

- [4] Введенский В.Л., Грабой И.Э., Кауль А.Р. - В сб. Сверхпроводимость вып. 1. М.: ЦНИИатоминформ, 1987, с. 78-85.
- [5] Tjukanov E., Cline R.W., Krain P. - Phys. Rev. B, 1987, v. 36, N 13, p. 7244-7247.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 19 12 октября 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННОГО ИЗ ВИСМУТОВОГО РАСТВОРА-РАСПЛАВА

А.А. Аристархова, Ю.Ф. Бирюлин,
С.С. Волков, С.В. Новиков,
М.Ю. Тимашев, Ю.В. Шмарцев

Влияние изовалентного легирования арсенида галлия висмутом на электрофизические и люминесцентные характеристики материала изучено достаточно подробно [1-5], но оно касалось в основном его объемных свойств. При этом было установлено, что вследствие чрезвычайно малой растворимости висмута, он входит в арсенид галлия в концентрациях, не превышающих 10^{18} см^{-3} [2].

В процессе исследований было замечено существенное различие поверхностных свойств арсенида галлия, выращенного из растворов-расплавов в висмуте $\text{GaAs} \langle \text{Bi} \rangle$ и галлии $\text{GaAs} \langle \text{Ga} \rangle$ (иной внешний вид поверхности, отклонение в скорости травления и т.п.). Напрашивался вывод о различии и в элементном (химическом) составе поверхности $\text{GaAs} \langle \text{Bi} \rangle$ по сравнению с $\text{GaAs} \langle \text{Ga} \rangle$.

В данной работе изложены результаты исследования поверхности (50-100 Å) арсенида галлия, выращенного из галлиевого и висмутотого растворов-расплавов.

Исследовавшиеся образцы арсенида галлия были получены методом жидкофазной эпитаксии с понижением температуры по стандартной технологии [5]. Толщины слоев $\text{GaAs} \langle \text{Bi} \rangle$ и $\text{GaAs} \langle \text{Ga} \rangle$ составляли соответственно 3-5 мкм и 20-30 мкм.

Концентрация свободных электронов в эпитаксиальных слоях $\text{GaAs} \langle \text{Bi} \rangle$ была на полтора порядка ниже соответствующего значения для образцов $\text{GaAs} \langle \text{Ga} \rangle$, полученных в идентичных условиях. При этом доминирующим мелким акцептором являлся C_{As} , а основными мелкими донорами: сера S_{As} (в случае галлиевого растворителя) и олово Sn_{Ga} (висмутотый растворитель) [5]. Низкотемпературные спектры фотолюминесценции (ФЛ) $\text{GaAs} \langle \text{Bi} \rangle$ и $\text{GaAs} \langle \text{Ga} \rangle$ совпадали по энергетическому положению краевых линий ФЛ друг с другом и со спектрами высокочистых эпитаксиаль-

