

ДИАГНОСТИКА ПЛЕНОК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

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

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко при Белорусском государственном университете им. В. И. Ленина, 220064, Минск, Беларусь
(Получена 10 января 1992 г. Принята к печати 24 декабря 1992 г.)

С помощью измерений комбинационного рассеяния света, низкотемпературной (4.5 К) фотолюминесценции (ФЛ), коэффициента Холла и электропроводности проанализировано качество слоев GaAs, выращенных методом атомно-слоевой эпитаксии из газовой фазы металлоорганических соединений при различных температурах подложки (435—600 °С). Установлено, что исследованные слои обладают дырочной проводимостью, обусловленной присутствием акцепторов углерода. Показано, что по мере увеличения температуры осаждения наблюдается постепенное улучшение качества слоев, сопровождающееся снижением концентрации дырок и ростом их подвижности. Высокая степень чистоты и совершенства пленки, выращенной при $T = 600$ °С, подтверждается результатами анализа спектра экситонной полосы ФЛ.

Проведено также сравнение характеристик слоев, полученных на подложках GaAs и Ge в одном технологическом процессе. Показано, что свойства слоев GaAs/Ge заметно отличаются от свойств гомоэпитаксиальных слоев.

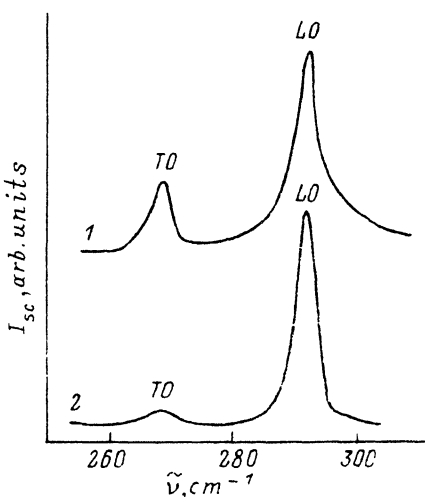
В последние годы активно развивается атомно-слоевая эпитаксия (АСЭ). Эта методика осаждения позволяет управлять процессом роста на монослойном уровне и открывает новые возможности для изготовления сверхрешеток с одноатомными слоями и различного рода гетероструктур [1–3]. Авторами [1–3] изучены зависимости скоростей роста и уровней фонового легирования слоев GaAs от скорости подачи реагентов и длительности их введения в процессе АСЭ. В настоящей работе по результатам измерений комбинационного рассеяния света (КРС), фотолюминесценции (ФЛ), а также коэффициента Холла и электропроводности проанализировано качество нелегированных гомоэпитаксиальных слоев GaAs, выращенных методом АСЭ при различных температурах. Рассмотрены также проблема фонового легирования пленок и возможность осаждения тонких слоев GaAs на неполярных подложках, таких как Ge.

Исследуемые слои толщиной $d = 0.3–0.5$ мкм осаждались на ориентированных в направлении (100) подложках из GaAs и Ge. Использовался реактор специальной конструкции в МОС-гидридной системе при атмосферном давлении. Температура подложки варьировалась в интервале 435—600 °С.

Измерения комбинационного рассеяния света проводились на воздухе при комнатной температуре в 90-градусной геометрии. Для возбуждения использовалось излучение аргонового лазера ($\lambda = 514$ нм). Спектры фотолюминесценции в диапазоне $h\nu = 1.29–1.55$ эВ снимались с помощью спектрометра «Ramalog (Spxh)» при $T = 4.5$ К. Достигалось разрешение ~ 0.05 мэВ. Возбуждение ФЛ осуществлялось с помощью излучения криптонового лазера ($\lambda = 647$ нм). Для охлаждения образцов использовалась криостатная система «Утрекс».

