

РЕКОМБИНАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЙ ОТЖИГ В СЛОЯХ GaAs И AlGaAs

© М.М.Соболев, А.В.Абрамов, Н.Г.Дерягин, А.Г.Дерягин,
В.И.Кучинский, М.И.Папенцев

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

(Получена 2 ноября 1995 г. Принята к печати 9 ноября 1995 г.)

Эпитаксиальные слои GaAs и AlGaAs, выращенные при сверхвысоких скоростях охлаждения, исследовались с помощью измерений спектров по методу DLTS и фотолюминесценции. Было обнаружено, что неравновесные условия роста приводят к формированию дефектов, характерных для радиационно-облученных GaAs и AlGaAs и связанных с центрами типа V_{As} и As_{Ga} . После облучения этих слоев лазером с длиной волны $\lambda = 0.51$ мкм наблюдались значительные изменения в спектрах DLTS для GaAs и AlGaAs и спектрах фотолюминесценции AlGaAs. Эти изменения связываются с процессом частичного оптически индуцированного отжига дефектов и с процессом рекомбинационно-стимулированной диффузии донорной примеси (D), приводящим к образованию комплекса $V_{As}-D$.

1. Введение

Известно, что в эпитаксиальных нелегированных слоях выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) из раствора-расплава Ga при обычных температурах начала кристаллизации и скоростях охлаждения раствора-расплава, образуются собственные точечные дефекты типа $HL2$ и $HL5$, являющиеся дырочными ловушками [1]. В работах [2-4] показано, что изменение состава раствора-расплава при добавлении в расплав Bi или увеличение рабочих температур роста выше $800^\circ C$ приводит к получению слоев с отклонением состава от стехиометрического. Происходит образование донорных дефектов и кластеров, в том числе дефектов, подобных $EL2$, обладающих высокой термостабильностью. Применение сверхвысоких скоростей охлаждения ($10^2 - 10^3$ C/c) существенно расширяет возможности метода ЖФЭ [5]. Процессы кристаллизации, протекающие в растворе-расплаве в этом случае, отличаются от кристаллизации в условиях, близких к равновесным. Следует ожидать, что будет отличаться и ансамбль дефектов, образующихся в процессе эпитаксиального роста. Важной для многих прикладных целей является также проблема стабильности дефектов, образующихся в процессе роста, по отношению к различного

рода отжигам, в том числе и к радиационно-стимулированному. Данная работа посвящена исследованию ансамбля дефектов и примесей с глубокими уровнями, образующихся при выращивании нелегированных слоев GaAs и AlGaAs со сверхвысокими скоростями охлаждения, методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и фотолюминесценции (PL). Также изучалась стабильность дефектов по отношению к воздействию оптического излучения на данные материалы.

2. Техника эксперимента

Нелегированные эпитаксиальные слои GaAs и AlGaAs были получены при кристаллизации из раствора-расплава Ga+As и Ga+As+Al на подложках GaAs [100] с концентрацией носителей $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в широком интервале температур, вплоть до комнатной. Температура начала роста составляла 750°C . Максимальная скорость охлаждения достигала 400°C/с . Толщина слоя GaAs была $\sim 2 \text{ мкм}$. Концентрация свободных носителей в слоях GaAs, измеренная с помощью $C-V$ -метода, была порядка 10^{16} см^{-3} . Выращенный эпитаксиальный слой AlGaAs представлял собой волноводную структуру толщиной примерно 1 мкм с концентрацией AlAs ≈ 40 и 50% в центре и на границе слоя соответственно [5]. Состав по толщине был определен с помощью метода вторично-ионной масс-спектропии на ионном микронзонде CAMECA IMS-4f. Концентрация свободных носителей в слое AlGaAs была порядка 10^{16} см^{-3} . Перед проведением измерений спектров PL на n -подложку GaAs методом термического осаждения с последующим отжигом были нанесены Au-Ge-омические контакты. Измерение спектров фотолюминесценции проводилось при температуре 77 K . В качестве источника возбуждения был применен аргоновый лазер (ЛГ-106М) с длиной волны генерации 0.51 мкм (2.43 эВ). Лазерный пучок фокусировался оптической системой на поверхность образца в пятно диаметром 200 мкм . Измерение спектров PL осуществлялось при мощности накачки 50 мВт . Лазерный отжиг образцов проводился при мощности излучения 600 мВт в течение $5-10 \text{ мин}$ при температуре жидкого азота. Плотность мощности при лазерном отжиге составляла 1.9 кВт/см^2 . После проведения измерений PL на эпитаксиальные n -слои AlGaAs и GaAs были нанесены методом термического осаждения Au-барьеры Шоттки. Исследования дефектов с глубокими уровнями в эпитаксиальных слоях производились $C-V$ - и DLTS-методами с помощью спектрометра DL4600 фирмы BIO-RAD, работающего в режиме двухстробного интегрирования. Для измерения емкости использовался мост Woonon-72В, работающий на частоте 1 МГц . Чувствительность этой установки равна $\Delta C/C_0 \approx 10^{-4}$.

