

Молекулярно-пучковая эпитаксия структур InGaAs/InAlAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов

© Н.А. Малеев¹, В.А. Беляков², А.П. Васильев³, М.А. Бобров¹, С.А. Блохин¹, М.М. Кулагина¹, А.Г. Кузьменков³, В.Н. Неведомский¹, Ю.А. Гусева¹, С.Н. Малеев¹, И.В. Ладенков², Е.Л. Фефелова², А.Г. Фефелов², В.М. Устинов^{3,4}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² ОАО «НПП „Салют“», 603950 Нижний Новгород, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Представлены результаты исследований по оптимизации технологии молекулярно-пучковой эпитаксии структур InGaAs/InAlAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов. Выбор температуры держателя подложки, скорости роста и соотношения потоков элементов III и V групп при синтезе отдельных областей гетероструктуры, толщина AlAs-вставок и качество границ барьерных слоев являются критическими параметрами для получения оптимальных характеристик гетеробарьерных варакторов. Предложенная конструкция трехбарьерных структур гетеробарьерных варакторов с непосредственно примыкающими к гетеробарьеру InAlAs/AlAs/InAlAs тонкими напряженными слоями InGaAs, рассогласованными относительно постоянной решетки подложки InP, при толщине AlAs-вставок 2.5 нм обеспечивает плотность тока утечки на уровне лучших опубликованных значений для структур гетеробарьерных варакторов с 12 барьерами и толщиной вставок 3 нм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45095.09

1. Введение

Для создания эффективных твердотельных источников диапазона частот от сотен ГГц до 1 ТГц успешно используются многокаскадные диодные умножители частоты, на вход которых подается качественный сигнал относительно низкочастотного генератора (например, на диоде Ганна или лавинно-пролетном диоде), а выходной сигнал может быть дополнительно усилен с помощью транзисторного усилителя [1]. В качестве активных элементов таких умножителей применяются включенные по балансной схеме диоды Шоттки в планарной геометрии с несколькими анодами [2]. Возможной альтернативой является использование гетеробарьерных варакторных диодов (ГБВ, heterostructure barrier varactors — HBV) [3]. Тонкие широкозонные барьерные слои в структурах ГБВ расположены между легированными *n*-типом слоями узкозонного материала и создают потенциальные барьеры для электронов в зоне проводимости. Приложенное внешнее напряжение смещения приводит к накоплению электронов с одной стороны от барьерного слоя, а с другой формируется обедненная область, барьерная емкость которой уменьшается по мере роста приложенного напряжения. Нелинейная вольт-фарадная характеристика (ВФХ) ГБВ имеет симметричную форму, что позволяет реализовать эффективные утроители и

пятикратные умножители частоты [4]. При этом величина допустимого размаха амплитуды входного сигнала умножителя на основе ГБВ ограничена токами утечки через барьерные слои. Лучшие результаты для умножителей на основе ГБВ достигнуты с использованием выращенных на подложках InP гетероструктур с несколькими последовательно расположенными барьерными слоями $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ в матрице $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, которые обеспечивают большую высоту потенциального барьера в зоне проводимости и подавление туннельных токов утечки. По результатам моделирования, выполненных в работе [5], для эффективного подавления туннельных токов утечки было предложено использовать в качестве оптимальной структуру барьера со следующей последовательностью слоев: 8 нм $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/3$ нм AlAs/8 нм $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. В то же время из результатов экспериментальных исследований следует, что при указанной толщине AlAs-вставок общая оптимальная толщина барьерного слоя лежит в диапазоне 10–14 нм [6], что существенно меньше предсказанного моделью значения ~ 19 нм. В связи с этим задача оптимизации барьерных слоев гетероструктур ГБВ на подложках InP для снижения токов утечки сохраняет свою актуальность.

В настоящей работе представлены результаты исследований по оптимизации технологии молекулярно-

пучковой эпитаксии (МПЭ) структур ГБВ в системе материалов InGaAs/InAlAs/AlAs. Рассмотрена возможность улучшения приборных характеристик с помощью введения в конструкцию барьера дополнительных структурно-напряженных слоев узкозонного материала, непосредственно примыкающих к барьерным слоям.

