

УДК 621.315.592

## Рекомбинация носителей заряда в бездислокационном кремнии, содержащем ростовые микродефекты различных типов

© Л.А. Казакевич, П.Ф. Лугаков\*

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко, 220064 Минск, Белоруссия

\* Белорусский государственный аграрный технический университет, 220608 Минск, Белоруссия

(Получена 2 июня 1997 г. Принята к печати 7 июня 1997 г.)

Анализ температурных и инжекционных зависимостей времени жизни носителей заряда в бездислокационном *n*-кремнии позволил сделать заключение о рекомбинационной активности ростовых микродефектов различных типов. Определены параметры основных рекомбинационных центров, связанных с микродефектами А- и В-типа.

Основными ростовыми нарушениями структуры в бездислокационных монокристаллах кремния являются микродефекты, тип которых определяется условиями выращивания, прежде всего скоростью роста *V* и режимом охлаждения (осевым градиентом температуры *G*) [1]. В зависимости от соотношения *V/G* в объеме кристалла могут возникать микродефекты А-, В-, С- или D-типа [2]. Использование методов селективного травления, рентгеновской топографии, а также электронно-микроскопические исследования позволили получить сведения о макрораспределении таких нарушений в слитках, их размерах, структуре и природе [2–4]. Однако результаты изучения электрических свойств микродефектов малочисленны и в значительной мере противоречивы [5,6], а о рекомбинационной активности микродефектов различных типов практически ничего не известно, что и определило цель данной работы.

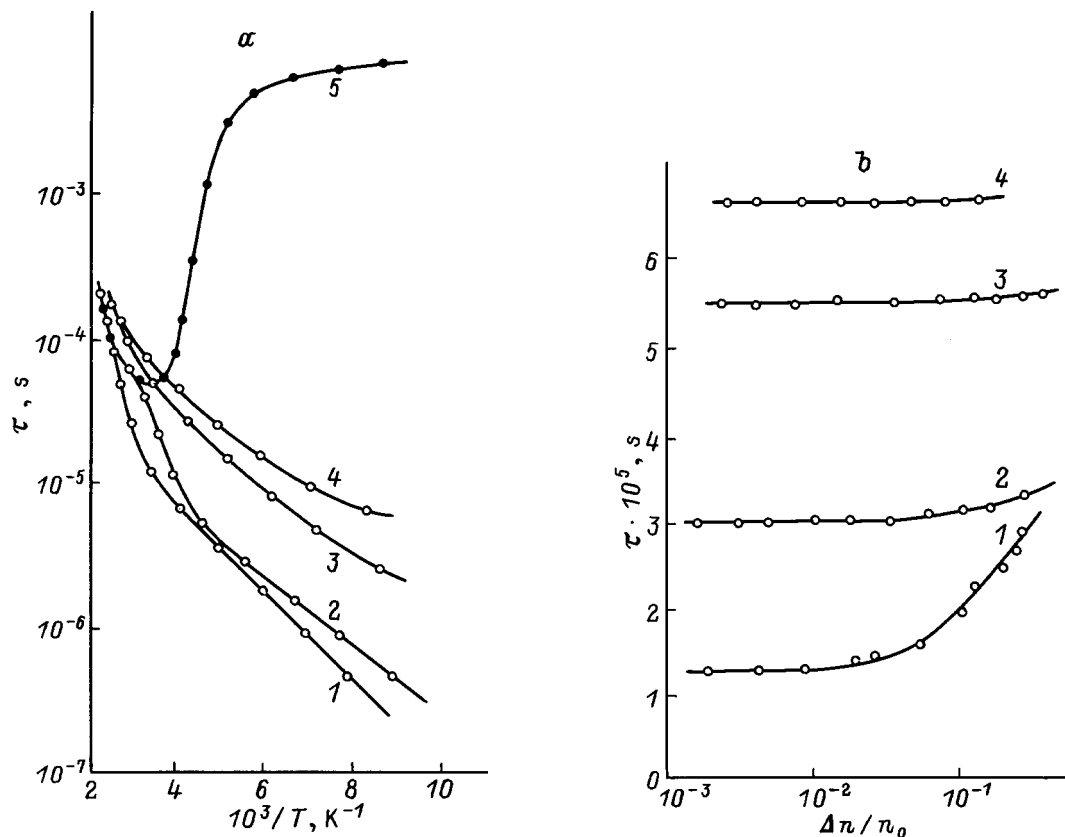
Исследования проводились на бездислокационных монокристаллах кремния *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 20 \div 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , полученных бестигельной зонной плавкой в вакууме или в атмосфере аргона с переменной скоростью *V* от 1 до 6 мм/мин, и содержащих в силу этого микродефекты А-, В- или D-типа. Наличие и тип микродефектов контролировался с помощью металлографических исследований. Из частей слитка, выращенного в вакууме при различных скоростях, были приготовлены три группы образцов. Первая из них — это кристаллы, содержащие преимущественно микродефекты А-типа (скорость роста мала), вторая — А- и В-типа, а третья — D-типа. Четвертую группу составляли кристаллы кремния, полученные в атмосфере аргона, в которых селективным травлением не было выявлено никаких известных микродефектов ("бездефектные" образцы). Методом стационарной фотопроводимости, фотомагнитоэлектрического эффекта и модуляции проводимости в точечном контакте измерялись температурные ( $T_m = 80 \div 400 \text{ К}$ ) и инжекционные ( $\Delta n/n_0 = 1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^0$ ) зависимости времени жизни ( $\tau$ ) неравновесных основных и неосновных носителей заряда (НЗ). Перед измерениями образцы подвергались

