

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ И ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ЯДЕРНО-ЛЕГИРОВАННОМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ, ПОЛУЧЕННОМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ И РОСТА КРИСТАЛЛОВ

© В.А.Быковский, Ф.П.Коршунов*,
Е.С.Солодовников†, В.И.Утенко, В.Ф.Шох

Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов,
220115 Минск, Белоруссия

* Институт физики твердого тела и полупроводников Академии наук
Беларуси,
220023 Минск, Белоруссия

† Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском
политехническом институте,
634000 Томск, Россия
(Получена 27 декабря 1995 г. Принята к печати 16 января 1996 г.)

Исследовалась низкотемпературная ($T = 4.2$ К) фотолюминесценция ядерно-легированных кристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского (НР, LP LEC) и облученных флюенсом тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻² при отношениях потоков тепловых и быстрых нейтронов в диапазоне 10–200. Установлено, что на начальных стадиях отжига облученных кристаллов до $T < 600^\circ\text{C}$ основной в спектрах люминесценции является полоса излучения с участием трансмутационных акцепторов германия. Остаточные акцепторы углерода в облученных кристаллах взаимодействуют с радиационными дефектами и образуют центры безызлучательной рекомбинации. Распад этих центров и стабилизация интенсивностей краевой и примесной (с участием акцепторов углерода) полос рекомбинационного излучения наблюдаются на заключительной стадии отжига при $T = 600\text{--}700^\circ\text{C}$. Полученные экспериментальные зависимости интенсивностей краевой и примесной (с участием остаточных (C) и трансмутационных (Ge) акцепторов) полос излучения в процессе отжига кристаллов проанализированы с использованием моделей локализации трансмутационных примесей и примесно-дефектного взаимодействия в облученных кристаллах.

Введение

Практическое получение высококачественных кристаллов GaAs методом нейтронного трансмутационного легирования (NTD) мелкими примесями Se, Ge, вводимыми при облучении тепловыми нейтронами, является достаточно сложной задачей, решение которой связано с преодолением трудностей как технического (совершенствование

реакторной технологии), так и физического характера. Основной недостаток метода NTD — неизбежное введение в легируемые кристаллы большого количества точечных и сложных радиационных дефектов (РД), вследствие присутствия в реакторном спектре облучения быстрых нейтронов, а также вследствие эффектов отдачи при ядерных реакциях трансмутации [1,2]. Концентрация и структура РД существенно зависят от условий облучения, а также от свойств исходных кристаллов. Имеющиеся в литературе результаты в большинстве случаев трудно сопоставимы, поскольку различными авторами исследовались NTD кристаллы GaAs, различающиеся исходными свойствами и условиями облучения. В настоящей работе, в продолжение исследований [3], методом низкотемпературной люминесценции исследовалось примесно-дефектное взаимодействие остаточных технологических и трансмутационно вводимых примесей в NTD кристаллах GaAs, полученных на основе полуизолирующих и *n*-типа проводимости кристаллов, выращенных методом Чохральского под слоем флюса (LEC). Легирование кристаллов осуществлялось одинаковым флюенсом тепловых нейтронов, но при различных отношениях потоков тепловых и быстрых нейтронов. Результаты исследования электрофизических свойств этих NTD кристаллов GaAs в процессе их отжига изложены в [4].