Спектры КРС для слоев GaAs/GaAs, осажженных при двух различных температурах, представлены на рис. 1. В том и другом случаях наблюдаются два основных пика, относящихся к процессам рассеяния с кинетикой первого порядка

Рис. 1. Типичные спектры комбинационного рассеяния гомоэпитаксиальных структур GaAs, выращенных с помощью АСЭ при различных температурах осаждения. T_g , °C: 1 — 435, 2 — 560.



(269 и 292 см^{-1} для TO - и LO -фононов соответственно). Согласно правилам отбора, в геометрии обратного рассеяния для кристаллов GaAs (100) разрешенным является лишь рассеяние LO -фононами, TO -рассеяние, напротив, запрещено. Активация TO -моды может быть обусловлена, с одной стороны, отклонением от геометрии обратного рассеяния, а с другой — наличием различного рода дефектов и несовершенств, способствующих понижению симметрии кристалла. Последнее обстоятельство в случае постоянства геометрии рассеяния и других экспериментальных условий позволяет характеризовать степень совершенства исследуемого материала по относительной интенсивности TO -моды [4]. Данные, представленные на рис. 1, показывают, что результаты измерений КРС весьма чувствительны к изменению условий роста. По мере изменения температуры осаждения наблюдаются снижение интенсивности TO -рассеяния (I_2) по отношению к LO -рассеянию (I_1) и изменение полуширины пика LO -моды (Γ_1). Представленные на рис. 2 зависимости $I_2/I_1(T_g)$ и $\Gamma_1 = f(T_g)$ свидетельствуют о том, что по мере увеличения температуры роста T_g до 600 °C наблюдается постепенное улучшение

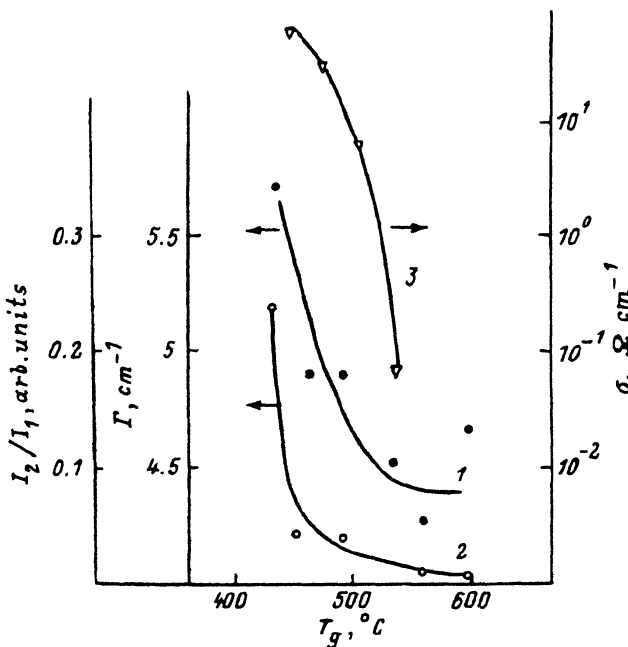


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности TO -моды КРС I_2/I_1 (1), полуширины пика LO -моды Γ_1 (2) и электропроводности σ (3) гомоэпитаксиальных слоев GaAs, выращенных методом АСЭ, в зависимости от температуры осаждения T_g , °C.

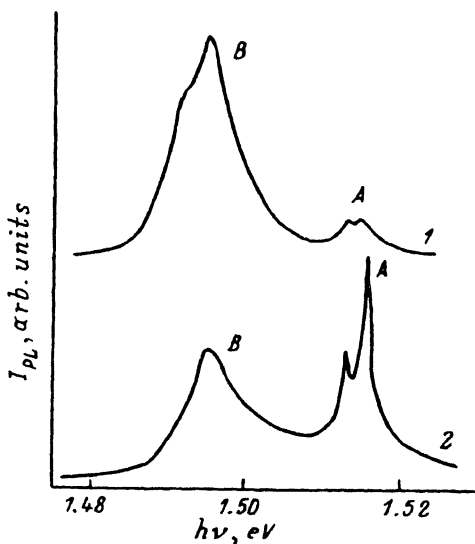


Рис. 3. Типичные спектры фотолуминесценции гомоэпитаксиальных слоев GaAs, выращенных методом АСЭ при различных температурах осаждения. T_g , °C: 1 — 435 (образец α), 2 — 600 (образец β), температура измерений 4.5 К; подложка — полуизолирующий GaAs (Cr).