2. Детали эксперимента

Эпитаксиальные структуры для ГБВ выращивались методом МПЭ в установке Riber Compact 21 на полупроводящих подложках InP диаметром 50.8 мм с кристаллографической ориентацией (001) и содержали три барьерных слоя InAlAs/AlAs/InAlAs с толщиной AlAs-вставок от 1.5 до 2.5 нм. Общая конструкция гетероструктур аналогична использованной в работе [4]. Для обеспечения согласования постоянных решетки эпитаксиальных слоев InGaAs и InAlAs с подложкой InP проводились предварительные калибровки с использованием метода высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии (HR XRD). Калибровки осуществлялись таким образом, чтобы точное согласование постоянных решетки слоев и подложки обеспечивалось при рабочей температуре держателя подложки в ходе эпитаксиального процесса. При таком подходе удается надежно обеспечить требуемую точность согласования слоев на всем протяжении эпитаксиального процесса. Выбор температуры держателя подложки ($\sim 480\text{--}500^\circ\text{C}$), скоростей роста InGaAs и InAlAs (~ 0.5 мкм/ч) и соотношения потоков элементов III и V групп ($\sim 1:5$) определялся компромиссом между оптимальными условиями для получения хорошей морфологии слоев, точностью контроля содержания In и возможностью прецизионного контроля интерфейсов. Ранее выполненные исследования влияния параметров эпитаксиального процесса на качество поверхности гетероструктур ГБВ показали, что при температуре держателя подложки на $20\text{--}30^\circ\text{C}$ выше оптимальной области с высокой шероховатостью поверхности занимают около 60% от общей площади образца, тогда как при оптимальной температуре области с шероховатой поверхностью располагаются у самых краев подложки (вблизи элементов крепления образца) и занимают не более 10% от его общей площади [7]. Структурные характеристики выращенных образцов исследовались методами HR XRD, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с локальным травлением ионным пучком и просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), количество и распределение поверхностных дефектов анализировались методом рассеяния лазерного излучения на установке SurfScan. Из выращенных гетероструктур были изготовлены наборы тестовых диодов с разной площадью барьерного контакта, для которых измерялись ВФХ и вольт-амперные характеристики (ВАХ). Рабочие образцы ГБВ с последовательным включением двух или четырех мезаструктур, каждая из которых содержит по три барьерных слоя,

Основные параметры исследуемых эпитаксиальных гетероструктур

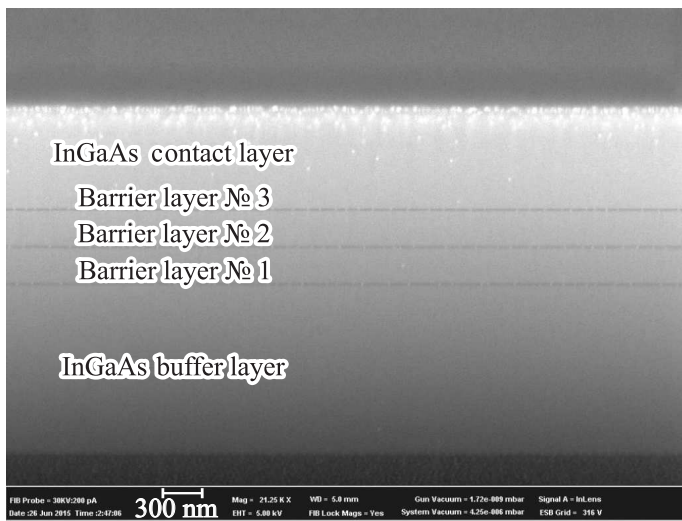
Слой эпитаксиальной структуры	Материал слоя	Толщина слоя, нм
Контактный слой	$n^+\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	400.0
Модулирующий слой	$n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	255.0
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Барьерный слой	$i\text{-AlAs}$	1.5, 2.0, 2.5
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Модулирующий слой	$n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	260.0
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Барьерный слой	$i\text{-AlAs}$	1.5, 2.0, 2.5
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Модулирующий слой	$n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	260.0
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Барьерный слой	$i\text{-AlAs}$	1.5, 2.0, 2.5
Барьерный слой	$i\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	6.0
Модулирующий слой	$n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	255.0
Буферный слой	$n^+\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	1000.0
Подложка	InP	450 ± 2.5 мкм

были реализованы в конструкции с балочными выводами и апробированы в составе умножителя частоты W-диапазона.

