

АТОМНЫЕ СТРУКТУРЫ И МЕТОДЫ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ATOMIC STRUCTURES AND STRUCTURAL STUDY METHODS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20, № 2. С. 142—147.

DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-142-147

УДК 621.315

Напряжения в пластинах кремния, возникающие в результате локального фотонного отжига

© 2017 г. В. В. Старков¹, Е. А. Гостева^{2,§}, Д. В. Иржак¹, Д. В. Рошупкин¹

¹ ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых материалов РАН»,

ул. Академика Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Аннотация. Методом трехкристальной рентгеновской дифрактометрии исследовано влияние фотонного отжига на возникновение деформаций в кристаллической структуре легированных бором кремниевых пластин, полученных по методу Чохральского (Cz–Si). Установлено, что традиционный отжиг всей поверхности двусторонне полированных пластин кремния галогенными лампами (режим фотонного отжига) в режиме быстрого термического отжига приводит к возникновению деформаций сжатия. Тот же процесс с использованием оригинальных фотомасок, позволяющих локально проводить обработку множественных, пространственно разделенных областей пластины (режим локального фотонного отжига) при относительно низких температурах обрабатываемой пластины (менее 55 °С), приводит к возникновению деформаций растяжения. Установленный эффект не наблюдается при наличии на тыльной стороне пластин механического геттерирующего слоя. Предложен механизм, объясняющий полученные экспериментальные результаты, который может быть использован при формировании зарядовых насосов в структуре фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, локальный фотонный отжиг, зарядовые насосы, трехкристальная рентгеновская дифрактометрия

Введение

Обработка кремниевых пластин в режиме так называемой быстрой термической обработки (БТО) получает все большее распространение в связи с постоянной тенденцией увеличения размеров пластин для изготовления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Относительная дешевизна и простота процесса дополняется его высокой универсальностью. Так, процесс можно успешно применять для формирования мелких $p-n$ -переходов в структурах ФЭП [1, 2]. С другой стороны, увеличение коэффициента диффузии примесей почти на порядок

величины позволило реализовать процесс глубокой диффузии лития для формирования локальных областей зарядовых насосов в предварительно сформированной структуре солнечных элементов [3]. Широко применяют БТО в производстве при формировании металлических контактов к полупроводниковым материалам [4]. Большой интерес у исследователей вызывает БТО для решения разнообразных проблем дефектной инженерии. В первую очередь это — отжиг радиационных дефектов и активация примеси после ионной имплантации в кремний. К этому же можно отнести и отжиг термодонорных дефектов, характерных для сильнолегированных бором кремниевых пластин, полученных по методу Чохральского [5]. Значительное число исследований связано с развитием процессов формирования дефектных кислородосодержащих областей в объеме пластин для последующих процессов внутреннего геттерирования [6, 7]. С использованием

Старков Виталий Васильевич¹ — канд. техн. наук, старший науч. сотрудник, e-mail: starka@iptm.ru; Гостева Екатерина Александровна^{2,§} — ассистент, e-mail: gos-3@mail.ru; Иржак Дмитрий Вадимович¹ — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; Рошупкин Дмитрий Валентинович¹ — доктор физ.-мат. наук

§ Автор для переписки

аналогичных процессов в ряде работ (см., например, [8—14]) экспериментально продемонстрирована возможность создания «скрытых» *n*-областей в объеме пластины *p*-типа проводимости. Скрытые области *n*-типа проводимости было предложено использовать для создания зарядовых насосов в *p*-базовой области ФЭП [9—14]. Важно отметить, что процесс формирования термодоноров чувствителен к наличию в структуре кремния тех или иных скоплений дефектов, геттерирующих слоев или неоднородностей, приводящих к возникновению полей напряжений. Так, авторы работы [15] экспериментально продемонстрировали связь процессов формирования термодоноров и механических напряжений в структуре кремния.