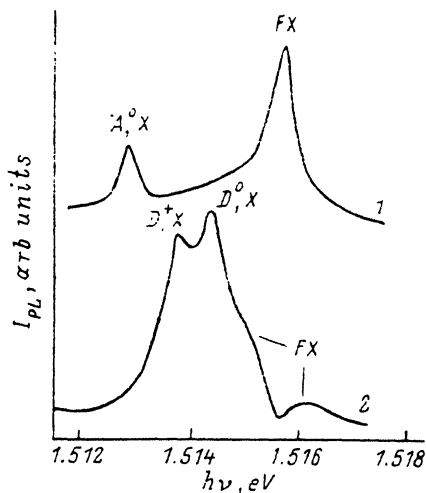


Рис. 4. Спектр экситонной полосы ФЛ гомоэпитаксиального слоя GaAs, выращенного с помощью АСЭ при $T_g = 600$ °C (1), в сравнении с одноименным спектром нелегированного n -GaAs, выращенного хлоридным методом (2).

качества исследуемых слоев. Результаты электрических измерений показывают, что пленки, выращенные при $T_g \leq 535$ °C, характеризуются дырочной проводимостью. Установлено также, что по мере увеличения температуры роста наблюдается постепенное снижение электропроводности (σ) слоев (рис. 2), обусловленное спадом концентрации дырок от $p \sim 10^{18}$ до $p \leq 10^{15}$ см⁻³ и незначительным ростом их подвижности. Электрические параметры слоев, осажденных при $T_g \geq 560$ °C, к сожалению определить не удалось. Таким образом, данные рис. 2 свидетельствуют о корреляции результатов электрических измерений и КРС.

Об изменении свойств слоев по мере увеличения температуры осаждения свидетельствовали и данные измерений фотолуминесценции. Так, на рис. 3 представлены спектры ФЛ слоев GaAs/GaAs, выращенных при двух крайних значениях температуры роста (для образца α $T_g = 435$ °C, а для образца β $T_g = 600$ °C). Видно, что независимо от температуры осаждения в спектре ФЛ наблюдаются основные полосы: краевая (А) и акцепторная (В), однако соотношение интенсивностей полос существенно зависит от температуры роста. В спектрах полосы В наблюдаются две основные составляющие — В1 (1.4950 эВ) и В2 (1.4910 эВ), которые, вероятно, обусловлены зонно-акцепторными ($e-A$) и донорно-акцепторными ($D-A$) переходами с участием примеси углерода. Последнее согласуется с результатами [3], где установлено, что основной акцепторной примесью в слоях, выращенных методом АСЭ из металлоорганических соединений, является углерод.

Из рис. 3 видно, что для образца β А-полоса ФЛ отчетливо разделяется на 2 составляющие. Структура этой полосы более детально представлена на рис. 4. Имеющиеся данные позволяют заключить, что обе компоненты А-полосы связаны с экситонными переходами. Пик при $h\nu = 1.5155$ эВ, по-видимому, соответствует свободному экситону, а пик при $h\nu = 1.5128$ эВ — экситону, локализованному на