Исследуемые материалы и методика эксперимента

Исходными материалами для трансмутационного легирования являлись специально не легированные кристаллы GaAs *n*-типа проводимости с концентрацией носителей $n = (1-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, полученные методом Чохральского с предварительным синтезом поликристаллического сырья при низком давлении инертного газа (LP LEC), а также полуизолирующие и *n*-типа проводимости кристаллы, полученные методом Чохральского, но с применением прямого синтеза при высоком давлении инертного газа (HP LEC). В отличие от работ [5,6] кристаллы облучались одинаковым флюенсом тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, но при различных отношениях потоков тепловых и быстрых ($E_f > 0.1 \text{ МэВ}$) нейтронов. Отношения потоков тепловых и быстрых нейтронов составляли $\varphi_{th}/\varphi_f = 10-200$ и определялись выбранным каналом ядерного реактора ИРТ-М. Последовательный изохронный ($t = 20 \text{ мин}$) отжиг образцов осуществлялся в печи в потоке водорода до температуры $T = 800^\circ\text{C}$. Перед измерениями с поверхности образцов травлением удалялся слой $\sim 20 \text{ мкм}$. Методика регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ) при $T = 4.2 \text{ К}$ аналогична использовавшейся ранее в [3] при исследовании NTD кристаллов GaAs.

Экспериментальные результаты

Для всех типов исследованных LP и HP LEC кристаллов после облучения рекомбинационное излучение не наблюдалось. Это обусловлено присутствием в кристаллах, облученных быстрыми нейтронами, значительного числа РД, являющихся эффективными центрами безызлучательной рекомбинации [7]. Восстановление интенсивности рекомбинационного излучения в облученных образцах происходит после отжига при $T = 400-500^\circ\text{C}$ в зависимости от отношения потоков тепловых и

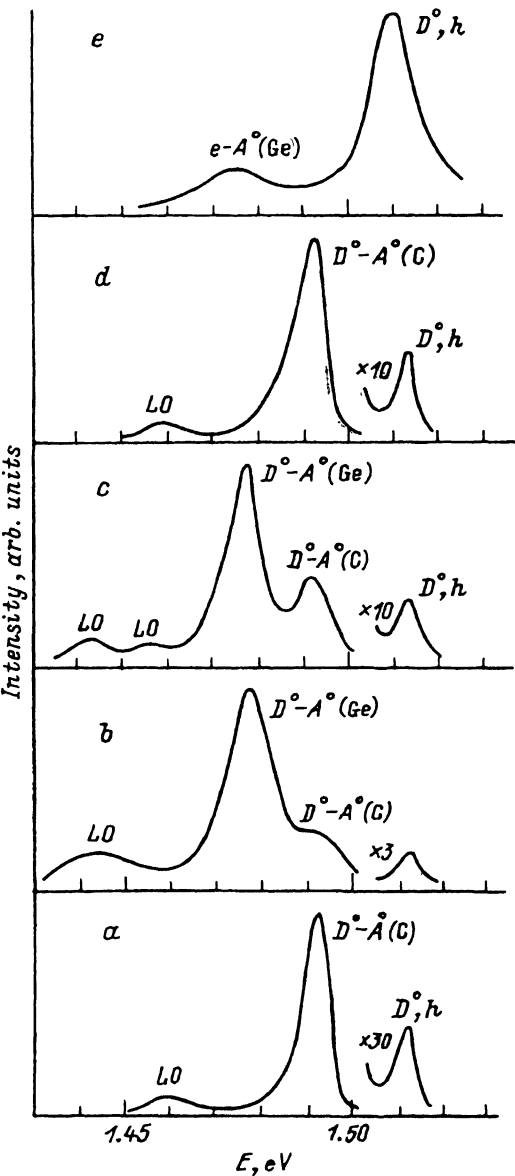


Рис. 1. Спектры ФЛ в процессе отжига NTD HP LEC кристалла GaAs, облученного флюенсом тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при отношении потоков тепловых и быстрых нейтронов $\varphi_{th}/\varphi_f = 26$ а — исходный HP LEC кристалл. Температура отжига, °C: б — 600; д, е — 775. Температура измерений, К: а-д — 4,2, е — 77.