Целью работы — исследование и сравнительный анализ остаточных механических напряжений, возникающих при БТО пластин кремния с различной обработкой поверхности в двух режимах: фотонного отжига (ФО) и локального фотонного отжига (ЛФО) для более эффективного применения процесса при формировании структур ФЭП с зарядовыми насосами [10].

Образцы и методы исследования

Для проведения фотонных обработок использовали установку БТО галогенными лампами. Мощность светового облучения достигала 45 Вт/см², скорость нарастания температуры в диапазоне до 1000 °С составляла 125 К/с [1]. Режим ЛФО реализовывали за счет применения металлической маски (съёмный шаблон), представляющей пластину из нержавеющей стали толщиной 6 мм. В пластине по всей площади имелись сквозные отверстия размером 1 × 1 мм², расстояния между отверстиями составляли 3 мм. Фотомаску размещали на поверхности всей пластины кремния и после окончания световой обработки удаляли с пластины. Фотошаблон выполнял также функцию термического экрана. Экран поглощает основную часть тепловой энергии, выделяемой в результате ЛФО за время светового импульса, которое в эксперименте составляло 8 с. Быстрое удаление экрана с поверхности пластины после окончания светового импульса способствовало уменьшению нагрева пластины. Экспериментально измеренная температура кремниевой пластины в результате обработки не превышала 45—55 °С по показаниям пирометра Term Pro-1200.

В эксперименте использовали пластины кремния *p*-типа проводимости, полученные методом Чохральского. Концентрация бора составляла порядка 10¹⁵ см⁻³ ($\rho_v = 8+10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), кислорода —

(0,8—1,2) · 10¹⁸ см⁻³, ориентация поверхности (100). Для эксперимента вырезали образцы пластин размером 2,5 × 2,5 см². Образцы под номерами 1 и 2 вырезали из одной пластины. Образец 3 вырезали из другой пластины, представляющей односторонне полированную кремниевую пластину, на тыльной стороне которой был расположен механически шлифованный гетерослой. Особенности и различия пластин друг от друга приведены в таблице.

Изменение межплоскостных расстояний в результате фотонных обработок кремниевых пластин
 [The change in interplanar distances as a result of photon processing of silicon wafers]

Номер образца	Толщина, мкм (обработка поверхностей образцов)	Значение $\Delta d/d$ после обработки	
		ФО	ЛФО
1	250 (полировка с двух сторон)	—	+2,913 · 10 ⁻⁵
2	250 (полировка с двух сторон)	-0,887 · 10 ⁻⁵	—
3	520 (с геттерирующим слоем на тыльной стороне)	—	-1,267 · 10 ⁻⁵

Определение типа остаточных деформаций (растяжение, сжатие) монокристаллических пластин проводили методом трехкristальной рентгеновской дифрактометрии.

Исследования выполняли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 DISCOVER. Монохроматизация рентгеновского излучения осуществлялась при помощи зеркала Гебеля и монохроматора Ge(400) с четырехкратным отражением. В качестве анализатора использовали монокристалл Ge(400) с двухкратным отражением. Вклад инструментальной функции такой оптической схемы в результат измерений незначителен. Были получены необходимые карты распределения дифрагированной интенсивности рентгеновского излучения в координатах θ — 2θ для кремниевых пластин до обработки и после нее. В качестве типичного примера на рисунке представлены карты, полученные для образцов 1 и 3 до и после проведения того или иного вида БТО.

Изменению межплоскостного расстояния $\Delta d/d$ на карте соответствует изменение положения максимума дифрагированной интенсивности рентгеновского излучения по координате 2θ . Искривление пластины проявляется в уширении пиков вдоль координаты θ , а также в смещении максимума по этой же координате (см. рисунок) [16]. Результаты обработки полученных карт распределения дифрагированной интенсивности рентгеновского излучения сведены в таблицу.

