

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-231

P14-96-231

Н.М.Казючиц¹, В.С.Вариченко¹, А.Ю.Дидык,
В.А.Скуратов, А.М.Зайцев^{1,2}, В.Фанер²

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ
ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ
ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ СЛОЕВ КРЕМНИЯ,
ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПРИМЕСЬЮ КИСЛОРОДА

¹Белорусский государственный университет, Минск
²Университет, Хаген, Германия

1996

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследуя трансформацию профилей сопротивления растекания (СР) при изохронном отжиге имплантированного МэВ-ми ионами инертных газов кремния, было обнаружено ^[1,2], что только в облученных малыми дозами образцах после отжига радиационных дефектов сопротивление восстанавливается до уровня подложки во всем имплантированном слое. В облученных большими дозами образцах значения сопротивления снижаются до уровня подложки на участке имплантированного слоя между поверхностью и областью проекционного пробега. В окрестности проекционного пробега вид профиля СР имеет специфический характер, зависящий от типа и уровня легирования подложки кремния. В образцах р-типа, например, после высокотемпературного отжига профиль СР приобретает вид, характерный для захороненных слоев с противоположным относительно подложки типом проводимости.

Последующими исследованиями ^[2] было установлено, что в кремнии в окрестности проекционного пробега ионов инертных газов после высокотемпературной обработки формируется слой n-типа проводимости. Предполагалось, что образование этого слоя обусловлено генерацией высокотемпературных термодоноров ("новых доноров").

Как известно, образование термодоноров в кремнии связано с присутствием в нем технологической примеси кислорода. В связи с этим сравнение профилей СР при отжиге образцов кислородосодержащего и бескислородного кремния, облученных ионами инертных газов, позволило бы прояснить вопрос о причине формирования n-го слоя в окрестности их проекционного пробега.

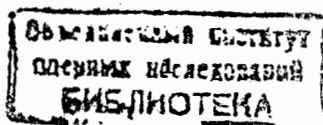
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследований были использованы образцы монокристаллического кремния, выращенного методом Чохральского (КДБ-10, КЭФ-20, КЭФ-0,5), и образцы кремния БКДБ-1, выращенного методом бестигельной зонной плавки. Концентрация кислорода, измеренная по поглощению на длине волны 9,1 мкм, составляла порядка 10^{18} см⁻³ для первой группы образцов и не превышала $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ для последних.

Имплантацию ионов ⁸⁴Kr с энергией 210 МэВ проводили на ускорителе У-400 (ЛЯР им.Г.Н. Флерова, ОИЯИ, г.Дубна) в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{13}$ - $1 \cdot 10^{14}$ см⁻². Имплантацию ионов ¹²⁹Xe с энергией 340 МэВ проводили на ускорителе VICKSI (г.Берлин), только в подложки КДБ-10 в диапазоне флюенсов $1,05 \cdot 10^{11}$ - $6,7 \cdot 10^{13}$ см⁻².

На имплантированных образцах были изготовлены косые шлифы с углом, близким к 1°, и проведены двухзондовые измерения СР вдоль поверхности косого шлифа.

Образцы, имплантированные минимальными и максимальными дозами, подвергались отжигу в течение пятнадцати минут в диапазоне температур 250-1000°C в атмосфере азота. После каждой термообработки косой шлиф обновлялся и проводились повторные измерения профиля СР.



3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлены дозовые зависимости распределения CP по глубине имплантированного слоя для случая имплантации кремния p -типа проводимости (КДБ-10) ионами ^{129}Xe . С ростом дозы имплантации наблюдается возрастание CP во всем имплантированном слое и увеличение глубины области повышенного сопротивления. Скорость изменения CP в конце пробега больше, чем в других областях имплантированного слоя. Аналогичный характер изменения профилей CP с дозой наблюдается и для ионов ^{84}Kr . Во всех случаях, независимо от типа проводимости, уровня легирования подложки и массы ионов, сопротивление имплантированного слоя выходит на насыщение приблизительно при одной и той же величине.

При изохронном отжиге образцов, имплантированных ионами ^{129}Xe , при флюенсе $1,05 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ с ростом температуры наблюдается монотонное уменьшение сопротивления во всем имплантированным слое, а при температурах выше 400°C сопротивление имплантированного слоя уменьшается до уровня подложки.