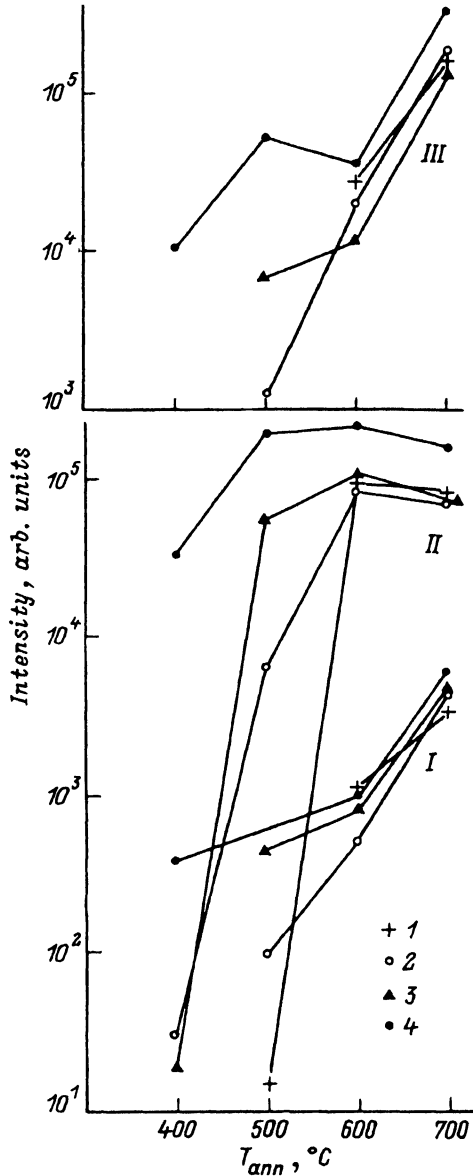


Рис. 2. Зависимости интенсивности полос ФЛ при $T = 4.2 \text{ К}$ от температуры отжига для NTD LP LEC кристалла GaAs, облученного флюенсом тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при различных отношениях потоков тепловых и быстрых нейтронов φ_{th}/φ_f . I — краевая полоса, II — примесная полоса с участием трансмутационных акцепторов германия, III — примесная полоса с участием остаточных акцепторов углерода. φ_{th}/φ_f : 1 — 11, 2 — 26, 3 — 50, 4 — 185.

