

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ГИПЕРДОПИРОВАННОГО АТОМАМИ ИНДИЯ И МЫШЬЯКА: ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ОТЖИГА

О.В. Мильчанин¹⁾, Ф.Ф. Комаров¹⁾, М.А. Моховиков¹⁾, И.С. Роговая¹⁾, И.Н. Пархоменко²⁾,
Н.Н. Коваль³⁾, А.Д. Тересов³⁾, О.В. Королик²⁾, Е. Wendler⁴⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем
им. А.Н. Севченко», ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь

³⁾Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия

⁴⁾Friedrich-Schiller-Universität, 1 Max-Wien-Platz, D-07743 Jena, Germany

Впервые использован импульсный микросекундный электронный отжиг ($E = 7 - 15$ кэВ) для гипердотирования кремния имплантацией ионами индия и мышьяка. Концентрация внедренных атомов In и As составила ~ 6.5 ат.%. Результаты просвечивающей электронной микроскопии выявили формирование протяженного слоя (толщиной порядка 20 мкм) вторичных дефектов структуры различного дислокационного типа после электронного отжига. Методом резерфордского обратного рассеяния ионов He^+ исследовано перераспределение внедренной примеси в условиях расплавления слоя Si электронным пучком и при твердофазном отжиге. Для ряда режимов отжига методом комбинационного рассеяния света обнаружено формирование нанокристаллов InAs. Определено влияние режимов электронного отжига на коэффициенты отражения света в видимом и ближнем ИК – диапазонах.

Ключевые слова: кремний; ионная имплантация; индий; мышьяк; электронный отжиг.

STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF SILICON HYPERDOPED WITH INDIUM AND ARSENIC: EFFECT OF ELECTRON BEAM ANNEALING

O.V. Milchanin¹⁾, F.F. Komarov¹⁾, M.A. Mokhovikou¹⁾, I.S. Rahavaya¹⁾, I.N. Parkhomenko²⁾,
N.N. Koval³⁾, A.D. Teresov³⁾, O.V. Korolik²⁾, Elke Wendler⁴⁾

¹⁾Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus

²⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus

³⁾Institute of High-Current Electronics SS RAS, 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia

⁴⁾Friedrich-Schiller-Universität, 1 Max-Wien-Platz, D-07743 Jena, Germany

For the first time, the pulse microsecond electron annealing (EA) ($E = 7 - 15$ keV) has been used for hyperdoping of silicon with ion-implanted indium and arsenic. The concentration of implanted impurities amounts to $\sim 6.5\%$. The results of TEM measurements indicated on the formation of extended layer (thickness of the order of 20 μm) of secondary defects such as dislocations of different type after EA. Redistributions of implanted atoms in the case of silicon layer melting and in the solid phase have been studied. The formation of InAs nanocrystal was observed by Raman spectroscopy for a few regimes of EA. The effect of EA regimes on light reflectance from the hyperdoped silicon in visual and near-infrared ranges was determined.

Keywords: silicon; ion implantation; indium; arsenic; electron beam annealing.

Введение

Кремний является полупроводником с низкой квантовой эффективностью межзонной излучательной рекомбинации, что затрудняет его использование в оптоэлектронике. Кремний в качестве материала солнечных элементов пропускает инфра-

красную (ИК) часть солнечного спектра в диапазоне $\sim 1.1 - 3.0$ мкм, что составляет около 30% от общего потока солнечной энергии [1], также кремниевые фотоприемники нечувствительны в области трех основных полос волоконно-оптической связи [2]. В последнее время опубликован

