

ГЛУБОКИЕ ЛОВУШКИ В *n*-GaAs, ОБЛУЧЕННОМ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

В. Н. Брудный, Н. Г. Колин, А. И. Потапов

Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете
им. В. Д. Кузнецова, 634050, Томск, Россия
(Получена 24.03.1992. Принята к печати 14.07.1992)

Методом нестационарной емкости спектроскопии глубоких уровней в эпитаксиальном *n*-GaAs [$n = (2 - 3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$], облученном быстрыми нейтронами (дозы $D \leq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), найдены ловушки *N1* (с энергией $E_a \approx 0.18 \text{ эВ}$), *N2* ($E_a \approx 0.36 \text{ эВ}$) и *N4*, аналогичные дефектам *E2*, *E3* и *E5* в GaAs, облученном электронами, и широкая *U*-полоса (со средней энергией $\bar{E}_a \approx 0.66 \text{ эВ}$), связанная с дефектами в разупорядоченной области. Исследована перестройка *U*-полосы при отжиге до 510 °С. Высказано предположение о том, что «заглубление» *U*-полосы с ростом температуры отжига обусловлено формированием дефектных кластеров за счет перестройки и отжига разупорядоченной области.

К настоящему времени выполнен большой объем экспериментальных исследований GaAs, облученного быстрыми нейтронами, обобщенный в значительной мере в работе [1]. Следует, однако, отметить ограниченное число публикаций, посвященных изучению радиационных дефектов (РД) в таком материале с использованием метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) [2-4].

В представленной работе исследовались глубокие ловушки в эпитаксиальных слоях *n*-GaAs, полученных хлоридным методом и облученных быстрыми нейтронами. Для измерения спектров НЕСГУ использованы структуры Ti/*n*-GaAs/*n*⁺-GaAs [$n \approx (2 \div 3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n^+ \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$]. Облучение быстрыми нейтронами (с энергией $E \leq 0.3 \text{ МэВ}$) проводилось на периферийном канале реактора типа ВВР, при плотности нейтронов $\approx 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, кадмиевом числе 10 и температуре $T_r \leq 70 \text{ °С}$.

В спектрах исходных образцов *n*-GaAs наблюдались два типа ловушек — *X1* ($\approx 280 \text{ К}$) и *X2* ($\approx 390 \text{ К}$) в концентрациях $\leq 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $\leq 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ соответственно с энергиями термической эмиссии электронов (E_a) около 0.5 и 0.77 эВ. Ловушка *X2* является известным *EL2*-центром, приписываемым сложному комплексу, часть атомной структуры которого содержит дефект As_{Ga} [5]. *X1*-дефект также является ростовым дефектом в GaAs, обозначаемым как центр *EL3*. Изменение спектров НЕСГУ при последовательной бомбардировке нейтронами представлено на рис. 1. При малых потоках нейтронов наблюдается возрастание амплитуды пика *X1* и появление пиков *N1* ($E_a \approx 0.18 \text{ эВ}$), *N2* ($E_a \approx 0.36 \text{ эВ}$), а также широкой полосы *N3* со средней величиной энергии $\bar{E}_a \approx 0.66 \text{ эВ}$. Кроме того, при дозах $D = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в спектрах НЕСГУ отмечена ступенька *N4* при $T \approx 365 \text{ К}$, близкая по своему положению к пику *E5* в GaAs, облученном электронами [6]. Скорости введения центров *N1*, *N2* и *N3* составляют приблизительно 2, 0.8 и 0.6 см^{-1} соответственно. Характеристики пиков *N1*, *N2* и их поведение при отжиге (рис. 2, 3) позволяют приписать их известным ловушкам *E2* и *E3*, наблюдаемым в GaAs, облученном электронами и γ -квантами. Значительные концентрации ловушек *E2* и *E3*