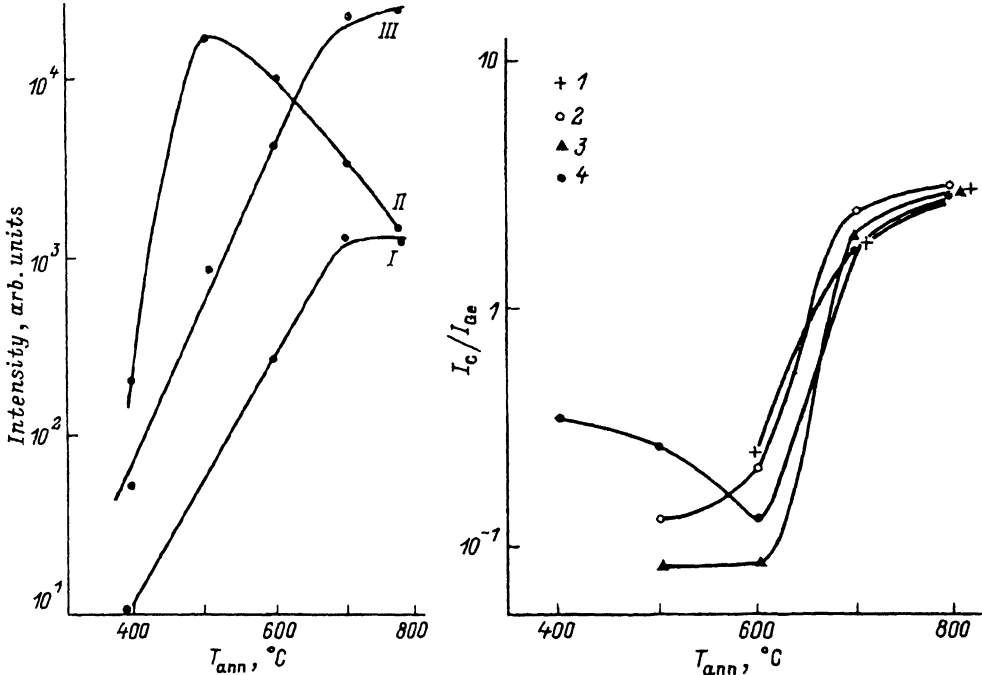


Рис. 3. Зависимости интенсивности полос ФЛ при $T = 4.2\text{ K}$ от температуры отжига для NTD исходного полужолирующего HP LEC кристалла GaAs, облученного флюенсом тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ при отношении потоков тепловых и быстрых нейтронов $\varphi_{th}/\varphi_f = 26$. I — краевая полоса, II — примесная полоса с участием трансмутационных акцепторов германия, III — примесная полоса с участием остаточных акцепторов углерода.

Рис. 4. Зависимости отношения интенсивностей полос ФЛ с участием акцепторов углерода и германия от температуры отжига для NTD LP LEC кристалла GaAs. Флюенс тепловых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$, отношение потоков тепловых и быстрых нейтронов φ_{th}/φ_f : 1 — 11, 2 — 26, 3 — 50, 4 — 185.

быстрых нейтронов φ_{th}/φ_f . Для образцов, облученных «мягким» спектром нейтронов ($\varphi_{th}/\varphi_f = 185$), излучение начинает восстанавливаться при $T < 400^\circ\text{C}$, тогда как для образцов, облученных «жестким» спектром нейтронов ($\varphi_{th}/\varphi_f = 10\text{--}25$) — при $T > 500^\circ\text{C}$. Трансформация спектров ФЛ (HP LEC кристалл) и характерные зависимости интенсивности полос рекомбинационного излучения (LP, HP LEC кристаллы) в процессе отжига кристаллов представлены на рис. 1–3. В спектрах ФЛ исходных HP, LP LEC кристаллов наблюдаются две основные полосы излучения 1.512 и 1.490 эВ (рис. 1, а). Основная по интенсивности примесная полоса 1.490 эВ обусловлена межпримесными излучательными переходами $D^0 - A^0(\text{C})$ с участием мелких дозоров и остаточных технологических акцепторов углерода. Высокоэнергетическая краевая полоса 1.512 эВ связана с излучательными переходами электронов с мелких донорных уровней в валентную зону. После отжига облученных кристаллов при $T > 400^\circ\text{C}$ основной в спектрах ФЛ является полоса излучения 1.479 эВ, энергетическое положение которой позволяет связать ее с межпримесными излучательными переходами $D^0 - A^0(\text{Ge})$ с участием трансмутационно вводимых акцепторов германия (рис. 1, б, с)

[8]. Это характерно для LP, HP LEC кристаллов как n -типа проводимости, так и полуизолирующих (рис. 2, 3). Проявляющаяся в процессе отжига при более высоких температурах краевая полоса (рис. 1, c; рис. 2, 3) обусловлена излучательными переходами электронов из зоны донорных состояний в валентную зону. Определить тип донорных примесей при данных уровнях трансмутационного ($n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и технологического фонового [$N_D + N_A = (2-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$] легирования фотоэлектрическими и оптическими методами невозможно даже после проведения полного отжига и достижения максимальной интенсивности полос рекомбинационного излучения. Мелкие доноры обусловлены как трансмутационно вводимыми примесями SE, Ge [1,9], так и остаточными технологическими — S, Se, Si [10].

