

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ В $n$ -GaAs : Ge, Bi

Чалдышев В. В., Якушева Н. А.

Исследована фотолюминесценция эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs : Ge, Bi при различных уровнях легирования германием и висмутом. Обнаружены две линии излучения глубоких уровней с максимумами 1.36 и 1.25—1.30 эВ. Установлено, что линия 1.25—1.30 эВ связана с германием, в то время как линия 1.36 эВ скорее всего обусловлена фоновым загрязнением медью.

Известно, что, легруя арсенид галлия одновременно германием и висмутом в процессе жидкофазной эпитаксии, в зависимости от условий роста и концентрации висмута в жидкой фазе можно получить слои как  $p$ -, так и  $n$ -типа проводимости [1]. Хотя тип проводимости слоев GaAs : Ge, Bi определяется прежде всего мелкими донорами и акцепторами, было установлено, что глубокие центры играют важную роль в формировании электрофизических свойств материала и при высоком ( $10^{18}$ — $10^{19}$  см $^{-3}$ ) [2, 3], и при относительно низком ( $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ ) [4] уровнях легирования германием. Люминесцентные свойства сильно легированных германием слоев арсенида галлия, выращенных из растворов-расплавов в висмуте, исследовались ранее в работе [3]. Целью данной работы является исследование люминесценции глубоких уровней в арсениде галлия в зависимости от уровня легирования германием и висмутом.

Эпитаксиальные слои GaAs : Ge, Bi выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках полупрозрачного арсенида галлия ориентации (100) в температурном интервале 850—820 °C по методике, описанной в [4]. Концентрация и подвижность свободных носителей заряда определялись методом Ван-дер-По. Зависимости этих параметров от содержания висмута в растворителе приведены в [4], а их изменения при варьировании содержания германия в висмутовом расплаве — в работе [2]. Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились при 77 и 4.2 К по стандартной методике [4].

Типичные спектры ФЛ при 77 К  $n$ -GaAs : Ge, выращенного из расплава висмута с различным уровнем легирования германием, представлены на рис. 1. Спектры содержат четыре характерные полосы: краевую ( $\sim 1.51$  эВ), обусловленную межзонной рекомбинацией с участием переходов донор ( $\text{Ge}_{\text{Ga}}$ )—валентная зона, акцепторную ( $\sim 1.475$  эВ), связанную с переходами на акцепторный уровень германия ( $\text{Ge}_{\text{As}}$ ), и две длинноволновые ( $\sim 1.36$  и 1.25—1.30 эВ), обусловленные излучательной рекомбинацией на глубоких уровнях. Аналогичная структура спектров сохранялась и при 4.2 К.

При изменении содержания висмута в составе растворителя  $x_{\text{Bi}}^{\text{II}}$  соотношение интенсивностей длинноволновых линий ФЛ в пределах точности эксперимента было неизменным. Зависимость интенсивности более яркой при  $[\text{Ge}]_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^{-4}$  ат. доли полосы 1.36 эВ от  $x_{\text{Bi}}^{\text{II}}$  представлена на рис. 2. Видно, что при уменьшении содержания висмута в растворе-расплаве интенсивность полосы 1.36 эВ быстро уменьшается, и при  $x_{\text{Bi}}^{\text{II}} \leq 0.8$  ат. доли ее интенсивность близка к порогу регистрирующей системы. Следует отметить, что наблюдаемый эффект коррелирует с уменьшением концентрации свободных электронов и доноров германия в слоях [4]. Соответствующие зависимости для краевой и акцепторной линий ФЛ выражены значительно слабее и подробно обсуждаются в [4].

Зависимости интегральной интенсивности ФЛ и интенсивностей отдельных линий при 77 К в  $n$ -GaAs : Ge, выращенном из расплава висмута, от уровня легирования германием приведены на рис. 3. Видно, что при увеличении содержания германия в жидкой фазе  $[Ge]_{ж}$  от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  ат. доли интегральная интенсивность ФЛ (рис. 2, кривая 1) увеличивается в  $\sim 2$  раза в основном за счет увеличения интенсивности акцепторной полосы (рис. 3, кривая 3) и уширения всех линий (рис. 1). В этом диапазоне  $[Ge]_{ж}$  интенсивность краевой полосы практически не изменяется (рис. 3, кривая 2). При концентрации германия в жидкой фазе свыше  $10^{-3}$  ат. доли интегральная интенсивность ФЛ и интенсивности краевой и акцепторной линий уменьшаются.