Результаты и их обсуждение

Результат влияния БТО на остаточные напряжения в пластинах представлен в таблице. Анализ

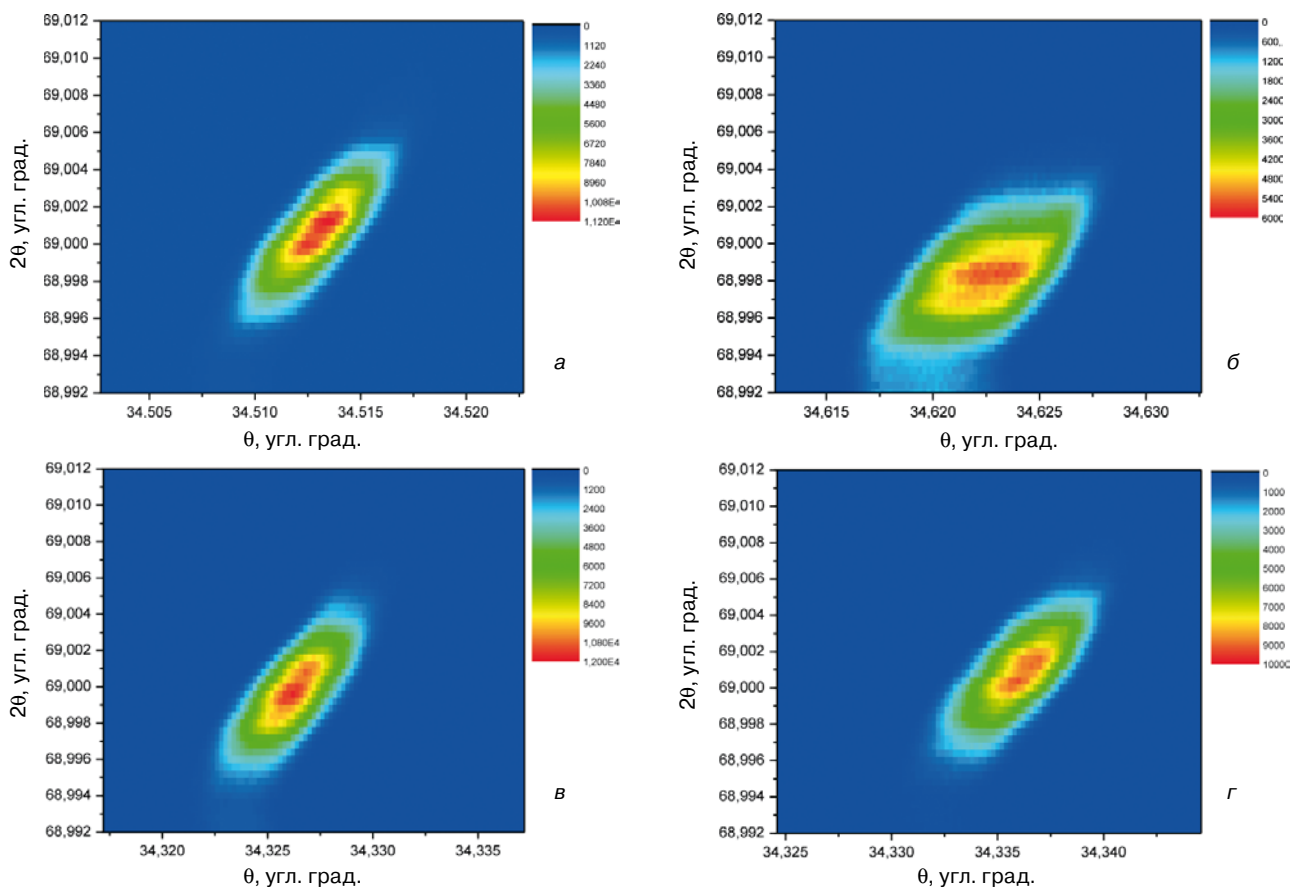
этих данных показал, что отжиг одинаковых образцов 1 и 2, полученных из одной исходной пластины и полированных с двух сторон, вызывает различие в природе конфигурации генерируемых структурных дефектов при воздействии традиционной ФО и предложенной ЛФО.

