

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР InAsSbP/InAs

Матвеев Б. А., Петров В. И., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н.,
Шабалин А. В.

Проведены исследования влияния собственных деформаций градиентных структур InAsSbP/InAs на интенсивность и спектры катодолюминесценции (КЛ) твердого раствора.

Показано, что упругие напряжения уменьшают интенсивность КЛ и смещают энергию максимума на 6–8 мэВ в область больших энергий. При измерениях с широкозонной стороны InAsSbP наблюдалась затяжка спектра КЛ в низкоэнергетичную область, что вызвано фотонным дрейфом носителей. Эффект затяжки спектра подавлялся в присутствии подложки, что обусловлено падением квантового выхода люминесценции при увеличении деформации.

Установлено увеличение вероятности безызлучательной рекомбинации на дислокациях несоответствия твердого раствора при возрастании степени упругой деформации кристалла.

Твердый раствор InAsSbP является материалом, на основе которого изготавливают источники излучения в важном для практики спектральном диапазоне 3–5 мкм [1, 2]. Эпитаксиальные слои (ЭС) InAsSbP с шириной запрещенной зоны, меньшей 0.41 эВ (77 К), являются неизопериодными с ближайшей бинарной подложкой InAs. Вследствие этого в структурах InAsSbP/InAs с узкозонным слоем возникают напряжения несоответствия, которые могут существенно изменить квантовый выход люминесценции [3, 4] и соответственно параметры источников. Однако для твердых растворов InAsSbP такие исследования не проводились.

Данная работа посвящена изучению влияния остаточных деформаций в структурах $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y/\text{InAs}$ (111) ($0.052 \leq x \leq 0.08$, $0.035 \leq y \leq 0.105$) на интенсивность и спектры катодолюминесценции (КЛ) градиентных ЭС InAsSbP.

Образцы по своим структурным свойствам были аналогичны описанным в [5], а именно ЭС с большим, чем у подложки, периодом решетки находились на выпуклой поверхности образцов, в которых подложка InAs была пластически деформирована под действием сил внутренних напряжений в процессе роста ЭС. Толщины подложки и ЭС составляли соответственно 390 и 55 мкм, средняя плотность дислокаций в InAs в результате выращивания ЭС возрастала от 10^4 до $\sim 10^6$ см⁻², плотность дислокаций в ЭС была на уровне 10^4 см⁻². Концентрация атомов сурьмы возрастала, а атомов фосфора убывала к поверхности ЭС, как показано на рис. 1. При этом, согласно интерполяционной оценке, ширина запрещенной зоны убывала к поверхности со средним градиентом ~ 1.5 мэВ·мкм, а период решетки возрастал, причем $\text{grad } a = 4.6 \cdot 10^{-8}$. ЭС специально не легировались и были *n*-типа проводимости.

Исследования КЛ проводились в растровом электронном микроскопе, оборудованном для работы в средней ИК области спектра. Типичные значения ускоряющего напряжения и тока зонда составляли соответственно $U = 25 \div 30$ кВ и $I = 10^{-8} \div 10^{-7}$ А. При измерениях КЛ образцы охлаждались до 80 К.

Влияние упругих напряжений на КЛ InAsSbP изучалось в структурах, в которых химическим травлением была локально удалена подложка. На рис. 2, а приведена схема образца с обозначенными на ней областями возбуждения и направлениями регистрации КЛ (A, B, C, D, E, F, G). На рис. 2, б представлена рентгеновская топограмма образца, снятая на излучении CuK_α со стороны

ЭС по методу углового сканирования [6]. Топограмма увеличена по отношению к размерам образца. Это вызвано тем, что съемка велась с выпуклой поверхности изогнутого кристалла. Изображение кристаллических дефектов в виде чередующихся светлых и темных полос, имеющих характерную для 60-градусных дислокаций направленность, существенно искажено в области с удаленной подложкой. Это искажение, а также несовпадение формы слоя и его рентгеновского изображения свидетельствуют о значительной кривизне свободного от подложки ЭС. Наличие этого изгиба свидетельствует о том, что ЭС в исследуемом образце упруго напряжен в областях с подложкой и не напряжен без нее.

