

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В n -GaAs

Козловский В. В., Кольченко Т. И., Ломако В. М.

С помощью измерений емкостной спектроскопии в слоях n -GaAs с $n_0 = 3 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, облученных электронами с $E = 0.9 \text{ МэВ}$ при температуре $\Theta = 20^\circ \text{C}$, наблюдались известные электронные ловушки $E1-E5$ и $E8$, а в слое с $n_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — дополнительно ловушка $E3_p$. Установлено, что эффективности введения указанных ловушек практически не меняются при изменении интенсивности пучка электронов ($I = 6 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Для слоев с $n_0 \approx (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ проанализировано влияние температуры облучения (Θ) на процессы дефектообразования в GaAs. Установлено, что при $\Theta \approx 300^\circ \text{C}$ из-за термического отжига в процессе облучения эффективность введения ловушек E резко уменьшается и основной вклад в изменение свойств материала вносят ловушки X . Впервые показано, что при дальнейшем повышении Θ вплоть до 550°C спектр вводимых электронных ловушек практически не меняется и включает в себя два основных центра — $X1$ и $X2$ с $E_a = 0.38$ и $E_a = 0.76 \text{ эВ}$ соответственно. Проанализирована кинетика накопления этих центров при $\Theta = 400^\circ \text{C}$, определены их основные параметры.

Показано, что результаты облучения при $\Theta = 300^\circ \text{C}$ и отжига до этой температуры после облучения при $\Theta = 20^\circ \text{C}$ почти эквивалентны.

В настоящее время в литературе имеется несколько обзоров о радиационных дефектах (РД) в GaAs, свидетельствующих об определенных успехах в этой области исследований [1-3]. Тем не менее многие аспекты проблемы дефектообразования в этом материале остаются слабо изученными. В n -GaAs в силу низкой подвижности ряда первичных РД реализуется относительно редкая ситуация, когда последствия облучения при $\Theta = 300 \text{ К}$ определяются собственными дефектами решетки, вклад вторичных процессов в дефектообразование практически не ощущается, а результаты облучения не отличаются большим разнообразием и информативностью. Усиление роли вторичных процессов в принципе может быть достигнуто изменением условий облучения (рост температуры и интенсивности облучения) и увеличением уровней легирования исходного материала различными примесями. Систематических данных по этим вопросам, полученных методом емкостной спектроскопии, в литературе нет, хотя результаты высокотемпературного облучения GaAs ($\Theta > 100^\circ \text{C}$) в [4-6] свидетельствуют о перспективности исследований в этом направлении.

Цель настоящей работы — изучение методом емкостной спектроскопии энергетического спектра и эффективностей введения РД в n -GaAs в зависимости от плотности пучка электронов и температуры облучения Θ в интервале $20 - 550^\circ \text{C}$.

Исследовались нелегированные и легированные серой слои n -GaAs с $n_0 = 3 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, выращенные хлоридным методом на n^+ -подложках. Перед облучением на поверхности слоев были сформированы барьеры Шоттки. Проводилось импульсное облучение электронами с $E = 0.9 \text{ МэВ}$. Частота следования импульсов составляла 450 Гц , длительность импульса — 370 нс . В случае облучения при $\Theta = 20^\circ \text{C}$ средняя плотность пучка электронов изменялась в пределах $6 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Флюенс (Φ) электронов в зависимости от n_0 варьировался в пределах $8 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При изучении влияния температуры облучения плотность потока электронов поддерживалась на уровне $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Типичные спектры НЕСГУ облученных при $\Theta=20^\circ\text{C}$ структур $n\text{-GaAs}$ с различным уровнем легирования представлены на рис. 1. В спектре структуры с $n_0=2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ присутствовали известные в $n\text{-GaAs}$ электронные ловушки радиационного происхождения ($E2-E5$ и $E8$) [2]. В спектрах слоев с $n_0=3\cdot 10^{14}-2\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$ отчетливо наблюдались лишь пики, относящиеся к ло-

