

05.2; 06.2

© 1991

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОБСТВЕННЫХ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ В КРЕМНИИ

Х.А. Абдуллин, Б.Н. Мукашев,  
М.Ф. Тамендаров, Т.Б. Ташенов

Изучены свойства собственных дефектов междоузельного типа в кремнии. Предложена модель центра  $Si_i$ , естественно объясняющая наблюдающиеся свойства.

Собственные междоузельные атомы являются первичными радиационными дефектами, поэтому сведения об их электронной структуре и свойствах представляют большой интерес. Однако, несмотря на многочисленные исследования радиационных дефектов в кремнии, собственные междоузельные атомы практически не изучены. Имеются лишь косвенные данные [1], показывающие, что центры  $Si_i$  подвижны в условиях электронного облучения даже при гелиевых температурах. В данной работе представлены результаты, относящиеся к свойствам собственных междоузельных атомов, и предложена модель электронной структуры центров.

При изучении методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) облученного  $\alpha$ -частицами кремния p-типа проводимости был обнаружен новый центр  $E2 = E_C - (0.39 \pm 0.02)$  эВ, не наблюдающийся в образцах p-типа. Исследования выявили ряд нетривиальных эффектов, связанных с центром E2.

1. В спектрах НЕСГУ при оптическом возбуждении (рис. 1, а) обнаруживается помимо центра E2 уровень  $E1 = E_C - (0.25 \pm 0.05)$  эВ. Оба центра одновременно отжигаются при инжекции неосновных носителей и могут соответствовать различным зарядовым состояниям одного и того же дефекта.

2. Центр E2 подвержен интенсивному инжекционному отжигу с образованием междоузельных атомов углерода  $C_i$ , а в образцах, легированных алюминием, отжиг идет и с образованием центров  $Al_i$ , как показано на рис. 2, б (спектры записывались без инжекции неосновных носителей, поэтому полоса E2 не регистрировалась). Заметим, что концентрация примеси Al в образце была примерно в 20 раз меньше концентрации углерода, а амплитуда полосы  $Al_i$  — в пять раз больше амплитуды полосы  $C_i$ . Поэтому сечение взаимодействия дефекта E2 с узловыми атомами  $Al_i^-$  должно быть примерно в сто раз больше, чем с атомами  $C_3^0$ .

3. Скорость инжекционного отжига центра E2 не зависит, либо очень слабо зависит от температуры в интервале 77–300 К.

4. Центр E2 нельзя связать с какой-либо примесью, поскольку он наблюдается в широком наборе образцов, легированных В, Al, Ga, выращенных зонной плавкой и методом Чохральского.

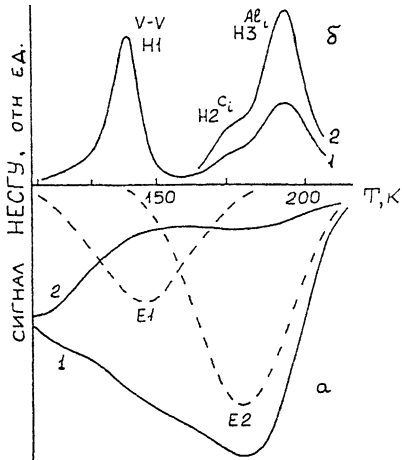


Рис. 1. а) Спектры НЕСГУ в  $p$ -Si, облученном  $\alpha$ -частицами с энергией  $\sim 4.7$  МэВ, записанные при оптическом возбуждении: 1 - сразу после облучения при температуре  $\sim 0$  °С, 2 - после инжекционного отжига, пунктир - разность кривых 1 и 2. б) Спектры НЕСГУ в образце  $p$ -Si:Al: 1 - сразу после облучения, 2 - после инжекционного отжига.

5. Уровень E2 подвержен интенсивному оптическому отжигу при засветке образца светом из собственной области спектра (рис. 2). Оптического отжига не происходит при освещении через германиевый фильтр либо при приложении к образцу обратного смещения. Скорость отжига, измеренная при температурах 85 и 175 К, была одинаковой, что говорит в пользу безактивационного процесса.

6. В процессе низкотемпературного оптического отжига центра E2 наблюдается появление уровня вакансии  $H4 = E_V + 0.13$  эВ (рис. 2), при этом концентрация дивакансий падает.

7. При нулевом напряжении на образце центры E2 не вводятся при температуре облучения  $\gtrsim 350$  К, а с приложенным обратным смещением - выше 250 К. Дефекты E2 термически стабильны до  $\sim 350$ К.

