

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-73

P14-95-73

В.С.Вариченко¹, П.И.Гайдук¹, А.Ю.Дидык, Н.М.Казючиц¹

МИКРОСТРУКТУРА ДЕФЕКТОВ
В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ
ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
СЛОЯХ КРЕМНИЯ ПРИ ОТЖИГЕ

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

1995

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение полупроводниковых и диэлектрических материалов с заданными свойствами является актуальной задачей современной технологии. Одним из наиболее перспективных методов для решения этой проблемы служит ионное легирование. Изучению свойств материалов, в том числе и процессов радиационного дефектообразования в условиях ионного легирования с энергиями ионов до 1 МэВ, посвящено большое количество работ (см., напр., /1,2/ и цитированную там литературу). В настоящее время наряду с традиционной низкоэнергетичной ионной имплантацией существенное развитие получают работы, в которых для создания ионно-легированных заглубленных структур используются тяжелые ионы с энергиями более 1 МэВ/а.е.м. /2-5/. В связи с этим значительный интерес представляют исследования структуры и свойств различных неметаллических кристаллов, облученных высокоэнергетичными ионами. В работе /6/ приведены данные по накоплению радиационных дефектов в кремнии в широком интервале флюенсов для ионов с различными массами.

В настоящей работе обсуждаются результаты экспериментов по изучению особенностей высокоэнергетичной ионной имплантации в процессах послерадиационной обработки в полупроводниковом монокристалле кремния, облученном различными тяжелыми ионами, имплантация которых представляется перспективной для создания проводящих и изолирующих слоев в кремнии.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Облучение образцов кремния проводилось на ускорителе тяжелых ионов ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова.

Вторичные дефекты, возникающие при термообработке в имплантированных ионами высоких энергий слоях кремния, исследовали методом просвечивающей микроскопии (ЭМ) поперечных слоев (сечений - ХТЕМ-метод типа метода cross-section). Указанный метод позволяет устанавливать однозначную связь дефектообразования, распределения различных фаз по глубине в зависимости от режима обработки образцов. Для исследованийготавливались тонкие образцы, представляющие собой поперечное сечение исходной пластины. Образцы склеивались "лицом к лицу" и утонялись до 10-30 мкм, после чего проводилась двухсторонняя ионная полировка (ионами Ag^+ с энергией 6-10 кэВ) до толщины 0.1-0.2 мкм. Полученные таким путем об-

разцы исследовались на электронном микроскопе ЭМ-125 с напряжением 100 кВ в режимах двухлучевой дифракции и "слабого" пучка.

В результате имплантации ионов бора ($E = 13.6$ МэВ при флюенсе - $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см²) в образцы КДБ-12 [100] и последующего термического отжига в течение 30 мин на воздухе формируются три разделенных полосы вторичных дефектов, локализованных на глубинах 2.0, 15.5 и 19.3 мкм (рис.1). Статистические исследования образцов показали, что промежуточный слой дефектов может и не образовываться, это зависит от условий имплантации (температуры и флюенса).

Можно выделить несколько условий дефектообразования при отжиге. С ростом температуры трансформация первичных радиационных дефектов проходит две стадии. На первой происходит образование кластеров точечных дефектов, затем - формирование стержнеобразных дефектов с последующей их трансформацией в дислокационные петли Франка с дефектами упаковки. Последующий рост температуры приводит к превращению петель Франка в полные дислокационные петли. В нашем случае обнаружено преимущественное формирование стержнеобразных дефектов во всех трех слоях.

Сравнительный анализ дефектов, находящихся в разных полосах в пределах одного образца, показывает, что развитие дефектной структуры усиливается с уменьшением глубины залегания слоев дефектов. Так, приповерхностный слой содержит преимущественно петли Франка и малую концентрацию стержнеобразных дефектов. То же самое характерно и для промежуточного слоя. Вместе с тем в глубине преобладают стержнеобразные дефекты. Необходимо отметить, что в этом случае дефекты сильно декорированы выделениями кислорода (см. рис.2); что может сдерживать их трансформацию в дислокационные петли. Одновременно преципитация атомов кислорода в наиболее глубоко лежащем дефектном слое свидетельствует о его геттерирующих свойствах.

Для сопоставления полученных электронно-микроскопическими исследованиями данных с другими методиками образцы кремния, имплантированные ионами ¹¹B до флюенса $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см², были изучены методами вторичной масс-ионной спектроскопии (ВИМС). В исследованиях применялся метод ВИМС с использованием спектрометра CAMECA-IMS F4. Ионное травление по глубине облученного слоя осуществлялось ионами аргона.

