

$CdS_{1-x}Te_x$  локализация экситонов происходит на точечных дефектах и, вероятно, флуктуациях состава.

Авторы выражают благодарность Е. А. Салькову за полезное обсуждение результатов.

#### Список литературы

- [1] Сальков Е. А. // Основы полупроводниковой фотоэлектроники. Киев, 1988. 278 с.
- [2] Lay K. Y., Neff H., Bachman K. J. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 92. N 2. P. 567—571.
- [3] Goede O., Heimbrodtt W. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 11. N 1. P. 175—181.
- [4] Goede O., Heimbrodtt W., Muller R. // Phys. St. Sol. (b). 1981. V. 105. N 2. P. 543—550.
- [5] Витриховский Н. И., Кишень А. А., Пляцко Г. В., Франив О. В. // УФЖ. 1978. Т. 23. В. 3. С. 464—469.
- [6] Булах Б. М., Друзь Б. Л., Евтухов Ю. Н. // Тез. докл. VII Всес. конф. по росту кристаллов. М., 1988. Т. 1. С. 290—291.
- [7] Goede O., John L., Hennig D. // Phys. St. Sol. (b). 1978. V. 89. N 2. P. K183—K186.
- [8] Витриховский Н. И., Кишень А. А., Мыхальский О. В., Пляцко Г. В. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 6. С. 1193—1195.
- [9] Tai H., Nakashima S., Hori S. // Phys. St. Sol. (a). 1975. V. 30. N 2. P. K115—K119.
- [10] Маслов А. Ю., Суслина Л. Г. // ФТТ. 1982. Т. 24. В. 11. С. 3394—3400.

Институт полупроводников АН УССР  
Киев

Получено 21.08.1989  
Принято к печати 28.09.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ К-ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е.

К-центры характеризуются значительной скоростью введения в кремний при его облучении. Однако механизм их образования по настоящее время остается неясным. В данной работе приводятся экспериментальные результаты и расчеты, направленные на обоснование выбора модели образования К-центров в р-кремнии, облученном быстрыми электронами.

Образцы для исследования из КДБ-10 размерами  $0.3 \times 2 \times 5$  мм имеют слои из  $p^+$  и  $n^+$ , нанесенные на плоские грани с противоположных сторон методом ионного легирования бором и фосфором. Облучение проводилось на ускорителе типа РТЭ-1В. Доза варьировалась в пределах  $6 \cdot 10^{14} - 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Концентрация К-центров измерялись по методу фотоемкости [1, 2].

Заметим, во-первых, что, согласно [2], скорость введения К-центров зависит от интенсивности по квадратичному закону.

На рисунке представлена зависимость концентрации К-центров от дозы облучения при двух разных значениях интенсивности. Нетривиальный характер зависимостей на рисунке состоит в том, что при большей интенсивности облучения насыщение концентрации достигается при меньших значениях дозы облучения. Два указанных факта используются в данной работе для обоснования модели образования К-центров.

В работах [3-5] предложены и обсуждаются следующие реакции образования К-центров: 1) захват вакансии комплексом  $C_2O_2$ , 2) захват междоузельного углерода А-центром, 3) захват междоузельного углерода комплексом  $V_2O$ . Здесь  $C_2$  — углерод в узле,  $O_2$  — кислород в междоузлии,  $V_2$  — дивакансия,  $V_2O$  — комплекс дивакансия—кислород. Поскольку скорость введения К-центров находится в квадратичной зависимости от интенсивности облучения, то, по нашему мнению, предпочтительна реакция 3. В облученном кремнии КДБ-10 реализуются К-центры в нейтральном зарядовом состоянии, следовательно,

возникает необходимость учета зарядовых состояний компонентов реакций. В этом случае реакция 1 должна быть записана в виде