Для флюенса имплантации $6,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ наблюдается более сложный характер изменения профилей CP с температурой (рис.2,3). При повышении температуры отжига сопротивление понижается в средней части профиля с последующим уменьшением в приповерхностной области и в конце пробега. Отжиг при температурах выше 600°C приводит к уменьшению сопротивления до уровня подложки на участке от поверхности до области проекционного пробега. В окрестности проекционного пробега профиль CP приобретает вид, характерный для захороненных слоев с противоположным относительно подложки типом проводимости. Непосредственные измерения типа проводимости с помощью точечного термозонда показали n -тип в области максимумами сопротивления. Наблюдаемые максимумы CP в окрестности проекционного пробега должны рассматриваться в этом случае как компенсированные переходные области от одного типа проводимости к другому. Как видно из рисунка, характерный вид распределения сохраняется и при температуре отжига 1000°C . С ростом температуры наблюдается только уменьшение расстояния между границами p - n -переходов за счет "движения" вглубь близлежащей границы от поверхности.

На рис.4,5 представлены кривые распределения CP в имплантированных ионами ^{84}Kr образцах КДБ-10 после отжига при высоких температурах. Для дозы имплантации $2,56 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, как и при имплантации ионами ^{129}Xe , в окрестности проекционного пробега образуется слой n -типа проводимости, который сужается с ростом температуры отжига. При этом значения сопротивления в n -слое сначала убывают, а затем возрастают. С ростом дозы имплантации ширина слоя n -типа проводимости увеличивается, прежде всего, за счет движения вглубь его правой границы. Для флюенса 10^{14} см^{-2} отжиг при температурах выше 800°C сопровождается неоднородным возрастанием сопротивления в пределах n -слоя, что приводит к его разделению на две области. Первая из них расположена в окрестности расчетного проекционного пробега, а вторая расположена на участке между 30 и 35 мкм.

Иной характер изменения профилей CP при изохронном отжиге кремния n -типа, имплантированного ионами ^{84}Kr . В низкоомных образцах КЭФ-0,5 с ростом

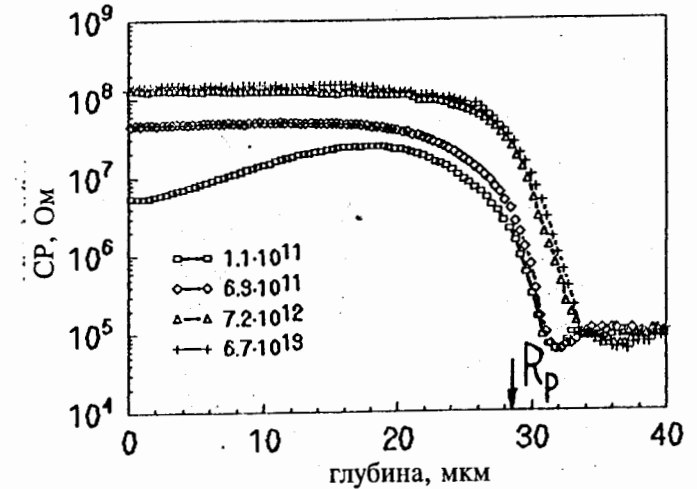


Рис.1. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{129}Xe с энергией 340 МэВ слоя в кремнии p -типа для четырех флюенсов облучения: $1,1 \cdot 10^{11}$, $6,3 \cdot 10^{11}$, $7,2 \cdot 10^{12}$ и $6,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

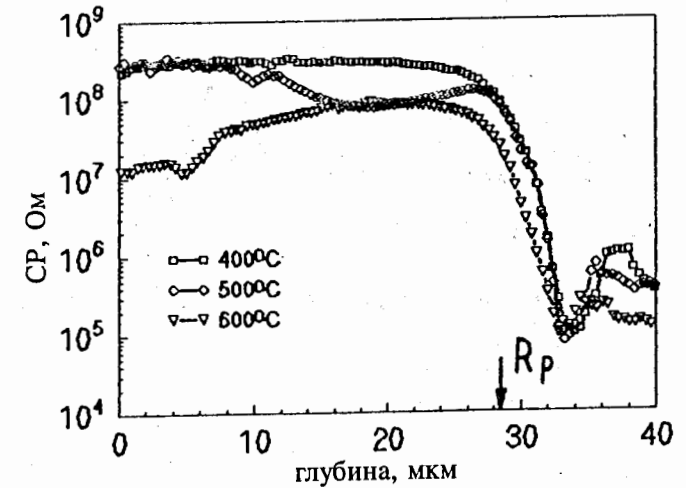


Рис.2. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{129}Xe с энергией 340 МэВ при флюенсе $6,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ слоя в кремнии p -типа при температурах отжига 400, 500 и 600°C