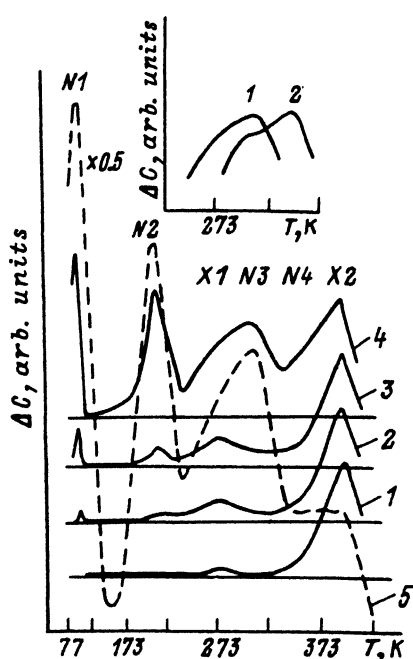


Рис. 1. Спектры НЕСГУ n -GaAs, $n = (2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, облученного потоками быстрых нейтронов. Дозы $D, \text{ см}^{-2}$: 1 - 10^{11} , 2 - 10^{12} , 3 - 10^{13} , 4 - 10^{14} , 5 - $3 \cdot 10^{14}$. Постоянная времени $\tau, \text{ с}$: 10^{-4} - для области температур (77-125) К, $5 \cdot 10^{-3}$ - для остальной температурной области. На вставке - U -полоса для $D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $\tau, \text{ с}$: 1 - $5 \cdot 10^{-3}$, 2 - $2.5 \cdot 10^{-4}$.

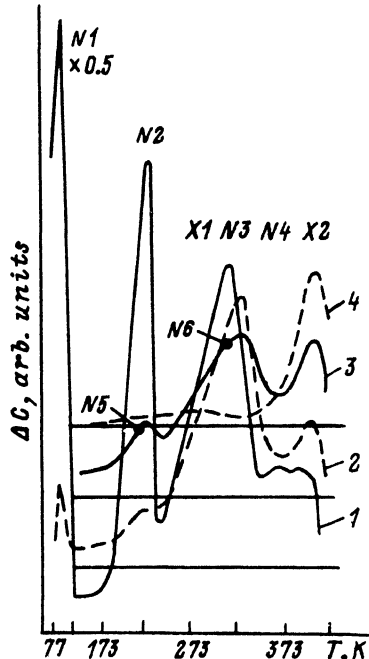


Рис. 2. Спектры НЕСГУ исходного n -GaAs (4) и облученного быстрыми нейтронами дозой $D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ после изохронного отжига в течение 10 мин при различных температурах (1-3). $T_a, \text{ }^\circ\text{C}$: 1 - 20, 2 - 290, 3 - 390.

обусловлены, по-видимому, «загрязнением» нейтронных пучков γ -квантами. Пики $N1$ и $N2$ исчезают вблизи температуры отжига $T_a = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует первой стадии восстановления электрофизических свойств облученного нейтронами GaAs (рис. 3). Следует отметить, что пик $N4$ также исчезает при $T_a \leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2), что характерно для центра $E5$ в образцах, полученных электронами [6].

Особенность нейтронного облучения - наличие в спектрах НЕСГУ широкой полосы в области температур (235-335) К (рис. 1). Полоса несимметрична по форме, имеет хвост в области низких температур и в литературе получила название U -полосы [3]. Несимметрия полосы может быть обусловлена особенностями эмиссии электронов и соответствующих дефектов вследствие проявления электрополевых эффектов. Приложение поля напряженностью $\mathcal{E} < 10^5 \text{ В/см}$ не изменяло характеристик эмиссии электронов для U -полосы, что указывает либо на отсутствие таких эффектов, либо на большую величину локальных электрических полей (\mathcal{E}) вблизи разупорядоченной области (РО). Можно оценить величину \mathcal{E} , если предположить, что уровень Ферми (F) в РО совпадает с предельным положением F в облученном GaAs ($E_{\text{lim}} \approx E_v + 0.6 \text{ эВ}$), а размер РО оценивается в $(100-200) \text{ \AA}$ [1], что дает $\mathcal{E}_r > 10^5 \text{ В/см}$. Однако более вероятно, что форма U -полосы обусловлена ее сложной структурой. Данные рис. 1 (вставка) показывают, что имеется по крайней мере два пика в области данных температур, один из которых совпадает с центром $X1$.

Высказаны две гипотезы о причине появления U -полосы: 1) наложение нескольких пиков от различных центров в РО; 2) искажение полосы радиационно-

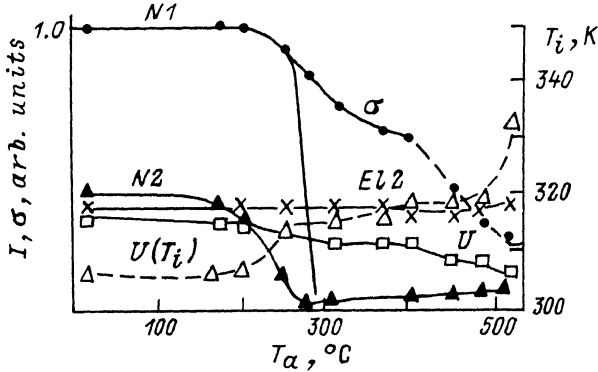


Рис. 3. Изохронный отжиг n -GaAs, облученного быстрыми нейтронами. I — интенсивность пиков $N1$, $N2$, $EL2$ и U -полосы в n -GaAs, облученном при $D = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. σ — электропроводность в n -GaAs ($n \approx 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), облученном при $D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. $U(T_i)$ — изменение температурного положения T_i максимума U -полосы при отжиге.

