

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaAs:Ge ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗОВАЛЕНТНОГО МЕТАЛЛА-РАСТВОРИТЕЛЯ

*Лебедь О.Н.*

*Херсонская государственная морская академия*

*В данной работе исследовались электрофизические и люминесцентные параметры эпитаксиальных слоев GaAs, полученные из раствора-расплава состава Bi – Ga – As с добавлением примеси германия. Рассмотрен механизм формирования и распределения легирующей примеси и создание дефектов в эпитаксиальном слое при вариации доли висмута в растворе-расплаве. Показаны возможности управления параметрами p-n структур GaAs: Ge, выращенные на основе галлий-висмутových расплавов.*

*Ключевые слова: арсенид галлия, германий, жидкофазная эпитаксия, висмут, электрофизические параметры, люминесцентные параметры.*

**Введение.** P-n переходы методом ЖФЭ могут быть получены одновременным добавлением в расплав донорной и акцепторной примеси или легированием расплава амфотерной примесью. Основным параметром при этом является температура инверсии (1). Температура, при которой происходит смена типа проводимости, называется температурой инверсии. Изменить температуру инверсии, а следовательно и параметры структур можно с помощью изменения состава жидкой фазы.

Для GaAs, при выращивании ЭС из галлиевого расплава, такой амфотерной примесью является кремний. Однако такие структуры не до конца удовлетворяют требованиям к излучательным характеристикам светодиодов – недостаточная удельная мощность излучения, узкий диапазон излучения, деградация приборов, особенно в условиях жесткого космического излучения.

Амфотерными свойствами в GaAs также обладает германий, однако при особых условиях. При стехиометрическом соотношении компонентов в расплаве германий обладает донорными свойствами. При небольшом уменьшении концентрации мышьяка в расплаве (менее 40 ат. %) и кристаллизации GaAs из избытка галлия – германий обладает акцепторными свойствами. Это приводит к тому, что при выращивании ЭС GaAs, легированных германием, из расплава галлия они всегда имеют дырочный тип проводимости. Изменить соотношения галлия и мышьяка в растворе-расплаве можно с помощью добавки висмута в расплав. При этом возможно получать слои как n-типа проводимости, так и p-n переходы [2, 3].

Целью настоящей работы является изучение динамики изменения люминесцентных и электрофизических параметров ЭС GaAs:Ge в зависимости от состава жидкой фазы при использовании изовалентного металла-растворителя висмута в контексте использования их для приборов оптоэлектроники.

**Методика эксперимента и результаты.** Выращивание слоев производили из ограниченного объема раствора GaAs и Ge в расплаве Bi с добавлением Ga на подложках n-GaAs(Sn) с  $n=(1\div 5)\cdot\text{см}^{-3}$  и полуизолирующего GaAs, ориентированных в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Варьирование содержания Ga в жидкой фазе изменяло точку инверсии типа проводимости, что позволяло получать n-, p-слои, а также p-n-структуры GaAs(Ge).

Усредненные по толщине концентрации основных носителей при 300 К, измеренные методом Ван-дер-Пау в слоях n- и p-типа, полученных на подложках полуизолирующего GaAs, в зависимости от содержания Ge в жидкой фазе  $C_{\text{Ge}}^1$  составляли  $5\cdot 10^{17}$ – $3\cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$ . Полная концентрация атомов электрически активного Ge в слоях с

различным типом проводимости в зависимости от  $C_{Ge}^I$  изменялась в пределах  $5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Выращивали также слои нелегированного n-GaAs ( $n \leq 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

На полученных структурах производили измерения спектров стационарной электролюминесценции (ЭЛ) и фотолюминесценции (ФЛ), зависимостей спектрального состава излучения от температуры и уровня возбуждения, кинетики ЭЛ, согласно методикам описанным в [4, 5].

Спектры ФЛ эпитаксиальных слоев нелегированного GaAs, выращенных из расплава Ві, содержали полосу краевого излучения с  $h\nu_m \sim E_g$ , обусловленную при высоких температурах межзонными переходами, а при низких – переходами через мелкий донорный уровень.

