

Никонов А. Ю.¹, Небеснюк О. Ю.², Шмалій С. Л.³, Никонова З. А.⁴¹Інженер Запорозької державної інженерної академії^{2,3}Канд. техн. наук, доцент Запорозької державної інженерної академії⁴Канд. техн. наук, професор Запорозької державної інженерної академії

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

В статье приведены результаты экспериментального исследования механизмов взаимодействия высокоэнергетического излучения с кремнием.

Ключевые слова: излучение, легирующие примеси, концентрация.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Применение высокоэнергетических излучений для локального легирования кремния заключается в возможности модифицировать тонкие поверхностные слои без изменения свойств объема (матрицы), нагревать и даже плавить локальные участки, формировать различные метастабильные состояния.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известно, что наличие значительных концентраций неконтролируемых примесей в кремнии (кислород, углерод и др.) приводит к состоянию, когда влияние легирующей примеси в образовании стабильных радиационных дефектов трудно определить [1].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Экспериментальное исследование механизмов взаимодействия высокоэнергетического излучения с кремнием, чтобы выбором его оптимальных параметров снизить или вообще исключить структурные несовершенства, влияющие на работу создаваемых приборов.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как правило, кристаллы с концентрациями легирующих примесей $10^{13} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ содержат $10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ кислорода, углерода и др. Последние могут являться эффективными стоками для первичных дефектов. С ростом уровня легирования кристаллов взаимодействие первичных радиационных дефектов с неконтролируемыми примесями может существенно изменяться как с точки зрения образования стабильных радиационных нарушений, так и рекомбинации первичных дефектов на неконтролируемых примесях. К тому же механизмы взаимодействия первичных дефектов с легирующими примесями могут существенно проявляться лишь при больших концентрациях последних.

При концентрациях легирующей примеси, больших 10^{15} см^{-3} , наблюдается падение активности введения дефектов с уровнями $E_C - 0,17$, $E_C - 0,24$, $E_V + 0,34$, $E_V + 0,21$ эВ, что хорошо видно из табл. 1 и рис. 1.

Авторами подтверждено экспериментально, что по мере увеличения уровня легирования кристаллов значительно возрастает начальная скорость удаления носителей δ_n , δ_p .

Как видно из рис. 2, при концентрациях носителей n_0 , $p_0 \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ δ_n и δ_p определяются введением указанных центров. При концентрациях носителей, существенно больших 10^{15} см^{-3} , введение рациональных дефектов не определяет скорость удаления носителей.

Рост скорости удаления носителей с увеличением концентрации легирующих примесей не определяется изменением зарядового состояния первичных радиационных дефектов с $E = E_V + 0,05$ эВ.

При концентрации носителей больше 10^{15} см^{-3} в кремнии процессы аннигиляции первичных нарушений не определяются температурой облучения, т.к. они не зависят от $T_{\text{обл.}}$ в области $78 \div 300$ К.

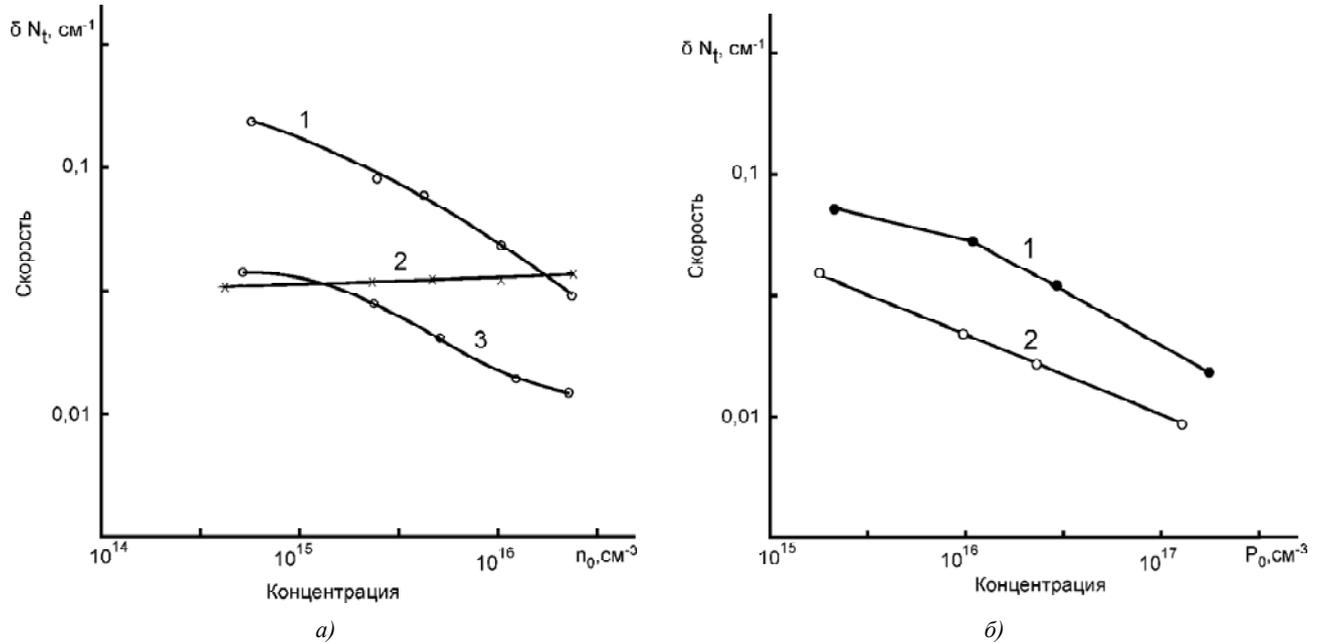
Анализ сведений о природе радиационных дефектов [2–6] показывает, что в состав радиационных дефектов входят вакансии. При сравнении концентрированных зависимостей скорости удаления носителей и введения радиационных нарушений (рис. 1, 2) экспериментально установлено, что уменьшение потока вакансий на образование дефектов с указанными уровнями не определяет рост скорости удаления носителей при $n_0, p_0 > 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Авторы отмечают, что компенсация высоколегированного кремния обусловлена введением нового типа радиационных дефектов с глубоким уровнем. Причём зависимости скорости удаления носителей от концентрации легирующей примеси при $n_0, p_0 > 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ или положение уровня Ферми, измеренное при 78 К, дают рост эффективности введения новых компенсирующих центров от уровня легирования кристаллов.