го центра $EL2$ вследствие его взаимодействия с более мелким уровнем. Вторая гипотеза основывается на том, что U -полоса при отжиге ($T_a \approx 400\text{--}600^\circ\text{C}$) n -GaAs ($\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$), облученного быстрыми нейтронами ($D \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), смещается в область температурного положения полосы $EL2$ [3]. Однако более поздний анализ многочисленных экспериментальных данных показал, что при облучении вводятся преимущественно изолированные дефекты As_{Ga} , а также комплексы $As_{Ga}-X$, где в качестве X -компоненты могут выступать дефекты типа As_I , V_{Ga} , V_{As} , $V_{Ga}-V_{As}$, т. е. возможно формирование целого семейства дефектов на основе As_{Ga} [5]. В частности, предпринималась попытка связать пик $E4$ в спектрах НЕСГУ облученного GaAs с дефектом типа $As_{Ga}-V_{As}$. Показано при этом, что прямое формирование центра $EL2$ при облучении не происходит. Более того, перестройка U -полосы в полосу $EL2$ после отжига ($>550^\circ\text{C}$) может быть приписана формированию $DL2$ -, а не $EL2$ -дефектов, т. е. даже после отжига до 600°C в GaAs не обнаружено центров $EL2$ радиационного происхождения.

Наши исследования на эпитаксиальном n -GaAs [$n \approx (2\div3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$] выявили, что интенсивность полосы $EL2$ при отжиге облученных образцов ($T_a \leq 600^\circ\text{C}$) не изменяется. U -полоса уменьшается по амплитуде и смещается в высокотемпературную область, то $\approx 306 \text{ K}$ после облучения до $\approx 335 \text{ K}$ после отжига при 510°C (рис. 3). При этом величина E_a возрастает от ≈ 0.66 до ≈ 0.71 эВ. Как следует из рис. 3, имеет место многостадийный отжиг и перестройка U -полосы при температурах вблизи 250 ($400\div450$) и выше 500°C . Первая стадия характеризуется незначительным уменьшением интенсивности U -полосы, ее сдвигом (на $\approx 10 \text{ K}$) в область высоких температур и исчезновением пиков $N1$, $N2$ и $N4$ (рис. 2, 3), приписываемых изолированными дефектами, предположительно $V_{As}-As$ [6]. Первая стадия отжига РД и перестройки спектров НЕСГУ обусловлена рекомбинацией дефектов преимущественно в кристаллической матрице, а также отжигом изолированных дефектов, расположенных в РО. Причем высокая плотность РД в РО будет способствовать образованию вторичных дефектов и тем самым перестройке РО. Действительно, в сильно облученных образцах GaAs из измерений характеристик аннигиляции позитронов [7], а также изменений периода решетки и плотности GaAs [8] обнаружено формирование кластеров дефектов при $T_a \approx 150\text{--}350^\circ\text{C}$. Вторая стадия отжига U -полосы и восстановление электропроводности σ (при $400\text{--}450^\circ\text{C}$) коррелирует с распадом вторичных кластеров [7] и уменьшением S -сигнала в спектре ЭПР,

приписываемого V_{Ga}^2 или кластерам на основе As_{Ga} [5]. Наблюдаемое при этом уменьшение ширины линий квадруплета (Q) приписывается перестройке и отжигу РО в окружении дефекта As_{Ga} [9].

В образцах, отожженных до 440 °С, исследованы характеристики высокотемпературных дефектов $N5$ и $N6$. Полученные параметры центров (энергии E_a и сечения захвата электронов σ_a) соответственно равны: $E_a \approx 0.34$ эВ, $\sigma_a \approx 3.6 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_a \approx 0.71$ эВ, $\sigma_a \approx 9.6 \cdot 10^{-13}$ см², что близко к характеристикам центров $P1$ и $P3$ соответственно, наблюдаемых в GaAs при высокотемпературном электронном облучении [10] или после отжига облученных электронами образцов [6]. В настоящее время не установлено, являются ли P -центры вторичными, т. е. образуемыми при отжиге облученных образцов, или, как предполагают авторы [11], P -центры вводятся при $T_c \leq 20$ °С. Поскольку это, предположительно, сложные центры, то их формирование при нейтронном облучении более вероятно вследствие высокой плотности РД в РО. Оценка скоростей введения $N5$ - и $N6$ -центров (для $T_a \approx 300$ —400 °С) дает 0.05 см⁻¹ и 0.2 см⁻¹ соответственно, что на порядок превышает скорость их введения при электронной бомбардировке [6].