3. Результаты и обсуждение

В процессе исследований после оптимизации технологических режимов эпитаксиального выращивания отдельных слоев была выращена серия гетероструктур ГБВ с тремя барьерными слоями $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, имеющими фиксированную толщину слоев InAlAs 6 нм и различную толщину AlAs-вставок в диапазоне от 1.5 до 2.5 нм. Параметры эпитаксиальных структур HBV1–HBV4, результаты для которых представлены в настоящей работе, приведены в таблице. Толщина вставок AlAs для четырех исследуемых структур составляет: HBV1 — 1.5 нм, HBV2 — 2 нм, HBV3 — 2 нм, HBV4 — 2.5 нм. Гетероструктуры HBV3, HBV4 дополнительно имеют непосредственно примыкающие к барьерным слоям $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ тонкие (~ 5 нм) вставки структурно-напряженных слоев InGaAs, роль которых обсуждается в дальнейшем.

На рис. 1 приведено СЭМ-изображение поперечного разреза гетероструктуры HBV2, подтверждающее хорошее соответствие толщин эпитаксиальных слоев проектным значениям. Представленные на рис. 2 результаты измерений ВФХ тестовых диодов с размерами барьерной области 47×47 мкм, изготовленных из структур HBV1–HBV4, демонстрируют высокую воспроизводимость абсолютной величины удельной барьерной емкости для выращенных гетероструктур с различной конструкцией барьерного слоя и симметричную форму ВФХ с отношением значений барьерной емкости при напряжениях 0 и 7 В около пяти. Измеренные ВФХ



Basic sequence of layers

Contact layer n^+ -InGaAs (400 nm)
 Modulating layer n -InGaAs (250 nm)
 Barrier layer № 3 InAlAs/AlAs/InAlAs (14 nm)
 Modulating layer n -InGaAs (250 nm)
 Barrier layer № 2 InAlAs/AlAs/InAlAs (14 nm)
 Modulating layer n -InGaAs (250 nm)
 Barrier layer № 1 InAlAs/AlAs/InAlAs (14 nm)
 Modulating layer n -InGaAs (250 nm)
 Buffer layer n^+ -InGaAs (1000 nm)
 Substrate is semi-insulating InP

Рис. 1. Изображение поперечного разреза эпитаксиальной гетероструктуры ГВВ в сканирующем электронном микроскопе с указанием последовательности основных слоев.

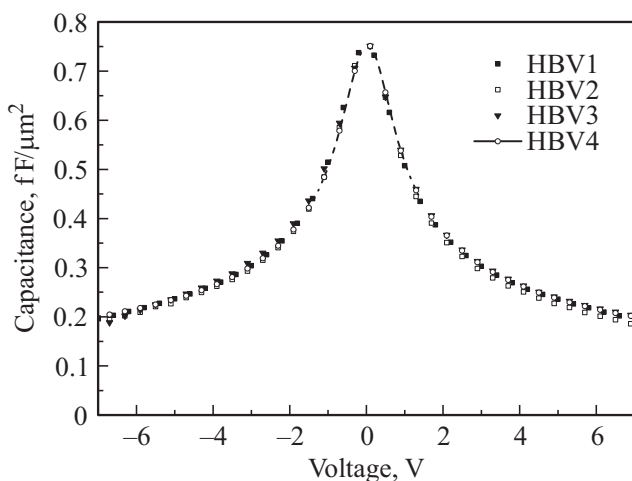


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики тестовых ГВВ.

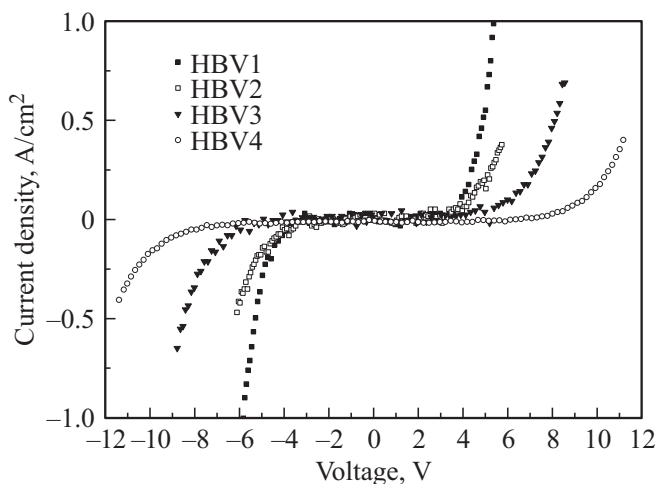


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тестовых ГВВ.