После ФО образца 2 наблюдаются остаточные напряжения в пластине, характеризующиеся сжимающими деформациями ($\Delta d/d$ имеет отрицательное значение). Наоборот, после проведения ЛФО образца 1 (см. рисунок, б), $\Delta d/d$ имеет положительное значение, что характеризует деформации, связанные с расширением кристаллической решетки. В то же время при ЛФО более толстого образца 3 (см. рисунок, г), имеющего механический геттерирующий слой на тыльной стороне пластины, отрицательное значение $\Delta d/d$ также характеризует наличие остаточных деформаций сжатия в пластине после ЛФО. Сравнение полуширины кривых качания (зависимость интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения от угла падения рентгеновского излучения на исследуемый образец при фиксированном положении детектора) для образцов 1 и 3 позволяет сделать вывод о том, что в случае образца 1 после обработки наблюдаются изгибные деформации. Используя зависимость изменения

углового положения дифракционного пика от линейной координаты образца, по методике, разработанной авторами работы [17], рассчитывали радиус изгиба. В данном случае радиус изгиба составлял 1,15 м. В образце 3, судя по тому, что полуширина кривой качания осталась неизменной, деформаций изгиба не наблюдается.

Результаты всех рассмотренных экспериментов, прежде всего, свидетельствуют о перестройке дефектно–примесной структуры в пластине после БТО [4–8]. При этом можно с уверенностью заключить, что решающую роль в том, какие дефекты будут сформированы в результате ФО или ЛФО, играют температура пластины в процессе обработки, а также наличие (или отсутствие) геттерирующего слоя, влияющего на перераспределение дефектов в объеме образца при термообработках.

В процессе ФО температура пластины за 8 с достигает 1000 °С. В структуре кремния по всей площади пластины протекают процессы генерации и релаксации дефектно–примесных комплексов, приводящих к возникновению остаточных деформаций сжимающего типа (образец 2). В образце 3 внутренние напряжения, созданные слоем геттера, и перестройка дефектно–примесной структуры при воздействии ЛФО приводят к итоговому сжатию



Карты распределения дифрагированной интенсивности рентгеновского излучения в окрестности узла Si (400) для образцов: 1 (а, б) и 3 (в, г) до (а, в) и после (б, г) обработки

The distribution maps of the diffracted X-ray intensity in the vicinity of the Si (400) node for samples: 1 (а, б) and 3 (в, г) before (а, в) and after (б, г) processing

решетки. Остаточные сжимающие деформации в этом случае у образца 3 примерно на 40 % выше, чем у образца 2, у которого отсутствовал геттерирующий слой с тыльной стороны. При этом толщина образца 2 примерно в два раза меньше, чем толщина образца 3.

При ЛФО относительно более тонкой пластины (образец 1) температура на поверхности не превышала 55 °С. При этом логично предположить, что в результате локального фотонного воздействия формируется «облачная» дефектно-примесная структура в виде отдельных дефектных областей. Наиболее вероятным механизмом возникновения остаточной деформации растяжения решетки при проведении ЛФО образцов типа 1 может выступать допороговая генерация первичных точечных дефектов типа межузельный атом кремния Si_i и вакансии V_{Si} при возбуждении электронной системы кристалла фотогенерированными электронами при Оже-рекомбинации (2,0—2,5 эВ). Уровень фотонной инжекции при воздействии ЛФО (45 Вт/см²) соответствует $\sim 10^{18}$ эл./см³. Дальнейшая ассоциация точечных дефектов низкотемпературными миграционными механизмами (включая прыжковую миграцию Si_i^+ , фотостимулируемую миграцию Si_i и V_i , а также миграцию вакансий и дивакансий) приводит к возникновению кластеров донорной или акцепторной природы. В кислородсодержащем кремнии Cz-Si межузельные атомы кислорода O_i формируют высокоподвижные кислородные димеры O_{2i} , создающие кластеры низкотемпературных термодоноров TD-1 из $(SiO_n)^+$ -комплексов, где $n < 10$ [18]. Одновременно протекает процесс образования вакансионных кластеров за счет генерации межузельных атомов кремния Si_i из термодонорных комплексов [10, 11, 19]. Локальное пространственное формирование кластеров с большей атомной плотностью и перестройка дефектно-примесной структуры в возбуждаемом объеме (~6,0 % площади) приводит к наведению деформации растяжения в сравнении с соседней, не облучаемой областью, где исходная деформация сжатия решетки обусловлена меньшим атомным радиусом примесного атома бора. Наличие в структуре кремния эффективных геттерирующих слоев, как следует из рассмотренных экспериментальных данных, может полностью нивелировать наблюдаемый эффект ЛФО.