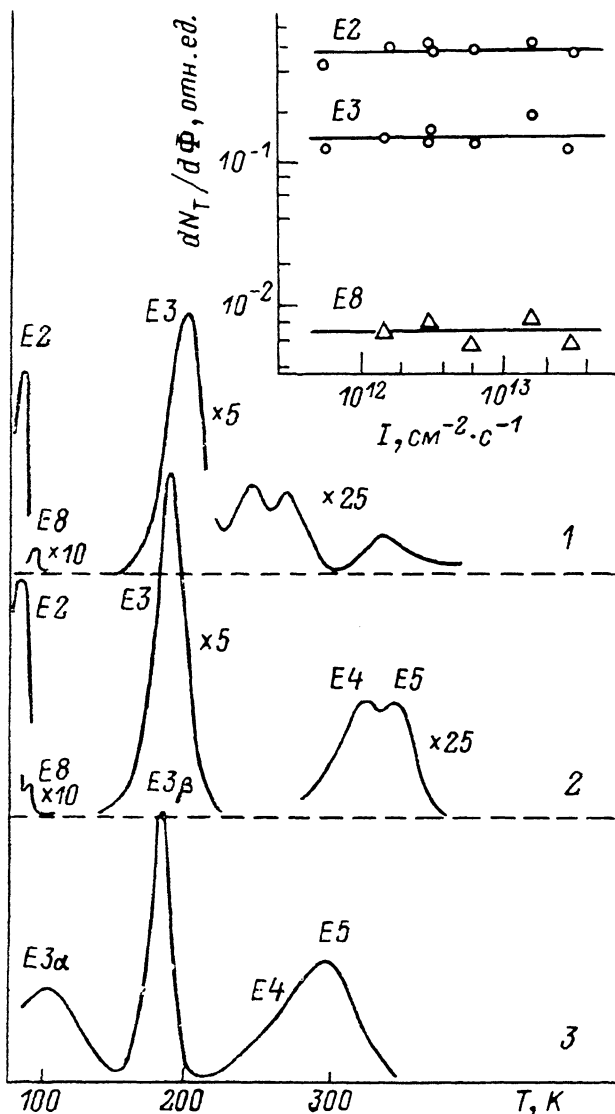


Рис. 1. Типичные спектры НЕСГУ структур $n\text{-GaAs}$ с различным уровнем легирования (n_0), облученных электронами с $E=0.9\text{ МэВ}$ при $\Theta=20^\circ\text{C}$ ($e_{\text{r}}^{-1}=1.31\cdot 10^{-2}\text{ с}$; $\Delta t=0.01\text{ с}$; $n_0, \text{ см}^{-3}$: 1 — $2\cdot 10^{14}$, 2 — $2\cdot 10^{16}$, 3 — $2\cdot 10^{17}$).

На вставке — эффективности введения центров $E2$, $E3$ и $E8$ в зависимости от интенсивности пучка электронов для структуры с $n_0=3\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$.

вушкам $E2$, $E3$ и $E8$. После облучения ($\Phi=8\cdot 10^{13}-8\cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$) сигналы центров $E4$ и $E5$ в них оказывались слабее сигналов природных ловушек с близкими скоростями эмиссии. Спектры НЕСГУ облученных структур с $n_0\sim(1\div 2)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ характеризовались рядом особенностей. В них по отношению к структурам с $n_0\approx 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ наблюдался сдвиг пиков, относящихся к центрам $E2-E5$, в область низких температур. Кроме того, при увеличении напряженности электрического поля пик $E3$ разделялся на 2 отдельных, обозначенных $E3_\alpha$ и $E3_\beta$. В [7] было показано, что дефекту, именуемому в лите-

ратуре центром $E3$, в низкоомном материале соответствует составляющая $E3_a$, а $E3_b$ характеризуется более низкой термической стабильностью и независимостью скорости эмиссии от величины напряженности электрического поля.

Анализ зависимостей концентрации центров $E2-E5$ и $E8$ от флюенса электронов показал, что накопление этих центров происходит по линейному за-

