

области. При этом уменьшается скорость роста отрицательного заряда у контакта, что влечет за собой медленное уменьшение нестационарной инжекции дырок и тока (рис. 2).

В стационарном режиме приращение рекомбинационного тока дырок в области эмиттера равно  $\delta j_n$ . Сразу после выключения подсветки в эмиттерной области начинает скапливаться положительный заряд  $\delta j_n t$ , вызванный рекомбинационным током дырок. Это приводит к отрицательному выбросу тока в цепи при выключении подсветки, обусловленному нестационарной эксклюзией [3] (рис. 2).

Таким образом, релаксация ЭОДФ имеет немонотонный вид. Именно такая релаксация наблюдается в экспериментах [4].

#### Список литературы

- [1] Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М., 1962. 557 с.
- [2] Шейнман М. К., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 2. С. 209—233.
- [3] Лукьянченко А. И., Сурис Р. А., Фукс Б. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 7. С. 1199—1204.
- [4] Милнс А. Тримеры с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.

Получено 1.08.1988

Принято к печати 27.12.1988

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЕЗДИСЛОКАЦИОННОГО $n$ -Si

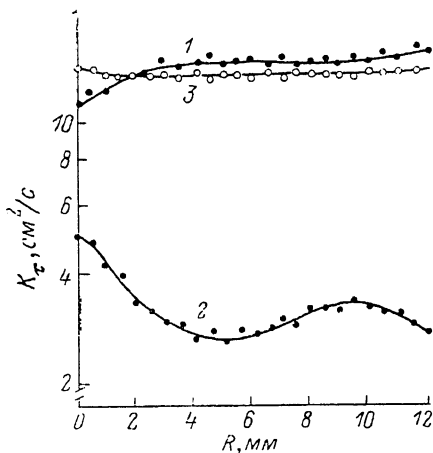
Колковский И. И., Лукаков П. Ф., Шуша В. В.

При выращивании бездислокационных кристаллов кремния в его объеме, как правило, формируются так называемые ростовые микродефекты различных типов ( $A, B, C, D$ ) [1-3], роль которых в процессах радиационного дефектообразования не совсем ясна, что и определило цель данной работы.

Исследовались пластины кремния, вырезанные из одного слитка, выращенного методом бестигельной плавки с переменной скоростью роста  $v_p$  от 1 до 6 мм/мин [4]. При  $v_p=1$  мм/мин в кристалле образовались микродефекты  $A$ -типа размером  $r=20-30$  мкм в концентрации  $N \approx 1 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> (I группа образцов). Кристаллы, полученные при  $v_p=3$  мм/мин (II группа), содержали микродефекты  $A$ -типа ( $r=1-3$  мкм,  $N=1 \cdot 10^5-1 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup>) и  $B$ -типа ( $r=0.1-0.3$  мкм,  $N=1 \cdot 10^6-3 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup>), а при  $v_p=6$  мм/мин (III группа) —  $D$ -типа ( $r \approx 0.01$  мкм,  $N \approx 1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>). Микродефекты различных типов выявлялись методом селективного травления, все они были однородно распределены по площади пластин, кроме микродефектов  $A$ - и  $B$ -типа во II группе исследуемых пластин, где наблюдалась свирл-картина. Независимо от скорости роста все пластины имели близкие значения удельного сопротивления ( $\rho \approx 100$  Ом·см) и времени жизни носителей заряда ( $\tau_0 \approx 100$  мкс). Экспериментальные результаты получены из измерений в исходных и облученных  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{\text{обл}} \leq 50$  °C) образцах (пластинах) методом модуляции проводимости в точечном контакте или по спаду фотопроводимости.

На рисунке показано радиальное распределение по пластине величины коэффициента  $K_\tau = (\tau_\phi^{-1} - \tau_0^{-1}) \Phi^{-1}$  радиационного изменения  $\tau$  ( $\tau_\phi$  — его значение после облучения) для образцов исследуемых групп. Как видно, в кристаллах I и III групп  $K_\tau$  практически одинаков и не зависит от типа присутствующих микродефектов и местоположения точки измерения на пластине. Он здесь совпадает с величиной  $K_\tau$  для зонного кремния, содержащего росто-

вые дислокации с плотностью  $N_D \approx 10^4 \text{ см}^{-2}$  [4]. Что касается образцов II группы, то здесь  $K_\tau$  значительно ниже по сравнению с кристаллами I и III групп, а его зависимость от расстояния до центра пластины имеет немонотонный характер. Анализ температурных зависимостей  $\tau$  на различных этапах облучения и отжига показал, что изменение  $\tau$  в образцах всех групп обусловлено накоплением  $E$ -центров с уровнем  $E_c - 0.42 \text{ эВ}$ , скорость введения которых в пластинах, содержащих микродефекты  $A$ - и  $B$ -типа, гораздо меньше [4], чем во всех остальных исследуемых материалах. Необходимо подчеркнуть также тот факт, что в пределах ошибки эксперимента ( $\pm 10\%$ ) не наблюдается прямой корреляции между величиной  $K_\tau$  и плотностью микродефектов  $A$ - и  $B$ -типа, распределение которых по пластине в радиальном направлении имеет четко выраженный полосчатый характер с шагом  $0.5-2 \text{ мм}$ . Так как примесный состав исследуемых пластин всех групп был примерно одинаковым (все они вырезаны из одного слитка, а скорость роста варьировалась лишь на последнем прогоне расплавленной зоны), получаемые на опыте относительно низкие значения скоростей введения  $E$ -центров и величины  $K_\tau$  в образцах II группы обусловлены, по-видимому, наличием конкурирующих с фосфором стоков, захватывающих создаваемые облучением вакансии. Такими стоками, образующимися в объеме кристалла при  $v_p = 3 \text{ мм/мин}$ , могут быть примесно-дефектные скопления междоузельного типа, представляющие собой мелкие включения второй фазы, окруженные примесной атмосферой [5]. Возможно, что такие включения формируются при «замораживании» так называемых



Радиальное распределение  $K_\tau$  в пластинах I (1), II (2) и III групп (3).

