

## ИНЖЕКЦИОННАЯ, ЭЛЕКТРОПОЛЕВАЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕСТРОЙКА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В *p*-КРЕМНИИ

Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П.

Исследованы перестройка и стабильность радиационных дефектов с энергетическими уровнями  $E_c - 0.14$ ,  $E_v + 0.29$ ,  $E_v + 0.35$  и  $E_v + 0.38$  эВ в *p*-кремнии при инжекционных, электрополевых и термических воздействиях. Показано, что диссоциация инжекционно-отжигающегося дефекта с энергетическим уровнем  $E_c - 0.14$  эВ, образующегося при высокой скорости генерации первичных дефектов, приводит к увеличению концентрации междоузельного углерода ( $E_v - 0.29$  эВ), который при термическом отжиге идет на образование комплексов  $C_i - O_i$  или  $C_i - O_v$  с уровнем  $E_v + 0.38$  эВ. Последний при дальнейшем нагревании изменяет конфигурацию и дает энергетический уровень  $E_v + 0.35$  эВ. Предполагается, что инжекционно-отжигающийся дефект является двойным или расщепленным междоузлем кремния либо комплексом  $Si_i - C_i$ .

В работе [1] проанализирован энергетический спектр радиационных дефектов (РД), вводимых альфа-облучением в *p*-кремний при 300 К в отсутствие электрического поля. В [2, 3] было установлено, что при облучении альфа-частицами *p*-кремния вводится инжекционно-отжигающийся дефект с энергетическим уровнем  $E_c - 0.14$  эВ ( $H5$ ), эффективность введения которого в сильном электрическом поле ( $E > 10^3$  В/см) зависит от температуры облучения. При 300 К в поле дефект  $H5$  не вводится, а при 78 К эффективность его введения в поле и вне его одинакова. Инжекция электронов при указанных температурах приводит к исчезновению дефекта  $H5$ . Отмечалось, что дефект  $H5$  вводится только при облучении альфа-частицами, когда имеется высокая скорость генерации первичных РД ( $\sim 10^5$  см $^{-1}$ ), и предполагалось, что в его состав входят междоузельные атомы. В работах [4, 5] на основании ЭПР исследований было показано, что высокая скорость генерации первичных РД может приводить к образованию двойного либо расщепленного междоузельного комплекса.

Цель данной работы — установление закономерностей перестроек в энергетическом спектре РД ( $E_c - 0.14$ ,  $E_v + 0.29$ ,  $E_v + 0.35$ ,  $E_v + 0.38$  эВ) и эффективности их образования в *p*-кремнии, облученном альфа-частицами, при инжекционных, электрополевых и термических воздействиях.

Измерения проводились на  $n^+$ -*p*-переходах, изготовленных диффузией фосфора при 1100 °С на глубину 3 мкм в пластины тянутого *p*-кремния, легированного бором ( $\rho = 10$  Ом·см). Образцы облучались со стороны  $n^+$ -области альфа-частицами изотопного источника  $^{210}\text{Po}$  ( $E_\alpha = 4.7$  МэВ,  $I = (3 \div 5) \cdot 10^7$  см $^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\Phi = 7 \cdot 10^{10}$  см $^{-3}$ ), длина пробега которых в кремнии составляет  $\sim 20$  мкм, а скорость генерации первичных смещений  $\sim 10^5$  см $^{-1}$ . Облучение проводилось в двух режимах: без смещения (без поля) и при напряжении обратного смещения 15 В (в поле) в интервале температур 78—400 К.

Положение энергетических уровней РД, их концентрация и сечения захвата основных носителей заряда определялись методом термоэмиссионной емкостной спектроскопии при напряжении обратного смещения 7 В. Такое напряжение обеспечивало зондирование базовой области, в которой при облучении  $E > 10^3$  В/см. Так как дефект  $H5$  при инжекции отжигается, его концентрация и энергетическое положение рассчитывались из концентрационных профилей электрически активных центров [2].