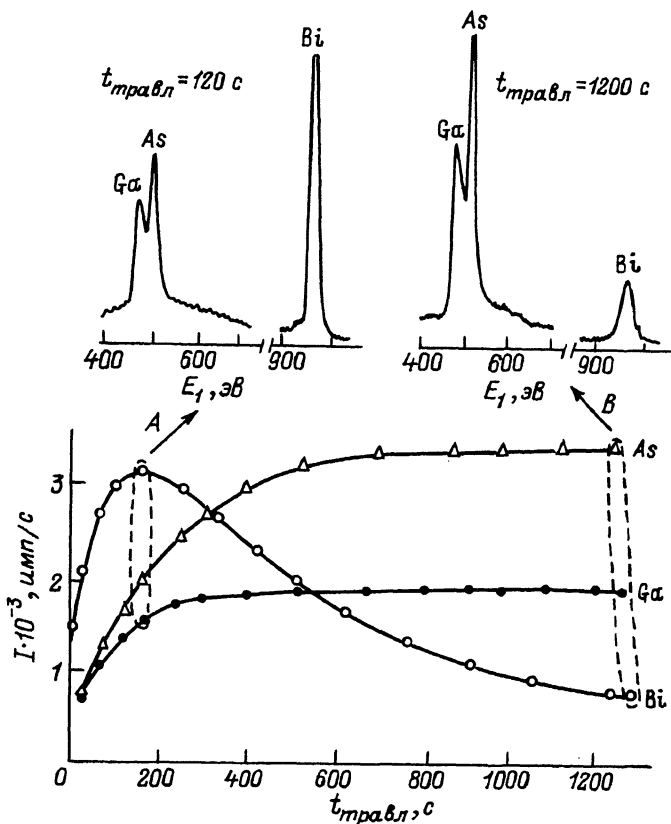


Рис. 1. Зависимость интенсивности пиков Ga , As , Bi от времени травления поверхности ионным пучком (Ne^+ , 2 кэВ, 10 мкА/см²). Вверху показаны спектры СОРИНЭ, соответствующие разным временам травления.

ных слоев, полученных другими авторами, что свидетельствует об отсутствии изменения ширины запрещенной зоны полупроводника в пределах ± 1 мэВ.

Исследование элементного состава слоев методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) не позволило выявить наличие висмута в слоях $GaAs\langle Bi \rangle$, т.е. концентрация входящего в эпитаксиальный слой висмута находится ниже обнаружительной способности метода ($1-3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Таким образом вышеуказанные методы (ФЛ и РСМА), описывающие интегральные характеристики эпитаксиального слоя, усредненные по приповерхностной области на глубину 1-2 мкм, фактически подтвердили выводы работы [2] о вхождении висмута в слой $GaAs\langle Bi \rangle$ в концентрациях, не превышающих 10^{18} см^{-3} .

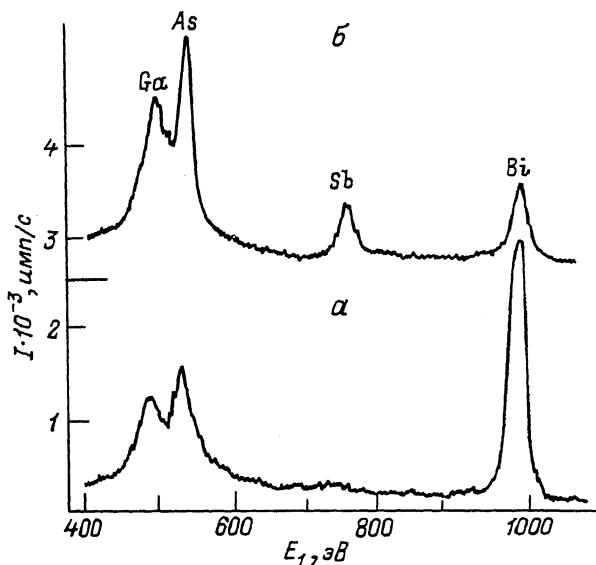


Рис. 2. Спектры СОРИНЭ (Ne^+ , 2 кэВ, $\theta = 130^\circ$) для поверхности $GaAs \langle Bi \rangle$ при разных температурах образца: а - $T = 300$ К, б - $T = 700$ К.

Элементный состав поверхности $GaAs \langle Bi \rangle$ и $GaAs \langle Ga \rangle$ анализировался с помощью методик Оже-спектроскопии и спектроскопии обратного рассеяния ионов низких энергий (СОРИНЭ) [6]. Распределение элементов по толщине приповерхностного слоя (50–100 Å) получали методом СОРИНЭ с использованием ионного травления.

Результаты проведенных исследований поверхности сводятся к следующему:

1. Содержание висмута в первом моноатомном слое $GaAs \langle Bi \rangle$ (после удаления ионной бомбардировкой типичных для арсенида галлия поверхностных загрязнений – углерода и кислорода) составляет около 20 ат. %, что на 3–4 порядка превышает концентрацию висмута в объеме $GaAs \langle Bi \rangle$. При этом по мере удаления от поверхности концентрации Bi снижается, и на глубине 50–70 Å эта величина составляет не более 3.5 ат. % (травление в течение 1300 с) (см. рис. 1 и таблицу). Возможное завышение значения концентрации висмута при больших временах травления и размывание профиля его концентрации обусловлено влиянием эффекта кратера при ионном травлении [7].