изготовленных тестовых ГВВ близки к проектным значениям. Поскольку величина удельной барьерной емкости и форма ВФХ преимущественно определяются общим количеством барьерных слоев, их толщиной и уровнем легирования модулирующих слоев InGaAs, наблюдаемое отсутствие заметной зависимости ВФХ от толщины AlAs-вставок вполне ожидаемо. В то же время, как следует из приведенных на рис. 3 данных измерений ВАХ тестовых диодов, проведенные исследования показывают сильное влияние толщины AlAs-вставок на уровень токов утечки. Увеличение толщины AlAs-вставок с 1.5 (структура HBV1) до 2 нм (структура HBV2) приводит к двукратному падению плотности тока утечки при напряжении 6 В — с 1 до 0.5 А/см². Следует отметить, что выращенные в оптимизированных условиях структуры ГВВ имеют высокое структурное совершенство и планарность гетерограниц барьерных областей, что подтверждается представленными на рис. 4 результатами исследований методом ТЕМ для структуры HBV2.

Структуры ГВВ с толщиной AlAs-вставок 2 нм были успешно использованы для предварительной приборной апробации в составе умножителя частоты. На их основе были изготовлены планарные ГВВ в интегральном исполнении с четырьмя диодными мезоструктурами, последовательно соединенными через сильно легированный InGaAs буферный слой. Каждая из диодных мезоструктура с размерами контактов $\sim 5 \times 100$ мкм содержала по три барьерных слоя. Созданный на основе изготовленных ГВВ утроитель с частотой выходного сигнала 94 ГГц в импульсном режиме обеспечивает выходную мощность 220 мВт при мощности входного сигнала 1 Вт. В непрерывном режиме выходная мощность составляет 80 мВт при входной мощности 500 мВт и ограничена неоптимальной схемой теплоотвода.

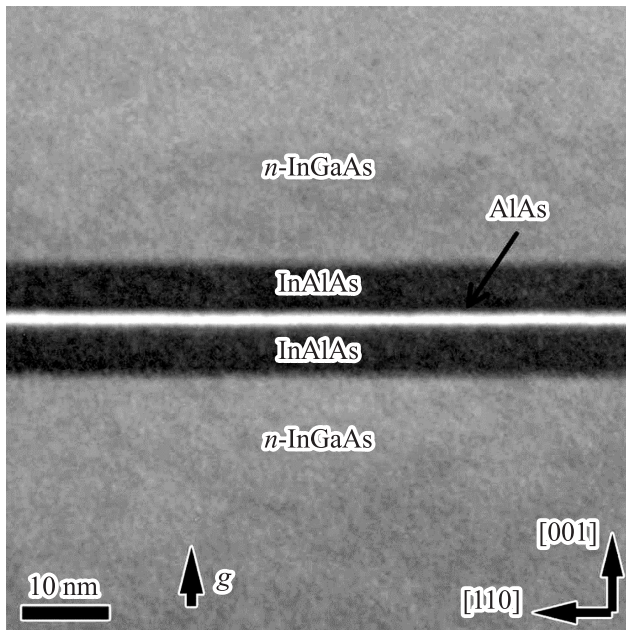


Рис. 4. ТЕМ-изображение единичного барьерного слоя InAlAs/AlAs/InAlAs гетероструктуры HBV2.

Попытки использования толщины AlAs-вставок больше 2 нм для решеточно-согласованной конструкции эпитаксиальной гетероструктуры в нашем случае приводили к неустойчивым результатам, в том числе к деградации качества поверхности для большей части площади эпитаксиальной структуры. В связи с этим была исследована возможность использования преднамеренного рассогласования состава непосредственно примыкающих к $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ гетеробарьеру тонких (~ 5 нм) слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ относительно значения $x = 0.53$, соответствующего постоянной решетки подложки InP. Фактически данный подход лежит в русле концепции частичной компенсации структурных напряжений, в ряде случаев успешно используемой при выращивании напряженных приборных гетероструктур различного типа. В результате было обнаружено, что при одинаковой толщине AlAs-вставок 2 нм фиксированный уровень тока утечки $0.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ при использовании тонких слоев $\text{In}_{0.565}\text{Ga}_{0.435}\text{As}$ достигается при напряжении 8 В, что на 2 В выше, чем для структур с полностью решеточно-согласованными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (рис. 4). Для выращенных трехбарьерных структур ГБВ с толщиной AlAs-вставок 2.5 нм и примыкающими к барьеру тонкими слоями $\text{In}_{0.565}\text{Ga}_{0.435}\text{As}$ плотность тока утечки при напряжении 10 В составляет $0.4 \text{ A}/\text{cm}^2$, что соответствует лучшим опубликованным значениям для структур ГБВ с номинальной толщиной AlAs-вставок 3 нм при последовательном включении 12 барьеров [4]. Таким образом, в расчет на один барьер обеспечивается снижение тока утечки в 4 раза. Следует отметить, что предложенный подход при рекордно низком уровне

токов утечки позволяет уменьшить общий уровень механических напряжений в структуре ГБВ.

