показал, что на пластинах без БТО выход на монокристаллический кремний происходит через 1,75 мин, что соответствует глубине нарушенного слоя 3,8 нм (рис. 1, *a*). После проведения быстрой термической обработки его глубина значительно уменьшилась и составила менее 1,0 нм (рис. 1, *b*). Данный результат указывает на то, что в ходе быстрой термообработки при температурах выше 600 °С идет процесс его твердотельной рекристаллизации, приводящий к уменьшению напряжений в нарушенном слое кремния, его структурному совершенству и как следствие к уменьшению глубины.

Электронно-микроскопические исследования поверхности данных пластин позволили установить, что они как до, так и после обработки характеризуются гладким микрорельефом, практически без микронеровностей. Однако картина дифракции «на отражение» до БТО свидетельствует о преимущественной параллельности кристаллографических плоскостей более глубинных слоев (рис. 2, *a*), а после БТО (рис. 2, *b*) на ней появляются непрерывные вертикальные стержни, являющиеся результатом двумерной дифракции электронов от поверхностных атомных слоев и характеризующие атомарно-плоскую поверхность.

Данные результаты полностью подтверждаются исследованиями, проведенными методом КДО. Сравнение КДО от поверхности кремния до (рис. 3, *a*) и после (рис. 3, *b*) быстрой термообработки показали, что уширение основания КДО, характерное для нарушенного слоя, исчезает после обработки и кривая приближается к эталонной для идеальной поверхности (рис. 3).

Важнейшими параметрами исходных кремниевых пластин, несущими информацию о состоянии поверхно-

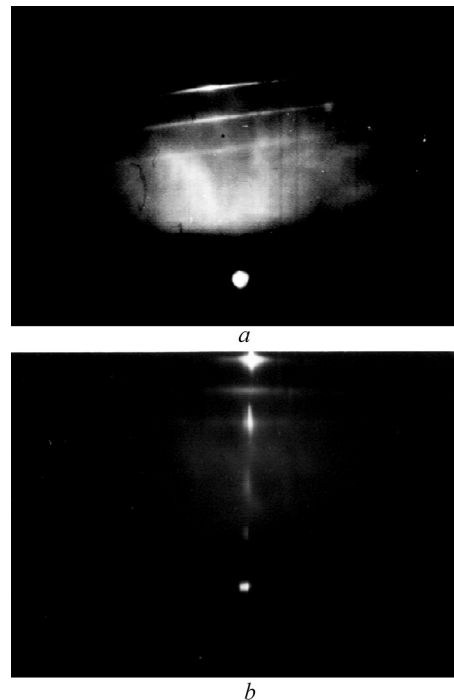


Рис. 2. Картина вторичной дифракции электронов от поверхности кремниевой пластины до (*a*) и после (*b*) быстрой термической обработки

Fig. 2. Picture of the electrons secondary diffraction from the silicon wafer's surface to (*a*) and after (*b*) the rapid thermal treatment