На начальных стадиях отжига ($T = 400-500^\circ\text{C}$) интенсивности как краевой, так и примесной (с участием акцепторов германия) полос излучения выше для образцов, облученных мягким спектром нейтронов (рис. 2). В процессе отжига интенсивность краевой полосы постепенно возрастает в 10–100 раз и достигает максимальной величины при $T > 700^\circ\text{C}$ для всех отношений φ_{th}/φ_f . Интенсивность примесной полосы излучения с участием акцепторов германия резко возрастает в 100–3000 раз и достигает максимального значения при $T = 500-600^\circ\text{C}$ (рис. 2, 3). При температурах отжига $T > 650^\circ\text{C}$ происходит уменьшение абсолютной интенсивности полосы излучения с участием трансмутационных акцепторов германия и появление полосы межпримесных излучательных переходов с участием остаточных акцепторов углерода (рис. 1, d; рис. 2, 3). При температуре отжига $T = 650-700^\circ\text{C}$ для различных типов кристаллов и всех отношений потоков тепловых и быстрых нейтронов ($\varphi_{th}/\varphi_f = 10-200$) еще удается наблюдать полосу излучения акцепторов германия как отдельный пик или разрешаемый перегиб. Зависимости отношения интенсивностей полос излучения с участием остаточных (C) и трансмутационных (Ge) акцепторов I_C/I_{Ge} в процессе отжига NTD кристаллов представлены на рис. 4, где наблюдается характерная стадия отжига при $T = 600-700^\circ\text{C}$. После отжига при $T = 800^\circ\text{C}$ для всех NTD кристаллов GaAs основной в спектрах ФЛ является полоса излучения с участием остаточных акцепторов углерода, а трансмутационные акцепторы германия проявляются только как низкоэнергетическое крыло основной полосы (рис. 1, d). В трансмутационно легированных полуизолирующих кристаллах присутствие акцепторов Ge приводит к уширению межпримесной полосы излучения с 6 до 8 мэВ. Для каждого типа исходных кристаллов NTD соотношение интенсивностей краевой и примесной (с участием остаточных акцепторов углерода) полос излучения на заключительной стадии отжига при $T = 800^\circ\text{C}$ одинаково для всех отношений потоков тепловых и быстрых нейтронов. В зависимости от типа исходных LP, HP LEC кристаллов GaAs, использовавшихся для легирования, оно составляет 0.07–0.26.

Обсуждение результатов

Основные результаты исследования спектров люминесценции NTD кристаллов GaAs заключаются в проявлении полосы межпримесной излучательной рекомбинации с участием трансмутационно вводимых акцепторов германия на начальных стадиях отжига, постепенном росте

интенсивности полосы излучения с участием остаточных акцепторов углерода в процессе отжига и доминирование этой полосы в спектрах ФЛ на заключительных стадиях отжига кристаллов. Интенсивность краевой полосы излучения постепенно восстанавливается в процессе отжига NTD кристаллов GaAs. Проведем анализ этих результатов.

Проявление в спектрах ФЛ полосы излучения с участием трансмутационных акцепторов Ge характерно для всех типов кристаллов GaAs, использовавшихся для ядерного легирования: изучавшихся ранее полуизолирующих (легированных хромом) и n -типа проводимости [3], исследовавшихся в настоящей работе и полученных методами HP, LP LEC. Причем это характерно для всех отношений потоков тепловых нейтронов к быстрым $\varphi_{th}/\varphi_f = 10-200$. Как известно, германий является амфотерной примесью в GaAs, а акцепторная локализация трансмутационных атомов Ge в NTD кристаллах GaAs вполне вероятна. В результате эффектов отдачи при ядерных реакциях трансмутации (n, γ), протекающих с выделением энергии, значительно превышающей пороговую энергию смещения атомов из узлов кристаллической решетки, возможен выход трансмутационных атомов Ge из подрешетки Ga [9]. Поскольку при нейтронном облучении и сопутствующем γ -фоне в реакторе кристалл насыщен вакансиями V_{Ga} и V_{As} , последующая локализация вышедших из галлиевых узлов трансмутационных атомов Ge неоднозначна, т. е. возможно вхождение их в обе подрешетки с проявлением донорных и акцепторных свойств. Возможность амфотерного поведения трансмутационных атомов Ge в NTD кристаллах GaAs подтверждена ранее результатами квантово-химических расчетов модели кристаллического кластера, включающего две вакансии (V_{Ga} и V_{As}) и атом Ge, локализованный в одном из междоузлий [11]. Полная энергия такого кластера имеет два характерных минимума при локализации атомов Ge в вакантных узлах мышьяка и галлия, причем в последнем случае минимум энергии глубже. Это может свидетельствовать о преимущественной локализации трансмутационных атомов Ge в донорном состоянии Ge_{Ga} . Амфотерное поведение атомов Ge вполне понятно, так как даже при выращивании кристаллов GaAs из расплава, и особенно при жидкостной эпитаксии, можно изменять соотношение доноров и акцепторов германия, изменяя условия роста [12]. Очевидно, что вследствие эффекта отдачи и значительного числа вакансий мышьяка невозможно избежать локализации атомов Ge в узлах As с проявлением ими акцепторных свойств. Акцепторная локализация атомов Ge наблюдалась в эпитаксиальных слоях даже при отношении потоков тепловых и быстрых нейтронов $\varphi_{th}/\varphi_f = 5 \cdot 10^5$ [9].