Как показали измерения, упругие напряжения (в данном случае напряжения сжатия) уменьшают квантовый выход КЛ. На рис. 2, в приведена фотография, полученная в режиме интегральной КЛ с поверхности ЭС в области F (рис. 2, а). Видно, что интенсивность КЛ неоднородна по поверхности и максимальна вблизи сколотого выреза ЭС, расположенного в части образца, не имеющей подложки. Интегральная интенсивность в наших экспериментах при перемещении зонда от напряженного к ненапряженному участку ЭС изменялась примерно вдвое ($I_A/I_B \sim 0.5$). При этом закономерно изменялось положение максимума спектров КЛ: слой без подложки имел максимум, сдвинутый в длинноволновую область на 6–8 мэВ по отношению к спектру ЭС с подложкой (рис. 3, а, кривые А, В). Используя данные по сдвигу зоны в напряженных сверхрешетках, содержа-

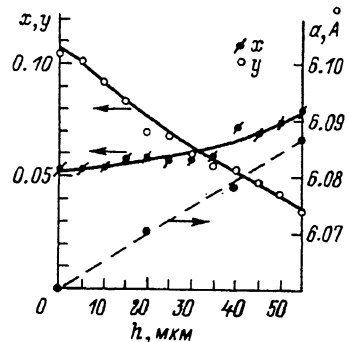


Рис. 1. Распределение периода решетки и состава ЭС $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ в направлении роста.
 $h=0$ — область гетерограницы.

щих InAs [7], можно оценить величину остаточных деформаций кристалла вблизи узкозонной поверхности ЭС, т. е. в области, где формируется полоса люминесценции при возбуждении и измерениях КЛ с поверхности InAsSbP : $\varepsilon = 0.36\%$. Полученное значение близко к величине деформации, оцененной по соотношениям из [8] с использованием распределения периода решетки в ЭС, представленного на рис. 1: $\varepsilon = 0.4\%$. На основании этого можно сделать вывод о том, что ЭС в данной структуре деформирован в основном упруго и что лишь незначительная часть напряжений релаксировала за счет пластической деформации подложки и образования дислокаций несоответствия (ДН) в ЭС.

Снижение эффективности излучательной рекомбинации (в данном случае уменьшение интенсивности КЛ) обычно связывается с изменением энергетических зон полупроводника [9]. В наших экспериментах дополнительным фактором, приводящим к уменьшению эффективности люминесценции, является безызлучательная рекомбинация на ДН. Действительно, как можно видеть из рис. 2, г, на КЛ изображении напряженного слоя присутствует сетка темных линий, ориентированных вдоль направлений типа $\langle 110 \rangle$, представляющая собой сетку ДН градиентного кристалла [10, 11]. Поскольку при измерениях с поверхности ЭС возможность возбуждения люминесценции подложки как электронным зондом, так и излучением более узкозонного, чем InAs, слоя исключалась, мы полагаем, что наблюдаемая сетка ДН локализована вблизи поверхности ЭС. В то же время сетка темных линий в ненапряженном (без подложки) слое отсутствует, хотя ДН присутствуют как в том, так и в другом случаях. Это видно при анализе топограммы, приведенной на рис. 2, б: линии ДН не прерываются и не исчезают при переходе от области ЭС с подложкой к области без нее. Отсюда можно сделать вывод: в ненапряженном кристалле ДН не проявляют безызлучательных свойств. Причиной может являться реконструкция ядра дислокации, приводящая к структуре без оборванных связей [12].

