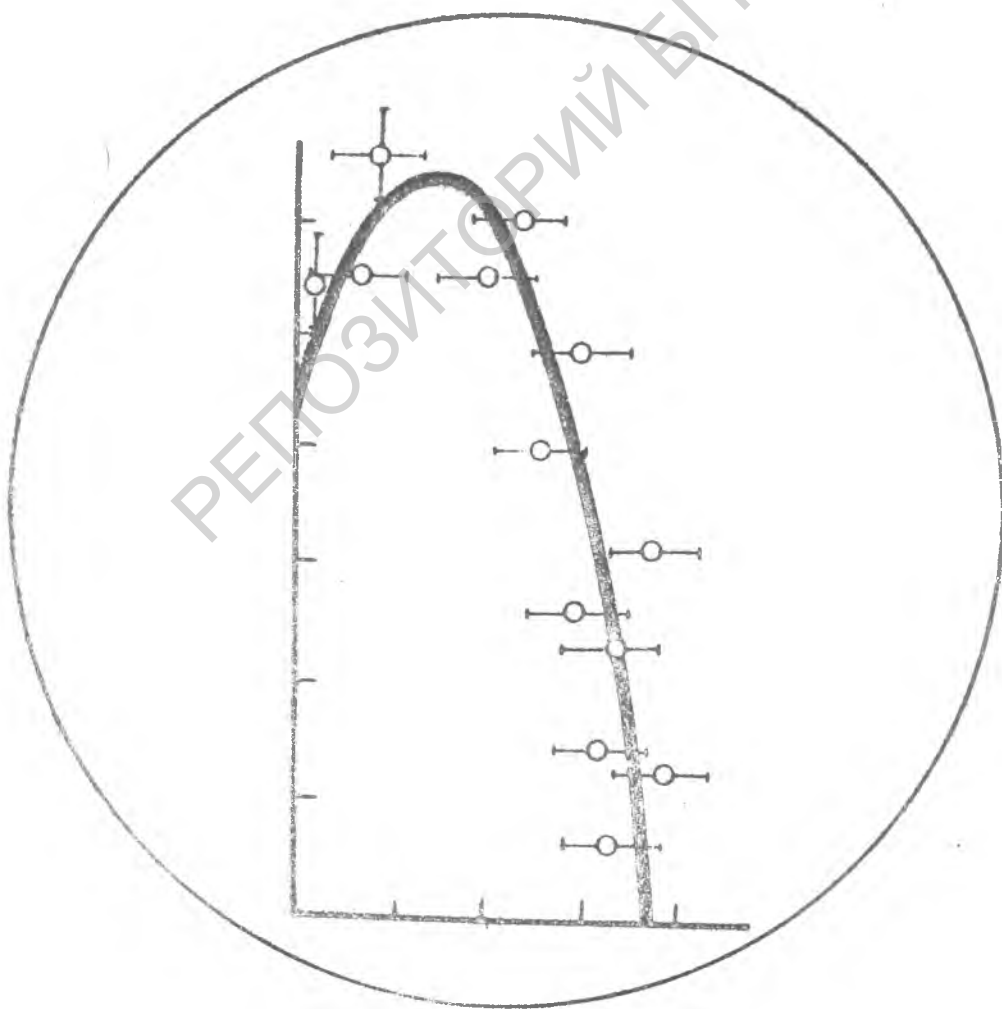


PROCEEDINGS
OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE
ON ION IMPLANTATION
IN SEMICONDUCTORS

P O L A N D L U B L I N 9 - 1 2 S e p t e m b e r 1 9 7 4

VOL.1



ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ УГЛЕРОДА

Гуманский Г.А., Мудрый А.В., Патрин А.А., Ташлыков И.С., Шамаль В.А.,
Белорусский государственный университет имени В.И.Ленина,
Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем
при Белгосуниверситете имени В.И.Ленина, Минск, СССР

В работе излагаются основные результаты исследования дефектообразования при имплантации кремния ионами углерода с $E = 30 + 40$ кэВ и интегральными потоками до $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Используя ориентационную зависимость Резерфордского рассеяния были получены спектры обратно рассеянных ионов гелия при ориентировании оси $\langle 111 \rangle$ исследуемого кристалла в направлении пучка ионов и при случайной ориентации кристалла. На основании полученных спектров проведён анализ профиля распределения дефектов, дана количественная оценка степени повреждения кристалла, показано распределение углерода по глубине в имплантированном слое.