Акцепторы трансмутационной примеси Ge несомненно присутствуют в NTD кристаллах GaAs после заключительного высокотемпературного отжига. Исчезновение в спектрах ФЛ полосы излучения с участием акцепторов Ge не означает исчезновения самих акцепторов Ge в NTD кристаллах GaAs. Можно указать две причина такого поведения интенсивности полосы излучения с участием акцепторов германия. Во-первых, интенсивность полосы межпримесных излучательных переходов с участием акцепторов Ge будет несколько ниже, чем в случае акцепторов C даже при равных их концентрациях. Это связано с тем, что вероятность межпримесного излучательного перехода электрона с донора на акцептор экспоненциально зависит от дипольного матричного элемента $M \sim \exp(-R/a)$, где R — расстояние в донорно-акцепторной

паре, a — величина порядка боровского радиуса мелкой примеси [13]. У более глубокого акцептора Ge ($E_a = 40.4$ мэВ) боровский радиус меньше, чем у акцептора C ($E_a = 26.0$ мэВ). Но вероятности переходов не могут существенно изменить соотношение интенсивностей полос излучения. Вторая, и по-видимому, основная причина слабой интенсивности полосы излучения с участием акцепторов Ge в исследованных нами NTD кристаллах GaAs после заключительного отжига при $T = 700\text{--}800^\circ\text{C}$ состоит в меньшей концентрации трансмутационных акцепторов германия по отношению к остаточным акцепторам углерода. Тем не менее присутствие акцепторов германия в NTD кристаллах GaAs после заключительного отжига следует из спектров ФЛ при $T = 77$ К (рис. 1, е), где энергетическое положение максимума примесной полосы 1.473 эВ соответствует излучательным переходам $e-A^0$ с участием акцепторов Ge. Это связано с тем, что при генерации неравновесных носителей заряда наряду с захватом дырок на уровне акцепторов идет их обратный выброс в валентную зону [14]. При $T = 77$ К неравновесные дырки легче выбрасываются в валентную зону с более мелкого акцептора (C), чем с глубокого (Ge), поэтому эффективная концентрация акцепторов углерода, участвующих в оптических переходах $e-A^0$, будет меньше. Все это вместе взятое позволяет заключить, что в исследованных нами кристаллах при использовавшихся уровнях ядерного легирования концентрация трансмутационных акцепторов Ge меньше концентрации остаточных акцепторов C. Концентрация акцепторов углерода в исходных ЛЕС кристаллах GaAs, использовавшихся для легирования, составляла $(5\text{--}10) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, а концентрация атомов германия, вводимых ядерными трансмутациями по оценкам [15], составляла $3.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. На основании этих результатов можно сделать вывод, что основная часть трансмутационных атомов германия является мелкими донорами в узлах галлия. Соотношение интенсивностей полос излучения в спектрах ФЛ с участием остаточных (C) и трансмутационных (Ge) акцепторов должно зависеть от уровней фонового и трансмутационного легирования. Это позволяет понять различие в спектрах ФЛ NTD кристаллов GaAs, исследовавшихся в [16]. Так, для кристаллов ЛЕС GaAs с концентрацией углерода $N_C < 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, выращенных в магнитном поле, после ядерного легирования и отжига при $T = 700^\circ\text{C}$ полоса излучения с участием трансмутационных акцепторов германия основная. Для обычного NTD ЛЕС кристалла с $N_C \sim 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ основной в спектрах ФЛ является полоса излучения с участием остаточных акцепторов углерода.