Установлено, что эффективность введения дефекта с энергетическим уровнем  $E_c + 0.29$  эВ ( $H2$ ) в поле и без него одинакова, а с  $E_c + 0.38$  эВ ( $H6$ ) — в поле выше (рис. 1). Инжекция электронов после облучения без поля приводит к двукратному увеличению концентрации дефекта  $H2$ , а концентрация дефекта  $H6$  не изменяется. Инжекция электронов после облучения в поле не вызывает изменения их концентрации.

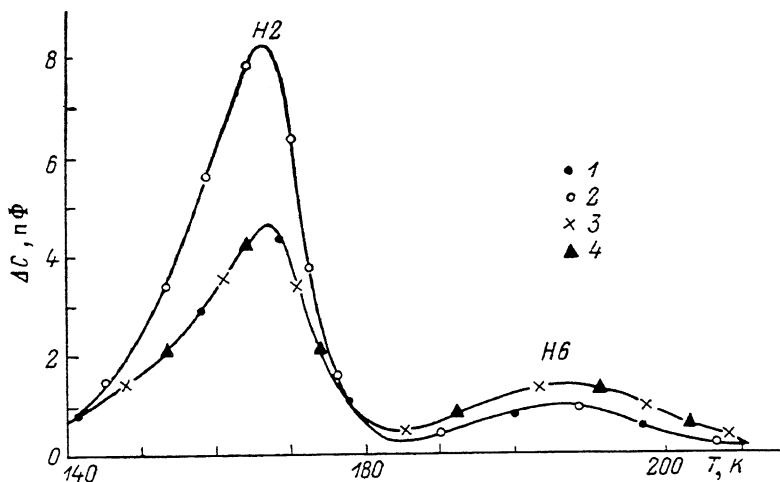


Рис. 1. Энергетический спектр дефектов  $H2$ ,  $H6$  в  $p$ -кремнии (временное окно 2 мс) после облучения без поля (1) и в поле (3) при 300 К и последующей инжекции электронов ( $J = 0.5$  А/см<sup>2</sup>) (2, 4 соответственно).

В случае облучения при 78 К в поле и без поля дефекты  $H2$  и  $H6$  не вводятся. Облучение при 78 К и последующая инжекция при той же температуре приводят к появлению этих дефектов, однако их концентрация существенно меньше, чем в случае облучения при 300 К.

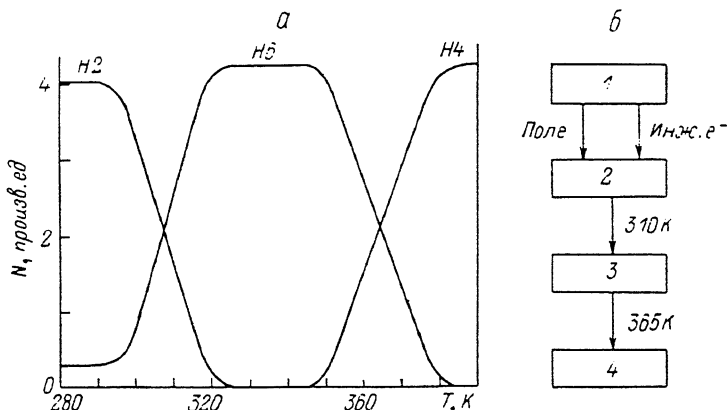


Рис. 2. Изохронный отжиг дефектов  $H2$ ,  $H6$ ,  $H4$  после облучения без поля и инжекции электронов (а) и схема перестройки дефектов  $H5$ ,  $H2$ ,  $H6$ ,  $H4$  (б).

1 —  $E_c - 0.14$ , 2 —  $E_c + 0.29$ , 3 —  $E_c + 0.38$ , 4 —  $E_c + 0.35$  эВ.

На рис. 2, а представлены результаты исследования изохронного отжига дефектов  $H2$  и  $H6$  в образцах, облученных при 290 К без поля и последующей инжекцией электронов. Видно, что отжиг дефекта  $H2$  в интервале температур 290—320 К приводит к возрастанию концентрации дефекта  $H6$ . При дальнейшем увеличении температуры дефект  $H6$  исчезает и появляется дефект с энергетическим уровнем  $E_c + 0.35$  эВ ( $H4$ ). Заметим, что дефект  $H2$  практически полностью перестраивается в  $H6$ , а последний — в  $H4$ , устойчивый до 580 К [1].