3. Результаты

Спектры фотолюминесценции нелегированных слоев AlGaAs и GaAs, измеренные при температуре 77 K , представлены на рис. 1. Видно, что спектр PL GaAs до и после отжига практически не изменяется (рис. 1, *b*). В спектре фотолюминесценции для AlGaAs происходят существенные изменения. Пик PL с энергией $E = 2.060 \text{ эВ}$ гасится.

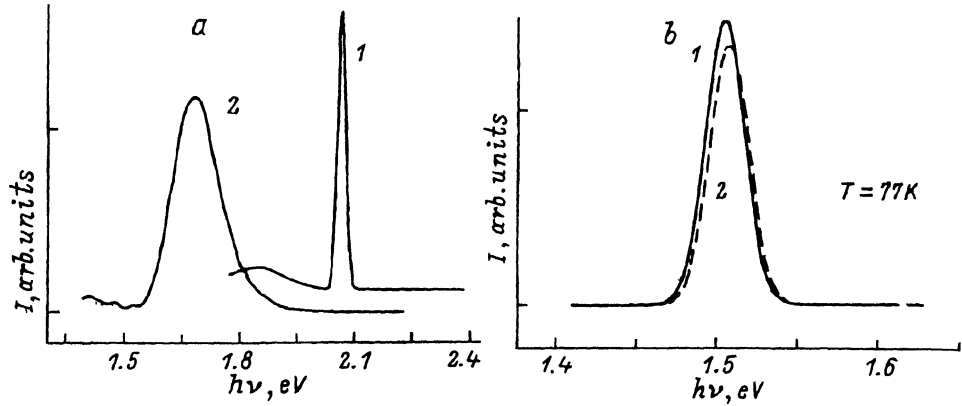


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции слоев n -AlGaAs (а) и n -GaAs (б), выращенных методом жидкофазной эпитаксии со сверхвысокими скоростями охлаждения до (1) и после (2) лазерного отжига.

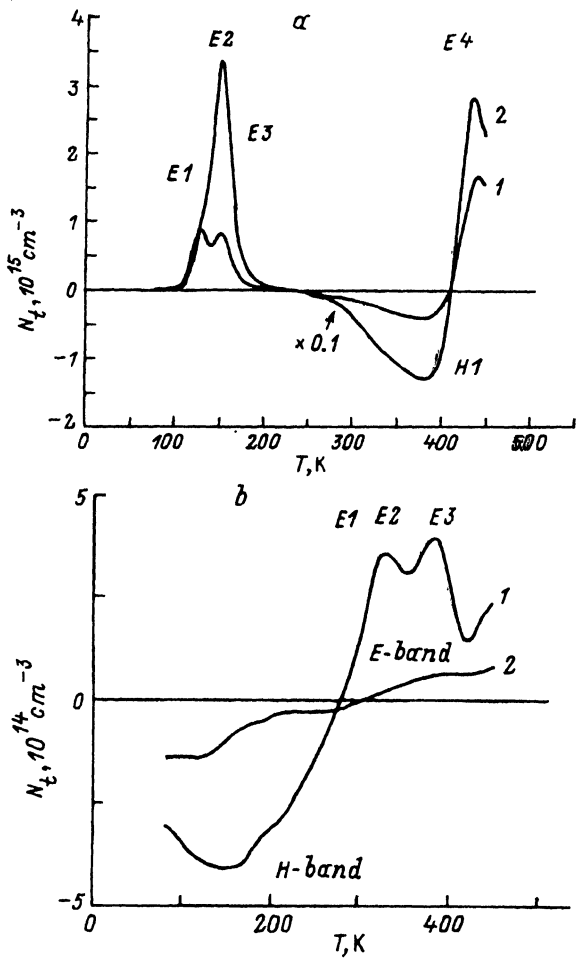


Рис. 2. Спектры DLTS эпитаксиальных слоев n -AlGaAs (а) и n -GaAs (б) до (1) и после (2) лазерного отжига.