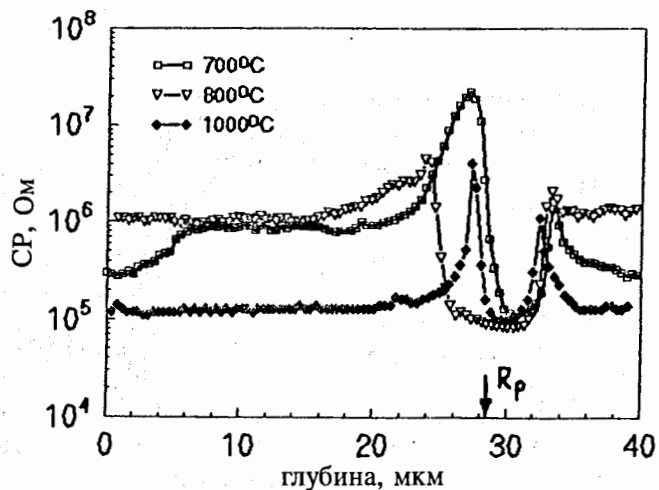


Рис.3. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{129}Xe с энергией 340 МэВ при флюенсе $6.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ слоя в кремнии р-типа при температурах отжига 700, 800 и 1000°C .

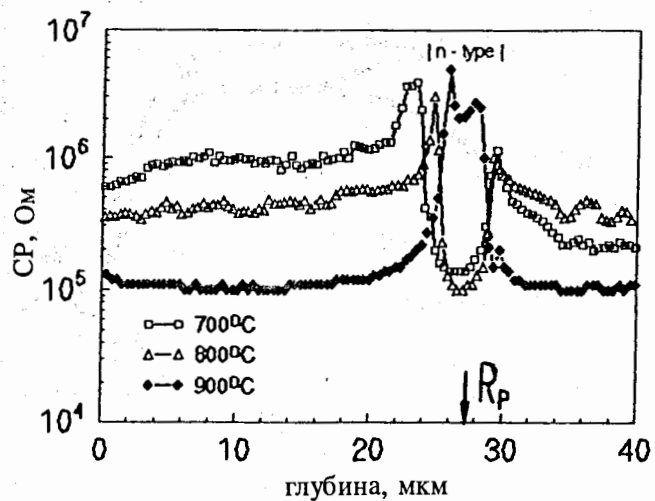


Рис.4. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ при флюенсе $2.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ слоя в образцах КДБ-10 кремния при температурах отжига 700, 800 и 900°C .

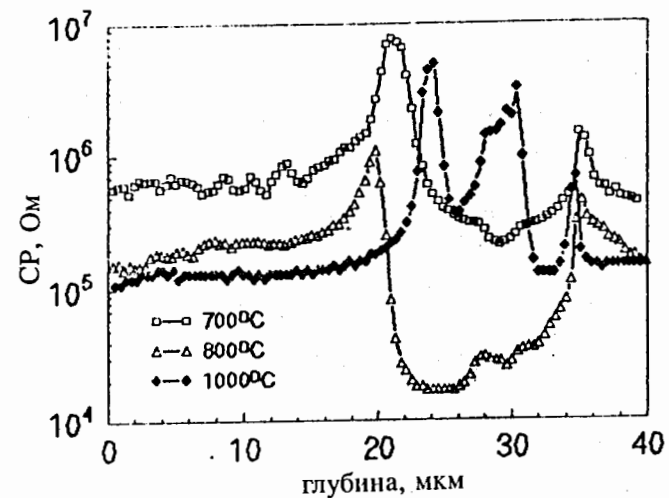


Рис.5. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ при флюенсе $1.0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ слоя в образцах КДБ-10 кремния при температурах отжига 700, 800 и 1000°C .