специальной обработке (прогрев при температуре около 1000 К в окислительной среде в течение примерно 10 мин с последующим охлаждением со скоростью  $0.2 \div 0.3 \text{ К/с}$ ), в результате которой на поверхности создавался тонкий слой термического окисла, имеющего встроенный положительный заряд [7], что обеспечивало исключение поверхностной рекомбинации НЗ.

На рисунке (кривые 1–4) приведены зависимости  $\tau$  неосновных НЗ от обратной температуры (*a*) и уровня их инжекции (*b*) в исследуемых материалах (номера кривых и групп кристаллов совпадают). Показано также (кривая 5) температурная зависимость  $\tau$  основных НЗ (электронов), которая в области низких температур ( $T_m < 250 \text{ К}$ ) имеет практически одинаковый характер для всех четырех групп образцов. Наблюдаемое увеличение  $\tau$  основных НЗ с понижением температуры свидетельствует о наличии во всех исследованных материалах центров прилипания для дырок одинаковой природы.

Отметим некоторые особенности температурных и инжекционных зависимостей  $\tau$  неосновных НЗ. Во-первых, для кристаллов первой и второй групп кривые увеличения времени жизни носителей заряда с температурой имеют характерные участки активационного изменения. Во-вторых, в этих же материалах наблюдаются более сильные (по сравнению с образцами третьей и четвертой групп) инжекционные зависимости  $\tau$ . Наконец, в кристаллах третьей и четвертой групп  $\tau$  монотонно изменяется с температурой, а в исследованном интервале уровней инжекции время жизни НЗ в них остается практически постоянным.

Анализ полученных зависимостей  $\tau$  от температуры и уровня инжекции НЗ проводился в рамках модели Холла–Шокли–Рида [8,9]. Для кристаллов, содержащих микродефекты А- или А- и В-типа, он дал следующие результаты. Изменение  $\tau$  неосновных НЗ с температурой при  $T_m < 200 \text{ К}$  обусловлено температурной зависимостью сечения захвата  $\sigma_p$  дырок, которая имеет вид  $\sigma_p \sim \exp \varepsilon_p/kT$ , где  $\varepsilon_p = 0.065 \text{ эВ}$  и  $\varepsilon_p = 0.045 \text{ эВ}$  в образцах первой и второй групп соответственно. Дальнейшее увеличение  $\tau$  ( $T_m > 250 \text{ К}$ ) связано глав-



Температурные (а) и инжекционные (б) зависимости времени жизни неосновных (1–4) и основных (5) носителей заряда в кристаллах первой (1), второй (2), третьей (3) и четвертой (4) групп.