ряд работ [3-4] по созданию светоизлучающих структур на основе нанокристаллов полупроводников с прямой запрещенной зоной: A^3B^5 (InAs, InSb, GaSb) в матрице Si и A^2B^6 (ZnSe, ZnO) в системе SiO_2/Si . С целью создания фоточувствительных слоев Si в видимом и ИК диапазонах используют гипердотирование их атомами халькогенов (S, Se, Te) с использованием импульсного (фемто-пико-наносекундным) отжига или миллисекундного флэш-отжига. В данной работе впервые для формирования слоя кремния, гипердотированного примесями In и As, рассмотрено использование электронно-лучевого импульсного отжига.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовали структуры SiO_2 (40 нм)/Si, имплантированные ионами As^+ (170 кэВ, $3.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и In^+ (250 кэВ, $2.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Дозы и энергии ионов выбирались таким образом, чтобы создать на глубине порядка 120-130 нм сравнимые профили In и As с концентрацией порядка 6.5 ат.%. Имплантация проводилась при 550 °С для обеспечения кристаллического состояния легированных слоев кремния. В таблице 1 указаны номера и режимы отжига исследуемых образцов. Для образцов № 2, № 3, № 4 длительность и частота импульсов составляли 100 мкс и 5 с^{-1} , а для образца № 5 – 50 мкс и 1 с^{-1} .

Таблица 1. Режимы облучения образцов импульсными электронными пучками

№ обр.	Ток пучка	Энергия электронов	Кол-во импульсов	Плотность энергии в импульсе
2	25 А	14 кэВ	5	Режим начального плавления - 8 Дж/см ²
3	25 А	15 кэВ	5	Режим слабого плавления - 10 Дж/см ²
4	40 А	15 кэВ	5	Режим умеренного плавления - 12 Дж/см ²
5	25 А	7 кэВ	300	Режим без плавления (~7 Дж/см ²)

Распределение примесей по глубине в образцах Si контролировалось методом Резерфордского обратного рассеяния (РОР). Структурные характеристики образцов исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Спектры зеркального отражения снимались с помощью спектрометра Lambda 1050 WB.

Результаты и их обсуждение

На рис.1 показаны спектры РОР в области выхода обратно рассеянных ионов He^+ от атомов примеси.

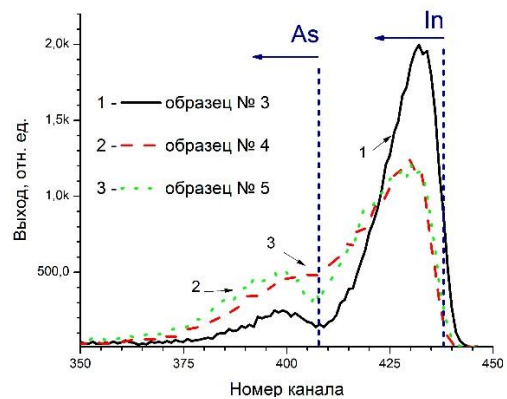


Рис. 1. Спектры РОР для образцов №3, №4 и №5

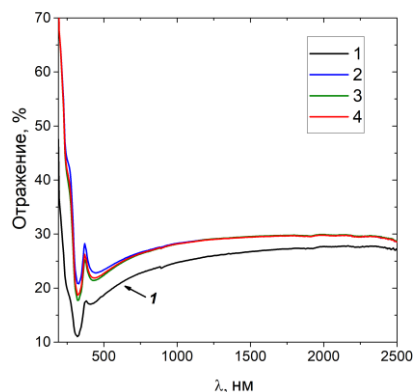
По результатам моделирования спектров РОР можно выделить ряд характерных особенностей. Все режимы электронного отжига приводят к уширению концентрационных профилей примеси и отмечается сдвиг их к поверхности кремниевых структур. При этом заметно снижается и концентрация примеси в максимуме профилей (таблица 2).

Таблица 2. Концентрации примесей в максимуме профилей и глубина распределения примеси в кремнии

№ образца	Концентрация, ат.%		Глубина, нм	
	In	As	In	As
3	12	3	230	240
4	7	4	220	250
5	6,5	5	230	250

Максимум при 370 нм в спектрах отражения света (рис. 2) в диапазоне длин волн 190-2500 нм, соответствующий критической точке зонной структуры кремния,

свидетельствует о восстановлении кристаллической структуры имплантированного слоя кремния.