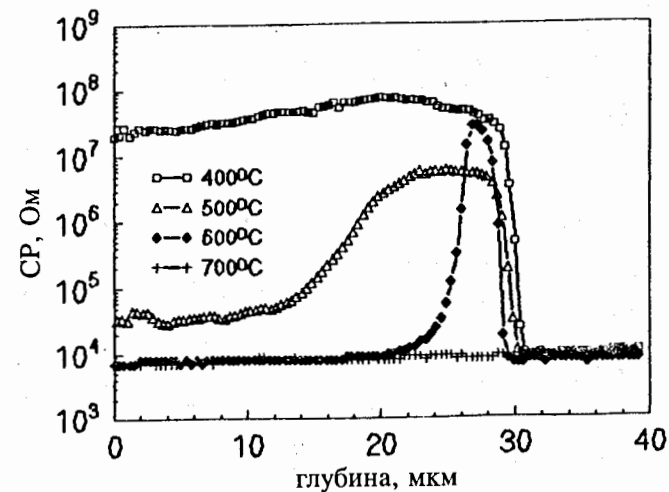


Рис.6. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ при флюенсе $2.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ слоя в образцах КЭФ-0,5 (п-тип) кремния при температурах отжига 400, 500, 600 и 700°C .

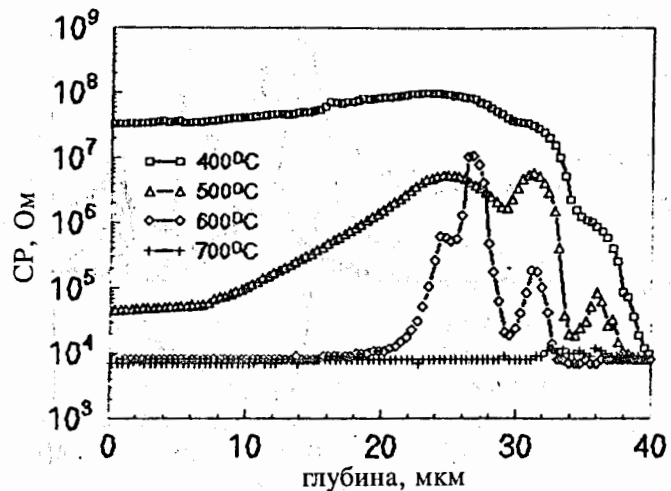


Рис.7. Распределение сопротивления растекания в зависимости от глубины имплантированного ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ при флюенсе $1.0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ слоя в образцах КЭФ-0,5 (p-тип) кремния при температурах отжига 400, 500, 600 и 700°C

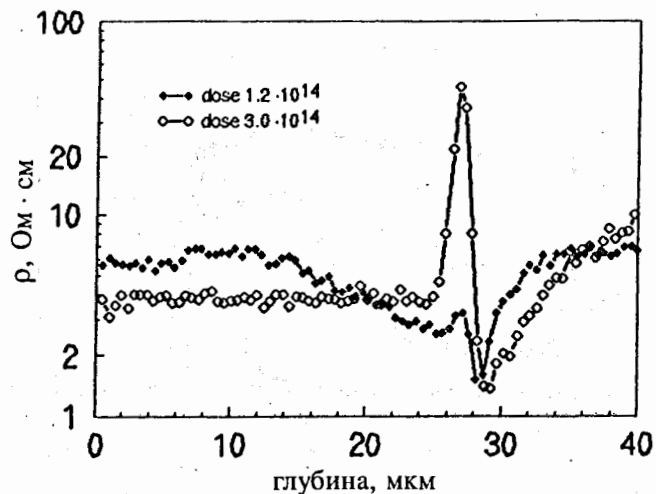


Рис.8. Профиль распределения удельного сопротивления в высокоомном кремнии p-типа (КЭФ-20), облученном ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ до флюенсов $1.2 \cdot 10^{14}$ и $3.0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и отожженном при температуре 800°C

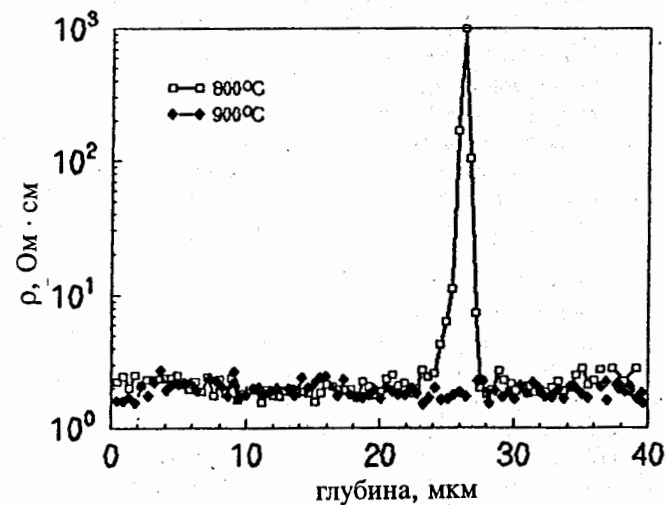


Рис.9. Профиль распределения удельного сопротивления в кремнии p-типа, выращенном методом зонной плавки, облученном ионами ^{84}Kr с энергией 210 МэВ и отожженном при температурах 800 и 900°C

