

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-230

P14-96-230

В.С.Вариченко¹, А.Ю.Дидык, В.А.Мартинovich¹,
А.М.Зайцев^{1,2}, Н.М.Пенина¹, Д.П.Ерчак¹

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ,
ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ НИКЕЛЯ
С ЭНЕРГИЕЙ 6 МэВ

¹Белорусский государственный университет, Минск

²Университет, Хаген, Германия

1996

1. ВВЕДЕНИЕ

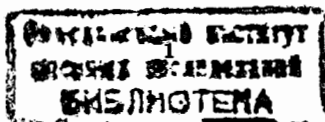
Интерес к высокоэнергетичной ионной имплантации (ВИИ) определяется перспективностью использования этого метода в микроэлектронной технологии [1]. Преимущество ВИИ заключается, прежде всего, в возможности введения легирующих примесей на большие глубины, что позволяет уменьшить или исключить длительную термообработку, требуемую для диффузионного легирования объема полупроводника. Кроме того, использование ионов высоких энергий обуславливает возможность создания скрытых проводящих или изолирующих слоев, используя особенности примесных профилей, формируемых в процессе такого облучения. И наконец, ВИИ позволяет решить ряд принципиальных вопросов, необходимых для увеличения степени интеграции и создания трехмерных интегральных микросхем.

К настоящему времени в результате проведенных исследований уже установлено, что рост энергии ионов обуславливает не только количественные изменения параметров ионно-имплантированного слоя (например, более глубокую локализацию ионно-легированного слоя), но также качественные изменения дефектно-примесной структуры всего облученного слоя [2-9]. Считается, что главные причины различий между ВИИ (энергия около 1 МэВ/а.е.м. и более) и ионной имплантацией с обычными энергиями (десятки и сотни кэВ) заключаются в качественно иных механизмах взаимодействия между высокоэнергетичными ионами и атомами мишени. Это определяет, прежде всего, специфику образования радиационных дефектов, их взаимодействия, а также особенности пространственного распределения как дефектов, так и имплантированной примеси.

Наиболее актуальными исследованиями в области ВИИ являются те, которые проведены на кремнии. Это связано, прежде всего, с перспективой практического использования результатов этих работ. Кроме того, полученные результаты можно сравнивать с хорошо известными данными по дефектообразованию при ионной имплантации с обычными энергиями.

В настоящей работе исследования кремния, подвергнутого высокоэнергетичному ионному облучению, продолжают на примере имплантации ионов никеля с энергией 6 МэВ с целью получения дальнейшей информации об особенностях дефектообразования при имплантации ионов высоких энергий. Выбор метода ЭПР для исследований обуславливается тем, что ЭПР является одним из наиболее чувствительных и мощных методов для изучения кристаллической решетки и ее изменений после введения дефектов, в том числе и с помощью ионного облучения. Кроме того, большое количество ЭПР – центров, обусловленных как точечными дефектами, так и аморфной фазой, уже идентифицированы в кремнии. Это существенно облегчает задачу интерпретации результатов, получаемых при исследовании кремния, подвергнутого ВИИ. Использование настоящего метода позволяет на основании ширины, формы, интенсивности и анизотропии параметров линий ЭПР [10] также устанавливать природу новых дефектов, образующихся в результате облучения кремния.

В процессе обсуждения результаты ЭПР-исследований кремния, облученного ионами высоких энергий, сопоставляются с результатами, полученными при измерении коэффициента оптического отражения на этих же образцах [11]. Величина



оптически детектируемого повреждения S определялась как изменение коэффициента оптического отражения R/R_c , нормированное на величину насыщения R_{ia}/R_c (R_c – коэффициент отражения неповрежденного кристаллического кремния):

$$S = (\Delta R/R_c) / (R_{ia}/R_c).$$

В соответствии с данным определением $S = 0$ и $S = 1$ описывают неповрежденное кристаллическое и полностью аморфное состояния соответственно.