Влияние остаточных напряжений на спектры КЛ проявлялось также при измерениях со скола структуры (при этом область возбуждения электронным зондом диаметром не более 100 Å находилась в широкозонной части InAsSbP

вблизи границы раздела слоя и подложки). При этом помимо ожидаемого коротковолнового пика КЛ, вызванного рекомбинацией носителей в области с расчетным значением ширины запрещенной зоны $E_g = 0.46$ эВ, наблюдалась дополнительная полоса с максимумом ~ 3.3 мкм (рис. 3, б). Последнее значение близко

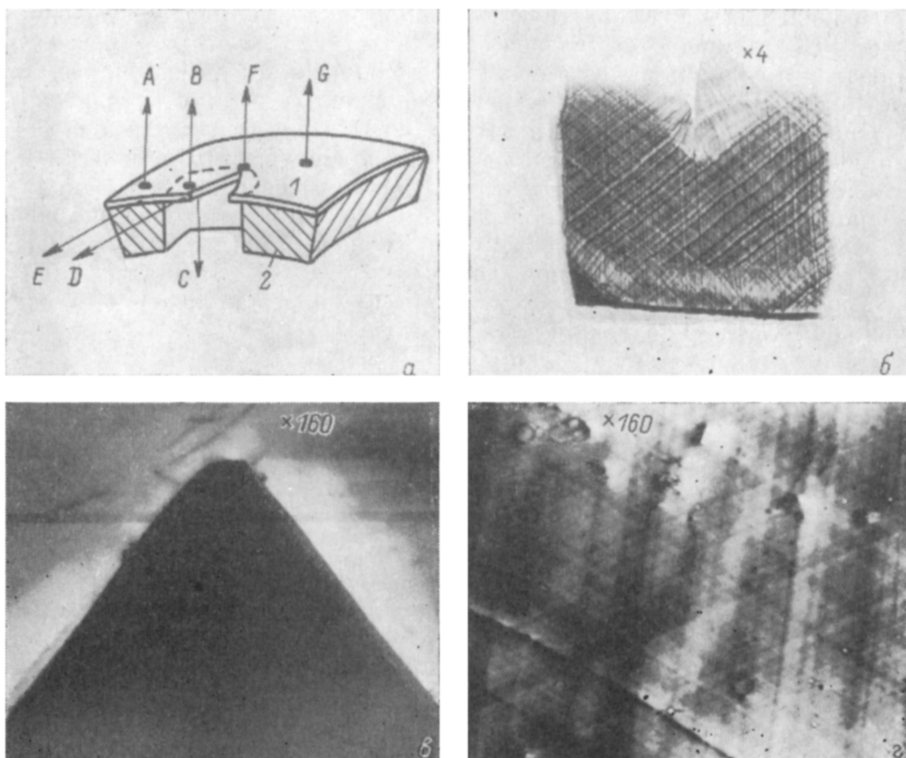


Рис. 2. Изображения образца с частично удаленной подложкой.

а) схема образца: 1 — ЭС, 2 — подложка InAs, штриховая линия на поверхности ЭС — контур сравненной подложки; б) рентгеновская топограмма ЭС; в) изображение в режиме КЛ участка ЭС F без подложки; г) изображение в режиме КЛ участка A (или G) ЭС, сопряженного с подложкой.

к длине волны в максимуме полосы, регистрируемой с поверхности ЭС (рис. 3, а), когда возбужденные электронным зондом носители локализованы вблизи поверхности ЭС, где ширина запрещенной зоны минимальна. Появление низкоэнергетического пика, соответствующего рекомбинации носителей вблизи узкозонной поверхности ЭС, можно связать с фотонным дрейфом носителей в варизонном полупроводнике [13] (диффузионная длина дырок [14] много меньше толщины ЭС, и диф-

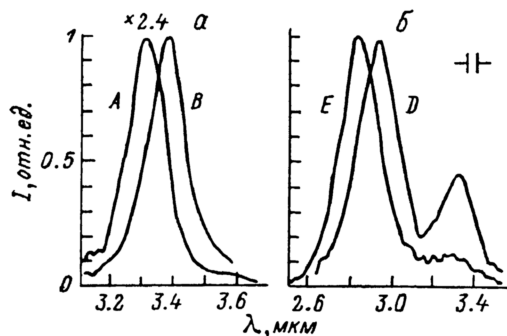


Рис. 3. Спектры локальной КЛ ЭС.