температуры сопротивление имплантированного слоя уменьшается с большей скоростью в приповерхностной области (рис.6,7). После термообработки (600°C) SR этой области восстанавливается до уровня подложки, но сохраняются повышенные значения сопротивления в окрестности проекционного пробега. Для образцов, имплантированных меньшей дозой, максимум сопротивления находится на глубине 27 мкм, имплантированных большей дозой – наблюдаются два максимума сопротивления на глубине 27 и 32 мкм. Отжиг при более высоких температурах приводит к полному восстановлению сопротивления поврежденного имплантацией слоя независимо от дозы имплантации.

Следует отметить, что положение областей повышенного SR в отожженных при температуре 600°C образцах КЭФ-0,5 совпадает с положением областей p-типа проводимости в отожженных при высоких температурах образцах КДВ-10.

На рис.8 представлен типичный профиль распределения удельного сопротивления в высокоомном кремнии p-типа (КЭФ-20) после имплантации ионами ^{84}Kr и отжига при температуре 800°C . Как видно из рисунка, профиль не содержит областей компенсации и является характерным для захороненных изотипных слоев с повышенной относительно подложки проводимостью. Общий вид профиля сохраняется и при более высокотемпературных обработках. Область повышенной проводимости расположена в окрестности проекционного пробега, что хорошо видно для меньшей дозы имплантации. Для большей дозы имплантации наблюдается узкий пик сопротивления на глубине проекционного пробега.

На рис.9 представлены кривые распределения удельного сопротивления в кремнии p-типа, выращенном методом зонной плавки, после имплантации ионами ^{84}Kr и высокотемпературного отжига. На глубине проекционного пробега наблюдается острый пик сопротивления, который отжигается при более высоких температурах.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение сопротивления р- и п-типов кремния при имплантации обусловлено захватом свободных носителей заряда на уровни радиационных дефектов^[3]. Вследствие этого распределение СР при малых дозах отражает характер накопления дефектов по глубине имплантированного слоя. А наблюдаемая большая скорость роста СР в конце пробега свидетельствует о преимущественном вкладе в дефектообразование ядерного механизма потерь энергии.

С ростом дозы все большая часть свободных носителей заряда связывается на дефектных уровнях. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока все носители не будут захвачены на дефекты и полупроводник станет как бы собственным. Величина сопротивления при этом будет иметь одно и то же значение независимо от уровня легирования и типа подложки. Наблюдаемое увеличение глубины области повышенного сопротивления с ростом дозы имплантации отражает уширение дефектного слоя либо связано с другими эффектами высокоэнергетичной ионной имплантации^[4].

Термообработка имплантированных образцов кремния в диапазоне температур от 100 до 600°C сопровождается изменением состава радиационных дефектов и постепенным их исчезновением^[3], а изменение профилей СР является отражением этих процессов на разных глубинах имплантированного слоя. В имплантированных малыми дозами образцах концентрация радиационных дефектов невелика и их перестройка и отжиг заканчиваются при температурах выше 400°C. В имплантированных большими дозами образцах, содержащих высокую концентрацию дефектов, эти процессы заканчиваются при температурах выше 600°C^[5] (см. рис.6,7). Аналогичным образом объясняется разная скорость восстановления сопротивления в приповерхностной области, где преобладают простые изолированные дефекты^[6], и в окрестности проекционного пробега, где сосредоточены области скопления радиационных дефектов.

Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к формированию в кислородосодержащем кремнии локального слоя п-типа проводимости. Область локализации этого слоя находится в окрестности проекционного пробега имплантированных ионов, так что в образцах КДБ-10 образуются структуры типа р-п⁺-р, а в образцах КЭФ-20 – структуры типа п-п⁺-п, стабильные и при температуре 1000°C.

При высокотемпературном отжиге бескислородного кремния ничего подобного не наблюдается. Острый пик сопротивления, регистрируемый в области проекционного пробега после отжига при 800°C (рис.9), исчезает при более высоких температурах. Поэтому он, вероятно, связан с неполным отжигом радиационных дефектов и (или) неполной активацией вытесненного бора.