При $T_a > 500$ °С наблюдается третья стадия отжига U -полосы — уменьшение ее интенсивности и дальнейшее смещение полосы в область высоких температур (рис. 3).

Эта стадия характеризуется уменьшением интенсивности Q -сигнала в спектре ЭПР облученного нейтронами GaAs и его полным исчезновением при $T_a \approx 600$ °С [5], в то время как U -полоса все еще присутствует в спектре НЕСГУ. Исследование спектров при этом затруднено, так как при $T_a \geq 550$ °С в структурах формируются термолушшки, в частности мощная ловушка с $E_a \approx 0.5$ эВ, а также ловушки вблизи центров $N1$ и $N2$. Эти данные показывают, что остаточная U -полоса не связана с каким-либо центром, включающим As_{Ga} , что противоречит модельным представлениям авторов [3].

Таким образом, выявлено по крайней мере три стадии отжига и перестройки U -полосы: 1 — вблизи 250 °С, характеризующаяся исчезновением изолированных дефектов $E2$, $E3$, $E5$ и, возможно, $E4$, явно не наблюдаемого в спектре НЕСГУ облученного нейтронами GaAs; 2 — вблизи 450 °С характеризующаяся исчезновением S -сигнала ЭПР и индивидуализацией дефекта As_{Ga} ; 3 — при температурах выше 510 °С, соответствующая началу отжига дефектов As_{Ga} (Q -сигнал в спектре ЭПР). Эти данные показывают, что за перестройку и отжиг U -полосы ответственны несколько процессов, причем «высвобождение» дефектов As_{Ga} происходит преимущественно при $T_a \approx 450$ °С, однако, эти дефекты не являются $EL2$ -центрами. Постоянное смещение U -полосы в область высоких температур с ростом T_a можно связать с отжигом точечных дефектов при низких температурах, перестройкой РО вблизи 450 °С и, возможно, выявлением более сложных дефектов в ядре РО при ее развале, отжигом центров As_{Ga} при $T_a > 500$ °С и формированием сложных дефектных кластеров при более высоких температурах. Следует отметить, что формирование крупных кластеров энергетически выгодно для кристалла, поскольку с увеличением размера кластера его уровень смещается в направлении F_{lim} , так как это способствует понижению электронной энергии дефектного кристалла. Поскольку в GaAs F_{lim} ($\approx E_v + 0.6$ эВ) близок энергетическому уровню $EL2$ -дефекта ($E_c - 0.82$ эВ), то это будет приводить к смещению пика в спектре, связанного с кластером, в область температурного положения полосы $EL2$, что и наблюдается в эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R. Coates, E. W. Mitchell. *Ady. Phys.*, **24**, 594 (1975).
- [2] J. W. Farmer, J. M. Meese. *J. Nucl. Mater.*, **108—109**, 700 (1982).
- [3] G. M. Martin, E. Esteve, P. Langiade, S. Makram-Ebeid. *J. Appl. Phys.*, **56**, 2655 (1984).

- [4] W. Feng-mei, W. Chun, T. Jie, G. Bang-rui. Acta Phys. Sin., 37, 1203 (1988).
- [5] M. O. Manasreh, D. W. Fisher, W. C. Mitchell. Phys. St. Sol. (b), 154, 11 (1989).
- [6] D. Pons, J. C. Bourgoin, J. Phys. C: Sol. St. Phys., 57, 1332 (1985).
- [7] V. N. Brudnyi, A. D. Pogrebnyak, Yu. P. Surov, A. S. Rudnev. Phys. St. Sol. (a), 114, 481 (1989).
- [8] Н. Г. Колин, В. Т. Бублик, В. Б. Освенский, Н. И. Ярмолюк. Физика и химия обраб. материалов, вып. 3, 28 (1987).
- [9] A. Goltzene, V. Meyer, C. Schwab. J. Appl. Phys., 57, 1332 (1985).
- [10] V. N. Brudnyu, V. V. Peshev. Phys. St. Sol. (a), 105, K 57 (1988).
- [11] В. А. Иванюкович, В. И. Карась, В. М. Ломако. ФТП, 24, 1427 (1990).

Редактор Л. В. Шаронова