На основании анализа низкотемпературных спектров люминесценции и оптического поглощения установлена природа дефектов, формирующихся при внедрении ионов углерода (дивакансии, 5-вакансионные комплексы и др.) Изохронный отжиг в интервале температур $0-900^\circ\text{C}$ позволил изучить кинетику перестройки ряда дефектов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование природы радиационных нарушений, возникающих при внедрении ионов в твёрдые тела представляет большой практический и научный интерес [1,2,3]. Данная работа посвящена изуче-

нию природы дефектов, образуемых в кремниевых подложках при внедрении ионов углерода. Идентификация и установление типа дефектов проведены с использованием разных экспериментальных методов: ионометрия, фотолюминесценции, оптического поглощения и электрических измерений.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались монокристаллы кремния легированные бором и фосфором ($\rho = 2-200$ ом·см), полученные бестигельной зонной плавкой (концентрация атомов кислорода меньше 10^{16} см⁻³) и тянутые из расплава в кварцевом тигле (концентрация атомов кислорода 7×10^{17} см⁻³). Внедрение ионов ^{12}C разных энергий (30-40 кэВ) в интервале доз $6 \times 10^{12} - 6 \times 10^{16}$ см⁻² проводилось при комнатной температуре.

При проведении ионометрических исследований в отделе прикладной физики-2 Иенского университета им. Ф. Шиллера выполнялись следующие условия. Пучок анализирующих ионов гелия с $E_0 = 1,4$ мэВ имел расходимость не более 10^{-2} градуса, его диаметр при падении на кристалл составлял 0,7 мм. Ток пучка при снятии спектров не превышал значения 9 нА, а общий перенесённый заряд за время снятия одного спектра имел величину 5 мкКл. Нами снимались осевые спектры при ориентировании оси $\langle 111 \rangle$ кристалла в направлении пучка и спектры при случайной ориентации кристалла. Применение двухосевого гониометра позволяло получать совпадение любой оси кристалла с желаемым направлением с точностью выше 0,05°. Регистрация рассеянных под углом 160° к первоначальному направлению ионов гелия осуществлялась полупроводниковым детектором с энергетическим разрешением 15 кэВ.

Исследование спектров излучательной рекомбинации монокристаллов кремния проводилось в диапазоне температур 4,2 - 120°К.

Облучённые образцы помещались в криостат, охлаждались до необходимой температуры и возбуждались в "собственной" области светом ксеноновой лампы ДКСШ-1000. ИК-излучение, возникающее в следствии рекомбинации неравновесных носителей тока на дефектах структуры кристаллической решётки кремния, анализировалось решёточным монохроматором и детектировалось охлаждаемым ИК-приёмником излучения (PbS, германиевый фото-диод).

Спектры пропускания в области от 1 до 2,5 мк снимались с использованием дифференциальной методики при комнатной и азотной температурах. 20-минутный изохронный отжиг образцов от комнатной температуры до 900°C проводился в вакууме 10^{-5} мм.рт.ст. с интервалом 50°.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. ИОНОМЕТРИЯ

Полученные спектры обратно рассеянных ионов гелия представлены на рисунке 1.

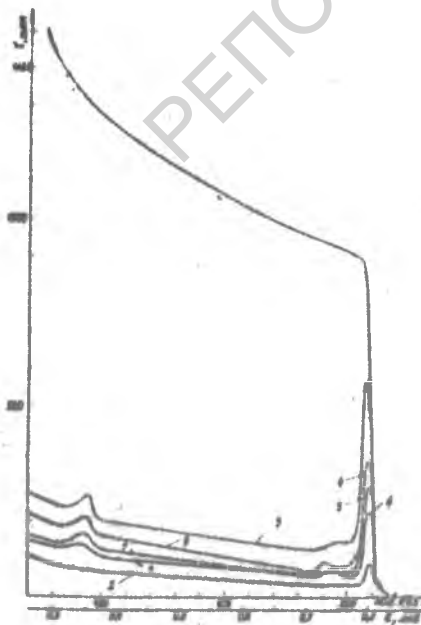


Рис. 1

Спектры обратно рассеянных ионов гелия с $E_0 = 1,4$ мэв. 1-случайный; осевые: 2- до имплантации; 3- после имплантации; после отжига 4-650°C; 5-750°C; 6-900°C.

