

07

## Сверхрешетки InAs/GaSb, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии

© Р.В. Левин<sup>1,2</sup>, В.Н. Неведомский<sup>1</sup>, Б.В. Пушный<sup>1,2</sup>,  
Н.А. Берт<sup>1</sup>, М.Н. Мизеров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Lev@vpegroup.ioffe.ru

<sup>2</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: pushnyi@vpegroup.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 августа 2015 г.

Экспериментально показана возможность изготовления сверхрешеток на основе InAs/GaSb с напряженными слоями методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Исследования изготовленной структуры методами просвечивающей микроскопии и фотолюминесценции показали, что получена сверхрешетка InAs–GaSb на подложке GaSb с толщинами слоев InAs 2 nm и GaSb 3.3 nm.

В настоящее время увеличивается интерес к исследованию наногетероструктур на основе сверхрешеток с напряженными слоями (strained layer superlattice–SLS). Такие сверхрешетки широко применяются при изготовлении фотоприемников для среднего ИК-диапазона спектра.

Применение этих материалов позволяет сравнительно просто, только путем изменения толщин слоев, изменять ширину запрещенной зоны, а следовательно, длинноволновую границу чувствительности фотоприемников. При этом они обладают поглощающей способностью, близкой к межзонному поглощению [1]. Кроме того, есть сообщения [2,3], что в такого вида структурах может быть снижена оже-рекомбинация вследствие изменения зонной структуры, что позволит повысить рабочие температуры фотоприемников. При использовании сверхрешеток для излучающих приборов возможно увеличение их эффективности.

Наиболее часто при изготовлении фотоприемников для спектрального диапазона до 15  $\mu\text{m}$  и каскадных приборов для нескольких диапазонов [4] на основе таких структур используется пара GaSb–InAs

(антимонид галлия–арсенид галлия). В такого рода наногетероструктурах толщины слоев обычно не превышают критической величины, обусловленной напряжениями, вызванными разностью параметров кристаллических решеток материалов (при превышении критической толщины сплошной слой не образуется и возникают отдельные островки — модель Stranski–Krastranov), с другой стороны, должны отсутствовать туннельные токи между слоями. Обычно толщины слоев составляют единицы нанометров, при этом основным методом изготовления наногетероструктур со сверхрешетками в настоящее время является метод молекулярно-пучковой эпитаксии. Этот метод позволяет с высокой точностью контролировать толщины слоев (до одного атомарного слоя), но требует дорогостоящего оборудования, что приводит к высокой стоимости структур при производстве. Кроме этого существует сложность при изготовлении структур на основе соединений с сурьмой (Sb).

В данной работе представлены результаты разработки технологии изготовления сверхрешеток на основе GaSb и InAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ), т. е. метода, широко применяющегося в массовом производстве структур для оптоэлектроники.

Авторами не обнаружены публикации, описывающие применение метода МОСГФЭ для получения сверхрешеток типа InAs/GaSb.

Методом МОСГФЭ на установке AIXTRON-200 с реактором горизонтального типа изготавливались структуры, содержащие последовательно чередующиеся слои GaSb и InAs на подложках *n*-GaSb (001). Давление в реакторе составляло 76 Торр. Подложка во время роста вращалась со скоростью 100 rpm. Газ-носитель — очищенный водород с точкой росы не хуже  $-100^{\circ}\text{C}$ , суммарный поток через реактор составлял 5.5 slpm. Источники элементов для роста: триметилиндий (TMIIn), триэтилгаллий (TEGa), триметилсурьма (TMSb) и арсин (AsH<sub>3</sub>). Структуры преднамеренно не легировались.

Целью экспериментов являлось исследование возможности получения тонких слоев с резкими границами раздела. Эти обстоятельства определяли весь режим роста — малую скорость роста и полную замену газовой среды между ростом соседних слоев.