первичных междоузельных кластеров [6]. Последние как раз и образуются наиболее эффективно при  $v_p = 3 \text{ мм/мин}$  [6], тогда как при меньших скоростях роста они коагулируют в крупные  $A$ -микродефекты, а при более высоких ( $6 \text{ мм/мин}$ ) не успевают сформироваться. Кстати, такого рода включения не возникают и в кристаллах, содержащих ростовые дислокации с  $N_D = 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$ . В этом случае при выращивании кристалла избыточные междоузельные атомы уходят на дислокации, и поэтому здесь отсутствуют стоки для вакансий, в силу чего при облучении таких кристаллов практически все свободные вакансии захватываются фосфором с образованием  $E$ -центров, чем и обусловлены достаточно высокие величины  $K_\tau$  в таких материалах [4].

Формирующиеся при  $v_p = 3 \text{ мм/мин}$  включения междоузельного типа создают вокруг себя анизотропные упругие деформационные поля, вследствие чего они окружены примесной атмосферой, в состав которой входят, как и в нейтронно-легированном кремнии [5], главным образом фоновые примеси (углерод и кислород). Захват вакансий при облучении такими скоплениями может приводить к образованию  $A$ -центров из-за высокой локальной концентрации кислорода вблизи включений. Действительно, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в образцах II группы скорость введения дефектов с уровнем  $E_c - 0.17 \text{ эВ}$ , принадлежащим  $A$ -центру, выше, чем в других кристаллах. Необходимо отметить, что суммарная скорость введения дефектов с уровнями  $E_c - 0.42$  и  $E_c - 0.17 \text{ эВ}$  примерно одинакова во всех кристаллах. Поэтому уменьшение скорости введения  $E$ -центров в образцах II группы близко по абсолютной величине возрастанию скорости образования  $A$ -центров. Этот результат можно считать дополнительным подтверждением в пользу предлагаемых представлений о процессах радиационного дефектообразования в кристаллах кремния, содержащих различные типы ростовых микродефектов, но примерно одинаковые концентрации легирующих и фоновых примесей.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что ростовые микродефекты *A*-, *B*- и *D*-типа не оказывают непосредственного влияния на процессы накопления рекомбинационных и электрически активных центров при облучении. Наблюдаемое же на опыте уменьшение скорости образования *E*-центров в кристаллах, содержащих микродефекты *A*- и *B*-типа, связано с присутствием в их объеме примесно-дефектных скоплений междоузельного типа, представляющих собой «мелкие» включения другой фазы, окруженные примесной атмосферой.

#### Список литературы

- [1] Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М., 1984. 256 с.
- [2] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 472 с.
- [3] Ситникова А. Р., Сорокин Л. М., Таланин И. Е., Малышев К. Л., Шейхет Э. Г., Фалькевич Э. С. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 6. С. 1829—1833.
- [4] Колковский И. И., Латышенко В. Ф., Шейхет Э. Г., Шуша В. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 959—960.
- [5] Колковский И. И., Шуша В. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 11. С. 1974—1977.
- [6] Voronkov V. V. // J. Cryst. Growth. 1982. V. 59. P. 625—643.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
и. А. Н. Севченко БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 7.12.1988  
Принято к печати 27.12.1988

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Крутоголов Ю. К., Довженко С. В., Диордиев С. А.,  
Крутогорова Л. И., Кунакин Ю. И., Рыжих С. А.

Потенциальные возможности использования твердых растворов в системе  $\text{In-Ga-P}$  для создания диодов, излучающих в желтой области спектра, определяются положением точки перехода от «прямозонного» материала к «непрямозонному» [1]. Однако вопрос о взаимном расположении прямой и непрямых долин в зоне проводимости твердого раствора  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$  остается дискуссионным [1-3].

Настоящая работа посвящена исследованию зонной структуры твердого раствора  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$  с использованием фотоэлектрического метода.

Слой  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$  ( $0.5 < x \leq 1$ ) *n*-типа были выращены методом эпитаксии из газовой фазы в хлоридно-гидридной системе при легировании теллуром. Между эпитаксиальным слоем и подложкой *n-GaP* (100) наращивался переходный слой переменного состава с градиентом  $1.5 \div 2$  моль %/мкм. Толщина слоя постоянного состава находилась в диапазоне  $5 \div 20$  мкм. Состав твердого раствора определялся на рентгеновском микроанализаторе MS-46, с помощью которого измерялся также внешний квантовый выход катодолюминесценции при плотности тока электронного луча  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup> и энергии возбуждающих электронов  $\sim 20$  кэВ. Концентрация носителей заряда контролировалась трехзондовым методом пробоя точечного контакта металл—полупроводник и составляла  $(0.5 \div 1.5) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Все измерения выполнялись при комнатной температуре.

Для определения зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от состава твердого раствора использовалась разновидность фотоэлектрического метода, основанная на явлении фотозффекта в переходе полупроводник—прозрачный