Спектры ЭЛ р – n-структуры и ФЛ n - и p-слоев GaAs(Ge) содержали полосу излучения с полушириной  $0.070 \div 0.190 \text{ эВ}$ , энергия максимума  $h\nu_m$  которой была меньше ширины запрещенной зоны  $E_g$  нелегированного GaAs.

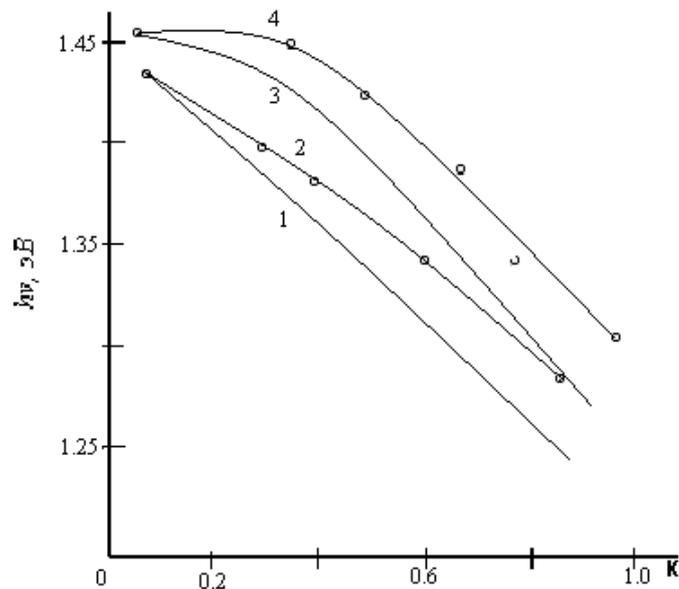


Рисунок 1 – Зависимость  $h\nu_m$  от степени компенсации К при различных уровнях компенсации, измеренных при 77К ( $C_{Ge}^I=9,5\text{at}\%$ ). 1,2 – спектр n-типа, 3,4 – спектр p-типа

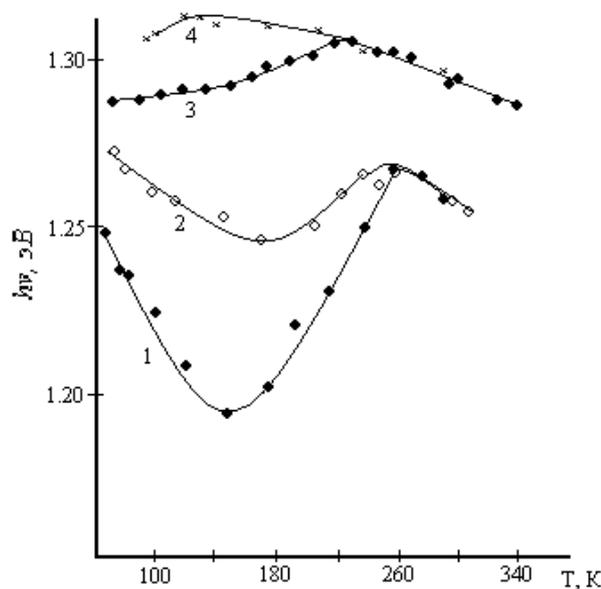


Рисунок 2 – Температурные зависимости энергии максимума спектра ФЛ n-слоя (1, 2) и спектра ЭЛ р-n-структуры (3, 4). 1 –  $L_0=10^{-19} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ; 2 –  $10L_0$ ; 3 –  $1,5L_0$ ; 4 –  $5L_0$ .

С ростом  $C_{\text{Ge}}^1$  увеличивалась степень компенсации  $K$  и смещение  $h\nu_m$  в область меньших энергий. На рис. 1 (2, 4) приведены зависимости энергии максимума спектров ФЛ  $n$ - и  $p$ -слоев GaAs (Ge) от степени компенсации  $K$ .

При увеличении уровня фотовозбуждения  $n$ - и  $p$ -слоев, а также прямого тока через  $p$ - $n$  переход,  $h\nu_m$  смещалось в область больших энергий рис. 1 (1, 3)

Из рисунка видно, что для слоев  $p$ -типа зависимость  $h\nu_m$  ( $K$ ) находится выше, чем для слоев  $n$ -типа при сопоставимых значениях коэффициента компенсации, а также различен характер зависимости  $h\nu_m$  ( $K$ ) при малых значениях  $K$ .