На рисунке 2 показаны профили распределения дефектов, расчёт которых проведён по методу, предложенному в работе [4]. Обращает на себя внимание малая глубина залегания дефектов в им-

плантационном кристалле и незначительное их содержание в олове ($n_g = 6,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$), хотя легирование проводилось ионами углерода с $E = 30 \text{ кэВ}$ ($R_p = 1060 \text{ \AA} [5]$) и интегральным потоком $\Phi = 3,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Повидимому, значительная часть дефектов отожглась уже в процессе легирования в результате радиационно-стимулированного отжига (в данном эксперименте легирование длилось более 20 часов), из-за чего максимум пика дефектов сместился к самой поверхности. В результате распыления поверхности, о чём говорится ниже, глубина расположения дефектов также уменьшается.

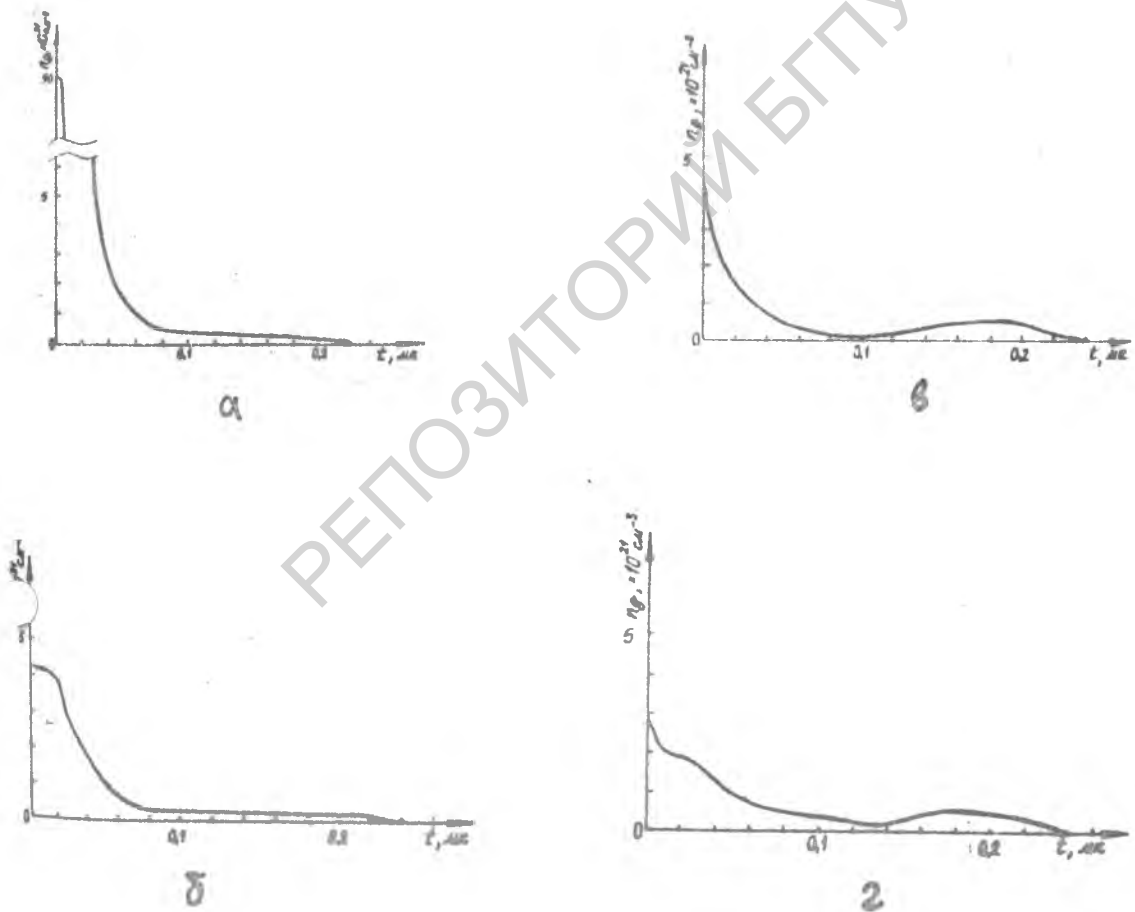


Рис. 2

Профили распределения дефектов по глубине:
 а - после имплантации; б - после отжига 650°C ; в - 750°C ; г - 900°C .