Для объяснения совокупности экспериментальных данных предлагается модель центра собственного междоузельного атома, имеющего три различных зарядовых состояния:  $Si_i^{++} (3s^2)$ ,  $Si_i^+ (3s^2 3p)$  и  $Si_i^0 (3s^2 3p^2)$ , которым соответствуют уровни  $E2 = Si_i (+/++)$  и  $E1 = Si_i (0/+)$ .

Для объяснения эффекта интенсивного безактивационного инжекционного и оптического отжига необходимо, чтобы состояние  $Si_i^{++}$  было седловой точкой для состояния  $Si_i^+$ , и наоборот [2]. В этом случае при инжекции либо освещении образца собственным светом генерируются неосновные носители и происходит захват электронов

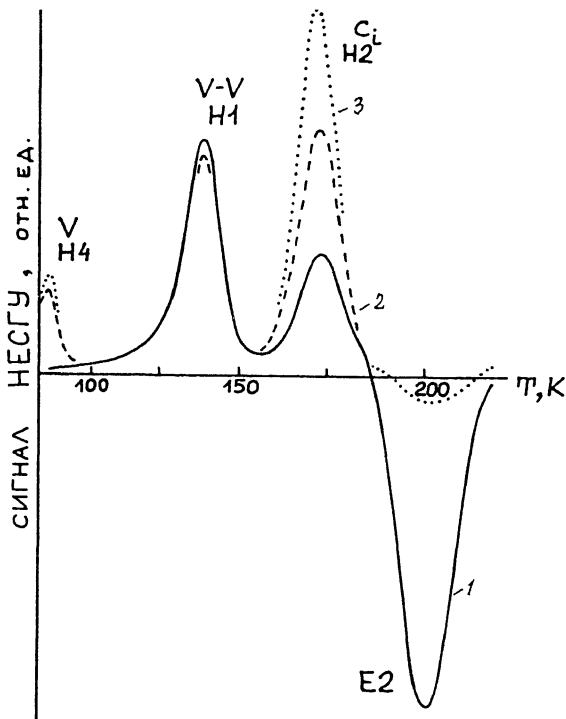


Рис. 2. Спектры НЕСГУ образца  $p$ -Si, облученного  $\alpha$ -частицами, записанные при малом уровне инжекции. 1 - сразу после облучения, 2 - оптический отжиг при 175 K в течении 5 с, поток  $\sim 10^{18}$  фотон/см<sup>2</sup>·с, 3 - отжиг 20 с в тех же условиях.

на дважды положительно заряженный центр  $Si_i^{++}$ , что переводит центр в нестабильное в образце  $p$ -типа состояние  $Si_i^+$  с последующей релаксацией. В процессе такой циклической перезарядки идет миграция атомов  $Si_i$  к центрам захвата: дивакансиям и примесным атомам. Поскольку центр заряжен положительно, он будет слабо взаимодействовать с дивакансиями (большая часть которых находится в положительно заряженном состоянии) с образованием изолированной вакансии, более интенсивно с нейтральными центрами (атомы  $C_s^0$ ) и наиболее интенсивно с отрицательно заряженными центрами (атомы  $Al_s^-$ ). Приложение к образцу обратного смещения во время оптического отжига приводит к резкому уменьшению концентрации неравновесных носителей в области объемного заряда, поэтому в этих условиях центр E2 не отжигается. Получает свое объяснение и температурная зависимость скорости введения центров E2 при  $\alpha$ -облучении. В условиях приложенного обратного смещения и облучения  $\alpha$ -частицами значительная часть уровней E2 заполнена электронами. Тепловая генерация с уровня  $E2 = E_c - 0.39$  эВ

в зону проводимости начинается при  $\sim 200$  К. Это вызывает процесс перезарядки уровня и миграцию атомов  $Si_i$ . Без приложения к образцу смещения для перезарядки центра E2 требуется энергия, примерно равная  $E_g - E_2 \sim 0.6$  эВ, чему соответствует температура 300–350 К. Поэтому при таких температурах центр отжигается термически и не вводится при облучении. Центр E2 не вводится также при облучении протонами и электронами, поскольку в этом случае на один дефект смещения создается значительно большее число электронно-дырочных пар, вызывающих интенсивную перезарядку и отжиг центра E2 даже при низких температурах облучения. Таким образом, модель позволяет объяснить все имеющиеся экспериментальные данные.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] W a t k i n s G.D. In: Radiation Damage in Semiconductors. Dunod. Paris. 1964. P. 97-113.
- [2] К о р б е т т Дж., Б у р г у э н Ж. В кн.: Точечные дефекты в твердых телах. М.: Мир, 1979. С. 9-162.

Поступило в Редакцию  
15 июля 1991 г.