На рис.3 представлена зависимость интенсивности регистрации ионов ¹¹B в зависимости от времени ионного травления. Положение обнаруженных при этом пиков представлено в таблице, а их глубина определена путем

$d=19.3$



$d=15.5$



$d=2.0$

$d=0$

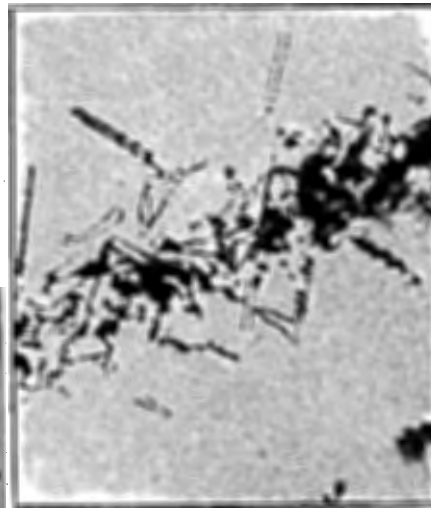


Рис.1. Микрофотографии вторичных дефектов в кремнии, имплантированном ионами бора с энергией $E = 13.6$ МэВ до флюенса $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 1000°C в течение 30 мин на воздухе.

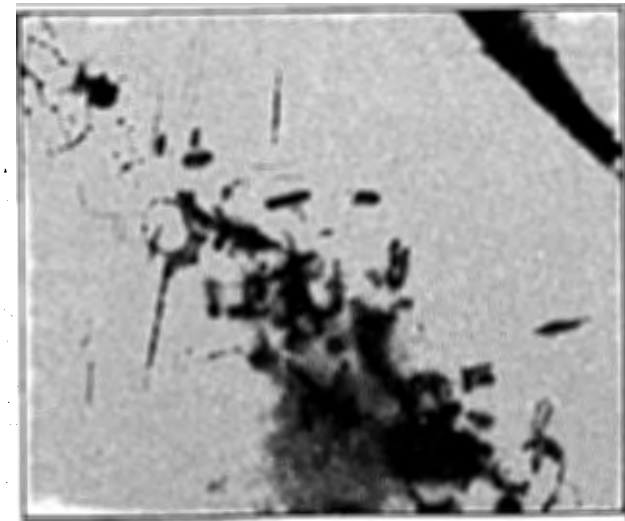


Рис.2. Микрофотография глубинного дефектного слоя, содержащего преципитаты кислорода. Облучение ионами ^{11}B с энергией $E = 13.6$ МэВ до флюенса $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Отжиг при температуре 1000°C в течение 30 мин на воздухе

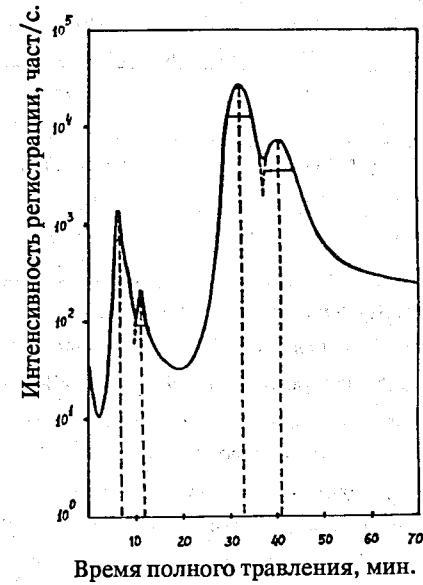


Рис.3. Зависимость интенсивности регистрации ионов ^{11}B от времени ионного травления в методе ВИС

пересчета измеренной скорости травления (V_T) и времени ионного травления (t_T). Следует заметить, что применение метода ВИМС для таких относительно глубоких слоев залегания имплантированного бора носит качественный характер, поскольку возможное уширение профиля залегания ионов бора на глубинах $R_3 = 11.43$ мкм и $R_4 = 14.46$ мкм может быть обусловлено подтравом ионами аргона боковых стенок.