а — спектр сопряженного с подложкой (A) и «свободного» (B) ЭС при измерениях с поверхности образца; б — спектры ЭС, измеренные с торца структуры в области с подложкой (E) и без нее (D) (см. рис. 2).

фузионным переносом можно пренебречь). Две полосы, аналогичные описанным выше, наблюдались также и при измерении со стороны сравненной подложки [область и направление регистрации C (рис. 2, а)]. Усиление

длинноволнового пика свидетельствует о возрастании фотонно-дрейфовой длины при удалении подложки. Это указывает на возрастание квантового выхода люминесценции при уменьшении деформации ЭС InAsSbP.

Таким образом, показано, что внутренние деформации в градиентных структурах InAsSbP/InAs уменьшают эффективность излучательной рекомбинации, что проявляется в двукратном падении интенсивности КЛ и гашении длинноволнового пика при измерении с торца структуры. Величина деформации кристалла вблизи узкозонной поверхности ЭС, оцененная по энергетическому сдвигу максимума полосы КЛ ЭС с подложкой и без нее ($\varepsilon=0.36\%$), оказалась близкой к расчетному значению деформации без учета пластической деформации в структуре. Это свидетельствует о малой степени пластической релаксации в градиентном ЭС. Дислокации несоответствия ЭС InAsSbP в отсутствие упругих напряжений (без подложки) не проявляют свойств безызлучательных центров рекомбинации.

Авторы благодарят М. А. Чернова за предоставление рентгеновской топограммы образца.

Л и т е р а т у р а

- [1] Айдаралиев М., Зотова Н. В., Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н. — Письма ЖТФ, 1987, т. 13, в. 9, с. 563—565.
- [2] Есина Н. П., Зотова Н. В., Матвеев Б. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н., Абишев Т. Д. — Письма ЖТФ, 1983, т. 9, в. 7, с. 391—395.
- [3] Берт Н. А., Васильев В. И., Конников С. Г., Кучинский В. И., Лазутка А. С., Мишурный В. А., Портной Е. Л. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 4, с. 193—197.
- [4] Страхов В. А., Яременко Н. Г., Телегин А. А., Оганджян В. А., Карачевцева Н. В., Михалева Л. Ф., Петров В. И., Прохоров В. А. — ФТП, 1985, т. 19, в. 4, с. 601—607.
- [5] Конников С. Г., Матвеев Б. А., Попова Т. Б., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н., Уманский В. Е. — ФТТ, 1986, т. 28, в. 3, с. 789—792.
- [6] Гундарев В. М., Белова Н. В., Есин В. О. — В кн.: Выращивание монокристаллов тугоплавких и редких металлов. М., 1973, с. 121—127.
- [7] Voisin P., Voos M., Marzin J. Y., Tamargo M. C., Nahory R. E., Cho A. Y. — Appl. Phys. Lett., 1986, v. 48, N 21, p. 1476—1478.
- [8] Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников. М., 1985. 160 с.
- [9] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., 1973. 456 с.
- [10] Матвеев Б. А., Петров В. И., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н., Шабалин А. В. — Поверхность, Физика, химия, механика, 1986, № 7, с. 41—44.
- [11] Hiroyuki Kasano, Sigeyoki Hosoki. — J. Appl. Phys., 1975, v. 46, N 1, p. 394—401.
- [12] Petroff P. M., Logan R. A., Savage A. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, N 4, p. 287—291.
- [13] Волков А. С., Липко А. А., Мереплиев Ш., Шленский А. А. — ФТП, 1984, т. 18, в. 3, с. 471—474.
- [14] Bubulac L. O., Andrews A. M., Gertner E. R., Cheung D. T. — Appl. Phys. Lett., 1980, v. 39, N 9, p. 734—736.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 1.12.1987
Принята к печати 21.01.1988