

Выявление условий формирования глубоких состояний дислокаций несоответствия и DX-центров в гетероэпитаксиальных слаболегированных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ -слоях

© М.М. Соболев, Ф.Ю. Солдатенков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: m.sobolev@mail.ioffe.ru, f.soldatenkov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 15 мая 2025 г.

В окончательной редакции 1 июля 2025 г.

Принята к публикации 4 июля 2025 г.

Методами вольт-фарадных характеристик и нестационарной спектроскопии глубоких уровней исследованы высоковольтные плавные p^0-i-n^0 -переходы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с максимальным содержанием x от 0.15 до 0.6 и y до 0.02, полученные методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями. Установлено, что эффективной рекомбинационной ловушкой в гетероэпитаксиальных слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с x более 0.23, независимо от содержания сурьмы, является DX-центр фоновых донорных примесей Si, Se или Te, при этом в данных гетероструктурах отсутствовали глубокие уровни, связанные с дислокациями. В гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $x \sim 0.15-0.19$ и $y \sim 0.02$ и $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $y \sim 0.02$ эффективной рекомбинационной ловушкой является глубокий уровень HD3, связанный с дислокациями несоответствия.

Ключевые слова: AlGaAsSb , p^0-i-n^0 -переход, емкостная спектроскопия, DLTS, DX-центр, дислокации несоответствия, жидкофазная эпитаксия.

DOI: 10.61011/FTP.2025.03.61096.8179

1. Введение

Широкозонные слаболегированные гетероэпитаксиальные слои $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ и $\text{AlGaAsSb}/\text{GaAs}$, используемые при изготовлении импульсных высоковольтных $p-i-n$ -диодов, способных работать в мегагерцовом диапазоне частот повторения импульсов и при повышенных температурах, $> 300^\circ\text{C}$ [1–5], в настоящее время представляют интерес из-за их потенциального применения в высоковольтных высокоскоростных и оптоэлектронных устройствах. Эпитаксиальный рост таких гетероструктур сопровождается деформацией растущего слоя, который возникает из-за разницы в параметрах решетки между ним и подложкой [1–3,6,7]. Если эпитаксиальный слой достаточно тонкий, несоответствие решетки может быть компенсировано упругой деформацией слоя [5–7]. Однако, когда толщина слоя превышает определенное критическое значение, на границе раздела, чтобы снять часть деформации, генерируются дислокации несоответствия. Наличие дислокаций несоответствия на границе раздела слоя и подложки может привести к появлению глубоких состояний энергии в запрещенной зоне, которые действуют как ловушки свободных носителей заряда. Ранее было выявлено [3,4,6,8], что в слаболегированных гетероэпитаксиальных слоях $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и $\text{GaAsSb}/\text{GaAs}$ из-за разницы постоянных решетки между GaAs и тройным соединением (при содержании Sb или In около 0.3–1.5% и толщинах гетероэпитаксиального слоя ~ 50 нм) происходило образование двумерной сетки 60° дислокаций несоответствия. Для гетероэпитаксиальных слоев $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и $\text{GaAsSb}/\text{GaAs}$ с

дислокациями несоответствия было характерно проявление в DLTS-спектрах так называемых дислокационных пространственно-локализованных (1D размерности) глубоких уровней (ГУ) донорного (ED1) и акцепторного (HD3) типа с энергией термической активации 683 и 848 мэВ.

При исследовании плавных p_0-i-n_0 -переходов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с x до 0.34 и y до 0.15, толщиной ~ 50 нм, методами емкостной спектроскопии был получен неожиданный результат [2] — несмотря на то что содержание сурьмы в гетероэпитаксиальном слое было достаточным для образования дислокаций, в DLTS-спектрах отсутствовали пики, связанные с дислокациями несоответствия [4,6–8]. Вместо них в спектрах наблюдался DLTS-пик DX-центра, характерный для соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $x \geq 0.23$ [1,2,9–11]. Необходимо отметить, что изучение плавных p_0-i-n_0 -переходов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ является сложной задачей, поскольку присутствие атомов двух видов III и V групп создает нетривиальную среду роста и создает большое пространство для интерпретации экспериментальных результатов.