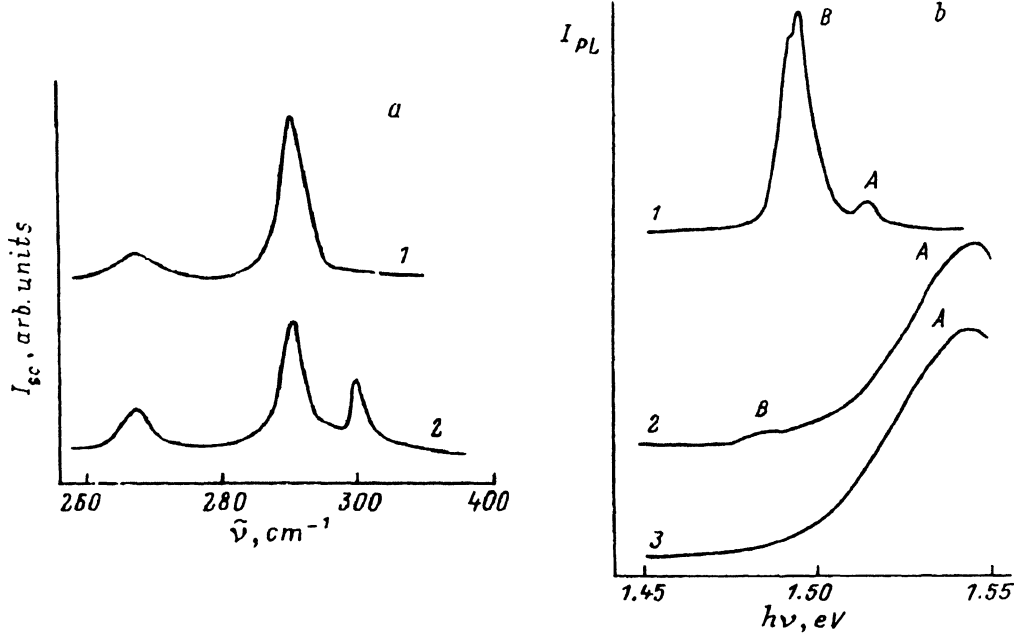


Рис. 5. Результаты измерений комбинационного рассеяния света (а) и фотолюминесценции (б) слоев GaAs, выращенных методом АСЭ при $T_g = 465^\circ\text{C}$ на различных подложках. Подложки: 1 — полупроводящий GaAs (Cr), 2 — Ge, 3 — спектр ФЛ сильно легированного объемного GaAs n -типа проводимости (б).

нейтральном акцепторе. Для сравнения на этом же рисунке дан спектр экситонной полосы нелегированного n -GaAs ($n_0 = 4.10^{14}\text{ см}^{-3}$), выращенного хлоридным методом $T_{\text{sub}} = 700^\circ\text{C}$). Сопоставление представленных данных показывает, что в спектре слоя, выращенного методом АСЭ, отсутствуют экситонные пики, связанные с мелкими донорами. С другой стороны, спектр экситонной полосы образца β очень близок к одноименному спектру высококачественных слоев p -GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [5]. Эти факты, а также высокая интенсивность полосы излучения свободного экситона для образца β свидетельствуют о совершенстве, относительной чистоте и слабой компенсации исследуемого слоя, который, очевидно, также обладает дырочной проводимостью. Совокупность представленных данных позволяет заключить, что при $T_g \approx 600^\circ\text{C}$ методом АСЭ могут быть получены достаточно совершенные слои p -GaAs с концентрацией дырок $p \leq 10^{15}\text{ см}^{-3}$. Согласно [6, 7], такие слои могут быть успешно использованы в качестве буферных при создании гетероструктур GaAs/Si, служащих основой солнечных элементов, изделий оптоэлектроники, а также цифровых и СВЧ интегральных схем.