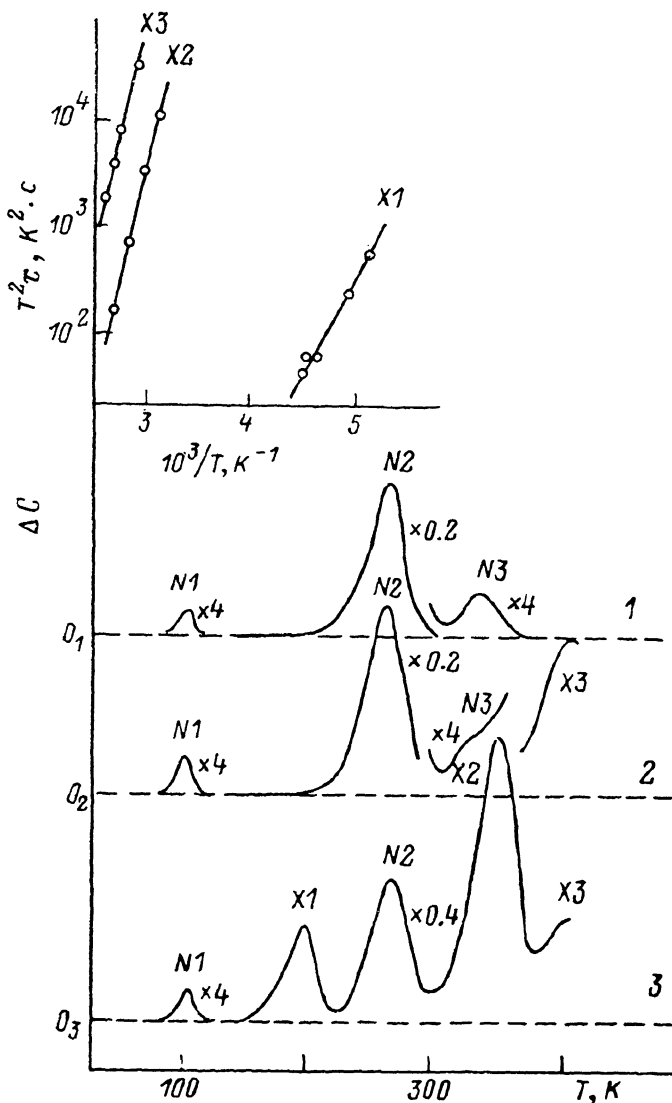


Рис. 2. Типичные спектры НЕСГУ исходных (1), термообработанных при $T=400^\circ\text{C}$ ($\Delta t=10$ мин) (2) и облученных электронами при $\theta=400^\circ\text{C}$ (3) ($\Phi=10^{18}$ см^{-2}) структур $n\text{-GaAs}$ ($e_{\text{eff}}^{-1}=1.31 \cdot 10^{-2}$ с; $\Delta t=0.01$ с).

На вставке — кривые Аррениуса для вводимых при облучении центров X1, X2 и центра X3.

кону. Данные, представленные на вставке рис. 1, свидетельствуют о том, что скорости введения $E2$, $E3$ и $E8$ в структуре с $n_0=2 \cdot 10^{15}$ см^{-3} практически не зависят от интенсивности пучка электронов. В исследованном интервале I оставались постоянными и скорости введения $E2-E5$ в структуре с $n_0=2 \times 10^{16}$ см^{-3} . Таким же было поведение $dN_x/d\Phi=f(I)$ для центров $E2$ и $E3$ в структуре с $n_0=3 \cdot 10^{14}$ см^{-3} ($I=6 \cdot 10^{11}-3 \cdot 10^{12}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и центров $E2$, $E3_a$, $E3_b$, $E4$ и $E5$ в структуре с $n_0=2 \cdot 10^{17}$ см^{-3} ($I=3 \cdot 10^{12}-3 \cdot 10^{13}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Таким образом, с ростом плотности пучка электронов изменения скоростей введения указанных центров не наблюдалось.

Последствия облучения при $\Theta=20-550^\circ\text{C}$ анализировались для слоев с $n_0=10^{15}-3\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$. Типичный спектр НЕСГУ исходных структур представлен на рис. 2. Он включает 3 основные электронные ловушки $N1-N3$.¹