Цель данной работы — выявление технологических условий, при которых происходит образование дефектов с ГУ и дислокаций несоответствия в гетероэпитаксиальных слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ плавных p_0-i-n_0 -переходов при варьировании содержания соединений алюминия (x) и сурьмы (y), изготовленных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Исследования диодов производили с помощью метода вольт-фарадных ($C-V$) характеристик и нестационарной спектроскопии глу-

боких уровней (DLTS), которые позволяли обнаружить как электронные, так и дырочные ловушки в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ плавных p^0-i-n^0 -переходах.

2. Экспериментальные образцы

Высоковольтные $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диоды на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ были изготовлены с помощью модифицированного метода жидкофазной эпитаксии [1–5] в графитовой кассете прокачного типа в атмосфере водорода. Эпитаксиальное выращивание высоковольтных слаболегированных плавных p^0-i-n^0 -переходов твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ осуществляли на подложках $p^+-\text{GaAs}(100)$, легированных цинком до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при принудительном охлаждении ограниченных растворов-расплавов $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}$ или $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}-\text{Sb}$ в диапазоне температур от 900–850 до 750–700 °C, после чего на них выращивали сильнолегированные $n^+-\text{GaAs}$ эмиттерные слои с концентрацией свободных электронов $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В работе исследовались $p-i-n$ -структуры на основе слаболегированных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ и $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ с максимальным содержанием x от 0.15 до 0.6 и y до 0.02, толщиной до 50 мкм, полученных методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями. Методика изготовления плавных p^0-i-n^0 -переходов используемым в работе способом из одного раствора-расплава за счет автолегирования фоновыми примесями изложена ранее в работах [1–5].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Измерения $C-V$ -характеристик $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ диодных $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -гетероструктур

Предварительный анализ изготовленных нами (в данной работе и ранее) чипов с плавными p^0-i-n^0 -гетеропереходами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ дает основание предполагать наличие в эпитаксиальных слоях структуры донорных примесей (Si, Se, Te), ответственных за формирование конфигурационно-бистабильных DX-центров [9–13].

Для выявления DX-центров в p^0-i-n^0 -гетероструктурах были проведены исследования $C-V$ -характеристик при 300 и 87 К с различными условиями измерения. Методика таких измерений для выявления бистабильных дефектов ранее нами уже применялась в работах [2,5]. В случае измерений при 87 К образец предварительно охлаждался либо при включенном напряжении обратного смещения $V_r < 0$, либо при $V_r = 0$. $C-V$ -измерения проводились либо в темноте, либо при оптической подсветке. После предварительного охлаждения образца с $V_r < 0$ либо $V_r = 0$ наблюдалась

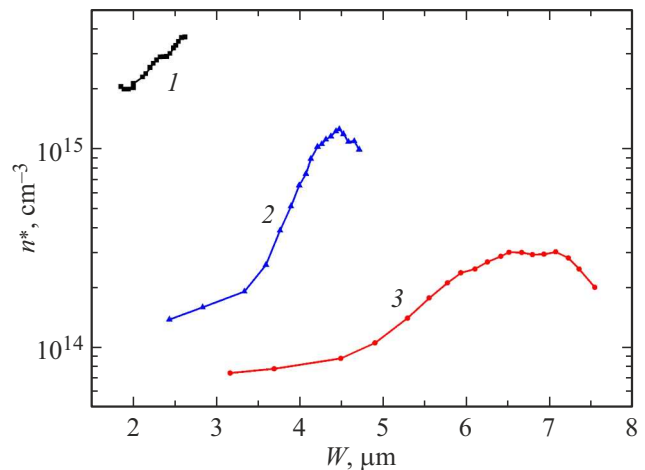


Рис. 1. Профили распределения эффективной концентрации свободных носителей заряда n^* по толщине W слоя объемного заряда $p^+-p^0-i-n^0$ -диода на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с $x \sim 0.6$, измеренных при различных температурах T , К: 1 — 151; 2, 3 — 88; в темноте (1, 3) и при оптической подсветке (2).