Такое сравнение полученных результатов представляется достаточно интересным и информативным, поскольку изменение коэффициента отражения определяется плотностью различных видов дефектов, часть которых не обладает парамагнетизмом, а следовательно, не может регистрироваться с помощью ЭПР.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Образцы кремния p -типа с ориентацией $\langle 111 \rangle$ и удельным сопротивлением в диапазоне $85\text{--}110 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ были имплантированы ионами $^{68}\text{Ni}^{2+}$ с энергией 6 МэВ в интервале флюенсов от $5\cdot 10^{12}$ до $2\cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при температурах мишени от 125 до 450 К . Имплантация проводилась на ускорителе университета г.Бохума (Германия). Имплантированные образцы кремния исследовались при комнатной температуре методом ЭПР в X -диапазоне на спектрометре "Radiopan". Для контроля добротности и точной настройки фазы 100 кГц модуляции магнитного поля использовался сигнал от ионов Cr^{3+} эталонного образца рубина, находящегося в резонаторе вместе с исследуемым образцом. Термический отжиг имплантированных образцов проводился на воздухе в интервале температур $50\text{--}600^\circ\text{C}$ в течение 15 минут при каждом значении температуры.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования с помощью метода ЭПР показали существенное влияние температуры подложки и флюенса облучения на процесс дефектообразования. Так, в спектрах ЭПР – образцов, имплантированных при 450 К , наблюдаются различные парамагнитные центры точечных дефектов, пять из которых были идентифицированы (рис.1а). Так, центр Si-A4 представляет собой планарный $\langle 110 \rangle$ трехвакансионный кластер (спин $S = 1/2$, симметрия C_{2v}) предположительно в отрицательном зарядовом состоянии [12]; Si-P1 – непланарный пятивакансионный кластер (спин $S=1/2$, симметрия C_{1h}) в отрицательном зарядовом состоянии [13]; Si-P3 – планарная $\langle 110 \rangle$ тетравакансия в нейтральном зарядовом состоянии [13]; а также Si-A6 [12] и Si-B2 [14], атомная структура которых еще не установлена. Все перечисленные центры ранее уже наблюдались в спектрах ЭПР нейтронно – облученного кремния, а в ионно – облученном кремнии такие центры, как Si-A4 и Si-A6, зарегистрированы впервые. При данной температуре имплантации (450 К) Si-P1, Si-A4 и Si-A6 следует рассматривать как первичные дефекты, так как для их образования требуется отжиг облученных образцов кремния при температуре более 400 К [15]. Кроме того, в спектрах ЭПР зарегистрированы линии NC1 и

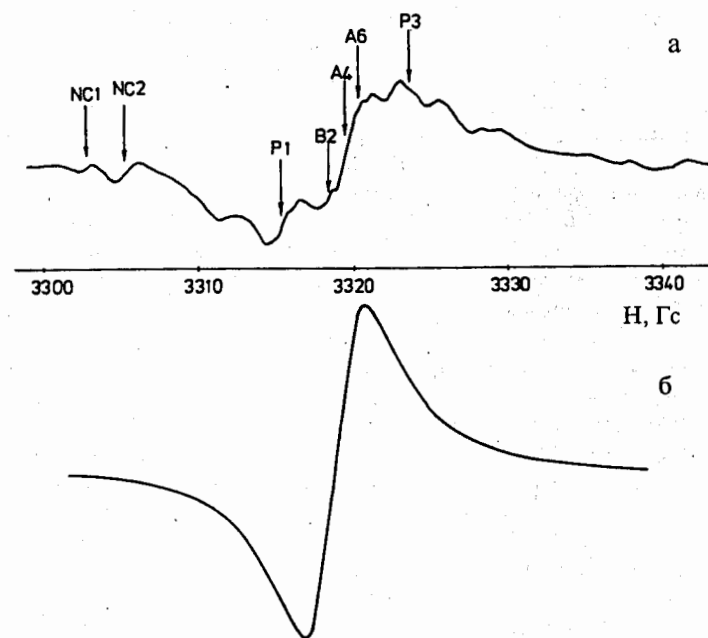


Рис.1. Спектры ЭПР образцов кремния, имплантированных ионами никеля с дозой $2\cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при температурах мишени 450 К ($\bar{H} \parallel \langle 001 \rangle$, $\nu=9319.1 \text{ МГц}$) (а) и 125 К ($\bar{H} \parallel \langle 111 \rangle$, $\nu=9317.9 \text{ МГц}$) (б). Центры точечных дефектов указаны стрелками. Неидентифицированные линии обозначены как NC1 и NC2

NC2, обусловленные точечными парамагнитными центрами неизвестной природы. Эти линии обладают анизотропией ширины и интенсивности, что, в принципе, позволяет установить их атомную структуру, но это уже выходит за рамки данных исследований.

