

ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В СИЛЬНОЛЕГИРОВАННОМ Si ПРИ ДИФфуЗИИ ФОСФОРА

А.Е. Беляев¹⁾, Н.С. Болтовец²⁾, Р.В. Конакова¹⁾, В.П. Кладько¹⁾, О.И. Любченко¹⁾,
А.В. Саченко¹⁾, Н.В. Сафрюк¹⁾, В.В. Шинкаренко¹⁾, В.А. Солодуха³⁾,
В.А. Пилипенко³⁾, А.А. Ходин⁴⁾, П.Н. Романец¹⁾, Я.Я. Кудрик¹⁾

¹⁾Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН Украины,
Киев, Украина, kopaikova@isp.kiev.ua

²⁾ГП НИИ "Орион", Киев, Украина

³⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца И.П. 121А, 220108 Минск, Беларусь, office@bms.by

⁴⁾ГНПО "Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника" НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, alexhodin@msn.com

С помощью метода диффузного рассеяния рентгеновских лучей изучены структурные дефекты, возникающие в сильнолегированном кремнии при диффузии фосфора при $T = 900-970$ °С. Установлено, что в процессе диффузии при $T = 900-970$ °С в Si формируются дефекты вакансионного и межузельного типов.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ Украины (заявка №23852 конкурса Ф73) и БРФФИ Беларуси (проект №Ф16К-092).

Введение

Для создания низкоомных омических контактов к полупроводниковым приборам независимо от уровня легирования до сих пор считается наиболее эффективным метод получения ступеньки легирования, когда в приконтактной области полупроводника создается тонкий слой сильно легированного полупроводника, обеспечивающий туннельное прохождение тока через контакт металл-полупроводник [1]. Такая ступенька создается методами диффузии или ионного легирования [2, 3]. Однако при анализе таких "ступенек" не рассматривались процессы микродефектообразования и их влияние на механизм токопереноса [4].

Известно, что при диффузии фосфора в Si в последнем возникают механические напряжения, релаксация которых приводит к появлению структурных дефектов, в том числе дислокаций. Для возникновения дислокаций в Si нужна концентрация механических напряжений больше $4 \cdot 10^8$ дин/см² [5]. При создании омических контактов к n-Si используют диффузию фосфора и силицидную металлизацию (например, Pd₂Si, TiSi), при вжигании контактов в последних возникают механические напряжения $\sim 10^9$ дин/см² [6]. Дислокации, как известно, оказывают сильное влияние на механизмы формирования омических контактов и токоперенос в них [7]. Поэтому знание дефектного состава полупроводника непосредственно под контактом представляет научный и практический интерес.

Эксперимент

В данной работе ступенька легирования получается методом диффузии фосфора в кремниевую n⁺ пластину. Глубина диффузионного слоя составляла 0.5 мкм. Диффузия осуществлялась при $T = 900, 925, 950$ и 970 °С в n⁺-пластину с легированием $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³, плотностью дислокаций $\sim 10^5$ см⁻².

$$\frac{q_x}{2\pi} = \frac{1}{\lambda} (\cos \omega - \cos(2\omega' - \omega)) \Rightarrow q_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \omega - \cos(2\omega' - \omega))$$

Структурное совершенство образцов исследовалось методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции на дифрактометре Panalytical X'Pert PRO MRD [4].

Экспериментальные результаты

Для определения дефектного состояния образцов были построены ω -сканы симметричного рефлекса 111. Из рис. 1 видно, что после диффузии при 900 С полуширина кривой увеличивается, и также растут диффузные хвосты с обеих сторон кривой. С повышением температуры диффузии до 925°С наблюдается спад диффузных хвостов с обеих сторон. Последующее повышение температуры диффузии приводит к сильнейшей асимметрии кривых, причем преобладающей является диффузная компонента справа.

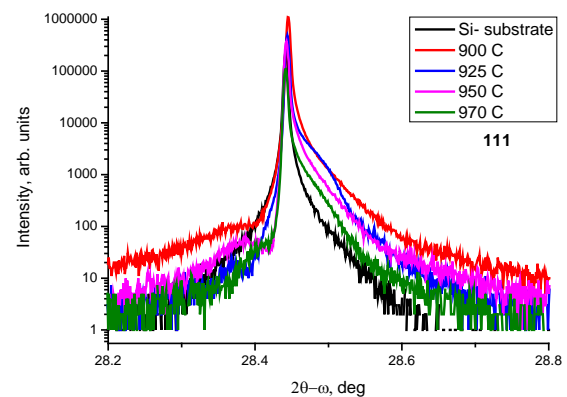


Рис. 1. 2θ - ω -скан симметричного рефлекса кремния 111

Для расчета данных кривых использовались соотношения по нахождению координат в пространстве обратной решетки:

$$\frac{q_z}{2\pi} = \frac{1}{\lambda} (\sin \omega + \sin(2\omega' - \omega)) \Rightarrow q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \omega + \sin(2\omega' - \omega))$$

Здесь λ - длина волны рентгеновского излучения, соответствует $\text{CuK}\alpha$; q_x , q_z - координаты в пространстве обратной решетки; ω , ω' - углы падения и отражения, соответственно.