значительная разница в $C-V$ -характеристиках. При $V_r < 0$ $C-V$ -характеристика определялась изменением диффузионного потенциала, при $V_r = 0$ происходило значительное увеличение толщины W слоя объемного заряда (CO3) и почти на порядок происходило уменьшение величины эффективной концентрации свободных носителей [2,5]. $C-V$ -характеристика оставалась неизменной в течение длительного времени при низкой температуре после выключения освещения, что объясняется так называемым эффектом остаточной фотопроводимости. Как было показано в работах [5,10], наблюдаемые нами изменения $C-V$ -характеристик присущи DX-центру с отрицательной корреляционной энергией U и указывают на наличие в эпитаксиальных слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ донорных примесей (Si, Se, Te), обладающих одним делокализованным DX^+ -состоянием мелкого донора и двумя глубокими локализованными DX^0 - и DX -состояниями. $C-V$ -характеристики, подобные описанным выше, наблюдались для эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с максимальным содержанием x от 0.23 до 0.6 и y до 0.02. На рис. 1 представлены результаты $C-V$ -исследований диодной $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры, охлаждаемой с $V_r < 0$ либо в темноте, либо при оптической подсветке. Из измеренных $C-V$ -характеристик были рассчитаны профили распределения эффективной концентрации свободных носителей заряда n^* по толщине слоя объемного заряда W (см. рис. 1). Кривая 1 была получена для температуры измерения $C-V$ -характеристики $T = 151 \text{ К}$, а кривые 2 и 3 были измерены при $T = 88 \text{ К}$ и, соответственно, при оптической подсветке и в темноте. Аналогичные зависимости от температуры измерения и наличия подсветки в профилях $n^*(W)$ наблюдались и для слоев

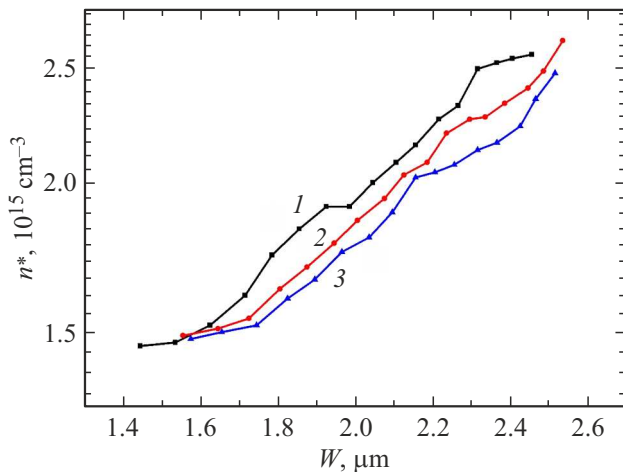


Рис. 2. Профили распределения эффективной концентрации свободных носителей заряда n^* по толщине W слоя объемного заряда $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диода на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $x \sim 0.2$ и $y \sim 0.02$, измеренных при различных температурах T, K : 1 — 200; 2, 3 — 90; в темноте (1, 3) и при оптической подсветке (2).

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$. В случае, когда молярный состав x не превышал 0.20, эффекта остаточной фотопроводимости в $C-V$ -характеристики не наблюдалось (рис. 2). Для этих гетероструктур толщина СОЗ росла при понижении температуры измерения образца, как было отмечено в нашей работе [5], прирост толщины СОЗ при изменении температуры от 300 до 86 К существенно превышал значения, рассчитанные для температурного поведения диффузионного потенциала. Также для этой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ -гетероструктуры с $y \sim 0.02$ была выявлена зависимость эффективной концентрации свободных носителей заряда (n^*) от наличия оптического освещения образца (рис. 2, кривая 2). Освещение структуры приводило к уменьшению толщины СОЗ как при 90, так и при 200 и 300 К. Наиболее вероятной причиной этих изменений толщины СОЗ с температурой и освещением являются глубокие интерфейсные состояния донорного и акцепторного типов на гетерограницах $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -структуры. Влияние плотности интерфейсных состояний N_{ss} на $C-V$ -характеристику $p-n$ -перехода подробно исследовалось в работе [4]:

$$\frac{1}{C^2} = -\frac{2(\epsilon_n N_d + \epsilon_p N_a)}{q \epsilon_n \epsilon_p N_d N_a} (U - U_0) - \frac{N_{ss}^2}{\epsilon_n \epsilon_p N_d N_a}, \quad (1)$$

где U_0 — диффузионный потенциал, U — обратное смещение, ϵ_n и ϵ_p — диэлектрические постоянные n - и p -слоев, N_d и N_a — концентрация доноров и акцепторов в n - и p -слоях соответственно.