Наименование уровней	Энергия E , мэВ	Сечение захвата σ , см ²	Концентрация глубоких уровней N , см ⁻³		Идентификация глубоких уровней
			до отжига	после отжига	

AlGaAs

$E1$	297	$8.3 \cdot 10^{-12}$	$1.8 \cdot 10^{15}$	$1.05 \cdot 10^{15}$	
$E2$	268	$1.3 \cdot 10^{-14}$	$4.5 \cdot 10^{15}$	$1.15 \cdot 10^{15}$	
$E3$	285	$7.5 \cdot 10^{-15}$	$2.0 \cdot 10^{14}$	$7.0 \cdot 10^{13}$	DX [8]
$E4$	732	$3.6 \cdot 10^{-16}$	$6.0 \cdot 10^{14}$	$3.5 \cdot 10^{14}$	$EL2$ [10]
$H1$	740	$3.9 \cdot 10^{-15}$	$2.2 \cdot 10^{14}$	$6.5 \cdot 10^{13}$	$HL2$ [4]

GaAs

$E1$	563	$5.2 \cdot 10^{-16}$	$3.0 \cdot 10^{14}$	$\approx 6.0 \cdot 10^{13}$	
$E2$	592	$1.6 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{14}$	$\approx 6.0 \cdot 10^{13}$	
$E3$	726	$9.4 \cdot 10^{-15}$	$4.2 \cdot 10^{14}$	$\approx 7.0 \cdot 10^{13}$	

Вместо него появляется новая линия с энергией $E = 1.680$ эВ. Измерения спектров DLTS (рис. 2) показывают формирование в слоях AlGaAs в процессе эпитаксиального роста четырех электронных ловушек ($E1-E4$) и одной дырочной ловушки $H1$ (см. таблицу и рис. 3, *a*). Уровень $E2$ был подобен уровню $E2$, обнаруженному в работе [6] при радиационном облучении AlGaAs. Природа этого уровня связывается в настоящее время с V_{As} [7]. Уровень $E3$ был идентифицирован как DX -центр донора VI группы, замещающего мышьяк в кристаллической решетке [8]. Эпитаксиальные слои проявляли эффект остаточной фотопроводимости, характерный для DX -центров [9]. Параметры уровня $E4$ были подобны параметрам дефекта $EL2$ [10]. После лазерного отжига концентрация дефектов $E1$ и $E4$ уменьшилась в 1.7 раза, а концентрация дефектов $E2$ и $E3$ — в 3.6–3.9 раза. Концентрация дефектов типа $H1$, которые идентичны дефектам, образующим уровень $HL2$, и связываются с комплексами, включающими в себя V_{As} , а также возможно, межузельный мышьяк [4], также уменьшается в 3.4 раза. Концентрация свободных носителей, измеренная $C-V$ -методом, уменьшилась после отжига примерно в 2 раза. В эпитаксиальных слоях n -GaAs в спектрах DLTS (рис. 2, *b*) наблюдался широкий пик неосновных носителей (H -полоса), что не позволило нам определить параметры связанных с ним уровней. Наличие трех электронных уровней (см. таблицу) в этих спектрах также было необычным. Один из них, уровень $E3$, был идентичен по параметрам с уровнем дефекта $EL2$. Два других были характерны для радиационно-облученных слоев GaAs и связывались с кластерами дефектов As_{Ga} и V_{As} [11]. На рис. 3, *b* показаны зависимости Аррениуса для этих уровней. После лазерного отжига происходило уменьшение концентрации всех ловушек, индивидуальные характеристики дефектов становились неразличимыми. Наблюдалось образование кластеров электронных и дырочных ловушек (рис. 2, *b*).