Таблица. Значения глубины залегания (R_m) и полуширины распределения ($R_{1/2}$) обнаруженных методом ВИМС пиков ионов ^{11}B , имплантированных в кремний, а также дефектных слоев - ЭМ (R_m^*). Приведены также расчетные значения энергии ионов бора, имеющие данный проективный пробег R_m и значения разброса R_p (расчет энергии выполнен по программе TRIM-90)

Номер пика	1	2	3	4
R_m (мкм)	2.25	4.11	11.43	14.46
$\Delta R_{1/2}$ (мкм)	0.57	0.61	1.78	2.54
R_m^* (мкм)	2.0	-	15.5	19.3
$E(R_m)$ (МэВ)	1.5	3.3	10.0	12.3
$\Delta R_p(E)$ (мкм)	0.14	0.14	0.10	0.07
$R(E=13.6 \text{ МэВ})$				17.0

Как видно, положение первого пика ионов ^{11}B практически совпадает как для методов ЭМ, так и для ВИМС (этот пик, как и второй пик (ВИМС), связан с относительно небольшой долей ионов бора с энергиями до $E = 1.4$ МэВ и до $E = 3.3$ МэВ соответственно, которые присутствуют в ионном пучке ускорителя ИЦ-100 при облучении на внутреннем пробнике. Оценка энергии ионных пучков сделана на основе расчетной программы TRIM-90). В то же время пространственные положения третьего и четвертого пиков значительно различаются, это может быть связано с подтравом поверхностей стенок кратера при ВИМС.

Остановимся далее на имплантации в кремний ионов кислорода. Как и в случае ионов бора, имплантация кислорода (с энергией $E = 19.7$ МэВ, $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см²) с последующим термическим отжигом приводит к формированию многослойной дефектной структуры в изученных образцах КДБ-10 [111]. Обнаружено четыре слоя дефектов, находящихся соответственно на глубинах 5.4, 6.8, 7.3 и 13.3 мкм (см. рис.4). При этом, в отличие от случая имплантации бором, слои содержат в основном дислокационные петли междоузельного типа. В то же время наиболее глубокий слой дефектов (13.3 мкм) содержит значительное количество выделений, связанных с кислородными комплексами (см. рис.5). В целом закономерности трансформации дефектов в слоях такие же, как обсужденные выше. Отметим лишь, что статистические исследования, выполненные на нескольких образцах, обнаружили, что при увеличении флюенса ионов кислорода при имплантации происходит существенное увеличение плотности дефектов в слое глубиной 6.8 мкм и усиление первого слоя дефектов, локализованного на глубине 5.4 мкм.

В заключение этого раздела остановимся на процессах химического травления имплантированной высокоэнергетическими ионами поверхности кремния. Характер травления имплантированных слоев кремния на разных глубинах исследовался для случая имплантации ионами бора ($E = 13.6$ МэВ, $Ft = 8 \cdot 10^{14}$ ион/см²) в подложки КЭФ-4,5 [100]. После имплантации формировался косой шлиф, поверхность которого обрабатывалась в селективном травителе Райта. Образовавшийся в результате травления рельеф на поверхности косого шлифа записывался с помощью профилометра (см. рис.6). Из рисунка видно, что скорость травления облученного слоя кремния меньше, чем необлученного кремния. В слое, совпадающем с максимумом ядерного торможения, имеет место повышенная скорость травления (на глубине 17 мкм). Следует отметить, что этот узкий слой высокой скорости травления окружен двумя областями, в которых скорость травления максимально низка. Положение этих двух максимумов коррелирует с двумя областями вторичных дефектов, выявленных электронной микроскопией поперечных сечений и локализованных на глубинах 15.5 и 19.3 мкм.