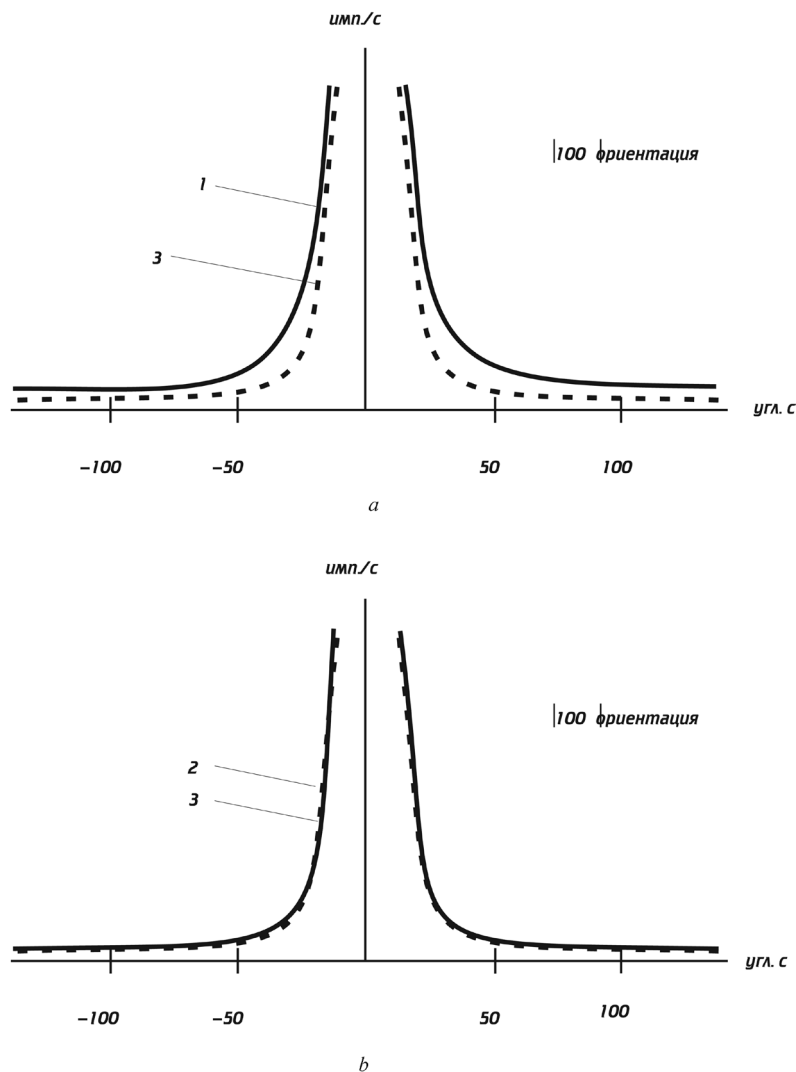
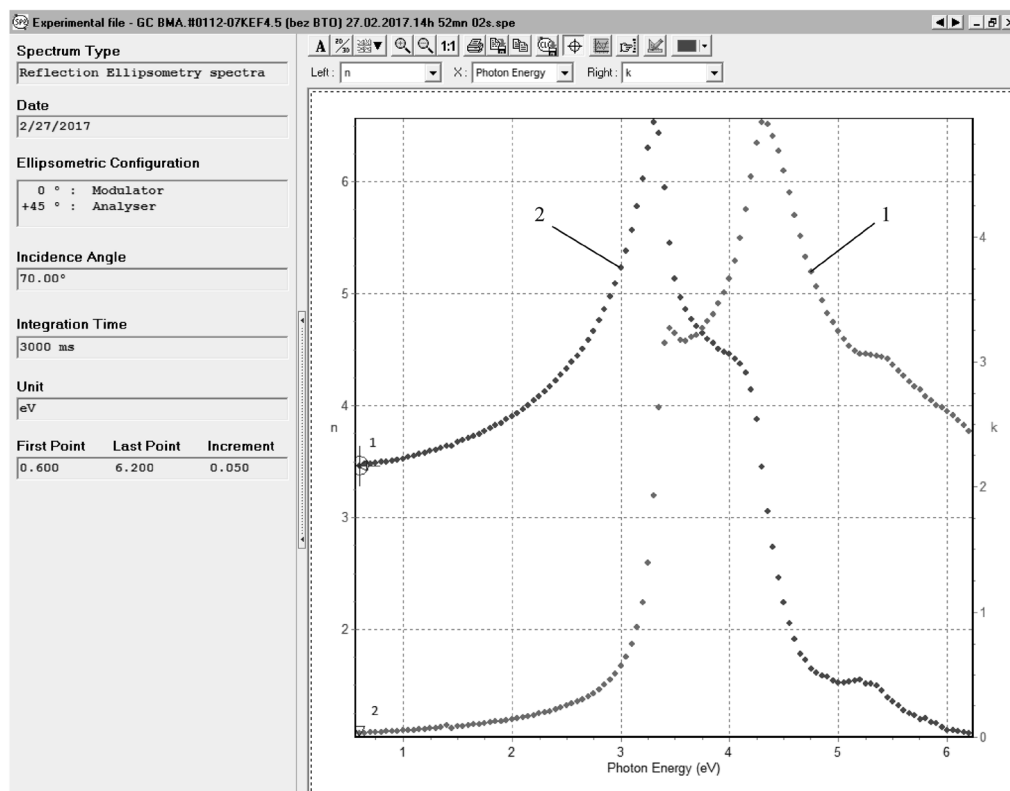