Необходимо отметить, что низкоэнергетическая допороговая генерация структурных дефектов и комплексов в пластинах Cz-Si, легированных бором, является широко известным фактом и причиной деградации и регенерации эффективности солнечных элементов [20]. При этом следует учитывать, что имеющаяся в литературе информация о природе дефектно-примесных комплексов и возможных процессов их трансформации в результате БТО носит не однозначный характер, о чем может

свидетельствовать даже краткий перечень работ по этому вопросу [4—8].

Заключение

Экспериментально показано, что традиционная обработка всей поверхности двусторонне полированных пластин Cz-Si, легированных бором, в режимах стандартного БТО галогенными лампами приводит к возникновению деформаций сжатия. Эффект наблюдался как на образцах, полированных с двух сторон, так и на односторонне полированных пластинах с механически шлифованной тыльной стороной. В последнем случае эффект проявлялся наиболее сильно (характерные сжимающие напряжения на 40 % выше, чем для пластин, полированных с двух сторон).

ЛФО в тех же режимах БТО с использованием фотомасок, позволяющих проводить обработку множественных, пространственно разделенных областей пластины при относительно низких температурах обрабатываемой пластины (менее 55 °С), приводит к возникновению деформаций растяжения пластин кремния, полированных с двух сторон.

Предложен механизм, объясняющий полученные экспериментальные результаты.

Результаты работы необходимо учитывать при формировании структуры современных ФЭП.

Библиографический список

1. Кравченко В. А., Старков В. В., Абросимов Н. В., Абросимова В. Н. Диффузионное легирование кремния бором и фосфором в условиях быстрого термического отжига // Электронная техника. Сер. Материалы. 1989. Вып. 4. С. 20—23.
2. Шишиняну С. Т., Шишиняну Т. С., Райлян С. К. Мелкие p - n -переходы в Si, изготовленные методом импульсного фотонного отжига // ФТП. 2002. Т. 36, № 5. С. 611—617.
3. Gusev V. A., Starkov V. V., Teterskii A. V. Solar cells with a charge pump: theoretical prospects and technological aspects of the application // Russian Microelectron. 2015. V. 44, N 8. P. 569—574. DOI: 10.1134/S1063739715080065
4. Anizan S., Leong C. S., Yusri K. L., Amin N., Zaidi S., Sopian K. The effect of rapid thermal annealing towards the performance of screen-printed Si solar cell // Am. J. Appl. Sci. 2011. V. 8, N 3. P. 267—270. DOI: 10.3844/ajassp.2011.267.270
5. Stein H. J., Hahn S. K., Shatas S. C. Rapid thermal annealing and regrowth of thermal donors in silicon // J. Appl. Phys. 1986. V. 59, N 10. P. 3495—3502. DOI: 10.1063/1.336820
6. Mezhenyi M. V., Milvidskii M. G., Resnick V. J. Influence of rapid thermal annealing on the specific features of defect generation in silicon wafers during the formation of effective internal getters // J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2009. V. 3, Iss. 4. P. 612—619. DOI: 10.1134/S1027451009040223
7. Park J. G., Park H. K., Kwack K. D., Hong J. H. Effect of gas ambient at high temperature rapid thermal annealing on oxygen precipitate formation and crystal originated particle dissolution // J. Korean Phys. Soc. 2001. V. 39. P. S327—S332.
8. Cui Can, Yang De-Ren, Ma Xiang-Yang, Fu Li-Ming, Fan Rui-Xin, Que Duan-Lin. Oxygen precipitation within denuded zone founded by rapid thermal processing in Czochralski silicon wafers // Chinese Phys. Lett. 2005. V. 22, N 9. P. 2407—2410. DOI: 10.1088/0256-307X/22/9/074
9. Гусев В. А., Старков В. В. Солнечные элементы с зарядовой подкачкой // Материалы XII Междунар. научно-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». СПб., 2011. Т. 2. С. 157—158.