Проведённый в течение 20 минут при температурах 650, 750, 900°С отжиг позволил выявить существенные изменения в распределении дефектов по глубине.

При увеличении температуры отжига до 750°С число дефектов в слое уменьшается (табл. I). Дальнейшее повышение температуры отжига до 900°С приводит к росту n_d . Аномальное поведение легирован-

$T_{отж}, ^\circ\text{C}$	исход.	650	750	900
$n_d, \times 10^{16} \text{см}^{-2}$	6,68	2,39	1,37	1,92

Таблица I.

ных углеродом кристаллов кремния при 900°С отжиге наблюдалось в работе [7] и объяснялось нарушением текстуры образовавшегося при 750°С отжиге слоя карбида кремния. Однако, в данном эксперименте получена максимальная концентрация углерода $4,2 \times 10^{21} \text{см}^{-3}$ (рис. 3) что по мнению авторов [8] недостаточно для образования фазы карбида кремния в кремнии.

Выбор сравнительно высокой начальной температуры отжига (650°С) определялся тем, что при более низких температурах отжига кристаллов кремния, легированных электрически неактивными примесями, изменения в осевых спектрах незначительны [6,7].

Интересным представляется появление на глубине 0,2 μ вторых максимумов на "хвостах" профилей распределения дефектов кристаллов, отожжённых при температурах 750 и 900°С, рис. 2 в, г. Поскольку обычные дефекты отжигаются в кремнии, легированном углеродом, при более низких температурах, что следует из результатов оптических исследований (раздел 3.2), то здесь можно предположить формирование сложных термоустойчивых дефектных образований, повидимому, с участием атомов углерода. Наличие "хвостов" в распределении (рис. 2 а, б) определяется тем, что небольшая

часть ионов углерода при внедрении могла попасть в режим каналирования, т.к. легирование проводилось под углом 10° к оси $\langle 111 \rangle$, а критический угол каналирования Линдхарда в данном случае равен $7,5^{\circ}$. Анализ увеличения выхода (приподнятые случайного спектра) в области энергий 270–370 кэв (рис. 1) дал распределение внедрённых ионов углерода по глубине, рис. 3.

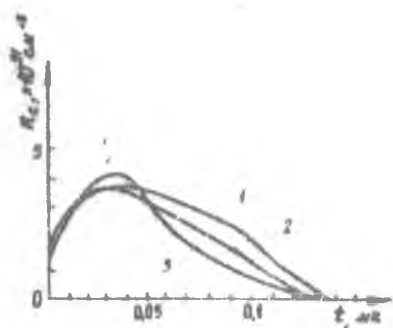


Рис. 3.
Профили распределения углерода по глубине: 1 — после имплантации; после отжига 2 — 650°C ; 3 — 750°C и 900°C .

Следует отметить, что максимум распределения углерода в имплантированном кристалле (кривая 1 на рис. 3) расположен на значительно меньшей глубине, чем даёт её теоретический расчёт [5]. Однако, данное различие эксперимента с теорией можно объяснить распадом поверхностного слоя кремния в процессе легирования.

Работа по количественному расчёту распыления поверхности кремния ионами углерода при различных режимах имплантации проводится нами и результаты будут опубликованы.

Отсутствие "хвоста" в распределении углерода связано с недостаточным разрешением накладывающихся спектров (от кремния и от углерода). При отжиге имплантированного кристалла с температурой 650°C , а затем 750°C наблюдается уменьшение концентрации углерода на глубине большей 500Å . Повидимому, при этих температурах отжига атомы углерода диффундируют вглубь кристалла частично входя в термоустойчивые комплексы дефектов, которые

проявляются в виде вторых максимумов на кривых распределения дефектов.

3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ранее мы использовали низкотемпературную (6°K) фотолюминесценцию для изучения радиационных дефектов в кремнии, облучённом частицами высоких энергий (γ -квантами ^{60}Co , электронами, быстрыми нейтронами) [9, 10]. В настоящей работе сообщается об успешном применении этой методики для установления природы дефектов, возникающих в кремниевых подложках при внедрении ионов углерода.