Первый член соотношения (1) связан с емкостью СОЗ $p-n$ -перехода, которая изменяется с приложенным напряжением смещения и распределением концентраций N_d и N_a в n - и p -слоях, а второй — с плотностью интерфейсных состояний N_{ss} , заселенность которых может меняться с температурой измерения и положением

уровня Ферми в структуре. Оптическое освещение гетероструктуры $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ может приводить при наличии в эпитаксиальных слоях глубоких уровней дефектов донорного и акцепторного типа в концентрациях, сопоставимых с концентрациями мелких уровней, к изменению положения уровня Ферми и, соответственно, к изменению заселенности локализованных интерфейсных состояний носителями. Поэтому наличие интерфейсных состояний могут быть связаны с формированием дислокаций несоответствия на гетерограницах исследуемых структур.

В случае p^0-i-n^0 -структур на основе GaAs исследования показали отсутствие изменений $C-V$ -характеристик от условий предварительного охлаждения образца при $V_r < 0$ либо при $V_r = 0$ и оптической подсветке.

3.2. DLTS-измерения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ диодных $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -гетероструктур

Для диодных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ -гетероструктур с $x = 0.00, \sim 0.20, \sim 0.30, \sim 0.60$ и $y = 0.00, \sim 0.01, \sim 0.02$ были произведены измерения DLTS-спектров при разных напряжениях смещения V_r и импульсов заполнения V_f (рис. 3–6). Оказалось, что DLTS-спектры исследуемых $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диодов существенно отличаются в зависимости от молярного состава (x и y) слоев, формирующих эти гетероструктуры. По полученным DLTS-спектрам можно выделить два типа гетероструктур. К первому типу относятся структуры со слоями из тройных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рис. 3) и четверных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ (рис. 4) соединений с x от 0.23 до 0.60, для которых в DLTS-спектрах обнаруживаются пики с положительным знаком, связанные с акцепторноподобным состоянием DX-центра. Эти DX-состояния

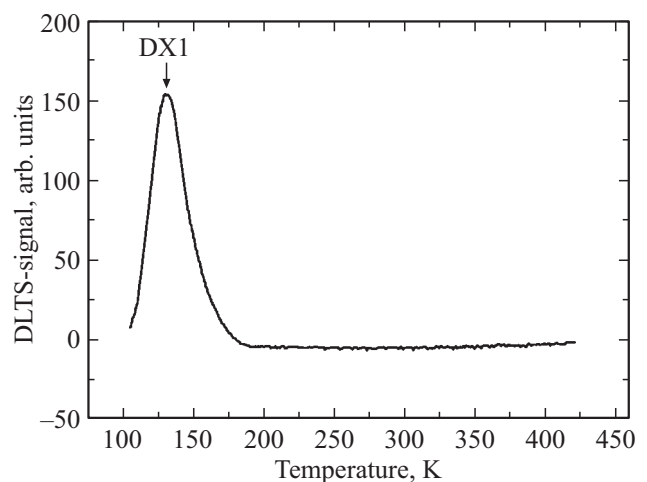


Рис. 3. DLTS-спектр $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с $x \sim 0.6$, полученных при темпе окон 200 c^{-1} , напряжении смещения $V_r = -2.98 \text{ В}$ и напряжении импульса заполнения $V_f = +0.87 \text{ В}$.

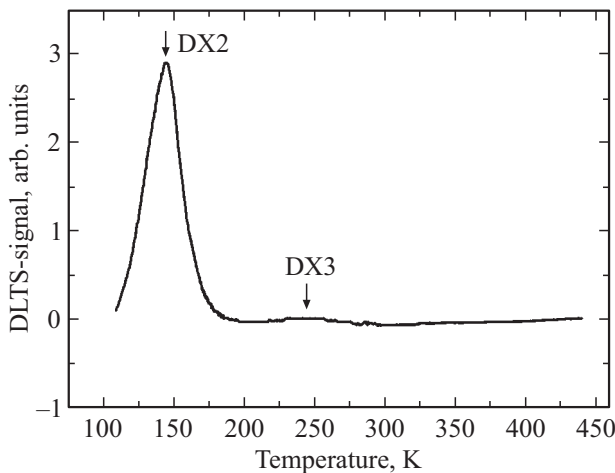


Рис. 4. DLTS-спектр $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $x \sim 0.3$ и $y \sim 0.02$, полученных при темпе окон 200 с^{-1} , напряжении смещения $V_r = -1.12 \text{ В}$ и напряжении импульса заполнения $V_f = +0.54 \text{ В}$.