ным образом с изменением степени заполнения уровней рекомбинационных центров. Как показали расчеты, в кристаллах с микродефектами А-типа рекомбинация НЗ идет через уровень с энергетическим положением  $\Delta E_{r1} = 0.41$  эВ, а кристаллах с микродефектами А- и В-типа на зависимости  $\tau$  от температуры четко наблюдается как энергетический уровень  $\Delta E_{r1} = 0.41$  эВ, так и другой — с  $\Delta E_{r2} = 0.30$  эВ. Поэтому можно считать, что первый из них связан с микродефектами А-типа, а другой — В-типа.

Учитывая положение уровня Ферми ( $E_c - 0.37$  эВ и  $E_c - 0.25$  эВ) при температурах, соответствующих переходам от температурных зависимостей  $\sigma_p$  к активационным изменениям  $\tau$  ( $10^3/T_m = 3.1$  и  $10^3/T_m = 4.4$ ), можно предположить, что в исследованных кристаллах энергетические уровни основных рекомбинационных центров расположены в нижней половине запрещенной зоны, т.е.  $\Delta E_{r1} = E_v + 0.41$  эВ и  $\Delta E_{r2} = E_v + 0.30$  эВ. Из инжекционных зависимостей  $\tau$  неосновных НЗ, измеренных при  $T_m = 300$  К, были определены отношения сечений захвата дырок и электронов. Оказалось, что в образцах первой группы  $\sigma_p/\sigma_n = 4.5$ , а второй —  $\sigma_p/\sigma_n = 4.0$ . Соотношение между сечениями захвата неосновных НЗ ( $\sigma_p > \sigma_n$ ), а также характер температурных зависимостей сечений захвата дырок ( $\sigma_p \sim \exp \varepsilon_p/kT$ ) позволяют сделать заключение, что в кристаллах, содержащих ми-

кродефекты А- или А- и В-типа, неравновесные носители заряда рекомбинируют через центры, отрицательно заряженные относительно захватываемых дырок, т.е. им соответствуют акцепторные энергетические уровни в нижней половине запрещенной зоны.

Микродефекты А-типа, как известно [2,4], представляют собой дислокационные петли межузельного типа, наличие у которых разорванных связей и захват на них НЗ определяет рекомбинационную активность микродефектов А-типа. По нашим оценкам, выполненным с учетом характерной для дислокаций величины степени заполнения разорванных связей  $\sim 0.01$  [10], концентрация центров захвата НЗ, связанных с микродефектами А-типа, не превышает  $10^{10} \div 10^{11}$  см $^{-3}$ . Таким значения концентрации дефектов практически не изменяют степень компенсации материала, но оказывают заметное влияние на процессы рекомбинации.

С микродефектами В-типа связывают кластеры межузельных атомов или микрочастицы новой фазы, составленной из атомов остаточных примесей [2,3]. Присутствие таких нарушений в объеме кристалла приводит к возникновению полей деформационных напряжений, под воздействием которых вблизи микродефектов формируется атмосфера из примесей или их комплексов, являющихся основными рекомбинационными центрами в таком материале.