Воздействие ионов на монокристаллы кремния приводит к тому, что с увеличением дозы собственная люминесценция [11] исчезает и в примесной области спектра (1-2,5 мк) обнаруживается ряд полос с интенсивными узкими линиями [12]. В качестве примера на рисунках 4 и 5 показаны спектры фотолюминесценции кремния

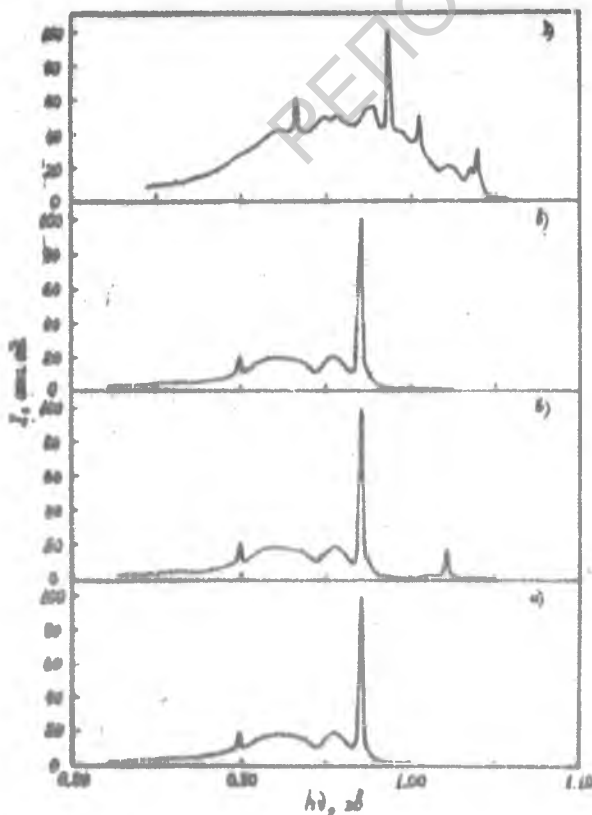


Рис. 4

Спектры фотолюминесценции одного из образцов кремния (р-тип, зонный, $\rho = 150 \text{ ом}\cdot\text{см}$), облучённого ионами углерода ($E = 38 \text{ кэВ}$, $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$): а - до отжига; б - отжиг 200°C ; в - 300°C ; г - 400°C .

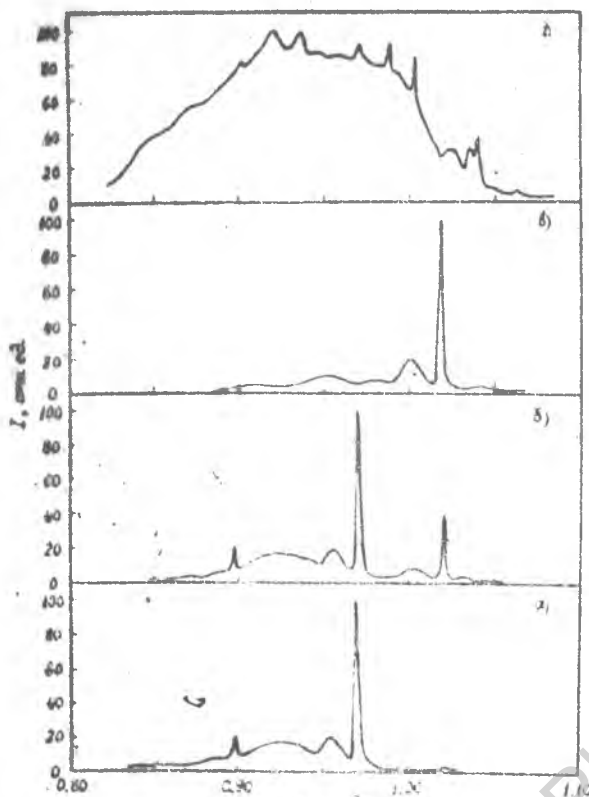


Рис. 5

Спектры фотолуминесценции одного из образцов кремния (р-тип, зонный, $\rho = 150 \text{ ом}\cdot\text{см}$), облучённого ионами углерода ($E=38 \text{ кэВ}$, $\Phi=6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$): а — до отжига; б — отжиг 200°C ; в — 300°C ; г — 400°C .

