

электрона положительно заряженным центром C_i^+ , концентрация C_i^+ станет весьма малой.

Таким образом, в данной работе предложена модель образования K -центра в облученном быстрыми электронами кремнии и показана возможность управления дефектным составом путем варьирования интенсивности и учета роли зарядовых состояний комплексов в формировании сложных РД.

Список литературы

- [1] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [2] Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 1496—1497.
- [3] Newman R. C., Smith R. S. // J. Phys. Chem. Sol. 1969. V. 3. P. 1493—1505.
- [4] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [5] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы. 1982. В. 2 (163). С. 38—40.
- [6] Kimmerling L. C. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 31. 1977. V. 2. P. 221—230.
- [7] Newman R. C., War Keijeld T. T. // Phys. Chem. Sol. 1961. V. 19. P. 230—237.
- [8] Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1136—1138.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 9.07.1989.
Принято к печати 4.10.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИЕ ТЕРМОДОНОРЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В КРЕМНИИ ПРИ «ГОРЯЧЕМ» γ -ОБЛУЧЕНИИ

Емцев В. В., Далуда Ю. Н., Шаховцов В. И., Шиндич В. Л.,
Неймаш В. Б., Антоненко Р. С., Шмальц К.

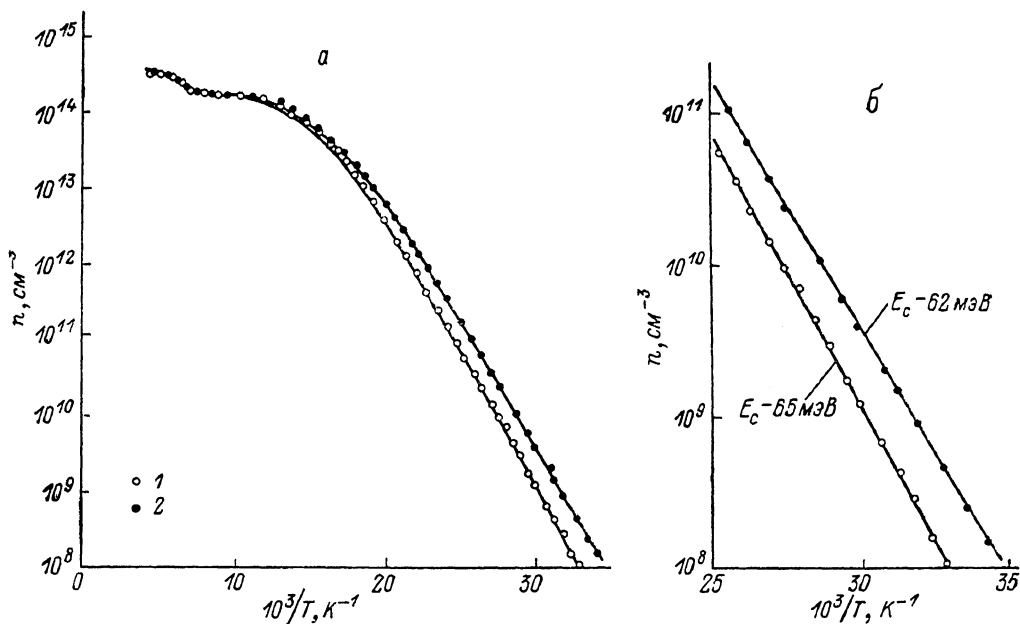
Вопрос о роли диффузии кислорода является ключевым для большинства современных моделей образования кислородосодержащих термодоноров (ТД) в кремнии, выращенном по методу Чохральского [1-3]. Поскольку простая экстраполяция коэффициента диффузии атомов кислорода из высокотемпературной области в область температур 370—470 °С, характерную для формирования ТД, не позволяет естественным образом объяснить процессы преципитации кислорода из пересыщенного твердого раствора, то различные модели таких процессов обычно базируются на предположении о возможном увеличении коэффициента диффузии кислорода в рассматриваемом температурном интервале. Вообще говоря, диффузия примесей может ускоряться в присутствии собственных дефектов кристаллической решетки (вакансий и собственных межузельных атомов, например, накопленных при предварительном облучении кремния, который в последующем подвергается термообработке [4]). В связи с этим несомненный интерес представляет вопрос о влиянии облучения непосредственно в процессе термообработки, т. е. вопрос о «горячем» облучении.

Исходным материалом служил чистый p -Si, выращенный по методу Чохральского. Концентрация примеси бора в исходном материале составляла $\leq 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$; содержание кислорода и углерода, определенное по интенсивности ИК поглощения, было $8 \cdot 10^{17}$ и $\leq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. В целом данный материал по своим характеристикам был аналогом материала, исследованного нами ранее в [5-7].

Образцы вместе с нагревателем помещались внутрь камеры γ -установки ^{60}Co с мощностью дозы в рабочем объеме $4.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; температура термо-

обработки была 450 ± 2 °С, длительность термообработки составляла 2 и 16 ч. Контрольные образцы подвергались термообработке в тех же условиях, но без γ -облучения. Анализ температурных зависимостей концентрации электронов $n(T)$ (после $p \rightarrow n$ -конверсии типа проводимости из-за образования ТД) проводился на основе соответствующих уравнений электронейтральности. В некоторых случаях для нахождения распределения ТД по энергии ионизации использовалась компенсация электронной проводимости акцепторными уровнями А-центров по методу, описанному, например, в [5].