Для анализа типа дефектов в образцах использовались высокоразрешающие 2θ - ω и ω -сканы. Из 2θ - ω сканов провели построение $I = I^* q_z^2$ и $I = I^* q_z^3$, которые приведены на рис. 2а и 2б, соответственно.

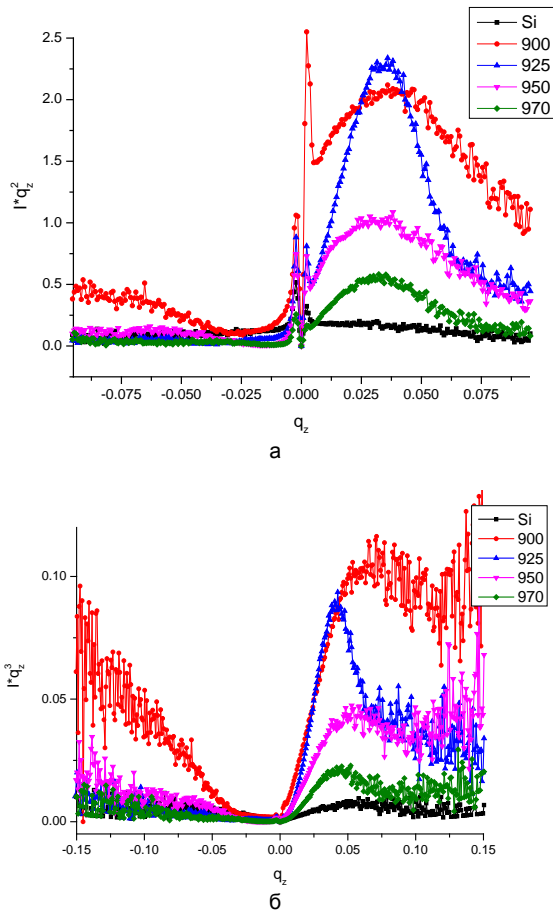


Рис. 2. Сравнение построений $I = I^* q_z^2$ (а) и $I = I^* q_z^3$ (б), полученных из 2θ - ω сканов

Из кривых (рис. 2) видно, что в данной области есть дефекты обоих типов: как вакансионного типа ($q_z < 0$), так и межузельные ($q_z > 0$). При температуре диффузии 900°C наблюдается увеличение дефектов обоих типов, хотя межузельные преобладают. При дальнейшем росте температуры диффузии видно уменьшение количества дефектов вакансионного типа. При таких температурах диффузии основными являются дефекты типа межузельных атомов, имеющих тенденцию спада с ростом температуры диффузии фосфора. Такой спад может быть связан с увеличением числа дислокаций в образцах с ростом температуры диффузии.

Анализ ω -сканов, снятых в направлении, перпендикулярном вектору дифракции, проводился с

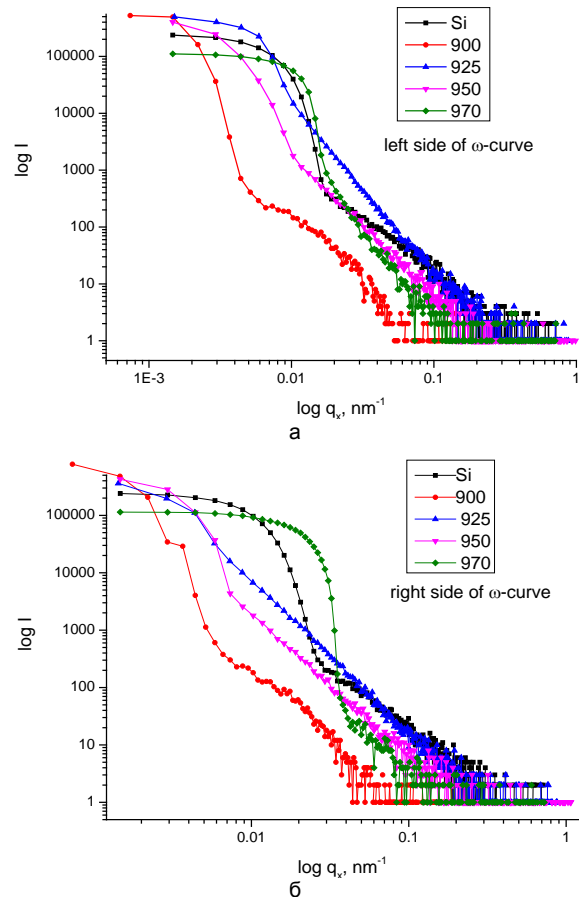


Рис. 3. Перестроенные в координатах $\log I = f(\log q_x)$ левая (а) и правая (б) стороны ω -сканов, снятых в направлении, перпендикулярном вектору дифракции