В спектрах ЭПР – образцов, облученных при температуре 350 К, практически уже невозможно различить сигналы от различных парамагнитных центров вследствие уширения соответствующих им линий и их перекрытия. Здесь наблюдается характерная Σ – линия [16] с анизотропными шириной и формой. Возникновение Σ – линии указывает на начало формирования сильно разупорядоченных (но все еще не аморфных) областей, в которых точечные дефекты теряют свои индивидуальные свойства из-за их взаимодействия. Для сравнения необходимо отметить, что в образцах кремния, облученных при этой температуре, оптически детектируемое повреждение достигает значения 0.13 в максимуме его распределения по глубине облученного слоя и дозовая зависимость величины оптически детектируемого повреждения S на этой глубине переходит из сублинейной в суперлинейную [11].

После имплантации образцов кремния при 300 К в спектрах ЭПР наблюдается синглетная линия с изотропным g - фактором 2.0059 ± 0.0002 и слабо анизотропной шириной ($\Delta H = 6$ Гс при $H \parallel \langle 111 \rangle$ и $\Delta H = 5.5$ Гс при $H \parallel \langle 110 \rangle$), свидетельствующая о формировании аморфной фазы. Дальнейшее уменьшение температуры имплантируемого кремния до 210 К и далее до 125 К приводит к возникновению изотропной синглетной линии (рис.16). Эта линия имеет форму, которая описывается функцией Лоренца, g - фактор 2.0055 ± 0.0002 , ширину $\Delta H = 5$ Гс и обусловлена парамагнитными центрами в аморфном кремнии.

На рис.2 для флюенса имплантации ионов никеля $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ сравнивается зависимость общей концентрации парамагнитных центров $N_{\text{пц}}$ от температуры имплантируемой подложки с результатами, полученными при измерении коэффициента оптического отражения в максимуме профиля дефектов. Данные кривые отражают фактически эффективность введения дефектов в кремний, облучаемый при разных температурах. Видно, что существует корреляция между этими двумя кривыми в области температур 125–210 К, где по данным ЭПР ионная имплантация приводит к сплошной аморфизации. Следует отметить, что для температур подложки 125 и 210 К величина оптически детектируемого повреждения S больше значения 0.1 во всем слое, облученном высокоэнергетичными ионами никеля [11]. При температурах, начиная с 300 К и выше, общая концентрация парамагнитных центров уменьшается слабее, чем величина S . Это свидетельствует о том, что метод ЭПР обладает высокой чувствительностью к наличию парамагнитных дефектов, обусловленных как аморфной фазой, так и точечными дефектами, в то время как метод измерения коэффициента оптического отражения наиболее чувствителен к аморфной фазе.

На рис.3 представлена дозовая зависимость концентрации парамагнитных центров $N_{\text{пц}}$, созданных в кремнии при температуре имплантации 400 К. Сравнение ее с величиной повреждений S , измеренной оптическим методом в максимуме профиля дефектов, при этой же температуре имплантации показывает хорошее соответствие между ними в пределах флюенсов $5 \cdot 10^{12}$ – $2 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$. При ма-