Обращает на себя внимание тот факт, что изменение уровня легирования поразному влияет на длинноволновые полосы 1.36 эВ (рис. 3, экспериментальные точки 4) и 1.25—1.30 эВ (рис. 3, кривая 5). Изменение интенсивности линии 1.36 эВ не коррелирует с содержанием германия в жидкой фазе. Эта полоса

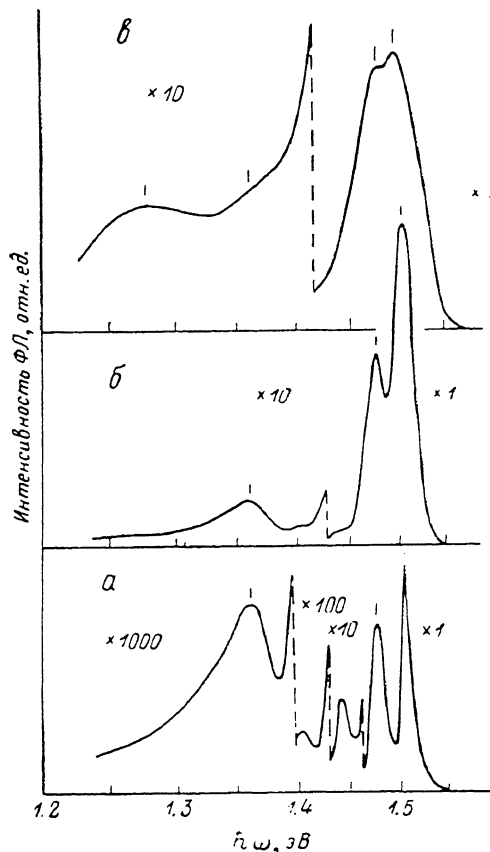


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции при 77 К  $n$ -GaAs : Ge, Bi.

Концентрация германия в жидкой фазе, ат. доли  $\cdot 10^4$ :  
а — 1, б — 2, в — 10.

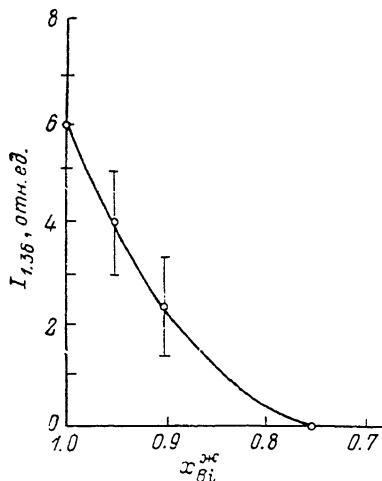


Рис. 2. Зависимость интенсивности полосы ФЛ 1.36 эВ при 77 К от содержания висмута в растворителе.

наблюдалась и в не легированных германием контрольных образцах GaAs, выращенных из расплава висмута в идентичных условиях. Напротив, интенсивность линии 1.25—1.30 эВ прямо пропорциональна  $[Ge]_{ж}$  во всем исследованном интервале уровней легирования.

Изложенные экспериментальные результаты позволяют сделать определенные выводы относительно природы наблюдаемых длинноволновых полос ФЛ.

В эпитаксиальных слоях  $p$ -GaAs : Ge, выращенных жидкофазной эпитаксией из галлиевых растворов-расплавов, ранее наблюдалась полоса ФЛ с максимумом вблизи 1.35 эВ, которая связывалась со сложным центром, включающим в себя атомы германия и собственные дефекты решетки [5]. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что наблюдаемая нами в  $n$ -GaAs : Ge, Bi полоса 1.36 эВ, очевидно, имеет иную природу и не связана с германием: во-первых, ее интенсивность не коррелирует с  $[Ge]_{ж}$ ; во-вторых, полоса, наблюдаемая нами, заметно уже, чем описанная в [5]. Поскольку интенсивность этой полосы увеличивается при снижении концентрации галлия в расплаве, можно предположить, что она скорее всего связана с фоновой примесью —

медью, встречающейся в галлиевой подрешетку [6]. Следует отметить, что неконтролируемое загрязнение GaAs медью при выращивании из висмутовых расплавов уже наблюдалось ранее [7]. То обстоятельство, что природа глубоких примесных центров в *p*- и *n*-GaAs : Ge различна, на наш взгляд, является закономерным, так как замена растворителя галлия висмутом влечет за собой кардинальную перестройку ансамбля собственных дефектов и примесей выращиваемого кристалла [1-4, 7-9].