Исследование влияния температуры на эффективность образования инжекционно-отжигающегося дефекта  $H5$  показало, что в поле дефект перестает эф-

эффективно вводится при  $T > 200$  К, в то время как без поля — при  $T > 300$  К (рис. 3). В случае облучения без поля при 78 К скорость его введения практически такая же, как и при 300 К. Было также установлено, что после облучения в интервале температур 78—300 К без поля наложение поля при 300 К приводит к уменьшению концентрации дефекта  $H5$  и возрастанию  $H2$ . Наложение поля при 78 К не приводит к изменению его концентрации.

Таким образом, из анализа влияния электрического поля и инжекции электронов на дефекты  $H5$ ,  $H2$  и  $H6$  видно, что исчезновение дефекта  $H5$  приводит к увеличению концентрации дефекта  $H2$ . В дальнейшем при отжиге дефект  $H2$  вначале перестраивается в  $H6$  (290—320 К), а затем — в  $H4$  (350—380 К) (рис. 2, б).

В процессе термического отжига в [6] наблюдали перестройку  $H2$  в  $H6$ , а в [1] —  $H2$  в  $H4$ . Заметим, что, согласно рис. 2, можно наблюдать перестройку

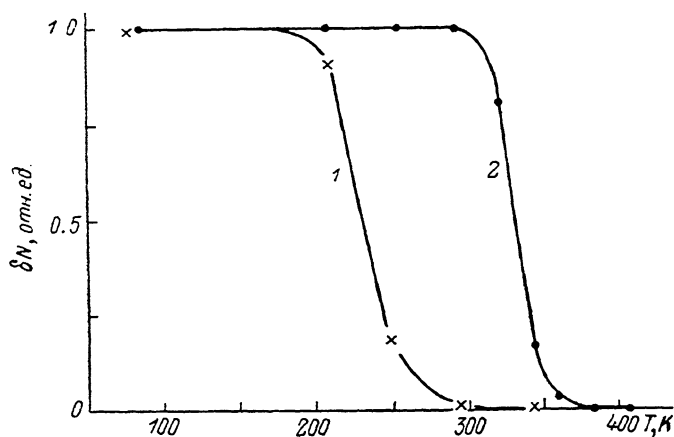


Рис. 3. Относительное изменение скорости введения дефектов  $H5$  при облучении в поле (1) и без поля (2) в зависимости от температуры облучения ( $T_{\text{взм}}=300$  К).

$H2$  сразу в  $H4$ , если вести отжиг с большим температурным шагом, что и имело место в работе [1].

Относительно природы дефекта  $H2$  существует предположение, что это междуузельный углерод [7, 8]. Относительно природы дефектов  $H6$  и  $H4$  высказывается несколько точек зрения:  $C-O-V$  (W) [7, 9],  $C_i-C_i$  [8],  $C_i-Si_i-C_i$  [10] и  $C-O$  [1]. В [7] было показано, что эффективность образования дефекта  $H4$  падает с уменьшением концентрации кислорода и углерода. Если считать, что дефект  $H2$  — междуузельный углерод, то в интервале температур 290—320 К он становится подвижным и идет на образование комплексов  $C_i-O_i$  или  $C_i-O_i$  с энергетическим уровнем  $E_c+0.38$  эВ ( $H6$ ). В интервале температур 350—390 К этот комплекс изменяет конфигурацию и дает энергетический уровень  $E_c+0.35$  эВ ( $H4$ ), что и подтверждается равенством суммы их концентраций во всем интервале перестройки (рис. 2). Однако если проводить отжиг без предварительной инжекции электронов после облучения при 300 К без поля, то концентрация дефекта  $H4$  равна сумме первоначальных концентраций дефектов  $H2$ ,  $H5$  и  $H6$ . В случае облучения в поле концентрация дефекта  $H4$ , образующегося при отжиге, равна сумме первоначальных концентраций дефектов  $H2$  и  $H6$ . Облучение же при 380 К без поля, когда дефект  $H5$  не наблюдается (как и при облучении при 300 К в поле), приводит к введению дефекта  $H4$  в концентрации, более высокой, чем в предыдущем случае. Таким образом, дефект  $H5$  при облучении в поле при 300 К не образуется и его компоненты не идут на образование дефекта  $H2$ .