Остановимся далее на характеристике слоев GaAs/Ge. На рис. 5 даны результаты исследований комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных в одном технологическом процессе при $T_g = 465^\circ\text{C}$ на подложках GaAs и Ge. Из представленных данных видно, что в спектре КРС слоя GaAs/Ge (рис. 5, а, кривая 2) присутствует дополнительный пик при $\nu = 301\text{ см}^{-1}$. Анализ имеющихся в литературе сведений позволяет заключить, что эта полоса, по-видимому, соответствует рассеянию на оптических фононах в германии ($\sim 38\text{ мэВ}$) [8, 9]. Следует отметить, что толщина исследуемого слоя GaAs/Ge $d = 0.3\text{ мкм}$. Глубина же проникновения лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 514\text{ нм}$, а следовательно, и толщина зондируемого слоя GaAs составляет в

нашем случае ~ 0.1 мкм. Последнее говорит о том, что наблюдаемый спектр КРС связан прежде всего с процессом рассеяния в эпитаксиальной пленке. Наличие в спектре КРС пика с $\nu = 301 \text{ см}^{-1}$, возможно, обусловлено присутствием в пленке GaAs/Ge большого количества атомов Ge, т. е., вероятно, в процессе осаждения эпитаксиального слоя вследствие автолегирования из подложки происходит формирование сплава GaAs—Ge.

Спектры ФЛ слоев GaAs/GaAs и GaAs/Ge также имеют значительные различия (рис. 5, б). Как уже отмечалось, в случае GaAs/GaAs они включают две основные полосы: краевую и акцепторную, причем последняя является преобладающей из-за присутствия в слое значительной концентрации акцепторов углерода ($N_A \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Спектр ФЛ слоя GaAs/Ge (кривая 2), как видно из рис. 5, б, имеет основную полосу при $h\nu = 1.545 \text{ эВ}$ и слабое плечо при $h\nu = 1.484 \text{ эВ}$, причем интенсивность ФЛ этого слоя примерно на порядок ниже, чем слоя GaAs/GaAs (кривая 1). С другой стороны, спектр GaAs/Ge подобен спектру ФЛ сильно легированного объемного n^+ -GaAs, обычно используемого в качестве подложек ($n_0 \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$). С учетом этого факта, из величины сдвига Бурштейна—Мосса была оценена возможная концентрация электронов в слое GaAs/Ge [10, 11]: она составила $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. С полученной оценкой согласуется и значение полуширины основного пика ФЛ. Относительная слабая ФЛ слоя GaAs/Ge, возможно, обусловлена его структурным несовершенством и значительной степенью компенсации. Последнее может быть связано как с присутствием акцепторов углерода, так и с амфотерными свойствами примеси германия.

Авторы признательны В. В. Макшакову и А. В. Юдинову за предоставление эпитаксиальных слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Ozeki, N. Ohtsuka, J. Sakuma, K. Kodama. *J. Cryst. Growth.*, **107**, 102 (1991).
- [2] S. M. Bedair et al. *J. Cryst. Growth.*, **93**, 182 (1988).
- [3] K. Mochizuki, M. Ozeki, K. Kodama, N. Ohtsuka. *J. Cryst. Growth.*, **93**, 557 (1988).
- [4] Г. Абштрайтер. В сб.: Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры (под ред. Л. Чанга, К. Плора), 348. М.
- [5] E. S. Koteles, B. S. Elman, S. A. Zemon. *Sol. St. Commun.*, **62**, 703. (1987).
- [6] N. Hoyafuji, M. Mitfashita. *J. Cryst. Growth.*, **106**, 421 (1990).
- [7] N. Chand, F. Ren et al. *J. Appl. Phys.*, **67**, 2343 (1990).
- [8] R. Merlin, A. Pinczuk, W. T. Beard, C. E. E. Wood. *J. Vac. Sci. Techn.*, **21**, 516 (1982).
- [9] D. Olego, M. Candona. *Phys. Rev. B*, **23**, 6592 (1981).
- [10] G. Borghs, R. Bhattacharyya et al. *J. Appl. Phys.*, **66**, 4381 (1989).
- [11] A. Haufe, R. Schabe, H. Fieseler, M. Pegems. *J. Phys. C*, **21**, 2951 (1988).

Редактор Т. А. Полянская