помощью построения $\log I = f(\log q_x)$, приведенных на рис. 3а и 3б, соответственно. Из точек перегиба кривых на рис. 2 были найдены распределения дефектов по размерам (табл. 1). Из значений полуширины ω -сканов была проведена оценка плотности дислокаций (табл. 2)

Таблица 1. Оценка размеров дефектных областей

Образец, $T_{\text{диффузии}},$ °C	Размеры областей вакансионных дефектов, нм		Размеры областей межузельных дефектов, нм	
	из $I \cdot q_z^2$	из $I \cdot q_z^3$	из $I \cdot q_z^2$	из $I \cdot q_z^3$
Si (исх.)	27.1	1.2	15.6	1.3
900	97.5	6.3	88.9	8.1
925	16.4	3.3	-	2.5
950	19.7	3.1	42.5	3.7
970	25.7	5.7	21.4	2.5

Из табл. 2 видно, что в исходной пластине плотность дислокаций $\sim 2,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, что типично для сильнолегированного Si [2]. По данным [2], плотность дислокаций в сильнолегированном Si

Таблица 2. Оценка плотности дислокаций

Образец, $T_{\text{диффузии}}, ^\circ\text{C}$	Ширина на полувысоте пика (град)	Плотность дислокаций, см^{-2}
Si (исх.)	0.01033	2.20E+05
900	0.00210	9.10E+03
925	0.00529	5.77E+04
950	0.00429	3.80E+04
970	0.01799	6.68E+05

составляет $10^5\text{-}10^6 \text{ см}^{-2}$. В результате возрастания температуры диффузии, вследствие роста механических напряжений в пластине Si, наблюдается изменение плотности дислокаций.

Заключение

Использование метода диффузного рассеяния рентгеновских лучей является эффективным неразрушающим методом исследования особенностей образования структурных дефектов в Si на завершающей высокотемпературной стадии технологии, когда другие методы неэффективны. С помощью этого метода установлено, что при T диффузии 900-970 $^\circ\text{C}$ в сильнолегированном Si возникают дефекты вакансионного и межузельного типа, которые необходимо учитывать в технологии полупроводниковых приборов.

Из приведенных данных видно, что наибольшая плотность дислокаций в образце возникает при $T_{\text{диффузии}} = 970^\circ\text{C}$ и соответствует $6.68 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Учитывая последующие режимы термообработки и операции вжигания омических контактов,

плотность дислокаций из-за несоответствия параметров решеток и коэффициентов термического расширения в контактах может существенным образом влиять на параметры полупроводниковых приборов [7]. Полученные результаты расширяют представление о дефектообразовании при диффузии и могут быть использованы для практической реализации.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ Украины (заявка № 23852 конкурса Ф73) и БРФФИ Беларуси (проект № Ф16К-092).

Список литературы

1. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. Ч.1. М.: Мир. 1984. 456 с.
2. *Рейви К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: Мир. 1984. 472 с.
3. *Пилипенко В.А.* Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск: Издательский центр БГУ, 2004. 531 с.
4. *Klad'ko V.P., Datsenko L.I., Bak-Misiuk J., Olikhovskii S.I., Machulin V.F., Prokopenko I.V., Molodkin V.B., Maksimenko Z.V.* // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2001. V. 34, P. A87–A92.
5. *Романов А.С., Щеглова В.В.* Механические напряжения в тонких пленках. М.: ЦНИИ "Электроника", 1981, 69 с.
6. *Мьюрарка Ш.* Силициды для СБИС. Москва: Мир, 1986. 176 с.
7. *Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Венгер Е.Ф., и др.* Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике. Гл. 5. Механизмы формирования контактного сопротивления омических контактов металл-полупроводник. Теоретическое моделирование. Харьков: ИСМА. 2011. С. 282-347.

THE FEATURES OF STRUCTURAL DEFECTS EMERGENCE IN HIGHLY DOPED Si UNDER PHOSPHORUS DIFFUSION

A.E. Belyaev¹, N.S. Boltovets², R.V. Konakova¹, V.P. Kladko¹, O.I. Ljubchenko¹,
A.V. Sachenko¹, N.V. Safruk¹, V.V. Shinkarenko¹, V.A. Solodukha³,
V.A. Pilipenko³, A.A. Khodin⁴, P.N. Romanets¹, J.J. Kudrik¹

¹V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductors Physics NASU, Kyiv, Ukraine, konakova@isp.kiev.ua

²SE NII "Orion", Kyiv, Ukraine

³JSC "INTEGRAL" – Holding Managing Company, Minsk, Belarus, office@bms.by

⁴SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Techniques" NASB, Minsk, Belarus, alexhodin@msn.com

The structural defects, generated in highly doped silicon under phosphorus diffusion at 900-970 $^\circ\text{C}$, have been investigated using X-rays diffuse scattering technique. It has been established that vacancy-type and interstitial defects are formed under diffusion at this temperature.