после внедрения ионов углерода, снятые на различных этапах 20-минутного изохронного отжига. Как видно, спектры состоят из узких интенсивных линий и примыкающих к ним длинноволновых колебательных крыльев. Большинство из этих линий мы наблюдали ранее при исследовании спектров излучательной рекомбинации кремния, облучённого γ -квантами, электронами и быстрыми нейтронами [10]. Детальный вид спектров зависит от энергии, интегрального потока ионов, а также от температуры отжига имплантированных образцов. Во всех исследованных образцах в области энергий 0,80–1,00 эв обнаружена структура с двумя бесфононными линиями 0,970 и 0,898 эв, относящаяся к одному излучательному центру (дивакансии [13, 14]). В спектрах кристаллов, тянутых из расплава, наблюдается полоса 0,60–0,80 эв с узкими линиями 0,795; 0,790; 0,724 и 0,717 эв, связанная с дефектом, в состав которого входит атом кислорода [10, 14, 15] (предположительно К -

центром [16]). Изохронный отжиг образцов при разных температурах в интервале от комнатной до 600°C приводит к исчезновению одних и появлению других спектральных групп, что позволяет проследить за кинетикой перестройки излучающих дефектов, образованных при внедрении ионов. Вид отдельных особенностей спектров и характер их изменения в процессе отжига указывают на то, что внедрение ионов подобно облучению нейтронами. В частности, спектры всех образцов содержат бесфононную линию $1,019$ эв с сопутствующей ей длинноволновой структурой, которая характерна также и для нейтронного облучения [10]. Как показывают исследования, интенсивность этой линии сильно возрастает при отжиге, достигая максимального значения при $T = 200^{\circ}\text{C}$ и увеличивается при росте дозы и энергии ионов углерода. Анализ результатов изохронного отжига в сочетании с проведенными пьезоспектроскопическими исследованиями по расщеплению линии $1,019$ эв при одноосной деформации сжатия кристаллов вдоль различных кристаллографических направлений, изучение "атомной" переориентации данного центра при повышенной температуре, а также независимость пика $1,019$ эв от примесного состава образцов указывают на то, что дефектом, ответственным за его появление, вероятно, является $\text{Si}-\text{PI}$ центр (5-вакансионный комплекс с симметрией C_1 [17]).

Отжиг образцов при более высоких температурах ($400-600^{\circ}\text{C}$) приводит к существенной перестройке спектров фотолюминесценции (см. рис. 4 и 5). Так, например, при 400°C в спектрах появляется полоса с бесфононной линией $1,004$ эв, которая, повидимому возникает в результате излучательной рекомбинации неравновесных носителей на центре, в состав которого входят атомы углерода. При дальнейшем отжиге ($T > 600^{\circ}\text{C}$) люминесценция в примесной области спектра исчезает и происходит частичное вос-

становление интенсивности собственного излучения. Неполное восстановление интенсивности полосы I, I мк, вероятно, связано с наличием температуроустойчивых нарушений, являющихся безизлучательными центрами рекомбинации, которые определяют время жизни неравновесных носителей.

Интересно отметить, что при 200°C нами обнаружена стадия обратного отжига для линии 0,970 эв, связанной с дивакансией, и линии 0,789 эв, приписываемой К-центру. На основании этого факта и сильного роста интенсивности пика I,019 эв можно предположить, что на этой стадии отжига происходит развал областей разупорядочения путём отсоединения вакансий с образованием более простых комплексов таких, например, как Si-PI - центр (линия I,019 эв) и дивакансии (линия 0,970 эв).

Не менее интересным фактом является то, что увеличение дозы облучения приводит к перераспределению интенсивностей бесфононных линий. Кроме того, характер отжига некоторых линий излучения зависит от дозы облучения. Это видно из сравнения результатов, представленных на рисунках 4 в и 5 в. Как известно, при облучении кристаллов кремния большими дозами ионов наблюдается перекрытие отдельных областей разупорядочения и, повидимому, условия отжига дефектов определённого типа (дивакансий, 5-вакансионных комплексов и т.д.) в этом случае будут несколько другими, чем при облучении меньшими дозами.