Скорость роста в методе МОСГФЭ определяется в основном температурой и соотношением количества элементов 3 и 5 групп элементов в зоне роста. Температура роста для слоев GaSb и InAs составляла  $500^{\circ}\text{C}$ , а соотношение элементов V/III имело значение: InAs V/III = 93 и GaSb

Нумерация слоев в структуре, состав и их толщины

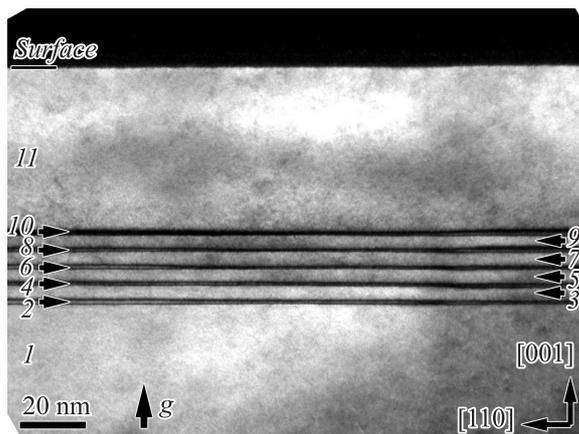
№ слоя	Состав	Толщина, nm
11	GaSb	47.8
10	InAs	1.8
9	GaSb	3.3
8	InAs	1.8
7	GaSb	2.9
6	InAs	2.4
5	GaSb	3.0
4	InAs	2.5
3	GaSb	3.0
2	InAs	1.4
1	GaSb	457
		Буферный слой

$V/III = 22.5$ . Высокое значение соотношения элементов V/III для GaSb объясняется низкой эффективностью разложения TMSb при  $T = 500^\circ\text{C}$  (типичное значение  $V/III$  для роста GaSb при  $T = 550\text{--}630^\circ\text{C}$  в диапазоне 1.2–2.5 [5]).

Для получения резких границ между слоями нами прерывалась подача газовых смесей с продувкой реактора одним водородом. Исходя из размеров реактора и величины потока газа-носителя, время полной замены газовой среды в зоне роста составляло около 10 s, в экспериментах время продувки реактора водородом составляло 30 s.

Ниже представлены результаты исследований изготовленных структур.

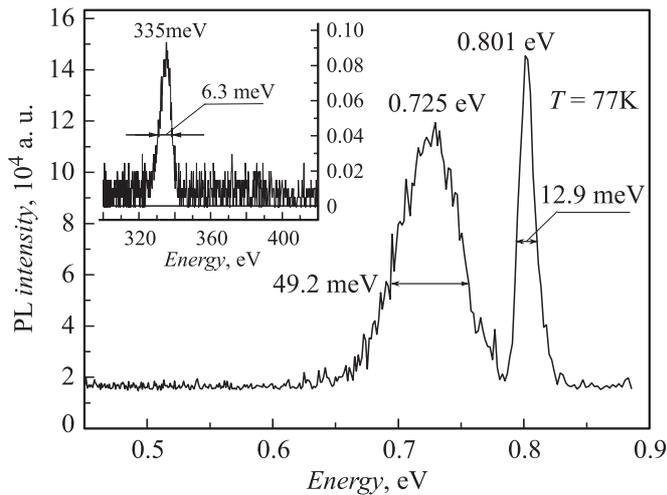
1. Исследования микроструктуры образцов проводились методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM2100F с ускоряющим напряжением 200 kV. Образцы для электронной микроскопии были подготовлены в поперечном сечении по общепринятой процедуре с использованием механического шлифования–полирования и финишного распыления ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией 3–3.3 keV под скользящим углом к поверхности. При исследовании в электронном микроскопе применялся режим дифракционного контраста в двулучевых условиях. На электронной микрофотографии поперечного сечения структуры в



**Рис. 1.** Темнопольное изображение поперечного сечения (1–10) образца, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии в двулучевых условиях с действующим вектором дифракции  $g = (002)$ . Слои 1, 3, 5, 7, 9, 11 — GaSb, слои 2, 4, 6, 8, 10 — InAs.