10. Старков В. В., Гусев В. А., Кулаковская Н. О., Гости́ева Е. А., Пархоменко Ю. Н. Формирование зарядовых насосов в структуре фотопреобразователей // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 4. С. 279—284. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-4-279-284

11. Гусев В. А., Старков В. В., Шоферистов С. Е. Дефектно-примесная инженерия в технологии кремниевых солнечных элементов с зарядовыми насосами // Вісник СевНТУ: Серія: Інформатика, електроніка, зв'язок. 2014. Вып. 149. С. 16—23. URL: <http://wel.net.ua/Russian/PDF/vsntui.pdf>

12. Гости́ева Е. А., Гусев В. А., Старков В. В., Герасименко Н. Н. Дефектно-примесная инженерия при формировании структуры солнечных элементов с зарядовыми насосами // Материалы I Всеросс. науч. конф. «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения». Чебоксары, 2013. С. 63—65. URL: http://nanosolar-conf.ru/filestore/сборник_конференции_Chuv-Nano-Solar_2013.pdf

13. Гости́ева Е. А. Исследование приборных структур фотопреобразователей на основе зарядовых насосов сформированных методами дефектно-примесной инженерии // III ежегодный российско-японский научно-технический семинар «Современные методы исследования структуры материалов и их применение в материаловедении». Сб. научн. трудов. М., 2013. № 1. С. 44—47.

14. Гости́ева Е. А. Оптимизированная приборная структура фотопреобразователя на основе зарядовых насосов, сформированных методами дефектно-примесной инженерии // 69 Дни

науки студентов НИТУ «МИСиС». М., 2014. С. 601—602. URL: http://sciencedays.misis.ru/69_DNI_all.pdf

15. Emtsev V. V., Andreev B. A., Davydov V. Yu., Poloskin D. S., Oganessian G. A., Kryzhkov D. I., Shmagin V. B., Emtsev V. V., Misiuk A., Londos C. A. Stress-induced changes of thermal donor formation in heat-treated Czochralski-grown silicon // Physica B: Condensed Matter. 2003. V. 340–342. P. 769—772. DOI: 10.1016/j.physb.2003.09.118

16. Bowen D. K., Tanner B. K. High resolution X-ray diffraction and topography. CRC Press, 2005. 252 p.

17. Щербачев К. Д., Воронова М. И., Бублик В. Т., Дерябин А. Н., Хохлов А. И., Выговская Е. А., Торопова О. В. Контроль качества обработки поверхности подложек из лейкосапфита с использованием рентгеновской дифракции // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2009. № 2. С. 44—49.

18. Seebauer E. G., Kratzer M. C. Charged Semiconductor Defects. Structure, Thermodynamics and Diffusion. London: Springer-Verlag, 2009. 294 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-059-3

19. Voronkov V. V., Fester R. Nucleation of oxide precipitates in vacancy-containing silicon // J. Appl. Phys. 2002. V. 91, Iss. 9. P. 5802—5810. DOI: 10.1063/1.1467607

20. Herguth A., Scubert G., Kaes M., Hahn G. Avoiding boron-oxygen related degradation in highly boron doped Cz silicon // Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich: WIP-Renewable Energies, 2006. P. 530—537. URL: http://kops.uni-konstanz.de/bitstream/handle/123456789/42206/Herguth_2-6ddiwp4szjy1.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Статья поступила в редакцию 24 марта 2017 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2017, vol. 20, no. 2, pp. 142—147. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-142-147