Из приведенных результатов следует, что проявление электрической активности слоев кремния в окрестности проекционного пробега ионов инертных газов после высокотемпературной обработки обусловлено высоким содержанием технологической примеси кислорода.

Мы считаем, что проявление электрической активности в данном случае обусловлена генерацией термодоноров.

Как известно, существуют два типа термодоноров^[7]. К первому типу относятся термодоноры, которые формируются путем длительной термообработки кислородо-

досодержащего кремния в области температур $T = 450^\circ\text{C}$. При температурах выше 600°C эти доноры отжигаются. В диапазоне температур $T = 550 - 800^\circ\text{C}$ формируется второй тип термодоноров – "новые" доноры. "Новые" доноры образуются вследствие преципитации кислорода, выделяющегося из междоузельного положения. Скорость генерации этих доноров существенно вырастает с ростом концентрации центров преципитации кислорода, которыми могут быть доноры первого типа, углерод, кластеры точечных дефектов^[7].

Исходя из предположения о генерации термодоноров, возможна следующая интерпретация результатов для подложек р-типа, например. При температурах отжига меньше 600°C характерный вид профиля сопротивления растекания с захороненным п-слоем не наблюдается из-за неполного отжига радиационных дефектов. После отжига радиационных дефектов стало возможным наблюдение изменений сопротивления растекания, обусловленных генерацией "новых" термодоноров. В диапазоне температур 700-800°C возрастает вклад доноров в модификацию вида профиля сопротивления растекания: слой п-типа расширяется, а его сопротивление уменьшается. При более высоких температурах (вне области генерации "новых" доноров), наоборот, наблюдается сужение слоя п-типа и возрастание его сопротивления. Это происходит вследствие частичного разрушения "новых" доноров. Полное разрушение "новых" доноров возможно путем растворения преципитатов кислорода при термообработке ($T = 1300^\circ\text{C}$)^[7], что объясняет высокую температурную стабильность проводящих слоев в окрестности проекционного пробега.

Аналогичные рассуждения справедливы и для образцов п-типа. Однако структуры типа п-п⁺-п наблюдаются только в высокоомных образцах КЭФ-20. В низкоомных образцах КЭФ-0,5 высокий уровень легирования подложки не позволяет их наблюдать в профилях СР.

При обсуждении природы электронной проводимости, с точки зрения влияния кислорода, закономерно возникают вопросы о причине ее локального характера и высокой скорости образования "новых" доноров. В самом деле, распределение кислорода по толщине стандартной пластины кремния можно считать однородным. В то же время донорная проводимость наблюдается только в слое в окрестности проекционного пробега. Концентрация доноров в слое достигает значений порядка 10^{16} см^{-3} за 30 минут отжига при 700 – 800°C. Для формирования термодоноров, как правило, требуется более длительная термообработка (десять часов).

В работе^[7] предполагается, что кластеры вакансионных дефектов в облученном нейтронами кремнии ускоряют генерацию "новых" доноров. Известно также, что нейтронное облучение ускоряет преципитацию кислорода^[8]. При ионной имплантации образуются такие же типы радиационных дефектов, как и при нейтронном облучении, а их концентрация монотонно возрастает от поверхности вглубь имплантированного слоя, достигая максимального значения в окрестности проекционного пробега. Исходя из этого, в имплантированном слое следует ожидать ускоренную преципитацию кислорода. Неоднородное распределение центров преципитации, которыми могут быть кластеры радиационных дефектов, объясняет локализацию п-слоя в окрестности проекционного пробега.

Образование двух слоев п-типа проводимости после высокотемпературного отжига кремния, имплантированного большими дозами ионов ^{84}Kr , отражает двухслойное распределение радиационных дефектов. Двухслойное распределение дефектов наблюдается при дозах имплантации, соответствующих перекрытию траекторий ионов, и является результатом попадания ионов в ранее созданные треки с

меньшей плотностью вещества. Подробно этот вопрос будет рассмотрен в отдельном сообщении.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружена локальная электрическая активность слоя кремния в окрестности проекционного пробега ионов инертных газов после высокотемпературного отжига. Установлено, что заглубленный проводящий слой имеет *n*-тип проводимости и обусловлен высоким содержанием в кремнии технологической примеси кислорода. Электронная проводимость слоя возникает в результате генерации "новых" доноров в диапазоне температур 550-800°C и сохраняется при более высокотемпературных обработках. Локализация "новых" доноров в окрестности проекционного пробега обусловлена неоднородным распределением в имплантированном слое центров преципитации кислорода - зародышей "новых" доноров, которыми являются кластеры радиационных дефектов.