являются ловушками основных носителей (электронов) [5]. Из зависимости Аррениуса для исследуемого слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x \approx 0.60$ были определены энергия термической активации $E_t = 342 \text{ мэВ}$ (DX1) и сечение захвата электрона $\sigma_n = 8.91 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$. В эпитаксиальных слоях четверных соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$, содержащих атомы сурьмы с $y = 0.01$ и алюминия с $x \sim 0.30$, параметры DX-уровня были соответственно: $E_t = 234 \text{ мэВ}$ (DX2) и $\sigma_n = 5.29 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. Параметры DX⁻-уровня этих двух структур указывают на то, что обнаруженный в DLTS-спектрах DX-центр, повидимому, сформирован фоновыми донорными примесями Te и Se [5,14]. Для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ -структуры с $y = 0.01$ и $x \sim 0.30$ в DLTS-спектрах также наблюдался более высокотемпературный пик с параметрами $E_t = 416 \text{ мэВ}$ и $\sigma_n = 5.08 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ (DX3), который может быть связан с DX-уровнем донорной примеси Si. Аналогичные DLTS-пики обнаруживались и для всех $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ -структур с x от 0.23 до 0.60, с тем отличием, что для структуры с $x \sim 0.60$ увеличивалось сечение захвата σ_n .

Ко второму типу гетероструктур относятся структуры с плавными p^0-i-n^0 -переходами, такие как $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ [7] и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с $x \sim 0.15-0.19$ и $y \sim 0.02$, для которых в DLTS-спектрах обнаруживаются пики, связанные с дислокациями несоответствия (рис. 5 и 6). Для обнаружения ловушек основных и неосновных носителей измерения проводили при разных напряжениях смещения V_r и импульсах заполнения V_f . Для выявления свойств, присущих локализованным состояниям дислокаций, дополнительно проводили исследования влияния оптической подсветки на их заполнение носителями. Этот прием для выявления локализации уровней дислокации впервые был применен нами в работе [5]. В структурах $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $y \sim 0.02$ отчетливо обнаруживаются

глубокие ловушки для электронов и дырок (рис. 5), связанные с дислокациями несоответствия, обозначенные как ED1 и HD3, параметры которых были соответственно: $E_t = 651 \text{ мэВ}$ и $\sigma_n = 2.15 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $E_t = 721 \text{ мэВ}$ и $\sigma_p = 3.34 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$. Ранее эти ловушки были тщательно изучены и описаны в целом ряде работ [6–8], в том числе и в наших статьях [4]. В $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ -гетероструктурах с плавным p^0-i-n^0 -переходом проведенные исследования DLTS-спектров также позволили обнаружить глубокий уровень, который можно было идентифицировать с дислокационным HD3 (рис. 6). Для широкого DLTS-пика, образующегося при измерениях DLTS-спектров с $V_r = +0.04 \text{ В}$ и $V_f = +0.93 \text{ В}$ в темноте и

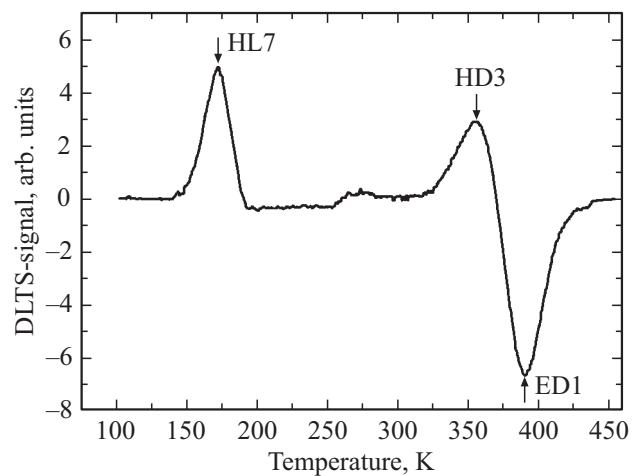


Рис. 5. DLTS-спектр $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диодов $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с $y \sim 0.02$, полученных при темпе окон 200 с^{-1} , напряжении смещения $V_r = -3.0 \text{ В}$ и напряжении импульса заполнения $V_f = +0.50 \text{ В}$.