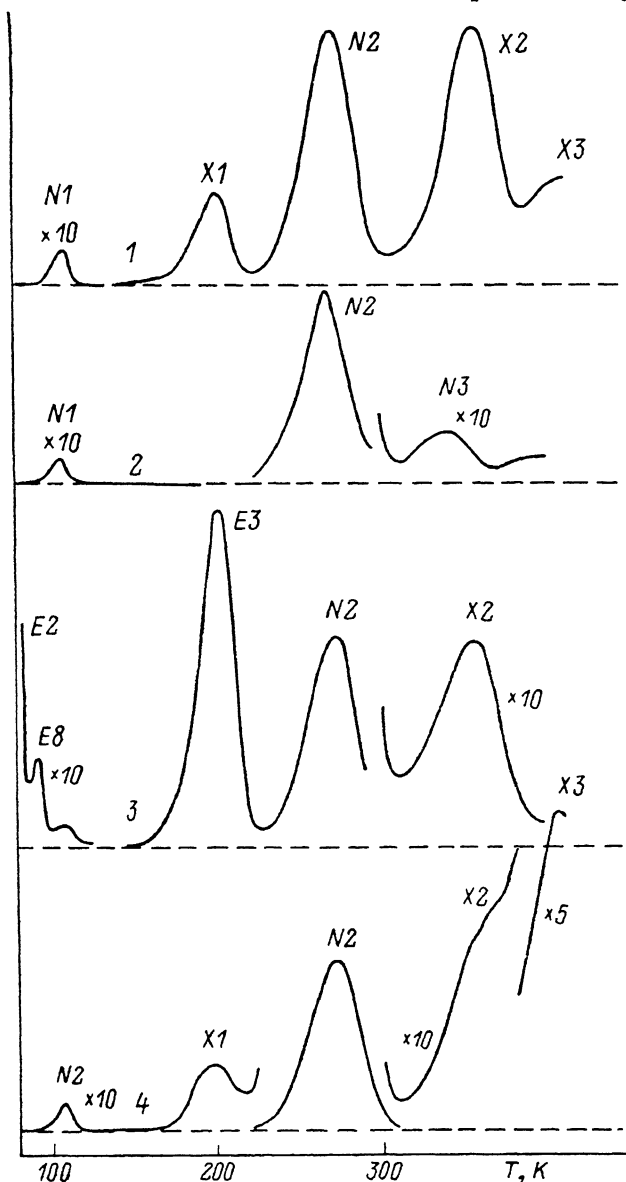


Рис. 3. Спектры НЕСГУ структур n -GaAs, облученных электронами (1) и γ -квантами ^{60}Co (3, 4), до (2), после облучения (1, 3) и последующего отжига при $\Theta=300^\circ\text{C}$ (4).

$\Theta, ^\circ\text{C}$: 1 - 400, 3, 4 - 20; $e_n^{-1}=1.31\cdot 10^{-3}\text{ с}$, $\Delta t=0.01\text{ с}$.

Определено, что энергии активации эмиссии E_a для этих центров составляют 0.18, 0.43 и 0.62 эВ. Здесь же дан типичный спектр структур, облученных при $\Theta=400-500^\circ\text{C}$. Видно, что, кроме природных ловушек, в спектрах появляются 3 новых пика $X1-X3$ с E_a , равными 0.38, 0.76 и 0.8 эВ соответственно.² Сопоставление этих данных с литературными показывает, что $X-$

¹ Концентрация центра $N2$ менялась от образца к образцу и в ряде из них достигала $\sim 10^{14}\text{ см}^{-3}$.

² Ловушка $E_c=0.38$ недавно наблюдалась в образцах GaAs, облученных электронами при $\Theta=250^\circ\text{C}$ [4].

центры ранее наблюдались в случае облучения электронами при $\Theta=300^\circ\text{C}$ [5] и γ -квантами ^{60}Co при $\Theta=400^\circ\text{C}$ [8]. Так, $X1$ сходен с $J4$ [5] и $P1$ [8], а $X2$ и $X3$ — с центрами $J2$ [5], $P3$ [8] и $J1$ [5] соответственно.

Представляло интерес изучить процессы накопления центров $X1-X3$. Было установлено, что при $\Theta=400^\circ\text{C}$ кинетика накопления ловушек $X1$ и $X2$ носит линейный характер, а их эффективность введения составляет $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ соответственно. Установлено, что пик $X3$ в спектрах НЕСГУ наблюдается после контрольной термообработки исходных образцов в интервале $T=300-500^\circ\text{C}$ (рис. 2) и близок по своим параметрам к центру $EL2$.

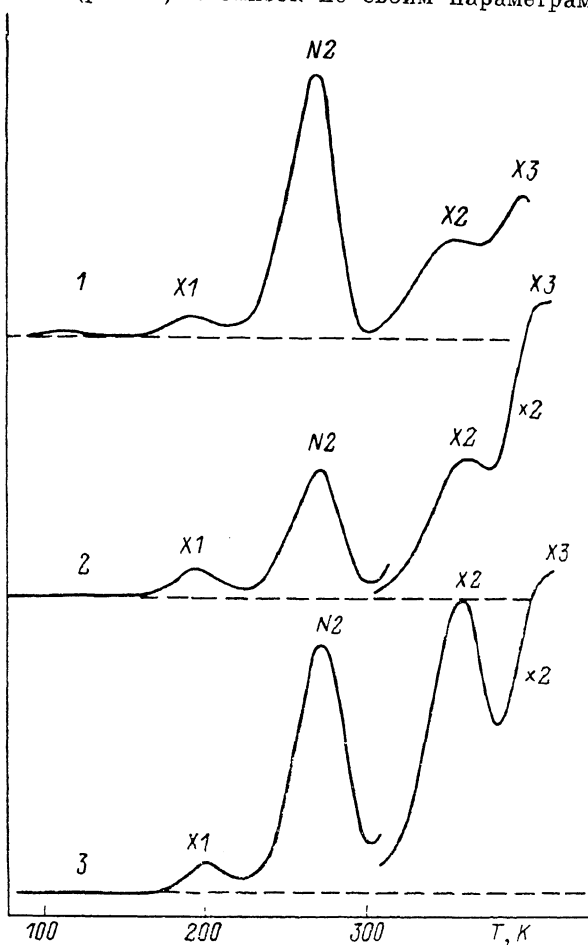


Рис. 4. Спектры НЕСГУ структур $n\text{-GaAs}$, облученных электронами непосредственно после облучения при определенной температуре (2, 3) и последующего отжига при $T=300^\circ\text{C}$ (1).