Необходимо также отметить, что остаточная полуширина наиболее интенсивных линий в области температур от 4,2°K до 30°K постоянна и заключена в интервале 0,35-0,45 мэв. Это несколько больше полуширины этих же линий, определённых ранее в случае облучения кристаллов γ -квантами, электронами (см., например, [19]) и, вероятно, связано с наличием дополнительных напряжений, возникающих в области излучательных спектров. Как показывают оценки

о использовании численных значений "деформационных потенциалов" линии 0,970 эв [13] механические напряжения от соседних дефектов в области расположения соответствующих центров не превышают 5 кг/мм^2 .

В спектрах пропускания кремния обнаружена полоса поглощения 1,8 мк, обусловленная дивакансиями [20], и дополнительное близкряевое поглощение.

Сравнение экспериментальных результатов, полученных двумя оптическими методами показывает, что излучение спектров люминесценции является более информативным методом исследования процессов дефектообразования при ионном легировании кремния.

3.3. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ

На образцах кремния, облучённых ионами углерода, исследовались вольт-амперные характеристики в зависимости от температуры отжига. На рис. 6 представлены экспериментальные результаты для четырёх образцов, вырезанных из одной пластины. Время отжига составляло 20 минут.

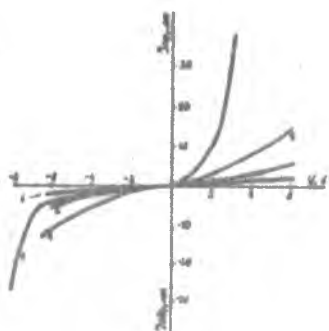


Рис. 6

ВАХ имплантированных ионами I_2C кристаллов кремния ($\Phi = 3,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Кривые: 1 - неотожжённый образец; 2 - $T_{\text{отж}} = 650^\circ\text{C}$; 3 - 750°C и 4 - 900°C .

Как видно из рисунка 6, при температуре отжига 750°C структура обладает выпрямляющим свойством. Повидимому, при температуре отжига 750°C происходит образование включений карбида

кремния, что отмечалось в работе [21] и поэтому структура может проявлять свойства гетероперехода кремний-карбид кремния. У образца, отожжённого при 900°C , выпрямляющих свойств не наблюдалось.

Литература

1. Mayer J.W. IEEE Trans., NS-15, Nr.6, 10 /1968/
2. Gibbson J.F. Proc. IEEE, 60, 1062 /1972/
3. Сб. Физические основы ионно-лучевого легирования. Горький, 1972.
4. Белошицкий В.В., Гуманский Г.А., Кумахов М.А., Ташлыков И.С., Труды V Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Москва, 1974.
5. Кумахов М.А. Частное сообщение.
6. Glaser E. Diplomarbeit. Jena, 1973
7. Гуманский Г.А., Соловьёв В.С., Ташлыков И.С. Труды III Всесоюзной конференции по взаимодействию атомных частиц с твёрдым телом. Киев, 1974.
8. Павлов П.В., Зорин Е.И., Тетельбаум Д.И., Рыжков Г.М., Лесников В.П. Сб. "IV Всесоюзное совещание по росту кристаллов. Цехкадзор, 1972. Выращивание кристаллов и их структура, часть I", Ереван, АН Арм.ССР, 1972, 76.
9. Бортник М.В., Ткачёв В.Д., Охневич А.В. ФТП, 1, 353, /1967/
10. Мудрый А.В., Охневич А.В. ФТП, 7, 170, /1973/
11. Haynes I.R., Westphal W.C. Phys. Rev., 101, 1676, /1956/
12. Мудрый А.В., Охневич А.В. ФТП, 8, 1351, /1974/
13. Охневич А.В., Мудрый А.В., ФТП, 7, 1215, /1973/
14. Iones C.E., Compton W.D. Rad. eff., 2, 83, /1971/
15. Johnson E.S., Compton W.D., Rad. eff., 2, 89, /1971/
16. Almeleh N., Goldstein B. Phys. Rev. 161, 711, /1967/
17. Lee J.H., Corbett I.W. Phys. Rev., 8, 2810, /1973/

18. Lee J.H., Corbet J.W. Phys. Rev., 8, 2810, /1973/
19. Мудрый А.В., Ткачёв В.Д., Охневич А.В. ФТП, 5, 2375, /1971/
20. Chen C.S., Corelli T.C. Phys. Rev., B5, 1505, /1973/
21. Borders J.A., Picraux S.T., Beezhold W. Appl. Phys. Letters, 18, Nr.11, 509, /1971/

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