Установив, что в исследованных NTD кристаллах GaAs концентрация трансмутационных акцепторов Ge не превосходит концентрации остаточных акцепторов C, необходимо объяснить соотношение интенсивностей полос излучения с участием акцепторов C и Ge (рис. 4) в процессе отжига кристаллов. Аналогичный качественный характер доминирования в спектрах ФЛ на начальных стадиях отжига полосы излучения с участием трансмутационных акцепторов германия и постепенного восстановления интенсивности полосы излучения остаточных акцепторов углерода наблюдался нами ранее [3] и связывался с комплексобразованием акцепторной примеси C с радиационными дефектами. Традиционно считается, что основные РД в облученных кристаллах GaAs не связаны с примесями [7,17]. В ряде известных работ на

основе электрофизических измерений показано, что скорость удаления носителей заряда в кристаллах GaAs *n*-типа, облученных высокоэнергетическими электронами [18] и быстрыми нейтронами [19], не зависит от концентрации и химической природы мелких донорных примесей. Однако спектроскопические методы более чувствительны к типу и концентрации примесей. Исследование колебательных спектров поглощения в облученном электронами GaAs обнаружило комплексообразование остаточной примеси углерода с радиационными дефектами [20]. В случае NTD кристаллов GaAs мы наблюдаем постепенный рост интенсивности полосы межпримесных излучательных переходов с участием акцепторов углерода и краевой полосы в процессе отжига кристаллов, хотя центры излучательной рекомбинации, включающие атомы углерода и радиационные дефекты, в спектрах ФЛ не наблюдаются. Такое поведение интенсивности полосы излучения с участием акцепторов углерода нельзя связать только с ростом эффективности излучательной рекомбинации вследствие изменения времени жизни носителей заряда в процессе отжига NTD кристаллов GaAs. Вследствие общего механизма межпримесной излучательной рекомбинации для мелких акцепторов C и Ge соотношение интенсивностей полос излучения в спектрах ФЛ (рис. 4) отражает их относительную концентрацию [21] и указывает на более высокую концентрацию акцепторов германия по отношению к акцепторам углерода в NTD кристаллах GaAs, отожженных при $T = 400\text{--}600^\circ\text{C}$. На этой стадии отжига еще возможен рост концентрации акцепторов германия в процессе вхождения трансмутационных атомов Ge в галлиевую подрешетку, но на заключительной стадии отжига, как отмечалось выше, концентрация акцепторов Ge не превосходит концентрации акцепторов C. Таким образом, соотношение интенсивностей полос ФЛ с участием акцепторов Ge и C в процессе отжига NTD кристаллов при $T = 400\text{--}600^\circ\text{C}$ указывает, что концентрация оптически активных акцепторов углерода меньше концентрации акцепторов германия на этой стадии отжига и, следовательно, меньше концентрации углерода в NTD кристаллах после заключительного отжига и в исходных кристаллах. Все это дает нам основание считать, что при облучении кристаллов GaAs нейтронами атомы остаточной акцепторной примеси углерода взаимодействуют с радиационными дефектами и образуют комплексы, являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации. Образующиеся при нейтронном облучении комплексы с участием примесных атомов углерода сложны и устойчивы до высоких температур отжига. Их распад происходит при $T = 600\text{--}700^\circ\text{C}$. Отметим, что концентрация комплексов не превышает концентрацию остаточных компенсирующих акцепторов углерода в исходных кристаллах GaAs.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Белоруссия.