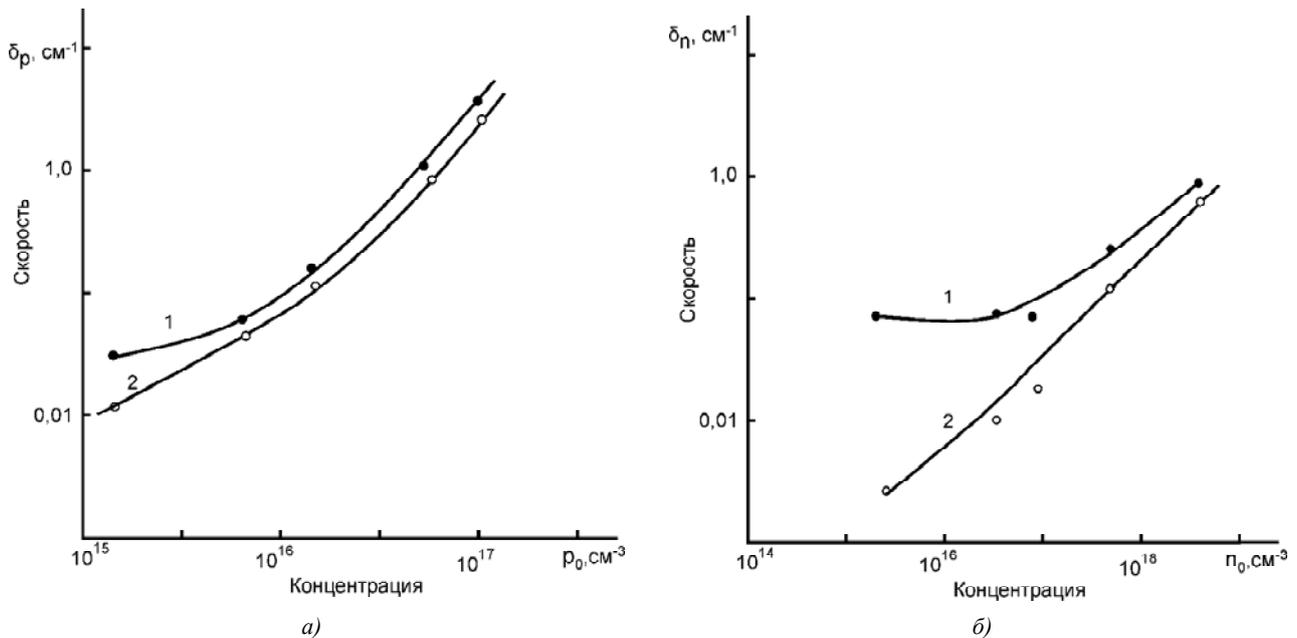
С ростом концентрации легирующих примесей наряду с взаимодействием первичных радиационных нарушений с неконтролируемыми примесями начинает конкурировать процесс захвата первичных дефектов атомами легирующей примеси. Возможность такого захвата может быть обусловлена наличием зарядов у взаимодействующих компонентов. Междоузельные атомы в n - и p -кремнии выступают как акцепторы и доноры, соот-

Таблица 1. Энергетический спектр и сечения захвата основных носителей в n - и p -высоколегированном кремнии