С учетом того, что эффективность образования дефекта  $H5$  с понижением температуры облучения не падает и он образуется только при высокой скорости генерации первичных РД, можно предположить, что дефект  $H5$  вводится прямым путем и является либо двойным или расщепленным междуузельем кремния,

либо расщепленным междоузельным комплексом  $Si_i-C_i$ . Действительно, как отмечалось в [5], центры, отвечающие модели двойного либо расщепленного междоузлия, возникают только тогда, когда имеет место высокая скорость генерации первичных РД, причем в состав указанных центров могут входить и примесные атомы.

В настоящее время в литературе используются модели конфигурационных перестроек дефектов в полупроводниках при инжекционно-термических воздействиях. Отмечается активная роль примесей, в частности углерода, в формировании метастабильных комплексов в кремнии [11, 12]. В связи с этим можно предположить, что наложение электрического поля при 300 К после облучения без поля приводит к изменению конфигурации дефекта  $H5$  и его распаду. Освободившиеся компоненты дефекта  $H5$  вытесняют углерод замещения с образованием дефектов  $H2$  и  $H6$ , если он — двойное или расщепленное междоузлие кремния. Если дефект  $H5$  является комплексом  $Si_i-C_i$ , то одна из его компонент идет непосредственно на образование дефектов  $H2$ ,  $H6$ . При наложении поля при 78 К его энергии уже недостаточно, чтобы вызвать распад междоузельного комплекса. Инжекция электронов после облучения без поля вызывает изменение зарядового состояния междоузельного комплекса и его распад, о чем может свидетельствовать отсутствие данного центра в  $n$ -кремнии. В случае облучения в поле при  $T > 200$  К последнее, вероятнее всего, препятствует образованию указанных комплексов.

Таким образом, при высокой скорости генерации первичных РД в  $p$ -кремнии образуется инжекционно-отжигающийся дефект с энергетическим уровнем  $E_c - 0.14$  эВ, который может быть двойным или расщепленным междоузельным комплексом  $Si_i-C_i$ . Инжекция электронов или выдержка в поле приводит к распаду двойного междоузлия и появлению междоузельного углерода, дающего энергетический уровень  $E_c + 0.29$  эВ, который при термическом отжиге идет на образование комплекса  $C_i-O_i$  или  $C_i-O$  с уровнем  $E_c - 0.38$  эВ. Последний при дальнейшем нагревании изменяет конфигурацию и дает энергетический уровень  $E_c + 0.35$  эВ. В данной конфигурации этот комплекс устойчив до 580 К. Инжекционно-отжигающийся дефект перестает эффективно вводиться в электрическое поле, если температура облучения  $T > 200$  К.

#### Список литературы

- [1] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1055—1059.
- [2] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 3. В. 5. С. 309—311.
- [3] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 740—742.
- [4] Lee Y. H., Cerasimenko N. N., Corbett J. W. // Phys. Rev. B. 1976. V. 14. N 10. P. 4506—4520.
- [5] Герасименко Н. Н. // Тр. II Советско-Американского семинара по полной имплантации. Новосибирск, 1979. С. 351—370.
- [6] Londos C. A. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 92. N 2. P. 609—614.
- [7] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [8] Kimerling L. C. // Int. Conf. «Radiation Effects on Semiconductors-1976». Conf. Ser. N 31. London—Bristol, 1977. P. 221—230.
- [9] Mooney P. M., Cheng L. J., Sult M., Gerson J. D., Corbett L. W. // Phys. Rev. B. 1977. V 15. N 8. P. 3836—3843.
- [10] Bains S. K., Banbury P. C. // Sol. St. Phys. 1985. V. 18. N 1. P. L109—L116.
- [11] Chantre A., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48 (15). N 10. P. 1000—1002.
- [12] Asom M. T., Benton J. L., Sauer R., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51 (4). N 3. P. 256—258.

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

Получена 8.06.1988  
Принята к печати 15.05.1989