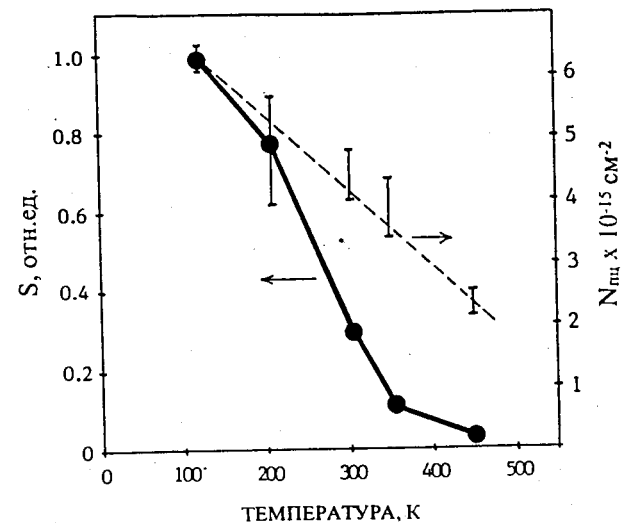


Рис.2. Температурная зависимость общей концентрации парамагнитных центров $N_{\text{пц}}$ и величины оптически детектируемого повреждения S в максимуме профиля распределения дефектов в кремнии, имплантированном ионами никеля с дозой $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$

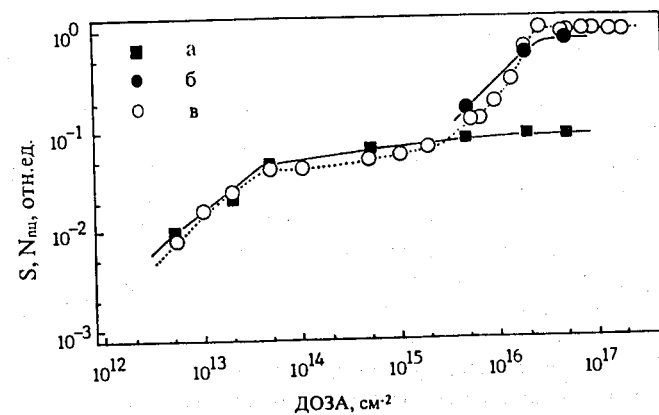


Рис.3. Дозовая зависимость общей концентрации парамагнитных центров радиационных дефектов (а), концентрации парамагнитных центров аморфных областей (б), величины оптически детектируемого повреждения S в максимуме профиля ее распределения (в) в кремнии, имплантированном при $T=400$ К

лых дозах (менее 10^{13} см⁻²) концентрация дефектов (как парамагнитных, так и оптически детектируемых) растет пропорционально флюенсу, что соответствует образованию и накоплению элементарных дефектов в пределах отдельных, взаимодействующих каскадов столкновений. С ростом флюенса, начиная с $5 \cdot 10^{13}$ и вплоть до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻², в дозовой зависимости концентрации парамагнитных центров, так же как и значения величины оптического повреждения S , наблюдается почти горизонтальное плато. Наличие такого плато обуславливается доминирующими процессами рекомбинации точечных дефектов по сравнению с процессами образования кластеров точечных дефектов. Небольшой же наклон может быть объяснен ростом концентрации дефектов из-за расширения ионно-облученного слоя с ростом флюенса. Очевидно, что рекомбинация точечных дефектов имеет место не только в пределах индивидуальных ионных треков. При таких флюенсах имплантации среднее расстояние между треками уменьшается до 1.5–2 нм. А на таком расстоянии уже становится возможной рекомбинация между дефектами из соседних треков, что и приводит к дальнейшему уменьшению скорости их накопления. Как свидетельствуют результаты работы [11], где приводятся дозовые зависимости величины S для разных температур имплантации, это особенно заметно при температурах более 350 К. При меньших температурах имплантации (125, 210, 300 и 350 К) такое плато в дозовой зависимости величины оптического повреждения S практически отсутствовало. Накопление радиационных дефектов в этом случае имело практически линейный характер и приводило к полной аморфизации за счет образования кластеров точечных дефектов и роста аморфных областей уже при флюенсе 10^{14} см⁻². Начиная с флюенса $5 \cdot 10^{15}$, в спектрах ЭПР появляется сигнал от парамагнитных центров, обусловленных аморфизацией. При этом с ростом флюенса интенсивность этого сигнала, так же как и значение величины S , резко возрастает и выходит на насыщение уже при флюенсе $3 \cdot 10^{16}$ см⁻². Все это свидетельствует о росте количества аморфных областей и формировании аморфной фазы в облученном ионами никеля слое. Из рис. 3 видно, что появление сигнала ЭПР, свидетельствующее о начале процесса аморфизации, соответствует значению величины S , равной 0.1. Для сравнения стоит отметить, что сигнал, связанный с аморфной фазой, детектировался с помощью электронного дифрактометра на образцах кремния, имеющих в результате имплантации ионов Au с энергией 5 МэВ [17] степень оптического повреждения S , равную 0.23.