Материал базы	$E_C(\nu) \pm E$ эВ	$\delta_{n(p)} \cdot 10^2$ см ²
n -кремний	$E_C-0,17$	4,3
	$E_C-0,24$	3,6
	$E_C-0,41$	–
p -кремний	$E_V+0,21$	1,8
	$E_V+0,34$	1,1

Рис. 1. Зависимость скорости введения дефектов в n -кремнии (а) и p -кремнии (б) от концентрации носителей при облучении электронами ($E_0 = 7$ МэВ, $T_{\text{обл.}} = 300\text{K}$):

а) 1 – $E_C - 0,17\text{эВ}$; 2 – $E_C - 0,41\text{эВ}$; 3 – $E_C - 0,24\text{эВ}$ б) 1 – $E_V + 0,34\text{эВ}$; 2 – $E_V + 0,21\text{эВ}$

Рис. 2. Экспериментальная зависимость начальной скорости удаления носителей в p -кремнии (а) и n -кремнии (б) от концентрации носителей при облучении электронами ($E_0 = 7$ МэВ, $T_{\text{обл.}} = 300\text{K}$) $T_{\text{изм.}}$: 1 – 78K; 2 – 300K

ветственно. Если участники реакции обладают зарядами, то радиус взаимодействия, определяемый электростатическим потенциалом, составляет $r_{\text{ен}} \approx 50 \text{ \AA}$.

В этом случае с ростом уровня легирования кристаллов возрастает вероятность захвата подвижного междоузельного атома заряженным атомом легирующей примеси. В тоже время сходство концентрационных зависимостей скоростей удаления носителей в *n*- и *p*-кремнии дает возможность предположить, что вакансии в *p*-кремнии в условиях облучения подвижны при 78 К. В таком случае, при отсутствии аннигиляции первичных радиационных дефектов при $n_0, p_0 > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и уменьшении скорости введения дефектов вакансионного типа, возможно образование комплексов (примесный атом-междоузлие)+вакансия. Первоначальным актом, в силу большей подвижности междоузельных атомов, является их взаимодействие с примесью, с последующим захватом вакансии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, дефектообразование в высоколегированном кремнии характеризуется следующим:

– аннигиляция первичных радиационных дефектов практически отсутствует при $n_0, p_0 < 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $T \leq 300 \text{ К}$;

– введение известных вакансионных комплексов не определяет скорость удаления носителей при концентрациях $n_0, p_0 \gg 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

– компенсация кремния при больших концентрациях легирующих примесей обусловлена введением комплексов: легирующая примесь-междоузлие, либо (легирующая примесь-междоузлие)+вакансия, дающих глубокие уровни в запрещенной зоне ($E_i > 1/2 E$);

– совершенствование способов локального легирования с целью снижения структурных несовершенств высоколегированного кремния позволит разрабатывать полупроводниковые приборы без ущерба для их структурных и электрофизических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Емцев, В. В.* Примеси и точечные дефекты в полупроводниках / В. В. Емцев, Т. В. Машовец ; под ред. профессора С. М. Рывкина. – М. : Радио и связь, 1981. – 248 с.
2. *Щербачев, К. Д.* Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур «кремний на изоляторе» / К. Д. Щербачев, В. Т. Бублик, В. Н. Мордкович // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 6. – С. 754–758.
3. *Вавилов, В. С.* Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах / В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. – М. : Атомиздат, 1969. – 312 с.
4. *Томпсон, М.* Дефекты и радиационные повреждения в металлах, пер. с англ. / М. Томпсон. – М. : Мир, 1971. – 368 с.
5. *Пагава, Т. А.* Два канала отжига дивакансий в облученных кристаллах кремния *n*-типа. / Т. А. Пагава, Н. Т. Бжалава, Н. И. Майсурадзе [та ін.] // Український фізичний журнал. – 2010. – Т. 55, № 11. – С. 1195–1200.
6. *Стась, В. Ф.* Термоакцепторы в облученном кремнии / В. Ф. Стась, И. В. Антонова, Е. П. Неустроев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, вып. 2. – С. 162–167.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2011.

Після доробки 16.11.2011.

Ніконов А. Ю., Небеснюк О. Ю., Шмалій С. Л., Ніконова З. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФЕКТООТВОРЕННЯ В ВИСОКОЛЕГОВАНОМУ КРЕМНІ ПРІ ОПРОМІНЕННІ

У статті наведені результати експериментального дослідження механізмів взаємодії високоенергетичного випромінювання з кремнієм.

Ключові слова: випромінювання, легуючі домішки, концентрація.

Nikonov A. Y., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A. RESEARCH OF FEATURES THE FORMATION OF DEFECTS IN HIGHLY ALLOYING SILICON DURING IRRADIATED

In the article the results of experimental research mechanisms interaction high-energy radiation on silicon.

Key words: radiation, doping impurity, concentration.