темном поле с действующим дифракционным вектором  $g = 002$  видны четкие границы слоев InAs и GaSb и их толщины. Скорости роста InAs и GaSb составили 0.2 и 0.03 nm/s соответственно. В зависимости от времени осаждения толщины эпитаксиальных слоев варьировались в диапазоне 1.5–2.5 nm для InAs и 3.0–3.5 nm для GaSb. На границах слоев GaSb/InAs видны тонкие темные полосы, которые соответствуют переходным слоям, близким по составу к InSb. Нумерация слоев указана на рис. 1, а их толщины приведены в таблице.

2. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись с поверхности полученных образцов при температуре  $T = 77$  К в диапазоне длин волн 1400–2500 nm (0.45–0.9 eV) на спектрометре МДР-23 с разрешением не хуже 5 nm. Для возбуждения использовался лазер Nd:YAG с длиной волны излучения 532 nm и интенсивностью освещения до 200 mW. Плотность мощности возбуждения при исследовании сверхрешетки составляла  $\sim 100$  W/cm<sup>2</sup>. На спектре ФЛ (рис. 2) четко видны два максимума: один с энергией 0.801 eV, связанный с межзонной рекомбинацией, и второй 0.725 eV, вероятно, связанный с примесно-дефектными ком-



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции изготовленной сверхрешетки. Видны пики излучения структуры с энергией в максимумах 0.801 и 0.725 eV, на вставке — пик 0.335 eV (77 K).

плексами  $V_{\text{Ga}}\text{GaSbTeSb}$  в буферном слое GaSb (толщина  $\sim 500$  nm) [6]. Полуширина спектра ФЛ, основной полосы эпитаксиальных слоев, составила 12.9 meV, а второй полосы (0.725 eV) почти в 4 раза больше (49.2 meV) основного пика. Измерение ФЛ в спектральном диапазоне 2200–4600 nm (0.27–0.55 eV) производилось с поверхности структур при  $T = 77$  K на спектрометре МДР-23. Для возбуждения использовался диодный лазер с длиной волны излучения  $\sim 1 \mu\text{m}$  и мощностью в импульсном режиме несколько ватт. Регистрация излучения осуществлялась охлаждаемым фотодиодом из InSb. На вставке (рис. 2) представлен спектр ФЛ в диапазоне 0.3–0.42 meV, на спектре четко виден пик (0.335 eV) с полушириной пика 6.3 meV, энергетических переходов между уровнями, вероятно, связанный со сверхрешеткой InAs/GaSb.

Таким образом, в работе впервые экспериментально показана возможность изготовления сверхрешеток на основе InAs/GaSb с напряженными слоями методом МОСГФЭ. Изготовлена сверхрешетка

InAs–GaSb на подложке GaSb с толщинами слоев InAs 2 nm и GaSb 3.3 nm и резкими границами.

В заключение авторы выражают благодарность А.С. Власову, М. Ременному и Б.А. Матвееву за помощь в фотолюминесцентных исследованиях образцов и за полезные замечания (обсуждения).

## Список литературы

- [1] *Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г.* Современные проблемы инфракрасной техники. М.: Изд. МИИГА и К, 2011. 84 с.
- [2] *Georgy G. Zegrya, Aleksey D. Andreev* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. N 18. P. 2681.
- [3] *Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А.* Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011. 448 с.
- [4] *Gautam N., Naydenkov M., Myers S., Barve A.V., Plis E., Rotter T., Dawson L.R., Krishna S.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 121 106.
- [5] *Левин Р.В., Власов А.С., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Пушный Б.П., Андреев В.М.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 12. С. 1427–1431.
- [6] *Wu M.C., Chen C.C.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 12. P. 8495.