

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Б. М. Вул, И. Д. Воронова, Г. А. Калюжная, Т. С. Мамедов, Т. Ш. Рагимова. Письма ЖЭТФ, 29, 21 (1979).
- [2] Б. М. Вул, С. П. Гришечкина, Т. Ш. Рагимова. ФТП, 21, 1054 (1987).
- [3] И. Д. Воронова, Е. В. Семенова. Краткие сообщения по физике ФИАН, вып. 7, 19 (1987).
- [4] А. А. Андронов, А. М. Белянцев, В. И. Гавриленко, Е. П. Додин, З. Ф. Красильник, В. В. Никонов, С. А. Павлов, М. М. Шварц. ЖЭТФ, 90, 367 (1986).
- [5] K. Unterrainer, C. Kremser, E. Gornik, C. R. Pidgeon, Yu. L. Ivanov, E. E. Haller. Phys. Rev. Lett., 64, 2277 (1990).
- [6] Ю. А. Митягин, В. Н. Мурзин, С. А. Стоклицкий, И. Е. Трофимов, А. П. Чеботарев. Краткие сообщения по физике ФИАН, вып. 8, 11 (1987).
- [7] Yu. A. Mityagin, V. N. Murzin, S. A. Stoklitsky, A. P. Chebotarev, I. M. Melnichuk. Optical and Quant. Electron., 23, 307 (1991).
- [8] Н. Н. Берченко, А. И. Евстигнеев, В. Ю. Ерохов, А. В. Матвеевко. Зарубежн. электрон. техн., вып. 3, 3 (1981).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 5, 1993

## ПРОЦЕССЫ ОТЖИГА И ПЕРЕСТРОЙКИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ БОРА

Ф. Аль-Баккур, А. Ю. Дидык, И. П. Козлов, В. Б. Оджаев, В. В. Петров,  
В. С. Просолович, А. С. Сохацкий, О. Н. Янковский

Белорусский государственный университет,  
220080, Минск, Беларусь

(Получено 15 апреля 1991 г. Принято к печати 18 ноября 1992 г.)

Учитывая зависимость характера отжига радиационных дефектов от энергии внедряемых частиц [<sup>1, 2</sup>], представляет интерес исследование влияния термообработки на свойства слоев кремния, созданных высокоэнергетичной ионной имплантацией.

Изохронный отжиг проводился в печи в интервале температур 100—1150 °С в течение 15 мин. Быстрый термический отжиг (БТО) осуществлялся с использованием галогеновых ламп накаливания. Ионы бора имплантировались с энергиями  $\approx 5.6$  и 13.6 МэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13}$ — $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> в кремний *n*- и *p*-типа проводимости. В экспериментах использовались методы инфракрасного поглощения, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и эффекта Холла.

Как было установлено, кинетики отжига дивакансий и областей разупорядочения не зависят от энергии ионов, а определяются величиной их удельной энергии. Отжиг завершался к 250 °С. Достижение расчетного уровня активации бора происходило после нагрева при температурах  $\geq 600$  °С (рис. 1, кривая 1).

По данным ЭПР концентрация парамагнитных центров Si—P3 при температуре отжига свыше 125 °С уменьшалась, и в области 200—225 °С соответствующие тетравакансиям линии ЭПР исчезали, но появлялись новые, связанные с центром Si—P1 [<sup>3</sup>]. Концентрация последнего достигала максимума при 275 °С, затем уменьшалась, и при температурах  $\geq 575$  °С линии ЭПР, принадлежащие пентавакансионному комплексу, не проявлялись. Согласно [<sup>3</sup>], это обусловлено

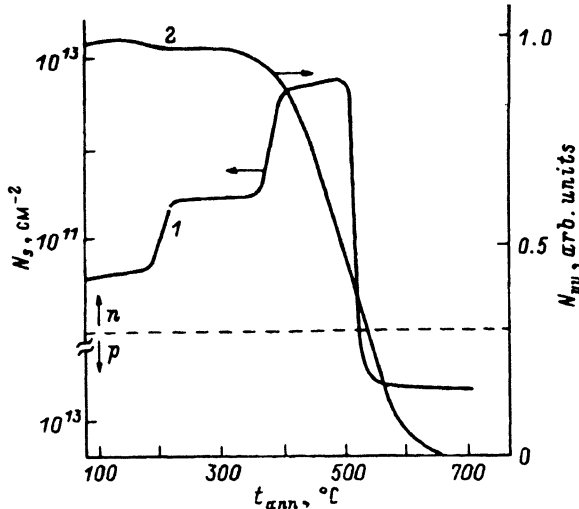


Рис. 1. Зависимость слоевой концентрации носителей заряда (1) и концентрации парамагнитных центров, связанных с аморфной фазой (2), от температуры изохронного отжига.  $E_{B^+} = 13.6$  МэВ. Доза имплантации  $1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ .

Область термической устойчивости и ширина соответствующих линий ЭПР свидетельствуют о наличии протяженного «рыхлого» дефектного слоя, в котором сконцентрированы включения аморфной фазы.

Измерения профиля распределения слоевого сопротивления ( $R_s$ ) образцов, подвергнутых отжигу в печи, выявили наличие двух максимумов  $R_s$ : первый находился в области остановки ионов, второй — на меньшей глубине (рис. 2). Отметим, что аналогичная картина наблюдалась при исследовании распределения дивакансий по глубине имплантированного слоя [4]. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что имеет место корреляция двух этих профилей. Более глубокий максимум в отожженных образцах находился на несколько большей глубине в том случае, если имплантация проводилась в  $n$ -кремний, что, вероятно, обусловлено высоким сопротивлением формирующегося  $p$ — $n$ -перехода. Следовательно, максимальное значение удельного сопротивления после отжига в печи соответствует тем областям, в которых в процессе внедрения эффективно генерировались дивакансии.