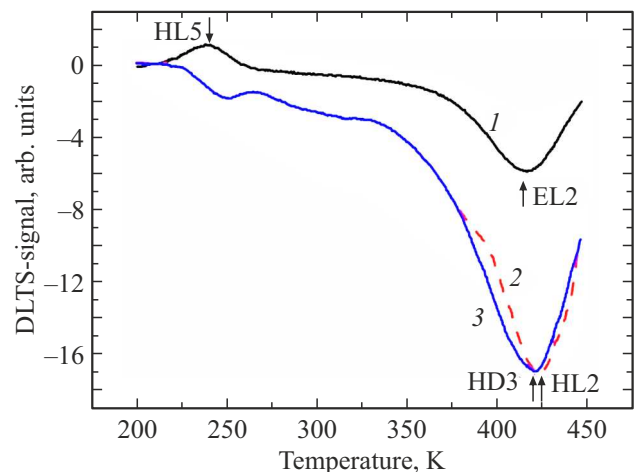


Рис. 6. DLTS-спектр $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ с x до 0.19 и $y \sim 0.02$, полученных при темпе окон 200 с^{-1} , напряжении смещения $V_r = -3.0 \text{ В}$ и напряжении импульса заполнения $V_f = +0.93 \text{ В}$ (1); при $V_r = +0.05 \text{ В}$ и $V_f = +0.93 \text{ В}$, в темноте (2) и при оптической подсветке (3).

при оптической подсветке, обусловленного эмиссией дырок с глубоких состояний в p^0 -слое, удалось выделить два пика и их идентифицировать. Подсветка приводила к проявлению второго DLTS-пика со стороны низких температур. Зависимость амплитуд пиков DLTS-сигналов от оптической подсветки является характерным признаком таких пространственно-локализованных состояний, как квантовые точки [15] и дислокации несоответствия [4]. Это отличает их от точечных дефектов с глубокими уровнями, распределенных по всей толщине эпитаксиального слоя. С помощью зависимостей Аррениуса были определены параметры этих двух глубоких состояний. Для глубоких состояний дырок, связанных с дислокациями, они были соответственно: $E_t = 735$ мэВ и $\sigma_p = 3.78 \cdot 10^{-16}$ см², а для второго состояния, не проявляющего свойства локализации и являющегося точечным дефектом, они были: $E_t = 881$ мэВ и $\sigma_p = 1.8 \cdot 10^{-14}$ см². Подобный уровень в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ с $x \sim 0.20$ ранее наблюдали в работе [16]. Мы его определяли как состояние дефекта HL2 [4] с дырочной ловушкой. Для электронных ловушек, расположенных в n^0 -слое и обуславливающих появление DLTS-пика с отрицательным знаком, выделить уровень дислокации не удалось. Параметры электронной ловушки были близки к уровню EL2-дефекта с $E_t = 837$ мэВ и $\sigma_n = 6.06 \cdot 10^{-14}$ см², что является не удивительным для соединений, выращенных при температурах $> 850^\circ\text{C}$ методом ЖФЭ [17].