Из дозовой зависимости суммарной концентрации парамагнитных центров $N_{\text{пм}}$ также видно, что аморфизация не приводит к ее дополнительному росту (рис.3). Это означает, что в процессе трансформации кремния, содержащего в результате ионного облучения главным образом точечные дефекты и кластеры точечных дефектов, в кремний, содержащий аморфные области, общее число неспаренных электронов остается приблизительно одинаковым, т.е. количество неспаренных электронов в точечных дефектах равно количеству неспаренных электронов аморфной фазы. Такая особенность дефектообразования представляется весьма интересной и требует дальнейших исследований в этом направлении для определения, является ли она общей закономерностью ВИИ и будет ли иметь место при использовании ионов различных масс и энергий. По крайней мере, это является справедливым для рассматриваемого случая имплантации ионов никеля с энергией 6 МэВ.

Необходимо отметить, что в дозовой зависимости концентрации парамагнитных центров только аморфной фазы в интервале флюенсов от $5 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² в отличие от суммарной концентрации парамагнитных центров наблюдаются значительные изменения, составляющие примерно порядок величины. Приблизительно так же изменяется в данном интервале и величина оптически детектируемого повреждения S . Это свидетельствует о практически одинаковой чувствительности этих методов к структурным перестройкам, происходящим в кристаллической решетке при облучении в указанном интервале флюенсов.

Известно, что созданные в процессе ионного облучения радиационные дефекты отжигаются при различных температурах, которые зависят от типа конкретного дефекта. Так, в работе [18] отжиг радиационных дефектов в кремнии, облученном ионами никеля с энергией 6 МэВ, исследовался рентгенодифракционным методом, контролирующим изменение постоянной решетки Δa . Было показано, что кривая восстановления периода решетки Δa имеет два характерных температурных интервала 350–550 К и 650–850 К. Аналогичное поведение при отжиге наблюдалось и для кремния, имплантированного ионами, имеющими энергию килоэлектронвольтового диапазона [19]. Это свидетельствует о том, что ряд радиационных дефектов вблизи поверхности кремния, имплантированного высокоэнергетичными ионами никеля, не сильно отличается от дефектов, образованных низкоэнергетичными ионами в области максимума ядерного торможения. Это может свидетельствовать о том, что в процессе имплантации ионами никеля с энергией 6 МэВ в кремний даже в приповерхностной области, где доминирует электронное торможение, образование дефектов скорее обусловлено ядерным торможением, чем электронным. Об этом же свидетельствует появление парамагнитных центров аморфной фазы в кремнии, облученном до флюенса $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² при температуре 300 К. В противоположность этому использование при имплантации больших значений энергии ионов, как, например, в случае имплантации ионов никеля с энергией 335 МэВ [20], не приводит к появлению аморфных областей в кремнии, облученном до такого же флюенса. При имплантации ионов бора с энергией 13.6 МэВ [21] сплошная аморфизация не происходит во всем изученном интервале флюенсов $10^{13} - 2 \cdot 10^{15}$ см⁻². В этом случае зарегистрировано лишь начало процесса аморфизации, обуславливающее появление в спектрах ЭПР Σ – линии [16]. Все это свидетельствует о том, что при ВИИ, когда электронные потери доминируют над ядерными, в случае использования энергий менее 1 МэВ/а.е.м. вклад ядерных потерь в процесс дефектообразования все еще достаточно велик по сравнению с ионным облучением с энергией более 1 МэВ/а.е.м., при котором происходит подавление процесса аморфизации. Действительно, теоретические расчеты, проведенные с использованием программы TRIM-90, показывают, что только 81.5 % энергетических потерь ионов никеля, имеющих начальную энергию 6 МэВ, тратится на ионизацию решетки и эти электронные потери доминируют над ядерными на большей половине проективного пробега ионов, равного 3.05 мкм. Однако такой уровень электронных потерь недостаточно высок для подавления процесса аморфизации, как это имеет место при облучении ионами с энергией более 1 МэВ/а.е.м., когда электронные потери составляют практически 99 % от суммарных потерь энергии.