На рисунке приведены зависимости $n(T)$ для двух образцов — контрольного и подвергнутого горячему облучению. Видно, что горячее облучение стимулирует образование ТД с более мелкими донорными состояниями. Такой эффект



Температурные зависимости концентрации электронов для двух образцов, подвергнутых обычной термообработке (1) и горячему облучению (2).

Точки — эксперимент, кривые — расчет. 1 — образец 38К2, термообработка при 450 °С в течение 2 ч; 2 — образец 5К2, термообработка при 450 °С одновременно с γ -облучением в течение 2 ч. а — общий вид зависимости $n(T)$ для мелких и глубоких донорных состояний; б — активационный участок зависимости $n(T)$ для мелких донорных состояний.

наблюдался и в случае более длительной термообработки (16 ч): энергия ионизации самых мелких ТД составляла 62 и 53 мэВ соответственно для образцов, подвергнутых термообработке без радиационной стимуляции (контрольные образцы) и в условиях γ -облучения. Попутно отметим два обстоятельства: во-первых, для контрольных образцов эффективная энергия ионизации ТД хорошо согласуется с данными, полученными нами ранее на аналогичном материале [5, 6]; во-вторых, степень компенсации самых мелких ТД в образцах после горячего облучения была примерно такой же, как и для контрольных образцов (даже для длительной термообработки она составляла всего несколько процентов, что в свою очередь соответствует концентрации компенсирующих центров $\leq 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и не очень отличается от концентрации бора в исходном материале).

Следует отметить также, что горячее облучение не приводит к увеличению концентрации возникающих ТД по сравнению с контрольными образцами (см. рисунок). Для материалов с несколько другим соотношением примесей кислорода и углерода эффект стимуляции образования ТД с более мелкими состояниями при длительном горячем облучении сопровождается даже уменьшением полной концентрации ТД примерно на 30 % по сравнению с контрольными образцами. Таким образом, горячее облучение во всяком случае не приводит к ускоренному образованию ТД в количественном отношении, хотя заметно влияет на

качественную сторону их структурного преобразования. Нет сомнения, что собственные дефекты кристаллической решетки, генерируемые радиацией, принимают участие в указанных процессах. Оценки показывают, что при использованных дозах γ -облучения концентрация таких дефектов составляет до 10 % от полной концентрации образующихся ТД.

Дальнейшие исследования выявят роль собственных дефектов в процессах преципитации кислорода, однако их участие в ускоренном движении атомов кислорода пока не подкрепляется полученными экспериментальными данными; в противном случае концентрация ТД при горячем облучении могла бы быть больше, чем в контрольных образцах. Поэтому участие собственных дефектов в структурном преобразовании ТД представляется более реальным, хотя бы и путем косвенных квазихимических реакций (например, в самом простом случае подмешиванием к процессам «выдавливания» собственных межузельных атомов при снятии упругих напряжений вокруг растущих преципитатов [2, 8]).

Список литературы

- [1] Kaiser W., Frisch H. L., Reiss H. // Phys. Rev. 1958. V. 112. N 5. P. 1546.
- [2] Bourret A. // Proc. 13 Int. Conf. «Defects in Semicond.» / Ed. by L. C. Kimerling, Y. M. Parsey, Jr. USA, 1985. P. 129—146.
- [3] Markevich V. P., Makarenko L. F., Murin L. L. // Mater. Sci. Forum. V. 38—41. Pt 2. Switzerland—Germany—UK—USA. 1989. P. 589—594.
- [4] Newman R. C., Tucker J. H., Livingston F. M. // J. Phys. C. 1983. V. 16. P. 151—156.
- [5] Emtsev V. V., Daluda Yu. N., Gaworzewski P., Schmalz K. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 85. P. 575—584.
- [6] Далуда Ю. Н., Емцев В. В., Кервалишвили П. Д., Петров В. И., Шмальц К. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 7. С. 1283—1288.
- [7] Daluda Yu. N., Emtsev V. V., Schmalz K. // Rad. Eff. 1989. V. 107. N 2-4. P. 93—99.
- [8] Claybourn M., Newman R. C. // Mater. Sci. Forum. V. 38—41. Pt 2. Switzerland—Germany—UK—USA, 1989. P. 613—618.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 26.09.1989
Принято к печати 4.10.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

О ВЛИЯНИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОДОНОРОВ В КРЕМНИИ

Литвинов В. В., Пальчик Г. В., Уренев В. И.

Работа посвящена выяснению роли собственных дефектов структуры в процессе формирования термодоноров (ТД) в кремнии.

Исследовались монокристаллы кремния n -типа ($\rho \approx 60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) с концентрацией межузельного кислорода (O_i) $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Содержание O_i определялось по интенсивности полосы поглощения излучения в области 9 мкм с использованием калибровочного множителя $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ [1]. Облучение исходных кристаллов проводилось при комнатной температуре быстрыми электронами ($E = 4 \text{ МэВ}$) в интервале потоков $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$. Часть облученных образцов подвергалась предварительному отжигу при 270°C в течение 184 ч. После этого исходные кристаллы и две группы облученных образцов проходили одновременную термообработку при 440°C .

На рис. 1 представлены типичные температурные зависимости концентрации электронов (n) в трех типах образцов на различных стадиях их термообработки при 440°C . Анализ $n(T)$ показывает, что в первые 7 ч выдержки облученных образцов при 440°C завершается отжиг электрически активных радиационных дефектов (РД). Концентрация же вводимых ТД, которая отождествлялась с концентрацией уровней вблизи $E_c - 0.15 \text{ эВ}$, увеличивается со временем термо-