Спектр фотолюминесценции слоев AlGaAs до отжига имел узкую линию с $E = 2.060$ эВ. Измерения PL, проведенные при температуре 4.2 К, показали, что энергия этого пика не зависит от плотности возбуждения, в то время как его интенсивность линейно увеличивается с ростом мощности возбуждения. Наблюдаемые параметры положения и ширины спектральной линии, а также зависимости от плотности мощности характерны для фотолюминесценции экситона, связанного на нейтральном доноре для AlGaAs с составом, близким к $x = 0.38$ [12]. Измерения показали также наличие в спектре фоновой реплики с положением максимума при $E = 2.003$ эВ. Это характерно для высококачественных слоев AlGaAs с составом вблизи кроссовера прямой-непрямой переход [12]. Наблюдаемая после отжига линия с энергией $E = 1.680$ эВ ранее уже наблюдалась [13], и ее связывали с комплексом V_{As} -примесь, поскольку для этой линии характерным является ее усиление при отжиге в вакууме. Отжиг при сверхвысоком давлении мышьяка к изменениям в интенсивности этой линии не приводил. Изменения в спектрах PL и DLTS, наблюдаемые нами после лазерного отжига, могут быть поняты как результат рекомбинационно-генерационного процесса, состоящего из рекомбинационно-стимулированного отжига и рекомбинационно-стимулированной диффузии примеси [14,15]. Из наших измерений следует, что концентрация дефектов, в состав которых входят вакансии мышьяка, уменьшается в 2 раза больше, чем концентрация дефектов, содержащих вакансию галлия. Полностью гасится излучение экситона, связанного на нейтральном доноре, которым, по-видимому, является донор VI группы, замещающий в узле мышьяк и имеющий общую с DX-центром природу. Согласно модели, предложенной в работе [16], DX-центр имеет два состояния — одно глубокое, когда донор расположен в междоузлии, проявляющееся при DLTS-измерениях, другое — мелкое водородоподобное, когда донор замещает атом мышьяка. DX-центр может быть переведен в мелкое состояние при фотовозбуждении его светом при температурах ниже 120 К. В этом состоянии он положительно заряжен. При достаточно низких температурах донор становится нейтральным. В нашем случае DX-центр переводится в состояние, в котором он является мелким уровнем, при проведении измерений PL, а также в процессе лазерного отжига при 77 К. При этом, по-видимому, происходит образование экситона, связанного на нейтральном доноре, который наблюдается в спектрах PL. Донорная примесь, также как и межузельный As_i , обладает достаточной подвижностью при отжиге [7], что в конечном счете может привести к образованию комплекса $D-V_{As}$ и к аннигиляции As_i с V_{As} . В работе [7], в частности, было показано, что отжиг дефекта E3, представляющего собой комплекс $V_{As}-As_i$, значительно усиливается при инъекции неосновных носителей. Энергия, выделяющаяся при аннигиляции дефектов, передается фононам, которые усиливают этот процесс. Возможно также рождение других дефектов, усиливающих диффузию донорной примеси, которая при своей диффузии объединяется с другой частью вакансий мышьяка, которые не проаннигилировали с As_i . Гашение линии с энергией $E = 2.060$ эВ в AlGaAs таким образом по-видимому, связано как с про-

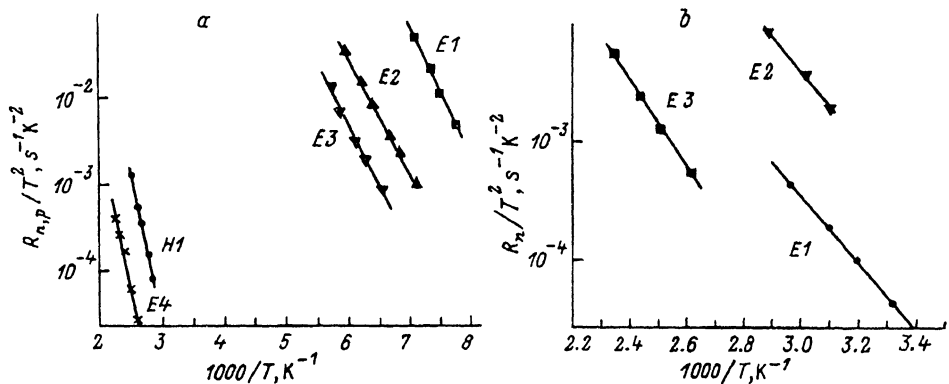


Рис. 3. Зависимости Аррениуса термоэлектронной эмиссии глубоких уровней эпитаксиальных слоев n -AlGaAs (а) и n -GaAs (б).

пессом рекомбинационно-стимулированной диффузии донора, так и с образованием комплекса примесь-⟨вакансия мышьяка⟩. В случае GaAs рекомбинационно-стимулированный процесс ведет к аннигиляции части дефектов, связанных с V_{As} и As_{Ga} .