$\Theta, ^\circ\text{C}$: 1 — 20, 2 — 300, 3 — 500; $\Phi=1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $e_{\text{н}}^{-1}=1.31 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $\Delta t=0.01 \text{ с}$.

Это позволяет заключить, что появление $X3$ не связано с радиационным воздействием.

Свойства дефектов $X1$ и $X2$ в литературе, по-видимому, ранее детально не изучались. Анализ показал, что процесс захвата электронов на центр $X2$ носит сложный характер и заметно активируется термически. По оценкам, для этого центра $E_s \approx 0.12 \text{ эВ}$, но увеличение амплитуды пика не описывается простым экспоненциальным выражением для термоактивируемого процесса захвата.

Авторы [5] сделали заключение, что дефекты, вводимые в $n\text{-GaAs}$ при $\Theta=300^\circ\text{C}$, представляют собой комплексы, включающие в свой состав междоузлие As и образующиеся в результате миграции этого дефекта при $T \approx 200^\circ\text{C}$. Тщательный анализ спектров НЕСГУ GaAs с $n_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$, облученного электронами и γ -квантами ^{60}Co , показал, что центр $X2$ ($J2$) вводится непосредственно

в результате облучения при $\Theta = 20^\circ\text{C}$. Его пик отчетливо проявляется в спектре НЕСГУ на фоне ловушки $N3$ как в облученных, так и в отожженных впоследствии ($T_{\text{отж}} \approx 300^\circ\text{C}$) образцах (рис. 3). Сигнал ловушки $X1$ в спектре, снятом непосредственно после облучения при $\Theta = 20^\circ\text{C}$, не обнаруживается на фоне сигнала ловушки $E3$, его присутствие становится очевидным лишь после отжига при $T \approx 300^\circ\text{C}$ или в результате облучения при $\Theta = 250^\circ\text{C}$ [4]. Однако не исключено, что и этот центр вводится непосредственно и в результате облучения при $\Theta = 20^\circ\text{C}$, поскольку в [9] он наблюдался после инжекционного отжига $E3$ при $T = 55^\circ\text{C}$. Изложенные факты свидетельствуют о возможности образования комплексов дефектов в результате облучения при $\Theta = 20^\circ\text{C}$, когда в соответствии с развитыми в литературе представлениями основные типы первичных РД в $n\text{-GaAs}$ неподвижны.

При анализе влияния температуры облучения на процессы дефектообразования в $n\text{-GaAs}$ интересно было сопоставить результаты облучения при $\Theta = 300\text{--}500^\circ\text{C}$ и отжига до этих температур после облучения при $\Theta = 20^\circ\text{C}$. Имеющиеся данные позволили заключить, что упомянутые процессы практически эквивалентны, хотя с ростом температуры облучения соотношение концентраций $X1$ и $X2$ несколько изменяется (рис. 4).

Список литературы

- [1] Ланг Д. В. Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 187—220.
- [2] Pons D., Bourgoin J. C. // J. Phys. C. Sol. St. Phys. 1985. V. 18. P. 3839—3871.
- [3] Bourgoin J. C., Bardeleben H., Stievenard D. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. K65—K91.
- [4] Захаренков Л. Ф., Козловский В. В., Пилькевич Я. Я. // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1990. Т. 26. В. 6. С. 1145—1147.
- [5] Stievenard D., Bourgoin J. C. // J. Appl. Phys. 1986. V. 9. N 3. P. 743—747.
- [6] Zakharonkov L., Kozlovskii V., Pilkevich Ya. // Phys. St. Sol. (a). 1989. V. 111. P. K215—K218.
- [7] Кольченко Т. И., Ломако В. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 295—299.
- [8] Brudnyi V. N., Pesehev V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 105. P. K57—K60.
- [9] Stievenard D., Bourgoin J. C. // Phys. Rev. B. Condens. Matter. 1986. V. 33. Pt 1. N 12. P. 8410—8415.

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

Получена 2.11.1990
Принята к печати 20.11.1990