Зависимость  $h\nu_m$  от температуры имеют сложный не постоянный характер и для ФЛ и ЭЛ имеют различный вид. На рис. 2 показаны зависимость  $h\nu_m^{\text{ФЛ}}$  для  $n$ -слоя, а также  $h\nu_m^{\text{ЭЛ}}$  для одного из  $p$ - $n$  структур (кривые 3,4).

Интенсивность ЭЛ после прекращения возбуждения спадала экспоненциально и с течением времени изменялась медленнее.

**Обсуждение результатов.** Полученные зависимости можно объяснить на основании зависимостей сильно легированных компенсированных полупроводников, излучательная рекомбинация которых обусловлена переходами через состояния «хвостов».

Доминирующими в спектрах ФЛ  $n$ -GaAs Ge (Bi) являются переходы на глубокие уровни, обусловленные, по-видимому, образованием комплексов германия и С.Т.Д. решетки. В частности авторы [6] утверждают, что  $p$ -GaAs: Ge (Ga) при содержании 10 ат. % Ge в жидкой фазе длинноволновая полоса  $h\nu_m = 1,35$  эВ проявлялась только в виде плеча, а в  $n$ -GaAs: Ge (Bi) при 1 ат. % в жидкой фазе длинноволновая полоса с  $h\nu_m = 1,26$ - $1,3$  эВ становится определяющей. Смещение энергетического положения максимума этой полосы по мере роста концентрации германия в твердой фазе с 1,30 эВ при  $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  к 1,26 эВ при  $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$  объясняется, возможно, увеличением плотности состояний в хвостах, простирающихся в запрещенную зону, что характерно для сильно легированных, компенсированных полупроводниках, как происходит в ЭС GaAs сильно легированных Si [7-10].

Неравновесный характер распределения неравновесных носителей заряда приводит к смещению  $h\nu_m$  в коротковолновую область с ростом уровня возбуждения при низких температурах, а также к экспоненциальному спаду интенсивности [9-10].

Зависимости  $h\nu_m$  ( $T$ ), также можно объяснить различной локализацией носителей заряда по состоянию хвостов. При низких температурах (до 150-160 К) более глубокие состояния хвостов зоны неосновных носителей оказываются термически опустошенными, что приводит к уменьшению  $h\nu_m$ . Дальнейшее увеличение  $h\nu_m$  с повышением  $T$  до 270 К, связано с более равновесным распределением неравновесных носителей по состояниям хвостов. В результате меньшие уровни начинают играть определяющую роль в излучательной рекомбинации. Уменьшение  $h\nu_m$  при дальнейшем увеличении  $T$  связано с температурными уменьшениями ширины запрещенной зоны [10].

Более низкая концентрация основных носителей в области ЭЛ, чем в области ФЛ отображает характер различия  $h\nu_m^{\text{ЭЛ}}$  ( $T$ ) от хода кривых  $h\nu_m^{\text{ФЛ}}$  ( $T$ ) (рис. 2). Согласно [10], уменьшение основных носителей в области излучения ведет к понижению температуры максимум на кривых  $h\nu_m$  ( $T$ ), в результате чего кривые 3 и 4 при  $T \geq 77$  К имеют лишь возрастающий участок.

**Выводы.** Таким образом, можно заключить, что арсенид галлия, легированный германием, выращенный из галлий-висмутовых расплавов, является сильнолегированным компенсированным полупроводником, у краев разрешенных зон которого образуются хвосты плотности состояний из-за флуктуаций концентраций легирующей примеси. Добавка висмута в раствор-расплав Ga-GaAs, с легирующей примесью германия, изменяет

соотношение С.Т.Д на фронте кристаллизации и позволяет управлять параметрами ЭС GaAs:Ge .

В виду того, что включения растворителя в таких эпитаксиальных слоях содержит в основном висмут, а атомный радиус германия больше, чем у кремния, то при использовании для светодиодов в ЭС GaAs:Ge следует значительно меньший уровень деградации параметров, чем в ЭС GaAs:Si. Следовательно они могут быть более перспективны для применения в оптоэлектронике.