2. Количественный анализ элементного состава поверхности арсенида галлия, выращенного из галлиевого и висмутитового раствори-

Элементный состав $GaAs <Bi>$ в точках А и В (рис. 1)

Элемент	А	В
Bi	18.2 ат %	3.5 ат %
Ga	42.9 ат %	44.3 ат %
As	38.8 ат %	51.8 ат %

телей показывает, что в пределах точности метода СОРИНЭ в случае $GaAs <Ga>$ состав поверхности стехиометричен, а в $GaAs <Bi>$ стехиометрия смещена в пользу избытка элементов У группы (Bi и As). Этот факт подтверждает сделанный нами ранее вывод об изменении объемной стехиометрии $GaAs$ в пользу вакансий галлия при переходе от галлиевого к висмутовому растворителю [4, 5].

3. Прогрев образцов $GaAs <Bi>$ до температур 300–700 °С приводит к некоторому снижению приповерхностной концентрации висмута. При этом как в $GaAs <Ga>$, так и в $GaAs <Bi>$ уже на уровне 3–5 монослоев появляется надежно идентифицируемый пик сурьмы (рис. 2,б). Ее концентрация в приповерхностной области для обоих типов образцов достигает 1–1.5 ат. %.

4. В оже-спектрах $GaAs <Ga>$ и $GaAs <Bi>$ надежно идентифицируются неконтролируемые загрязнения: углерод, кислород и калий, которые могут вноситься в процессе послеэпитаксиальной обработки, транспортировки и хранения образцов.

При трактовке полученных результатов по концентрации и распределению висмута по толщине в приповерхностной области следует прежде всего указать на то, что столь значительное его содержание (до 20 ат. %) в первых монослоях не объясняется микровключениями растворителя вследствие его захвата в процессе роста. При наблюдении поверхности $GaAs <Bi>$ в растровом электронном микроскопе микровключения висмута нами обнаружены не были.

Сопоставление результатов исследований объемных и поверхностных свойств слоев $GaAs <Bi>$ и $GaAs <Ga>$ позволяет сделать вывод о существенном различии в элементном составе приповерхностной области и объема слоя. Если исследование спектров ФЛ и результаты РСМА не позволяют установить наличия висмута и сурьмы в эпитаксиальном слое, то в приповерхностной области их содержание достигает нескольких атомных процентов, причем концентрация Bi резко возрастет к поверхности.

На наш взгляд, эти результаты могут быть объяснены следующим образом: при росте эпитаксиального слоя $GaAs$ из раствора-расплава в висмуте процесс встраивания атомов на поверхность монокристалла приводит к захвату достаточно большого количества атомов висмута растущей твердой фазой. Это обусловлено как необходимостью установления равновесия на границе раздела между жидкой фазой, состоящей на 95% из висмута, и твердой фазой, так и существенной неравновесностью самого процесса роста эпитаксиального слоя в методе жидкофазной эпитаксии. С другой стороны, стремление системы к минимуму энергии препятствует вхождению

в решетку $GaAs$ больших по размерам атомов висмута. Противоположное действие двух этих процессов приводит к возникновению градиента концентрации Bi в приповерхностном слое с максимумом его концентрации на поверхности. Профиль распределения висмута в этой области определяется динамическим равновесием потока атомов Bi под действием упругих сил решетки к поверхности и потока атомов Bi от поверхности за счет диффузии. По мере роста слоя это приповерхностное распределение смещается вслед за границей роста. После удаления раствора-расплава с поверхности слоя и охлаждения кристаллизационной системы распределение Bi как бы „замораживается“.