Silicon wafer strain under local photonic annealing

V. V. Starkov¹, E. A. Gosteva^{2,§}, D. V. Irzhak¹, D. V. Roshchupkin¹

¹ Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russia

² National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. The effect of photon annealing on the occurrence of deformations in the crystal structure of boron-doped silicon wafers produced by the Czochralski (Cz-Si) was studied by the method of triple-X-ray diffraction. It was found that the traditional annealing of silicon wafers with polished surfaces on both sides by halogen lamps in Photonic Annealing (PA) and rapid thermal annealing modes (RTA) leads to compression deformation. The same process with the use of original photo-mask, which allows local processing produces multiple, spatially separated regions of the plate produced by Local Photonic Annealing (LPA) at relatively low temperatures (less than 55 °C), gives rise to a tensile strain. This established effect is not observed if on the back side of the plates there is mechanical gettering layer. The mechanism explaining the experimental results can be used in the formation of the charge pump in the structure of the photo electric converters (PEC).

Keywords: photoelectric converters, local photonic processing, local photonic annealing, charge pumps, three-crystal X-ray diffraction

References

1. Kravchenko V. A., Starkov V. V., Abrosimov N. V., Abrosimova V. N. Diffusion alloying of silicon by boron and phosphorous in conditions of fast thermal annealing. *Elektron. Tekh., Ser. Mater.*, 1989, no. 4, pp. 20—23. (In Russ.)

Information about authors:

Vitaliy V. Starkov¹: Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (starka@iptm.ru); **Ekaterina A. Gosteva^{2,§}:** Assistant (gos-3@mail.ru); **Dmitry V. Irzhak¹:** Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy Directors; **Dmitry V. Roshchupkin¹:** Dr. Sci. (Phys.-Math.)

§ Corresponding author

2. Şişianu S. T., Şişianu T. S., Railean S. K. Shallow *p-n* junctions formed in silicon using pulsed photon annealing. *Semiconductors*, 2002, vol. 36, no. 5, pp. 581—587. DOI: 10.1134/1.1478552

3. Gusev V. A., Starkov V. V., Teterskii A. V. Solar cells with a charge pump: theoretical prospects and technological aspects of the application. *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, no. 8, pp. 569—574. DOI: 10.1134/S1063739715080065

4. Anizan S., Leong C. S., Yusri K. L., Amin N., Zaidi S., Sopian K. The effect of rapid thermal annealing towards the performance of screen-printed Si solar cell. *Am. J. Appl. Sci.*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 267—270. DOI: 10.3844/ajassp.2011.267.270

5. Stein H. J., Hahn S. K., Shatas S. C. Rapid thermal annealing and regrowth of thermal donors in silicon. *J. Appl. Phys.*, 1986, vol. 59, no. 10, pp. 3495—3502. DOI: 10.1063/1.336820

6. Mezhenyi M. V., Milvidskii M. G., Resnick V. J. Influence of

rapid thermal annealing on the specific features of defect generation in silicon wafers during the formation of effective internal getters. *J. Synch. Investig.*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 612—619. DOI: 10.1134/S1027451009040223

7. Park J. G., Park H. K., Kwack K. D., Hong J. H. Effect of gas ambient at high temperature rapid thermal annealing on oxygen precipitate formation and crystal originated particle dissolution. *J. Korean Phys. Soc.*, 2001, vol. 39, pp. S327—S332.

8. Cui Can, Yang De-Ren, Ma Xiang-Yang, Fu Li-Ming, Fan Rui-Xin, Que Duan-Lin. Oxygen precipitation within denuded zone founded by rapid thermal processing in Czochralski silicon wafers. *Chinese Phys. Lett.*, 2005, vol. 22, no. 9, pp. 2407—2410. DOI: 10.1088/0256-307X/22/9/074

9. Gusev V. A., Starkov V. V. Solar cells with a charge pump. *Trudy XII Mezhdunar. nauchnoprakt. konf. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologii v promyshlennosti = Proceedings of the 12th International Scientific-Practical Conference on Fundamental and Applied Studies, Development and Application of Higher Technologies in Industry*. St. Petersburg, 2011, vol. 2, pp. 157—158. (In Russ.)