Восстановление периода решетки при температурах 350-650 К объясняется отжигом дивакансий [19], а в области 650-850 К – доминирующим отжигом поливакансионных комплексов [22]. Как было показано ранее [11,18], практически полное отсутствие накопления дефектов с ростом флюенса облучения, регистрируемое при температуре мишени 400 К, также наблюдается и при более высоких температурах. Это свидетельствует о наличии процесса аннигиляции радиационных дефектов, вводимых при ионной имплантации. Известно, что уже при температуре 350 К происходит отжиг стабильных междоузельных комплексов [23]. В работе [19] было также установлено, что концентрация этих комплексов сравнима с концентрацией преобладающих, устойчивых дефектов вакансионного типа – дивакансий. Таким образом, вполне вероятно, что при температурах более 350 К процессы аннигиляции с вакансионными дефектами (дивакансиями) обуславливаются именно междоузельными комплексами.

В данной работе исследовался также изохронный отжиг парамагнитных центров аморфной фазы в кремнии, облученном ионами никеля до флюенса $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при температуре 125 К. Представленная на рис.4 кривая характерна для отжига парамагнитных центров аморфных областей в ионно-облученном кремнии и в аморфных пленках [24,25]. Условно данную кривую можно разделить на два температурных интервала: 350-550 и 750-900 К. Считается, что в первом интервале происходит отжиг изолированных областей аморфной фазы или же отжигаются дефекты на границе аморфный слой/кристалл, в то время как во втором интервале уже отжигается сплошной аморфный слой. При этом дефекты, формирующиеся в процессе отжига в первом температурном интервале, представляют собой в основном дефекты вакансионного и междоузельного типа, которые обладают высокой подвижностью. Это и обуславливает их взаимодействие с остальными стабильными дефектами, имеющими более высокую температуру отжига. В процессе такого взаимодействия происходит перестройка этих дефектов, что приводит к их дальнейшему распаду.

Как известно, в дефектной структуре кремния, подвергнутого какому-либо радиационному воздействию, с течением времени происходят структурные изменения не только при повышенных температурах, а даже и при комнатной. Это в значительной степени обуславливает конечность срока работоспособности полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т.д.). В настоящей работе был исследован процесс самоотжига при 300 К в течение 48 месяцев парамагнитных центров, созданных высокоэнергетичными ионами никеля. На рис.5 изображена зависимость эффективности самоотжига $K_{\text{эф}}$ от температуры имплантации. Величина $K_{\text{эф}}$ представляет собой отношение концентрации парамагнитных центров, созданных ионной имплантацией, к концентрации этих же центров в облученных образцах после их хранения в течение 48 месяцев при комнатной температуре. Видно, что наиболее эффективно самоотжиг проходит в образцах кремния, имеющих максимальное разупорядочение кристаллической решетки, и проявляется в рекристаллизации аморфных областей. Так, например, концентрация парамагнитных центров в образце, имплантированном при 125 К, уменьшилась в 3.4 раза. С ростом температуры имплантируемого кремния степень аморфизации уменьшается и, как указывалось выше, при температуре 400 К сигнал, свидетельствующий о наличии аморфной фазы, полностью исчезает. Видно, что при этом снижается

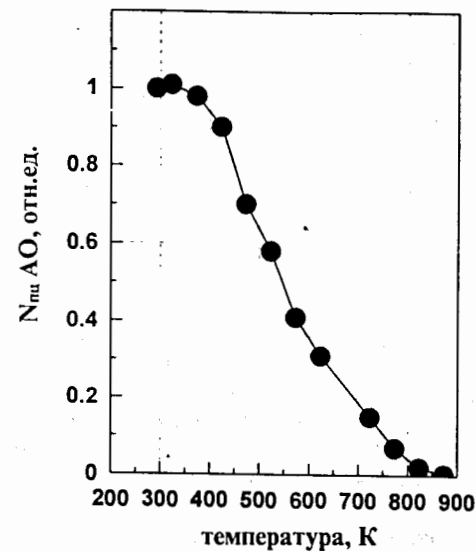


Рис.4. Зависимость концентрации парамагнитных центров аморфной фазы ($N_{\text{ам АО}}$) в кремнии, облученном ионами никеля с энергией 6 МэВ и дозой $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при температуре 125 К, от температуры отжига