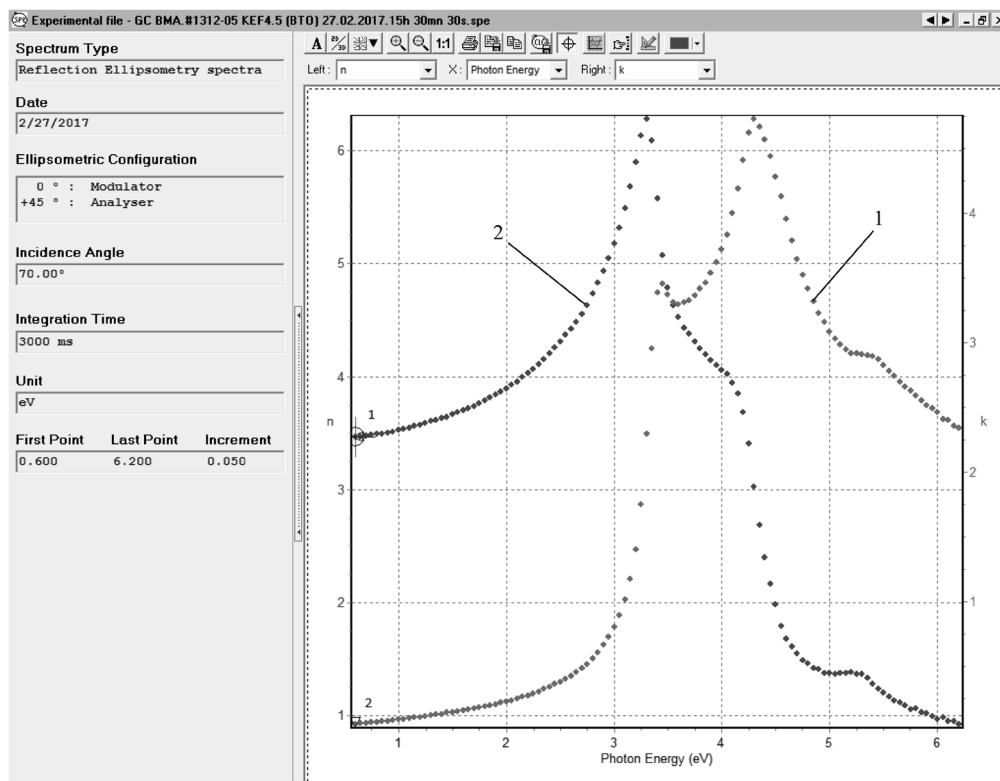
Рис. 3. Кривые дифракционного отражения от поверхности кремниевой пластины после механической полировки (а) и последующей быстрой термообработки (b): 1 – до обработки; 2 – после обработки; 3 – эталонной поверхности
 Fig. 3. The diffraction reflection curves from the silicon wafer's surface after the mechanical polishing (a) and the subsequent rapid thermal treatment (b): 1 – prior to treatment; 2 – after treatment; 3 – of the standard surface

сти, являются ее оптические характеристики, а именно, коэффициент преломления и поглощения. С точки зрения нарушенного слоя наиболее чувствительным к его наличию является коэффициент поглощения, который может определяться с высокой точностью методом спектральной эллипсометрии. Данный метод также позволяет определять влияние различных факторов на дисперсию оптических параметров в широком спектральном диапазоне. Анализ спектральной зависимости коэффициента преломления и коэффициента поглощения кремния показал, что она имеет явно выраженное изменение коэффициента поглощения в области 3,43 эВ (рис. 4). Такой рост коэффициента поглощения кремния в данной области спектра может быть связан с тем, что наблюдаемое поглощение соответствует прямым переходам сингулярности Ван Хова зоны проводимости. В кремнии Г-точка зоны проводимости считается точкой сингулярности Ван Хова, энергия которой составляет 3,43 эВ.