Также нужно отметить, что наличие температуры инверсии дает возможность не только выращивать р-п-переходы для светодиодов, но и дает возможность также выращивать высокоомные сильно компенсированные ЭС вблизи температуры инверсии, которые могут использоваться для детекторов рентгеновского и  $\alpha$ -диапазона излучения в медицине и технике.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж. И. Излучательная рекомбинация в эпитаксиальном компенсированном арсениде галлия / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Д. З. Гарбузов, М. К. Трукан // ФТП – 1972. – Т. 6, № 10. – С. 2015-2026.
2. Якушева Н. А. Инверсия типа проводимости в слоях арсенида галлия, легированных германием в процессе жидкофазной эпитаксии / Н. А. Якушева, Г. В. Сикорская // Электронная техника. – 1985. – В. 1 (200). – С. 47-49.
3. Якушева Н. А. Электрические свойства легированных германием слоев GaAs, полученных из висмутового раствора-расплава / Н. А. Якушева, Г. В. Сикорская, В. Н. Созинов // Неорганические материалы. – 1985. – Т. 21, № 4. – С. 534-536.
4. Пека Г. П. Люминесцентные методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов / Г. П. Пека, В. Ф. Коваленко, В. Н. Куценко – К. : Техніка, 1986. – 152 с.
5. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов – М. : Высшая школа, 1987. – 239 с.
6. Бирюлин Ю. Ф. Фотолюминесценции легированного германием и висмутом / [Ю. Ф. Бирюлин, В. В. Воробьева, Л. В. Голубев и др.] // Письма ЖТФ. – 1986. – Т. 13, В. 20. – С. 1264-1267.
7. Алферов Ж. И. Энергетический спектр GaAs, легированного Si / [Ж. И. Алферов, Д. З. Гарбузов, Е. П. Морозов, И. И. Протасов, Д. Н. Третьяков] // ФТТ. – 1968. – Т. 10, В. 9. – С. 2861-2865.
8. Дубровская В. С. Квантовый выход излучения GaAs р-п-структур, легированных кремнием / [В. С. Дубровская, Р. И. Кривошеева, С. С. Мескин, Н. Ф. Недельский, В. Н. Равич, В. И. Соболев, Б. В. Царенков, Л. А. Чичерин ] // ФТП. – 1969. – Т. 3, в. 12. – С. 1815 – 1820.
9. Алферов Ж. И. Излучательная рекомбинация в эпитаксиальном компенсированном арсениде галлия. / [Алферов Ж. И., Андреев В. М., Гарбузов Д. З., Трукан М. К. ] // ФТП. – 1972. т. 6, в. 10. – С.2015 – 2026.
10. Леванюк А. П. Краевая люминесценция прямозонных полупроводников. / Леванюк А. П., Осипов В. В. // УФН. – 1981. т. 133, в. 3. – С. 427 – 477.

**Лебедь О.М.** АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ТА ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ GaAs:Ge ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІЗОВАЛЕНТНОГО МЕТАЛА-РОЗЧИННИКА

*В даній роботі досліджувались електрофізичні та люмінесцентні параметри епітаксійних шарів GaAs отриманих із розчину-розплаву складу Bi – Ga – As з додаванням домішки германію. Розглянуто механізм формування і розподілу легуючої домішки і створення дефектів в епітаксійному шарі при варіації частки вісмуту в розчині-розплаві. Показані можливості управління параметрами p-n-структур GaAs:Ge, що вирощені на основі галій-вісмутових розплавів. Ключові слова: арсенід галію, германій, рідкофазна епітаксія, вісмут, електрофізичні параметри, люмінесцентні параметри.*

**Lebed' O.N.** THE ANALYSIS OF ELECTROPHYSICAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF EPITAXY LAYERS OF GaAs:Ge WHEN USING ISOVALENCY METAL-SOLVENT

*In this work electrophysical and luminescent parameters the epitaxy layers of GaAs received from solution-melt of structure of Bi – Ga – As with impurity addition germanium were investigated. The mechanism of formation and distribution of alloying impurity and creation of defects in an epitaxy layer is considered at a variation of a share of bismuth in solution- melt. Possibilities of management in the p-n-parameters of structures GaAs: Ge which have been grown up on a basis gallium - bismuth melts are shown. Keywords: gallium arsenide, germanium, liquid phase epitaxy, bismuth, electrophysical parameters, luminescent parameters.*