Как следует из результатов работы, для эффективного формирования "новых" доноров в имплантированных слоях кремния необходима высокая концентрация кислорода и высокая плотность структурных нарушений решетки. В связи с этим образование заглубленных проводящих слоев следует ожидать после имплантации и отжига кислородосодержащего кремния любыми тяжелыми ионами.

Работа выполнена на основе финансовой поддержки фонда INTAS, номер гранта "INTAS-94-1982".

ЛИТЕРАТУРА

1. N.M.Kasyutchits, V.S.Varichenko, A.M.Zaitsev, A.Yu.Didyk, V.A.Skuratov, W.R.Fahrner, D.Fink. Depth resolved spreading resistance of Si irradiated with 210 MeV Kr and 340 MeV Xe ions. - Beam Technologies (BT-95)-Dubna, Russia, 1995.
2. Н.М.Казюциц, В.С.Вариченко, А.М.Зайцев и др. -Тезисы докладов международной конференции "Взаимодействие излучения с твердым телом" (ВИТТ-95)-Минск, Беларусь, 1995, с.74.
3. Н.В.Кузнецов, Г.Г.Соловьев. Радиационная стойкость кремния.-М. :Энергоиздат, 1989, 96 с.
4. А.М.Зайцев, С.А.Fedotov, А.А.Melnikov, F.F.Komarov, W.R.Fahrner, V.S.Varichenko. Penetration of high energy ions in semiconductors through tracks: simulation with transport equations.- Nucl.Inst.Meth., 1993, v.B 82, p.421.
5. J.F.Ziegler. High energy ion implantation.-Nucl.Instrum.and Meth.Phys.Res., 1985, v.B 6, p.270.
6. В.С.Вариченко, А.М.Зайцев, Н.А.Куделевич, А.Р.Челядинский. - ФТТ, 1991, т.33, N 12, с. 3552.
7. A.Kanamory, M.Kanamory. Comparison of two kinds of oxygen donors in silicon by resistivity measurements. - J.Appl.Phys., 1979, v.50, N 12, p.8095.
8. X.Yuesheng, L.Yangxian, L.Caichi, W.Hongmei. Fast neutron irradiation for Czochralski grown silicon. - Appl.Phys.Lett., 1994, v.65, p.2807.

Рукопись поступила в издательский отдел

1 июля 1996 года.

Казючич Н.М. и др.

P14-96-231

Электрическая активность имплантированных ионами инертных газов слоев кремния, обусловленная примесью кислорода

Кремний *n*- и *p*-типа облучен ионами ^{129}Xe и ^{84}Kr с энергиями 340 и 210 МэВ в интервале флюенсов от 10^{11} до 10^{14} ион/см². Обнаружена локальная электрическая активность слоя кремния в окрестности проекционного пробега ионов инертных газов после высокотемпературного отжига. Установлено, что заглубленный проводящий слой имеет *n*-тип проводимости и обусловлен высоким содержанием в кремнии технологической примеси кислорода. Электроинная проводимость слоя возникает в результате генерации «новых» доноров в диапазоне температур 550—800° С и сохраняется при более высокотемпературных обработках. В связи с этим образование заглубленных проводящих слоев следует ожидать после имплантации и отжига кислородосодержащего кремния любыми тяжелыми ионами.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Kasytchits N.M. et al.

P14-96-231

Electrical Conductivity of Implanted by Inert Gas Silicon Layers, Stimulated by Oxygen Impurities

n- and *p*-kind silicon samples were irradiated by ^{129}Xe and ^{84}Kr ions with energies 340 and 210 MeV correspondently in the interval of fluences from 10^{11} up to 10^{14} ions/cm².

The local electrical conductivity of silicon layer near the projected range of inert gas ions after the high temperature annealing was discovered. It was established that this layer has *n*-kind of conductivity and connected with high level concentration of technological oxygen impurity. Electrical conductivity of layer is the result of new donor generation in temperature interval 550—800° C and is kept at high temperature treatments.

✓ The creation of conductive layers at big depth follows to wait after annealing of silicon with oxygen impurities implanted by various heavy ions.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996