Исследование образцов после быстрой термической обработки данным методом показало, что в области поглощения, соответствующей Г-точке зоны проводимости, имеет место рост коэффициента поглощения (рис. 4) по сравнению с его величиной до обработки. Такое его поведение, по-видимому, связано со следующими причинами. Поскольку кремний имеет гранцентрированную кубическую решетку, то ее обратная решетка является объемноцентрированной с первой зоной



a



b

Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов экстинкции (1) и преломления (2) кремния до (a) и после (b) быстрой термообработки

Fig. 4. Spectral dependence of the extinction ratio (1) and the refraction ratio (2) of the initial silicon to (a) and after (b) the rapid thermal treatment

Бриллюэна в форме усеченного октаэдра. В такой структуре Г-точка обладает полной симметрией куба, а следовательно, любые искажения кристаллической решетки за счет ее деформации под действием напряжений будут приводить к ее нарушению. Это означает, что наличие деформации кристаллической решетки кремния с рабочей стороны пластины будет приводить к соответствующему изменению поглощения кремния в спектральном диапазоне, близком к 3,43 эВ. В нашем случае увеличение 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. При этом данный результат не зависит от типа проводимости исследуемых пластин кремния.

Исследования величины коэффициента поглощения на длине волны 632,8 нм показали, что в результате быстрого термического отжига пластин КДБ 12 импульсами секундной длительности коэффициент поглощения уменьшился в 1,55 раза – с 0,014 до 0,009, для пластин кремния КЭФ 4,5 – с 0,012 до 0,011. Это свидетельствует о том, что в процессе такой обработки произошла также очистка поверхности кремния от различного рода загрязнений и перестройка ее микроструктуры.

Закключение. Таким образом, впервые установлено, что быстрая термообработка исходных кремниевых пластин приводит к увеличению структурного совершенства их рабочей поверхности за счет уменьшения глубины механически нарушенного слоя, обеспечивая получение атомарно-плоской поверхности. Методом спектральной эллипсометрии впервые проведено наблюдение сингулярности Ван Хова в Г-точке зоны проводимости при 3,43 эВ, и показано влияние деформации кристаллической решетки под действием напряжений, действующих в нарушенном слое, на коэффициент поглощения кремния в данной области спектра.

Список использованных источников

1. Tong, Q.-Y. Wafer bonding and layer splitting for Microsystems / Q.-Y. Tong, M. Gosele // *Adv. Mater.* – 1999. – Vol. 11, N 17. – P. 1409–1425. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4095\(199912\)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4095(199912)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w)
2. Красников, Г. Я. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС / Г. Я. Красников, Н. А. Зайцев – М.: Микрон-принт, 1999. – Ч. 2. – 216 с.
3. Концевой, Ю. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
4. Свойства поверхности кремния после лазерной обработки импульсами наносекундной длительности / В. А. Пилипенко [и др.] // ИФЖ. – 2008. – Т. 81, № 9. – С. 592.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.

References

1. Tong Q.-Y., Gosele M. Wafer bonding and layer splitting for Microsystems. *Advanced Materials*, 1999, vol. 11, no. 17, pp. 1409–1425. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4095\(199912\)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4095(199912)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w)
2. Krasnikov G. Ya., Zaitsev N. A. *Physical-Technological Fundamentals of Ensuring Quality of VLSI. Part. 2.* Moscow, Micron-print Publ., 1999. 216 p. (in Russian).
3. Kontsevoy Yu. A., Litvinov Yu. M., Fattakhov E. A. *Plasticity and Strength of the Semiconductor Materials and Structures.* Moscow, Radio and Communications Publ., 1982. 240 p. (in Russian).
4. Pilipenko V. A., Vecher D. V., Gorushko V. A., Syakerskii V. S., Petlitskaya T. V. Properties of a silicon surface exposed to nanosecond laser-radiation pulses. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 3, pp. 622–626. <https://doi.org/10.1007/s10891-008-0078-4>
5. Stepanenko I. P. *Fundamentals of Microelectronics.* Moscow, Soviet Radio Publ., 1980. 424 p. (in Russian).

Информация об авторах

Пилипенко Владимир Александрович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Солодуха Виталий Александрович – канд. техн. наук, генеральный директор. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Горушко Валентина Алексеевна – ведущий инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Омельченко Анна Александровна – инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Information about the authors

Pilipenko Vladimir Aleksandrovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

Solodukha Vitali Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), General Manager. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Gorushko Valiantsina Alekseevna – Leading engineer. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

Omelchenko Anna Aleksandrovna – Engineer. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.