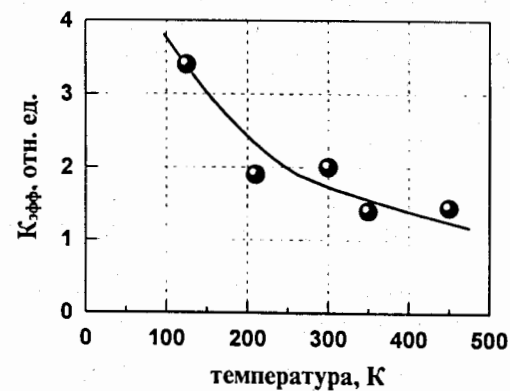


Рис.5. Зависимость эффективности самоотжига $K_{\text{эф}}$ общей концентрации парамагнитных центров радиационных дефектов от температуры облучаемых образцов кремния. Температура самоотжига - 300 К, время - 48 месяцев.

также эффективность процесса самоотжига. Это приводит к тому, что концентрация точечных парамагнитных центров в кремнии, имплантированном при 450 К, уменьшается только в 1.4 раза. Такой характер изменения концентрации парамагнитных центров в результате самоотжига может быть объяснен тем, что этот процесс доминирует, прежде всего, в сильно разупорядоченных областях, являющихся аморфными. В то же время точечные дефекты, обладая в определенной степени структурным упорядочением, подвергаются самоотжигу при комнатной температуре в значительно меньшей степени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ЭПР были изучены радиационные дефекты в кремнии, имплантированном ионами ^{68}Ni с энергией 6 МэВ в диапазоне флюенсов облучения $5 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при различных температурах мишени. Данные ЭПР сравнивались с данными, полученными методами измерения коэффициента оптического отражения и рентгеновской дифракции. Для образцов с малыми дозами и температурой имплантации 450 К были идентифицированы парамагнитные центры Si—A4, Si—P1, Si—P3, Si—B2 и Si—A6, причем центры Si—A4 и Si—A6 были зарегистрированы в ионно-облученном кремнии впервые. Для более низких температур имплантации спектры ЭПР показывали наличие аморфной фазы.

Исследования концентрации парамагнитных центров в зависимости от флюенса имплантации показали, что при температуре облучаемых образцов, равной 400 К, существует протяженный дозовый интервал (ниже флюенса аморфизации), в пределах которого общее количество парамагнитных радиационных дефектов $N_{\text{пм}}$ не меняется. На основании данных отжига радиационных дефектов предполагается, что низкая скорость образования дефектов в пределах этого интервала определяется аннигиляцией междоузельных комплексов и дивакансий. Величина $N_{\text{пм}}$ остается постоянной даже при более высоких флюенсах, где происходит аморфизация, хотя вклад, обусловленный парамагнитными центрами аморфных областей, возрастает так же, как и величина оптического повреждения S, что указывает на высокую чувствительность метода ЭПР к структурным перестройкам, происходящим в кристаллической решетке при ионном облучении.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке фонда INTAS, грант номер "INTAS-94-1982".

ЛИТЕРАТУРА

1. J.F.Ziegler. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B6, 1986, p. 270.
2. В.С.Вариченко, А.Ю.Дидык, А.М.Зайцев и др. Сообщения ОИЯИ Р14-86-411, Дубна, 1986, 7с.
3. В.С.Вариченко, Е.Д.Воробьев, А.М.Зайцев и др. ФТП 21, в.6, 1987, с. 1095.
4. В.С.Вариченко, А.Ю.Дидык, А.М.Зайцев и др. Сообщения ОИЯИ Р14-88-44, Дубна, 1988, 12с.
5. D.P.Erchak, V.G.Efimov, A.M.Zaitsev et al. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B69, 1992, p. 443.