1 – обр. № 5, 2 – обр. № 2, 3 – обр. № 3,
 4 – образец № 4

Рис. 2. Спектры отражения структур SiO₂/Si, имплантированных ионами As и In, после электроннолучевых обработок

Для образца без расплавления в ИК и в УФ областях зарегистрировано падение интенсивности отражения (11 %). Это может быть связано с формированием мелкозернистых кристаллитов InAs. На спектре комбинационного рассеяния света (не приводим) для этого образца регистрируются характеристические LO- и TO- полосы для кристаллического InAs, которые наблюдаются при 234 и 217 см⁻¹ [5].

По результатам ПЭМ исследований установлено, что после всех режимов электронного отжига в образцах формируется протяженный слой из дефектов дислокационного типа (рис. 3). Структура всех образцов сравнима, отличия лишь в толщине дефектного слоя.

Заключение

Изучены структура и оптические свойства структуры SiO₂(40нм)/Si, имплантированной ионно и мышьяком до концентраций ~ 6.5 ат.% с последующим электроннолучевым микросекундным отжигом. Все режимы электронного отжига приводят к уширению концентрационных профилей примеси и отмечается сдвиг их к поверхности кремниевых структур. Наблюдаемый в спектре отражения максимум при 370 нм, свидетельствует о восста-

новлении кристаллической структуры имплантированного слоя после отжига. По данным ПЭМ, после электронных обработок формируется протяженный слой (~ 20 мкм толщиной) дефектов дислокационного типа.

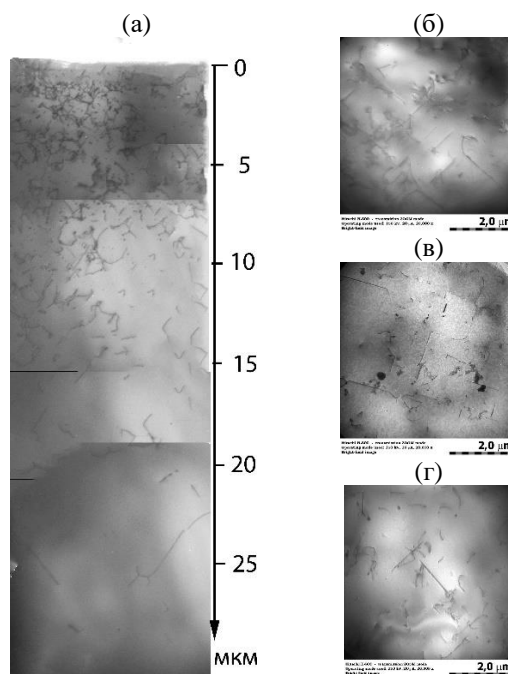


Рис. 3. ПЭМ микрофотографии поперечного (а) и планарных (б-г) сечений образцов после электронного отжига: а – без плавления, б – 8 Дж/см², в – 10 Дж/см², г – 12 Дж/см²

Библиографические ссылки

1. Luque A., Marti A. and Stanley C. Understanding intermediate-band solar cells. *Nat. Photon* 2012; 6: 146-152.
2. Carey J. E., Crouch C. H., Shen M. and Mazur E. Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes. *Optics Letters* 2005; 30: 1773-1775.
3. Komarov F., Vlasukova L., Wesch W., Kamarou A., Milchanin O., Grechnyi et al. Formation of InAs nanocrystals in Si by high-fluence ion implantation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2008; 266: 3557-3564.
4. Komarov F., Vlasukova L., Milchanin O., Wesch W., Wendler E., Zuk J. et al. Ion-beam synthesis and characterization of narrow-gap A³B⁵ nanocrystals in Si: Effect of implantation and annealing regimes. *Mater. Sci. Eng. B*. 2013; 178: 1169-1177.
5. Landolt, Bornstein, Series: Numerical data and functional relationships in science and technology, Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 1989.