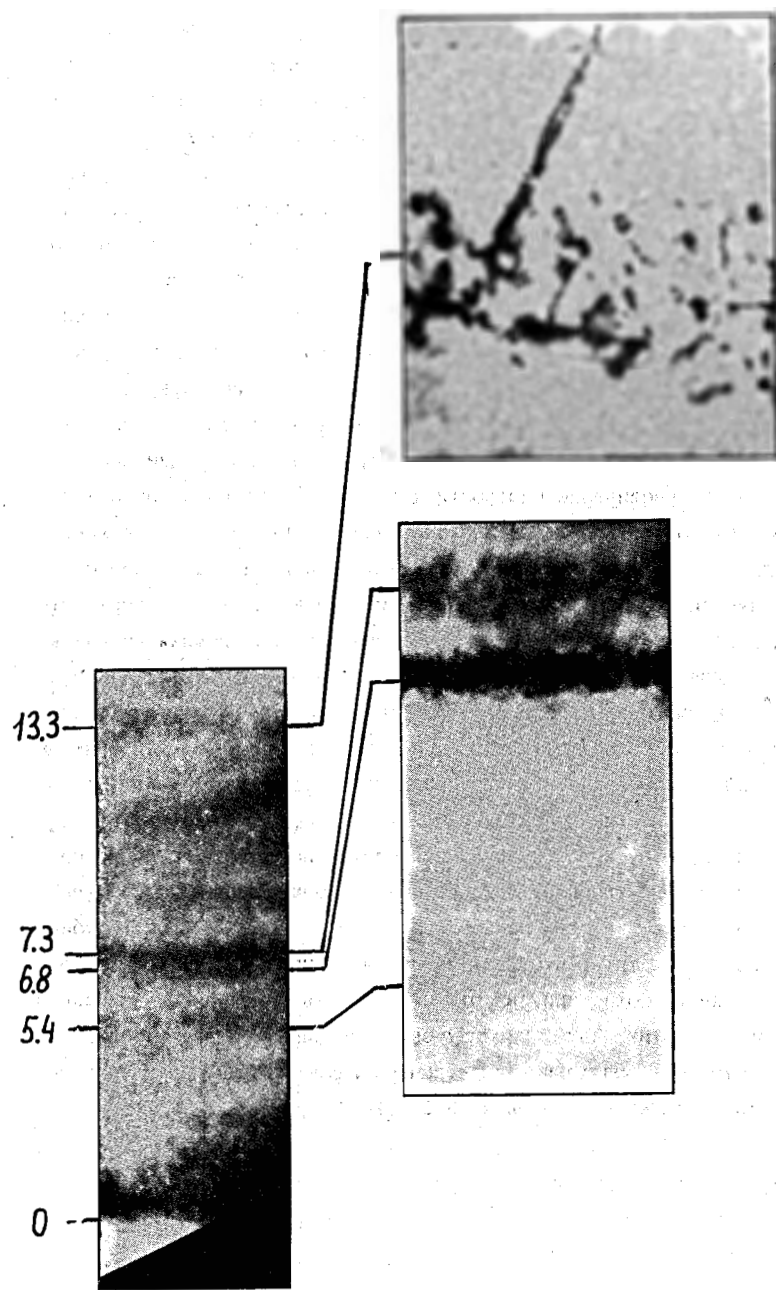


Рис. 4. Микрофотографии вторичных дефектов в кремнии, имплантированном ионами кислорода с энергией $E = 19.7$ МэВ до флюенса $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 1000°C в течение 30 мин на воздухе

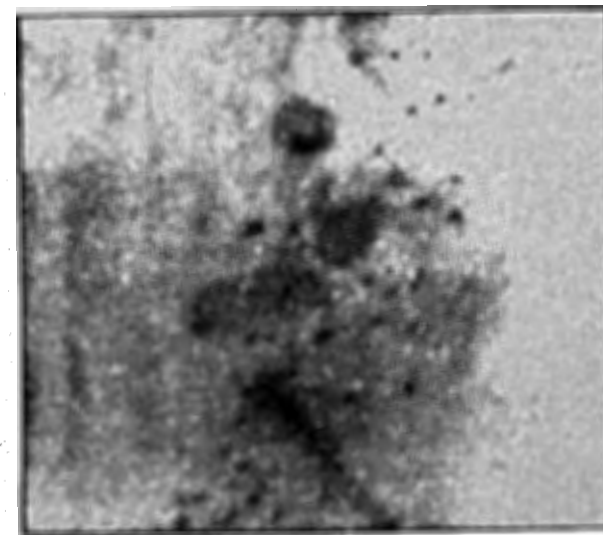


Рис. 5. Микрофотография глубинного дефектного слоя, содержащего преципитаты кислорода. Облучение ионами ^{16}O с энергией $E = 13.6$ МэВ до флюенса $Ft = 3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Отжиг при температуре 1000°C в течение 30 мин на воздухе