Список литературы

- [1] *Neutron Transm. Doping of Semicond. Mater.*, ed. by R.D. Larrabee (Plenum Press, N.Y., 1984).
- [2] *Легирование полупроводников методом ядерных реакций*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, 1981).
- [3] В.А. Быковский, В.А. Гирий, Ф.П. Коршунов, В.И. Утенко. ФТП, **23**, 78 (1989)

- [4] Ф.П. Коршунов, Л.М. Карпович, В.И. Утенко, А.В. Фотин, В.Ф. Шох. Изв. АН Белоруссии, N 11-12, 982 (1995).
- [5] В.Н. Вигдорович, Н.Г. Колин, В.Б. Освенский, В.А. Харченко, Л.П. Холодный, Н.И. Ярмолюк. ФТП, 15, 565 (1981).
- [6] Н.Г. Колин, Л.В. Куликов, В.Б. Освенский, С.П. Соловьев, В.А. Харченко. ФТП, 15, 565 (1981).
- [7] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, 1980).
- [8] D.I. Ashen, P.J. Dean, D.T.J. Hurle, J.B. Mullin, A.M. White, P.D. Greene. J. Phys. Chem. Sol., 36, 1041 (1975).
- [9] T.S. Low, M.H. Kim, B. Lee, B.J. Scromme, T.K. Lepkowski, G.E. Stillman. J. Electron Mater., 14, 477 (1985).
- [10] Л. Холлан, Дж. Холлейн, Дж. Брайс. В сб.: *Актуальные проблемы материаловедения* (М., 1983) вып. 2, с. 7.
- [11] Н.И. Акулович, А.Г. Уляшин, В.И. Утенко. Тез. докл. XII Всес. конф. по микроэлектронике (Тбилиси, 1987) ч. 1, с. 33.
- [12] В.М. Андреев, Л.М. Долгинов, Д.Н. Третьяков. *Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов* (М., Наука 1975).
- [13] F. Williams. Phys. St. Sol., 25, 493 (1968).
- [14] А.П. Леванюк, В.В. Осипов. УФН, 133, 427 (1981).
- [15] M.H. Young, A.T. Hunter, R. Baron, O.J. Marsh, H.V. Winston, R.R. Hart. *Proc. 4th Neutron Transmutation Doping Conference held at National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland* (Plenum Press, N.Y., 1984) p. 1.
- [16] M. Satoh, K. Kuriyama, T. Kawakubo. J. Appl. Phys., 67, 3542 (1990).
- [17] D.V. Lang. In: *Radiation Effects in Semiconductors*. Inst. Phys. Conf. Ser. 31 (Bristol-London, 1977) p. 70.
- [18] Т.И. Кольченко, В.И. Ломако. ФТП, 9, 1757 (1975).
- [19] K.V. Vaidyanathan, L.A. Watt. In: *Radiation Effects in Semiconductors* (Gordon and Breach, N.Y., 1971) p. 293.
- [20] J.D. Collins, G.A. Gledhill, R.R. Murray, P.S. Nandhra, R.S. Newman. Phys. St. Sol. (b), 151, 469 (1989).
- [21] В.П. Грибковский. *Теория поглощения и испускания света в полупроводниках* (Минск, 1975).

Редактор В.В. Чалдышев

Radiative recombination and impurity-defect interactions in neutron transmutation doped gallium arsenide obtained under various conditions of crystal growth and irradiation

V.A. Bykovskiy, F.P. Korshunov¹, E.S. Solodovnikov², V.I. Utenko, V.F. Shokh

Minsk Research Institute of Electronic Materials, 220115 Minsk, Belorussia

¹ Institute of Solid State and Semiconductor Physics, Belorussian Academy of Sciences, 220023 Minsk, Belorussia

² Research Institute of Nuclear Physics, Tomsk Polytechnics, 634000 Tomsk, Russia