Изменение интенсивности полосы 1.25—1.30 эВ при варьировании содержания висмута и германия в жидкой фазе указывает на то, что она связана с центром, включающим в себя атомы германия в галлиевой подрешетке. Следует отметить, что при высоких уровнях легирования  $[Ge]_{ж} > 10^{-3}$  ат. доли интенсивность этой полосы сравнима с интенсивностью краевого излучения. Более того, при  $[Ge]_{ж} \sim 10^{-2}$  ат. доли эта полоса становится доминирующей в спектре ФЛ [3]. Данное явление сопровождается уменьшением интегральной интенсивности ФЛ (рис. 3) и насыщением зависимости концентрации свободных электронов от содержания германия в растворе-расплаве [2].

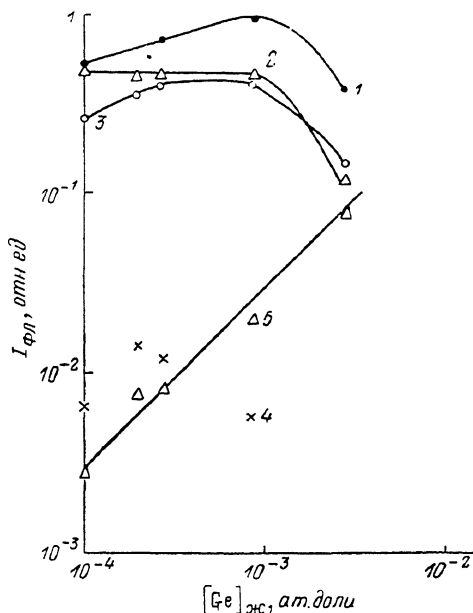


Рис. 3. Зависимости от концентрации германия в висмутовом растворе-расплаве интегральной интенсивности ФЛ (1), интенсивностей краевой полосы (2), линии, связанной с мелкими акцепторами (3), линий 1.36 (4) и 1.25—1.30 эВ (5) ( $T=77$  К).

Таким образом, можно заключить, что глубокие уровни заметно проявляются в люминесценции *n*-GaAs : Ge, выращенного из растворов-расплавов в висмуте, даже при относительно невысоких уровнях легирования германием и играют важную роль в формировании электрофизических свойств материала. Природа глубоких центров в *n*- и *p*-GaAs : Ge, по-видимому, различна, что обусловлено изменением ансамбля собственных дефектов решетки и примесей при замене растворителя галлия висмутом.

Авторы благодарны Ю. В. Шмарцеву и Ю. Ф. Бирюлину за полезные обсуждения работы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Якушева Н. А., Сикорская Г. В. // Электрон. техн. Материалы. 1985. № 1 (200). С. 47—49.
- [2] Якушева Н. А., Сикорская Г. В., Созинов В. Н. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1985. Т. 21. В. 4. С. 534—536.
- [3] Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Голубев Л. В., Новиков С. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1264—1267.
- [4] Чалдышев В. В., Якушева Н. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 1. С. 44—47.
- [5] Журавлев К. С., Терехов А. С., Якушева Н. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 5. С. 777—779.
- [6] Аверкиев Н. С., Аширов Т. К., Гуткин А. А. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 97—102.
- [7] Акчурун Р. Х., Бирюлин Ю. Ф., Ле Динь Као, Фистул В. И., Чалдышев В. В. // Электрон. техн. Материалы. 1984. № 11 (196). С. 78—80.
- [8] Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Голубев В. Г., Голубев Л. В., Иванов-Омский В. И., Новиков С. В., Осутин А. В., Савельев И. Г., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В., Ярошевич О. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 12. С. 2201—2209.
- [9] Yakusheva N. A., Prinz V. Ya., Bolkhovityanov Yu. B. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 95. N 1. P. K43—K46.