4. Заключение

Представлены результаты исследований по оптимизации технологии молекулярно-пучковой эпитаксии структур InGaAs/InAlAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов (ГБВ). Выбор температуры держателя подложки, скорости роста и соотношения потоков элементов III и V групп при синтезе отдельных областей гетероструктуры, толщина AlAs-вставок и качество границ барьерных слоев являются критическими параметрами для получения оптимальных характеристик ГБВ. Трехбарьерные структуры ГБВ с непосредственно примыкающими к гетеробарьеру InAlAs/AlAs/InAlAs тонкими напряженными слоями InGaAs, рассогласованными относительно постоянной решетки подложки InP, при толщине AlAs-вставок 2.5 нм демонстрируют плотность тока утечки на уровне лучших опубликованных значений для структур ГБВ с 12 барьерами при толщине AlAs-вставок 3 нм. Предложенная конструкция барьерных слоев при рекордно низком уровне токов утечки позволяет уменьшить общий уровень механических напряжений в структуре ГБВ.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ 16-29-03346 офи-м.

Список литературы

- [1] J.L. Hesler, T. Crowe. SPIE Newsroom. 10.1117/2.1201506.005859 (2015).
- [2] N.R. Erickson. Proc IEEE MTT-S International, 1301 (1990).
- [3] A. Rydberg, H. Grönqvist, E. Kollberg. IEEE Electron Dev. Lett., **11**, 373 (1990).
- [4] A. Malko, T. Bryllert, J. Vukusic, J. Stake. *24th Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials* (Santa Barbara, USA, 2012) p. 92.
- [5] Y. Fu, J. Stake, L. Dillner, M. Willander, E.L. Kollberg. J. Appl. Phys., **82**, 5568 (1997).
- [6] T.A. Emadi, T. Bryllert, M. Sadeghi, J. Vukusic, J. Stake. Appl. Phys. Lett., **90**, 012108 (2007).
- [7] Н.А. Малеев, В.А. Беляков, А.П. Васильев, М.М. Кулагина, А.Г. Кузьменков, Ю.А. Гусева, С.Н. Малеев, Е.В. Никитина, С.А. Блохин, М.А. Бобров, С.В. Оболенский, Е.Л. Фефелова, И.В. Ладенков, А.Г. Фефелов, В.М. Устинов. *Электроника и микроэлектроника СВЧ. V Всеросс. конф.* (Санкт-Петербург, 2016). Сб. ст., т. 1, с. 68.

Редактор А.Н. Смирнов

Molecular-beam epitaxy growth of InGaAs/InAlAs/AlAs structures for heterobarrier varactor diodes

*N.A. Maleev¹, V.A. Belyakov², A.P. Vasil'ev³,
M.A. Bobrov¹, S.A. Blokhin¹, M.M. Kulagina¹,
A.G. Kuzmenkov³, V.N. Nevedomskii¹,
Yu.A. Guseva¹, S.N. Maleev¹, I.V. Ladenkov²,
E.L. Fefelova², A.G. Fefelov², V.M. Ustinov^{3,4}*

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² JSC «NPP „Salyut“»,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

³ Submicron Heterostructures for Microelectronics,
Research & Engineering Center of the Russian
Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Molecular-beam epitaxy growth of InGaAs/InAlAs/AlAs structures for heterobarrier varactor diodes (HBV) was investigated and optimized. Substrate holder temperature, growth rate and III/V ratio, thickness of AlAs insertions and heterointerface quality are essential parameters for optimal HBV performance. Proposed triple barrier HBV structures with InAlAs/AlAs/InAlAs barriers surrounded by thin lattice-mismatched compressively-strained InGaAs layers at AlAs insertion thickness of 2.5 nm demonstrates leakage current as low as best published 12 barriers HBV structures with AlAs insertion thickness of 3 nm.