5. Заключение

В эпитаксиальных слоях GaAs и AlGaAs, выращенных методом жидкофазной эпитаксии при сверхвысоких скоростях охлаждения, обнаружено образование электронных ловушек, связанных с V_{As} и As_{Ga} . Облучение этих слоев лазером с длиной волны $\lambda = 0.51$ мкм привело к частичному оптически индуцированному отжигу дефектов и к рекомбинационно-генерационному процессу диффузии примеси с образованием комплекса ⟨вакансия мышьяка⟩-⟨донорная примесь⟩.

В заключение авторы выражают благодарность С.И.Кахановскому за проведенные фотолюминесцентные измерения при 4.2 К и Б.Я.Беру за измерения составов эпитаксиальных слоев по толщине с помощью метода вторично-ионной масс-спектропии на ионном микронзонде CAMECA IMS-4f.

Список литературы

- [1] A. Mitoneau, G.M. Martin, A. Mircea. Electron. Lett., **13**, 666 (1977).
- [2] М.М. Соболев, С.Г. Конников, М.Н. Степанова. ФТП, **18**, 383 (1984).
- [3] М.М. Соболев, П.Н. Брунков, С.Г. Конников, М.Н. Степанова, В.Г. Никитин, В.П. Улин, А.Ш. Долбая, Т.Д. Камушадзе, Р.М. Майсурадзе. ФТП, **23**, 1058 (1989).
- [4] П.Н. Брунков, С. Гайбуллаев, С.Г. Конников, В.Г. Никитин, М.И. Папенцев, М.М. Соболев. ФТП, **25**, 338 (1991).
- [5] А.В. Абрамов, Б.Я. Бер, Н.Г. Дерягин, А.В. Меркулов, Д.Н. Третьяков. Письма ЖТФ, **21**, 34 (1995).
- [6] D.V. Lang, R.A. Logan, L.C. Kimerling. Phys. Rev. B, **15**, 4874 (1977).
- [7] D. Stievenard, X. Boddaert, J.C. Bourgoin, H.J. von Bardeleben. Phys. Rev. B, **41**, 5271 (1990).
- [8] M. Zazoui, S.L. Feng, J.C. Bourgoin. Phys. Rev. B, **41**, 8485 (1990).
- [9] D.V. Lang, R.A. Logan. Phys. Rev. B, **19**, 1015 (1979).
- [10] P.K. Bhattacharya, S. Subramanian, M.J. Ludovise. J. Appl. Phys., **55**, 3664 (1984).

- [11] S. Makram-Ebeid, P. Boher. *Revue Phys. Appl.*, **23**, 847 (1988).
- [12] L. Pavesi, M. Guzzi. *J. Appl. Phys.*, **75**, 4779 (1994).
- [13] L. Pavesi, N.H. Ku, J.D. Ganie're, F.K. Renhart, N. Baba-Ali, I. Harison, B. Tuck, M. Henini. *J. Appl. Phys.*, **71**, 2225 (1992).
- [14] D.V. Lang, L.C. Kimerling. *Phys. Rev. Lett.*, **33**, 489 (1974).
- [15] M. Hamatsu, K. Wada. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 2015 (1991).
- [16] D.J. Chadi, K.J. Chang. *Phys. Rev. B*, **39**, 10063 (1989).

Редактор П.А. Полянская

Recombination enhanced annealing in GaAs and AlGaAs layers

M.M.Sobolev, A.V.Abramov, A.G.Deryagin, N.G.Deryagin, V.I.Kuchinsky, M.I.Papentsev

A.F.Ioffe Physico-Technical Institute of Russian Academy of science,
194021 St.-Petersburg, Russia

GaAs and AlGaAs epitaxial layers, grown under ultra fast cooling rates, have been investigated by DLTS and photoluminescence measurements, It was observed that unequilibrium growth conditions led to formation of defects which are typical for irradiated GaAs and AlGaAs and are connected with V_{As} and As_{Ga} . Significant changes were observed in DLTS spectra of GaAs and AlGaAs and in photoluminescence spectra of AlGaAs after irradiation of these layers by laser with wavelength $\lambda = 0.51\mu$. These changes are connected with process of optically induced annealing of defects and with process of recombination enhanced diffusion of donor impurity (D), leading to formation of complex $V_{As}-D$.