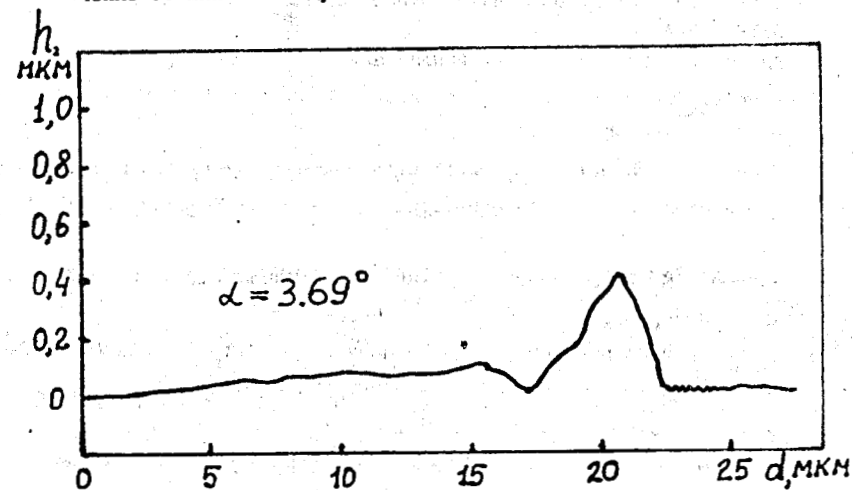


Рис. 6. Рельеф поверхности косого шлифа, сформированного на образцах КЭФ-4,5 после имплантации ионов ^{11}B ($E = 13.6$ МэВ, $Ft = 8 \cdot 10^{14}$ ион/см²) и травления в селективном травителе

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Тяжелые ионы высоких энергий позволяют детально исследовать процессы радиационного дефектообразования в полупроводниковых материалах ввиду относительно высоких скоростей дефектообразования и сравнительно больших величин пробегов ионов, позволяющих проводить исследования с применением всех классических методик полупроводниковой технологии.
2. Применение тяжелых ионов, являющихся электрически активными примесями, изменяющими тип проводимости, дает возможность создавать проводящие электрические слои в глубине полупроводниковых материалов, в том числе и многослойные структуры, которые остаются стабильными при термообработках.
3. Области максимального дефектообразования, совпадающие с максимумом упругих потерь энергии тяжелых ионов, обладают геттерирующими свойствами, в частности, в этих областях скапливаются атомы кислорода. Данная методика может рассматриваться как методика создания изолирующих слоев в глубине имплантированных полупроводниковых монокристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983.
2. Ziegler J.F. High energy ion implantation. - Nucl. Instr. & Meth., 1985, v. B6, p. 270-290.
3. Ziegler K. Materials Research with Beams at Cyclotron Energies. In.: Proceedings of 13th International Conference, Vancouver, 1992, p. 149-157.
4. Зайцев А.М. Высокоэнергетическая ионная имплантация в полупроводники. - Поверхность, № 10, 1991, с. 5-26.
5. Зайцев А.М. Ионная имплантация в полупроводники со сверхпрочной ковалентной связью. - В кн.: Алмаз в электронной технике, под ред. Б.Б. Кваскова. М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 211-227.
6. Adawi M.A., Didyk A.Yu. Damage Formation in Silicon Irradiated by Heavy Ions with Energy more than 1 MeV/amu. JINR Communication E14-94-334, Dubna, 1994, 11 p.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 февраля 1995 года.

Вариченко В.С. и др.

P14-95-73

Микроструктура дефектов в имплантированных ионами высоких энергий слоях кремния при отжиге

Изучена микроструктура образцов кремния, облученных тяжелыми ионами ^{11}B (с энергией 13,6 МэВ) и ^{16}O (с энергией 9,3 и 19,7 МэВ) при послерадиационном отжиге. Показано, что в изученной деструктурированной области формируются разделенные слои, содержащие кластеры радиационных дефектов, трансформация которых в зависимости от температуры отжига происходит различным образом. Как при облучении ионами кислорода, так и другими ионами в зоне остановки ионов при отжиге образуются преципитаты кислорода, что свидетельствует о геттерирующих свойствах в области максимального дефектообразования (пике смещений).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Varichenko V.S. et al.

P14-95-73

The Defect Structure of the Silicon Layers Irradiated by High Energy Ions in the Processes of Annealing

The microstructure of silicon irradiated by heavy ions ^{11}B (with the energy of 13.6 MeV) and ^{16}O (with energy of 9.3 and 19.7 MeV) in the processes of annealing is studied. It is shown that in the destructive layers the separate branches are formed and contain the damage clusters. The transformation of these clusters in the annealing processes has a different character. The oxygen complexes are created in maximum destructive zones after the irradiation by not only oxygen ions, but the other ions as well. This fact proves the gettering properties of zones like these.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995