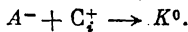


где  $V^-$  — отрицательно заряженная вакансия. При этом за счет захвата неравновесных носителей заряда (НЗ), генерированных быстрыми электронами, интенсивность потока которых равна  $G$ , концентрация  $V^- \sim G^2$ . Для получения экспериментально наблюдаемой зависимости должно быть  $[CO]^+ \sim G$ , т. е. концентрация положительно заряженных комплексов углерод—кислород должна возрастать с ростом интенсивности облучения. Рассмотрение электронно-дырочного равновесия при перезарядке этого комплекса дает

$$[C_sO_i]^+ = \frac{S_p(p_0 + x_p G)}{S_n(n_0 + x_n G)} [C_sO_i]^0 \approx \frac{S_p p_0}{S_n(n_0 + x_n G)} [C_sO_i]^0, \quad (2)$$

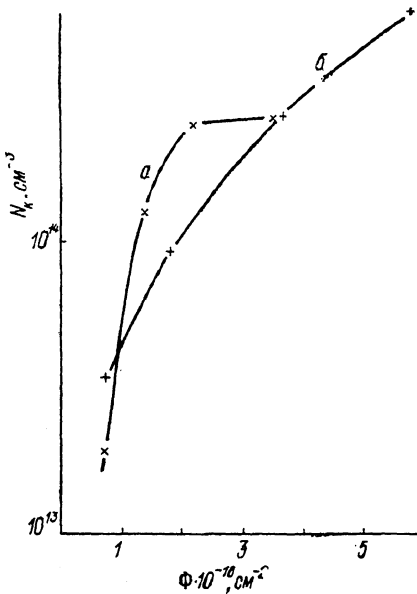
где  $S_p, S_n$  — сечения захвата дырок комплексом  $[C_sO_i]^0$  и электронов комплексом  $[C_sO_i]^+$ ;  $p_0, n_0$  — исходные концентрации НЗ;  $x_p G, x_n G$  — концентрации избыточных НЗ. Таким образом, концентрация положительно заряженных комплексов не нарастает, а несколько падает с ростом интенсивности, что говорит не в пользу (1).

При рассмотрении реакций 2 и 3 нужно учесть, что в них, вероятнее всего, участвует положительно заряженный междуузельный углерод  $C_i^+$  с высокой подвижностью (энергия миграции 0.8 эВ [6]), а не нейтральный (энергия миграции 3 эВ [7]). Для концентрации  $C_i^+$  справедливо соотношение, аналогичное (2), т. е. на начальном участке накопления радиационных дефектов (РД) концентрация  $C_i^+$  либо падает с интенсивностью облучения, либо слабо зависит от нее (если  $p_0 + x_p G \approx n_0 + x_n G$ ). В этом случае реакцию 2 следует записывать в виде



Зависимость концентрации  $K$ -центров от дозы облучения быстрыми электронами.

Интенсивность потока электронов,  $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ :  $a - 1.4 \times 10^{14}$ ,  $b - 6 \cdot 10^{13}$ .



В соответствии с результатами [8] концентрация  $A \sim G$  при постоянной дозе облучения, и скорость введения  $K$ -центров не может более, чем линейно, возрастать с ростом интенсивности облучения.

Очевидно, что реакцию 3 можно записать в виде



откуда следует возможность квадратичного роста скорости введения  $K^0$ , поскольку  $[V_2O]^- \sim G^2$ .

Обратимся к рисунку. На первый взгляд, зависимость кинетики накопления  $K$ -центров, приводимая здесь, аномальна. Такую зависимость можно объяснить с учетом (3). По мере накопления РД происходят компенсация кремния и уменьшение времени жизни неосновных НЗ. В пределе для концентрации подвижного компонента (3) будет справедливо соотношение

$$C_i^+ = \frac{S_p}{S_n} C_i^0,$$

и, поскольку  $S_p$  — сечение захвата дырки нейтральным центром  $C_i^0$  меньше (в нашей типичной ситуации нерезонансного захвата), чем  $S_n$  — сечение захвата

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» $\gamma$ -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  $\gamma$ -установки  $^{60}\text{Co}$  с мощностью дозы в рабочем объеме  $4.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; температура термо-