Что касается образцов третьей и четвертой групп, то характерные для них монотонные изменения  $\tau$  с температурой и весьма слабые инжекционные зависимости  $\tau$  не могут быть описаны в рамках статистики рекомбинации Холла–Шокли–Рида [8,9]. Поэтому можно предположить, что время жизни носителей заряда в этих кристаллах ограничено их диффузией к стокам с высокой локальной скоростью рекомбинации [11]. В роли таких стоков в кристаллах третьей группы могут выступать микродефекты *D*-типа, а в образцах четвертой группы (“бездефектный кремний”) — не выявляемые селективным травлением мелкие включения [12,13]. Наличие окружающих стоки для НЗ потенциальных барьеров, величина которых уменьшается с ростом температуры, обуславливает монотонные температурные зависимости  $\tau$  из-за изменения коэффициента диффузии НЗ к ростовым нарушениям при увеличении температуры. При  $T_m = 300$  К потенциальные барьеры снимаются и  $\tau$  практически не зависит от уровня инжекции НЗ, что и наблюдается на опыте.

Таким образом, результаты выполненных исследований и их анализ позволяют сделать заключение о рекомбинационной активности микродефектов различных типов в бездислокационном *n*-кремнии. Установлено, что в образцах с микродефектами *A*- и *B*-типа рекомбинация РЗ происходит на центрах, вносящих в нижнюю половину запрещенной зоны кремния акцепторные энергетические уровни  $E_v + 0.41$  эВ и  $E_v + 0.30$  эВ с асимметрией сечений захвата  $\sigma_p/\sigma_n = 4.5$  и  $\sigma_p/\sigma_n = 4.0$  соответственно. В образцах третьей и четвертой групп НЗ рекомбинируют преимущественно на центрах в примесной или примесно-дефектной атмосфере вблизи микродефектов *D*-типа или не выявляемых селективным травлением мелких включений межузельного типа.

## Список литературы

- [1] V.V. Voronkov. *J. Cryst. Growth*, **59**, 625 (1982).
- [2] К. Рейви. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии* (М., 1984).
- [2] А.А. Ситникова, Л.М. Сорокин, И.Е. Таланин, К.Л. Малышев, Э.Г. Шейхет, Э.С. Фалькевич. *ФТТ*, **28**, 1829 (1986).
- [3] H. Foll, В.О. Kolbesen. *Appl. Phys.*, **8**, 319 (1975).
- [4] В.Г. Мокеров, С.Н. Никифорова-Денисова, Е.Н. Овчаренко, В.П. Панасюк, В.И. Смирнов, Ю.А. Тимошенко, И.П. Чернов. *Микроэлектроника*, **15**, 36 (1986).
- [6] А.Ф. Муратов. *Ядерно-физические методы контроля полупроводниковых материалов и металлов* (Ташкент, 1984) с. 115.
- [7] Н.В. Румак. *Система кремний–диоксид кремния в МОП структурах* (Минск, 1986).
- [8] R.N. Hall. *Phys. Rev.*, **87**, 387 (1952).
- [9] W. Shockley, W. Read. *Phys. Rev.*, **87**, 835 (1952).
- [10] Г. Матаре. *Электроника дефектов в полупроводниках* (М., 1974).
- [11] S.R. Dhariwal, D.R. Mehrotra. *Sol. St. Commun.*, **67**, 1007 (1988).

[12] C. Junichi. In: *Defects and Prop. Semicond.: Def. Eng. Symp. Qual. Semicond.* (Tokyo, 1987) p. 143.

[13] I.I. Kolkovskii, P.F. Lugakov, V.V. Shusha. *Phys. St. Sol. (a)*, **127**, 103 (1991).

Редактор В.В.Чалдышев

## Recombination of charge carriers in dislocation-free silicon containing as-grown microdefects of various types

L.A. Kazakevich, P.F. Lugakov\*

A.N.Sevchenko Scientific Research Institute of Applied Physics Problems, 220064 Minsk, Belarus

\* Belorussian Agrarian Technical State University, 220608 Minsk, Belarus

**Abstract** The temperature and injection dependences of the charge-carrier lifetime in dislocation-free *n*-Si has been analysed. This allows one to consider the recombination activity of microdefects of various types. Parameters of the main recombination centres with microdefects of *A*- and *B*-types were found.