6. В.С.Вариченко, А.Ю.Дидык, В.А.Мартиневич и др. Сообщения ОИЯИ Р14-95-145, Дубна, 1995, 11с.
7. В.С.Вариченко, А.Ю.Дидык, В.А.Мартиневич, А.Р.Филипп. Сообщения ОИЯИ Р14-95-180, Дубна, 1995, 10с.
8. V.S.Varichenko, A.M.Zaitsev, M.S.Rusetskii et al. Diamond and Related Materials, 3, 1994, p.711.
9. A.Yu.Didyk, V.S.Varichenko. Radiation Measurements, v.25, 1-4, 1995, p. 119.
10. Дж.Вертц, Дж.Болтон. Теория и практические приложения метода ЭПР. М.: Мир, 1975, 548 с.
11. J.K.N.Lindner, N.Hecking, E.H. te Kaat. Nucl. Instrum. and Meth. B39, 1989, p. 306.
12. Y.H.Lee, Y.M.Kim and J.W.Corbett. Rad.Effects 15, 1972, p. 77.
13. Wun Jung and G.S.Newell. Phys.Rev.132, 1963, p. 648.
14. D.F.Daly and K.A.Pickar. Appl. Phys. Letters 15, 1969, p. 267.
15. Y.-H. Lee and J.W.Corbett. Phys. Rev. B, v.9, No10, 1974, p. 4351.
16. K.L.Brower and W.S.Beezhold. J. Appl. Phys. 43, 1972, p. 3499.
17. J.K.N.Lindner, N.Hecking and E.H.te Kaat. Nucl. Instr. and Meth. B26, 1987, p. 551.
18. V.S.Varichenko, A.M.Zaitsev, J.K.N.Lindner et al. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B94, 1994, p. 244.
19. N.I.Berezhnov, V.F.Stelmakh, A.R.Chelyadinskii, Phys.Stat.Solidi A78, 1983, p. K121.
20. A.M.Zaitsev, V.S.Varichenko, A.A.Melnikov et al. Abstracts of Int. Conf. on SHIM/CIRIL, Caen, France.
21. V.S.Varichenko, A.M.Zaitsev, A.A.Melnikov et al. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B94, 1994, p. 259.
22. H.J.Stein, F.L.Vook, J.A.Borders. Appl. Phys. Letters 14, 1969, p. 328.
23. Y.M.Lee, J.W.Corbett. Solid State Communications 15, 1974, p. 1781.
24. Физические процессы в облученных полупроводниках. - Новосибирск : Наука, 1977. - 254 с.
25. M.N.Brodsky, R.S.Title, K.Weiser, G.D.Pettit. Phys.Rev. B v.14, No.6, 1970, p. 2632.

Рукопись поступила в издательский отдел

1 июля 1996 года.

Дефектообразование в кремнии,
имплантированном ионами никеля с энергией 6 МэВ

Образцы кремния <111> были имплантированы ионами ^{68}Ni с энергией 6 МэВ при различных температурах в интервале флюенсов $5 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Данные ЭПР, дающие прямые сведения о существующих типах дефектов, сопоставляются с данными по изменению коэффициента оптического отражения, обусловленного введенными имплантацией радиационными дефектами. В спектрах ЭПР наблюдаются линии пяти различных точечных дефектов (Si—A4, Si—P1, Si—A6, Si—B2, Si—P3) и сигнал от аморфного материала. Результаты исследований ЭПР согласуются с дозовой и температурной зависимостями оптически детектируемых повреждений и интерпретируются с использованием модели, в соответствии с которой дефектообразование определяется рекомбинацией точечных дефектов, образованных в пределах отдельных каскадов столкновений.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Defect Production in Silicon Implanted by Nickel Ions
with Energy of 6 MeV

<111> silicon has been implanted with 6 MeV ^{68}Ni ions at various temperatures in a fluence range from $5 \cdot 10^{12}$ to $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. EPR data giving direct information about existing type of defects are compared with results of measurements of optical reflectivity change due to radiation defects formed by ion implantation. EPR lines of five different point defects (Si—A4, Si—P1, Si—A6, Si—B2, Si—P3) and of amorphous material are observed. Results of EPR investigations are in agreement with dose and temperature dependences of optically detected damage and interpreted using a model in which a defect production is determined by recombination of point defects produced within the individual collision cascades.

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