10. Starkov V. V., Gusev V. A., Kulakovskaya N. O., Gosteva E. A., Parkhomenko Yu. N. Formation a charge pump in the structure of phototransformators. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 279—284. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2015-4-279-284

11. Gusev V. A., Starkov V. V., Shopheristov S. E. Defects-impurities engineering for manufacture silicon solar cells with charge pumps. *Vestn. SevNTU, Ser. Inform., Elektron., Svyaz'*, 2014, no. 149, pp. 16—23. (In Russ.) URL: <http://wel.net.ua/Russian/PDF/vsntui.pdf>

12. Gosteva E. A., Gusev V. A., Starkov V. V., Gerasimenko N. N. Defect-impurity engineering in the formation of the structure of solar cells with charge pumps. *Materiali I Vserossiiskoi nauchnoi konferencii «Nanostrukturirovannye materialy i preobrazovatelnye ustroystva dlya solnechnih elementov 3-go pokoleniya»*. Cheboksary, 2013, pp. 63—65. (In Russ.) URL: http://nanosolar-conf.ru/filestore/сборник конференции Чув-Nano-Solar_2013.pdf

13. Gosteva E. A. Investigation of the instrument structures of photoconverters based on charge pumps formed by the methods of defect-impurity engineering. *III ezhegodnyi rossiisko-yaponskii nauchno-tekhnicheskii seminar «Sovremennye metody issledovaniya struktury materialov i ikh primeneniye v materialovedenii» = III Annual Russian-Japanese Scientific-Technical Seminar «Modern Methods for Researching the Structure of Materials and Their Application in Materials Science»*. Moscow, 2013, no. 1, pp. 44—47.

14. Gosteva E. A. Optimized instrument structure of a photoconverter based on charge pumps, formed by methods of defect-impurity engineering. *Sbornik tezisov 69 Dni nauki studentov NITU «MISiS»*. Moscow, 2014, pp. 601—602. (In Russ.) URL: http://sciencedays.misis.ru/69_DNI_all.pdf

15. Emtsev V. V., Andreev B. A., Davydov V. Yu., Poloskin D. S., Oganessian G. A., Kryzhkov D. I., Shmagin V. B., Emtsev V. V., Misiuk A., Londos C. A. Stress-induced changes of thermal donor formation in heat-treated Czochralski-grown silicon. *Physica B: Condensed Matter.*, 2003, vol. 340—342, pp. 769—772. DOI: 10.1016/j.physb.2003.09.118

16. Bowen D. K., Tanner B. K. *High resolution X-ray diffraction and topography*. CRC Press, 2005, 252 p.

17. Scherbachev K. D., Voronova M. I., Bublik V. T., Deryabin A. N., Khokhlov A. I., Vygovskays E. A., Toropova O. V. X-ray diffraction quality control of leucosapphire wafer surface. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2009, no. 2, pp. 44—49.

18. Seebauer E. G., Kratzer M. C. *Charged Semiconductor Defects. Structure. Thermodynamics and Diffusion*. London: Springer-Verlag, 2009, 294 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-059-3

19. Voronkov V. V., Fester R. Nucleation of oxide precipitates in vacancy-containing silicon. *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, no. 9, pp. 5802—5810. DOI: 10.1063/1.1467607

20. Herguth A., Scubert G., Kaes M., Hahn G. Avoiding boron-oxygen related degradation in highly boron doped Cz silicon. *Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Munich: WIP-Renewable Energies, 2006, pp. 530—537. URL: http://kops.uni-konstanz.de/bitstream/handle/123456789/42206/Herguth_2-6ddiwwpp4szjy1.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Received March 24, 2017

* * *