Появление на поверхности образцов $GaAs \langle Ga \rangle$ и $GaAs \langle Bi \rangle$ сурьмы в существенных количествах после прогрева до $T > 300^\circ C$ является несколько неожиданным, поскольку исследование спектров ФЛ данных слоев свидетельствует об отсутствии сурьмы в объеме пленки в пределах точности метода (т.е. Sb в слое не более 0.03 ат. %), а прямые источники загрязнения слоя сурьмой отсутствуют. На наш взгляд, возможны два механизма, объясняющие данное явление. Либо сурьма однородно распределена по толщине выращенных эпитаксиальных слоев с концентрацией ниже предела обнаружения ФЛ, а при прогреве происходит ее сегрегация на поверхность, либо в процессе роста сурьма накапливается в тонком приповерхностном слое порядка сотен монослоев. Причины такого поведения и накопления сурьмы в процессе роста и прогрева эпитаксиальных слоев требуют дополнительных исследований.

Л и т е р а т у р а

- [1] Ганина Н.В., Уфимцев В.Б., Фистуль В.И. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, вып. 10, с. 620-623.
- [2] Акчурин Р.Х., Бирюлин Ю.Ф., Ле Динь Као, Фистуль В.И., Чалдышев В.В. - Электрон. техн., сер. Материалы, 1984, вып. 11, с. 22-27.
- [3] Якушева Н.А., Сикорская Г.В., Созинов В.Н. - Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1985, т. 21, вып. 4, с. 534-536.
- [4] Бирюлин Ю.Ф., Голубев Л.В., Новиков С.В., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. - ФТП, 1987, т. 21, вып. 5, с. 949-952.
- [5] Бирюлин Ю.Ф., Воробьева В.В., Голубев В.Г., Голубев Л.В., Иванов-Омский В.И., Новиков С.В. и др. - ФТП, 1987, т. 21, вып. 12, с. 2201-2209.
- [6] Аристархова А.А., Волков С.С., Исаева Т.Н., Машкова Т.М., Тимашев М.Ю. - Электронная промышленность, 1987, вып. 5 (163), с. 47-49.
- [7] Протопопов О.Д. Послойный анализ в методах исследования поверхности. Обзоры по электронной технике,

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

Поступило в Редакцию
4 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 19

12 октября 1988 г.

О ПОЛНОМ ПОГЛОЩЕНИИ МОЩНОГО СВЧ ИМПУЛЬСА В В СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

В.Н. С л и н к о, Л.В. С у л а к ш и н а,
С.С. С у л а к ш и н

Мощные СВЧ импульсы, в особенности получаемые с помощью релятивистских генераторов, перспективны для возбуждения эксимерных и иных импульсных газовых лазеров [1-3]. Одним из основных здесь является вопрос об эффективности энерговода СВЧ импульса в плазму. Ранее сообщалось [4], что на мегаваттном уровне СВЧ мощности экспериментальный КПД энерговода достигал 80-90%. Для субгигаваттных мощностей СВЧ импульсов вопрос оставался открытым.

В настоящем сообщении анализируется вопрос о взаимодействии СВЧ импульса со столкновительной плазмой. Получено, что поглощение может достигать 100%.

Плазма активных сред газовых лазеров атмосферного давления характеризуется значениями электронной концентрации в диапазоне $N = (10^{13} - 10^{17}) \text{ см}^{-3}$ и частотами соударений $\nu = 10^{12} - 10^{13} \text{ с}^{-1}$. В 10 см - диапазоне длин волн это означает, что $\frac{N}{N_c} = 10^2 - 10^6$, $\frac{\nu}{\omega} = 10^2 - 10^3$, где $N_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$ - критическая электронная концентрация, ω - частота СВЧ волны. В [5] экспериментально показано, что указанные значения $\frac{N}{N_c}$ и $\frac{\nu}{\omega}$ в самостоятельном микросекундном СВЧ разряде в газах атмосферного давления реализуются. Соответственно, плазма в этом случае является столкновительной и слабо ионизованной. В отличие от бесстолкновительного случая, когда при достижении критической электронной концентрации возникает полная отсечка СВЧ волны, коэффициент отражения в районе $\frac{N}{N_c} \sim 1$ существенно падает, а полное отражение может произойти только при $\frac{N}{N_c} = 1 + \frac{\nu^2}{4\omega^2}$, что для самостоятельного СВЧ разряда практически недостижимо. Наиболее подходящей электродинамической структурой для ввода СВЧ мощности в разряд является волновод с расположенной по центру продоль-