4. Заключение

В работе были исследованы высоковольтные $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ -диоды на основе гетероэпитаксиальных слоев $AlGaAs/GaAs$ и $AlGaAsSb/GaAs$, а также $GaAsSb/GaAs$, полученных методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями. Методами вольт-фарадных характеристик и нестационарной спектроскопии глубоких уровней было выяснено, что эффективной рекомбинационной ловушкой в плавных p^0-i-n^0 -гетеропереходах $Al_xGa_{1-x}As$ и $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}Sb_y$ с $x > 0.23$, независимо от содержания сурьмы, является DX-центр фоновых донорных примесей Si, Se или Te, при этом с увеличением состава x увеличивалось сечение захвата σn ловушки. В исследованных $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}Sb_y/GaAs$ -гетероструктурах с $x \geq 0.23$ и с рассогласованием по параметру решетки, достаточным для образования дислокаций несоответствия, не было выявлено глубоких уровней, связанных с дислокациями. В гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}Sb_y/GaAs$ с $x \sim 0.15-0.19$ и $y \sim 0.02$ и $GaAs_{1-y}Sb_y/GaAs$ с $y \sim 0.02$ эффективной рекомбинационной ловушкой является глубокий уровень HD3, связанный с дислокациями несоответствия. Подобный уровень был обнаружен нами ранее в гетероэпитаксиальных структурах $InGaAs/GaAs$ и $GaAsSb/GaAs$ с дислокациями несоответствия.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.М. Соболев, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **57**(8), 644 (2023).
- [2] Ф.Ю. Солдатенков, М.М. Соболев, А.С. Власов, А.В. Рожков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, 19 (2024). DOI: <https://doi.org/10.31857/S1028096024070037>
- [3] Ф.Ю. Солдатенков, В.Г. Данильченко, В.И. Корольков. ФТП, **41** (2), 217 (2007).
- [4] M.M. Sobolev, F.Y. Soldatenkov, L. Shul'pina. J. Appl. Phys., **123**, 161588 (2018). DOI: 10.1063/1.5011297
- [5] M.M. Sobolev, F.Y. Soldatenkov, V.G. Danil'chenko. J. Appl. Phys., **128** (9), 095705 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0018317>
- [6] T. Wosinski. J. Appl. Phys., **65** (4), 1566 (1989).
- [7] T. Wosinski, O. Yastrubchak, A. Makosa, T. Figielski. J. Phys.: Condens. Mater., **12** (49), 10153 (2000). DOI: 10.1088/0953-8984/12/49/314
- [8] O. Yastrubchak, T. Wosinski, A. Makosa, T. Figielski, S. Porowski, I. Grzegory, R. Czernecki, P. Perlin. Eur. Phys. J.: Appl. Phys., **27**, 201 (2004). <https://doi.org/10.1051/epjap:2004139>
- [9] D.J. Chadi, K.J. Chang. Phys. Rev. B, **39**, 10063 (1989). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.10063>
- [10] W.Y.-S. Su, V.C.-P. Lu, C.-B. Wu, J.-Sh. Wang, J.-L. Shen, K.-Ch. Chiu. Scientific Rep., **10**, 12503 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69153-1>
- [11] M. Anbinderis, S. Ašmontas, A. Čerškus, J. Gradauskas, A. Lučun, A. Šilėnas, A. Sužiedėlis. Sensors, **21** (13), 4487 (2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134487>
- [12] D.V. Lang, R.A. Logan, M. Jaros. Phys. Rev. B, **19**, 1015 (1979). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.19.1015>
- [13] L. Dobaczewski, P. Kaczor. Phys. Rev. B, **44**, 8621 (1991). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.8621>
- [14] P. Nubile, M. Zazoui, J.C. Bourgoin, R. Grey, A.L. Powell, P.A. Claxton, P.I. Rockett. J. Appl. Phys., **72** (8), 3 530 (1992).
- [15] M.M. Sobolev, A.R. Kovsh, V.V. Ustinov, A.Y. Egorov, A.E. Zhukov, Y.G. Musikhin. J. Electron. Mater., **28**, 491 (1999).
- [16] D.V. Lang. J. Appl. Phys., **45**, 3023 (1974).
- [17] М.М. Соболев, П.Р. Брунков, С.Г. Конников, М.Н. Степанова, В.Г. Никитин, В.П. Улин, А.Ш. Долбая, Т.Д. Камушадзе, Р.М. Майсурадзе. ФТП, **25** (6), 1058 (1989).

Редактор Г.А. Оганесян

**Identification of conditions for the
formation of deep states of mismatch
dislocations and DX centers
in heteroepitaxial lightly doped
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ layers**

M.M. Sobolev, F.Yu. Soldatenkov

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract High-voltage gradual $p^0 - i - n^0$ junctions of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ with a maximum content of x from 0.15 to 0.6 and y to 0.02, obtained by liquid-phase epitaxy due to autodoping with background impurities, have been studied using methods of capacitance-voltage characteristics and deep-level transient spectroscopy. It was found that the effective recombination trap in the heteroepitaxial layers of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ with x more than 0.23, regardless of the antimony content, is the DX center of background donor impurities Si, Se, or Te, while these heterostructures lacked deep levels associated with dislocations. In the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ heterostructures with $x \sim 0.15-0.19$ and $y \sim 0.02$ and $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{GaAs}$ with $y \sim 0.02$, the deep HD3 level associated with mismatch dislocations is an effective recombination trap.