Как известно, в кремнии, облученном тяжелыми частицами (протоны, нейтроны и т. п.), в ходе высокотемпературного нагрева образуются так называемые кислородосодержащие «избыточные доноры», устойчивые до температур  $\geq 1000$  °C [5, 6]. С учетом этого обстоятельства области повышенного сопротивления в имплантированных слоях, формирующиеся в процессе отжига при температурах свыше 700 °C, можно связать с проявлением компенсирующего воздействия избыточных доноров. Так как радиационные нарушения генерируются неоднородно по толщине образца, то можно предположить, что качественно схожее распределение будут иметь и избыточные доноры.

На правомерность предположения о влиянии компенсации мелкими донорами, имеющими радиационно-термическое происхождение, указывают результаты, полученные при БТО. Как видно из рис. 2 (кривая 3), в данном случае эффекты компенсации практически не проявляются вследствие малой длительности обработки ( $\leq 12$  с), при которой эффективность миграции кислорода невелика. Более

тем, что при повышенных температурах имеет место уменьшение локальной концентрации точечных дефектов, окружающих пентавакансию, что способствует ее переводу в парамагнитное отрицательное зарядовое состояние (Si—P1). Характерное отличие высокоэнергетичной ионной имплантации от низкоэнергетичной ( $\approx 100$  кэВ) заключается в увеличении температуры отжига центра Si—P1 до 575 °C. Аналогичные результаты были получены ранее при отжиге кристаллов кремния, облученных высокими дозами быстрых нейтронов и  $\alpha$ -частиц [3]. Связанный с аморфной фазой парамагнитный центр с  $g$ -фактором, равным  $2.0055 \pm \pm 0.0005$ , проявлялся вплоть до 625 °C (рис. 1, кривая 2).

высокое сопротивление имплантированного слоя после БТО по сравнению с его значением, измеренным на образцах, отожженных в печи при  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , можно связать с формированием в первом случае закалочных дефектов. Это предположение подтверждается наличием в этих образцах сигнала ЭПР, с  $g$ -фактором, соответствующим межузельному атому железа, с симметрией  $T_d$  [7].

Таким образом, свойства имплантированных слоев после отжига определяются специфическими особенностями дефектообразования, при высокоэнергетичном внедрении ионов характерным является чередование по имплантированному слою высокоомных и низкоомных областей. На электрофизические параметры значительное влияние оказывают избыточные доноры, формирующиеся в сильно нарушенных областях в процессе нагрева. Эффективность их генерации при БТО мала, однако в данном случае, особенно при небольших дозах облучения, проявляются эффекты компенсации, связанные с введением закалочных термодфектов.

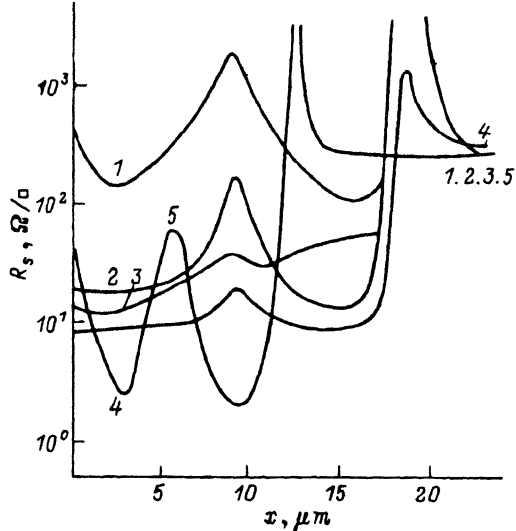


Рис. 2. Распределение слоевого сопротивления после отжига в печи при  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30 мин (1, 2, 4, 5) и БТО (3) слоев кремния, имплантированных ионами бора, с энергиями 5.6 (5) и 13.6 (1—4) МэВ. Доза имплантации: 1— $1 \cdot 10^{14}$ , 2— $5 \cdot 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ . Тип подложки: 1—3, 5 — КЭФ-4.5, 4 — КДВ-0.3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ф. Ф. Комаров, А. П. Новиков, В. С. Соловьев, С. Ю. Ширяев. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. Минск (1990).
- [2] Физические процессы в облученных полупроводниках (под ред. Л. С. Смирнова). Новосибирск (1977).
- [3] В. П. Толстых. Дис. канд. физ.-мат. наук. Минск (1986).
- [4] А. Ю. Дидык, И. П. Козлов, В. Б. Оджаев, В. С. Просолович, А. С. Сохацкий, Ф. Аль-Баккур. В сб.: Перспективные материалы твердотельной электроники. Ч. 1, 32. Минск (1990).
- [5] Н. М. Казючиц, Я. И. Латушко, А. А. Павленко, В. В. Петров, В. С. Просолович, Г. В. Черкас. Трансмутационное легирование кремния алюминием. Матер. VII межд. конф. по микроэлектронике «Microelectronics' 90». Т. 1, 105 Минск (1990).
- [6] Н. И. Акулович, М. А. Мороховец. ФТП, 18, 1642 (1984).
- [7] L. Elstner, W. Kamprath. Phys. St. Sol. (a), 22, 541 (1967).

Редактор В. В. Чалдышев