

**Малеев Н.А.^{1,3}, Беляков В.А.², Васильев А.П.⁴, Кулагина М.М.¹,
Кузьменков А.Г.⁴, Гусева Ю.А.¹, Малеев С.Н.¹, Никитина Е.В.⁵,
Блохин С.А.¹, Бобров М.А.¹, Оболенский С.В.⁶, Фефелова Е.Л.²,
Ладенков И.В.², Фефелов А.Г.², Устинов В.М.⁴**

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

²ОАО «НПП «Салют»

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

⁴НТЦ микроэлектроники РАН

⁵Академический Университет

⁶ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Молекулярно-пучковая эпитаксия структур гетеробарьерных варакторов в системе материалов InGaAs-InAlAs-InP

Представлены результаты экспериментальных исследований по оптимизации технологии молекулярно-пучковой эпитаксии структур InAlAs/InGaAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов. Разработанный способ формирования барьерных слоев позволяет увеличить толщину структурно-напряженных AlAs вставок. При толщине AlAs вставок 2.5 нм плотность тока утечки соответствует лучшим опубликованным значениям для структур гетеробарьерных варакторов с толщиной вставок 3 нм.

Ключевые слова: гетеробарьерный варактор, молекулярно-пучковая эпитаксия, микроволновые умножители частоты

Создание эффективных твердотельных источников электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона является актуальной задачей. На текущий момент в области частот от сотен ГГц до 1 ТГц наилучшие результаты для твердотельных источников достигнуты за счет использования многокаскадных умножителей 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 МИС транзисторного усилителя [1].

Основные успехи в повышении выходной мощности умножителей на сверхвысоких частотах связаны с применением диодов Шоттки планарной геометрии при использовании нескольких анодов, включенных по балансной схеме [2]. Твердотельные источники электромагнитного излучения на базе таких умножителей демонстрируют на частоте 920 ГГц в непрерывном режиме при комнатной температуре выходную мощность 0.6 мВт, которая возрастает до 1,4 мВт при температуре жидкого азота [3].

В качестве альтернативного активного элемента для сверхвысокочастотных умножителей частоты были предложены гетеробарьерные варакторные диоды (ГБВ, heterostructure barrier varactors - HBV) [4]. В таких приборах тонкий нелегированный слой более широкозонного материала (например, AlAs или AlGaAs), расположенный между двумя легированными n-типом слоями узкозонного материала (например, GaAs), создает потенциальный барьер для электронов в зоне проводимости. При приложенном внешнем

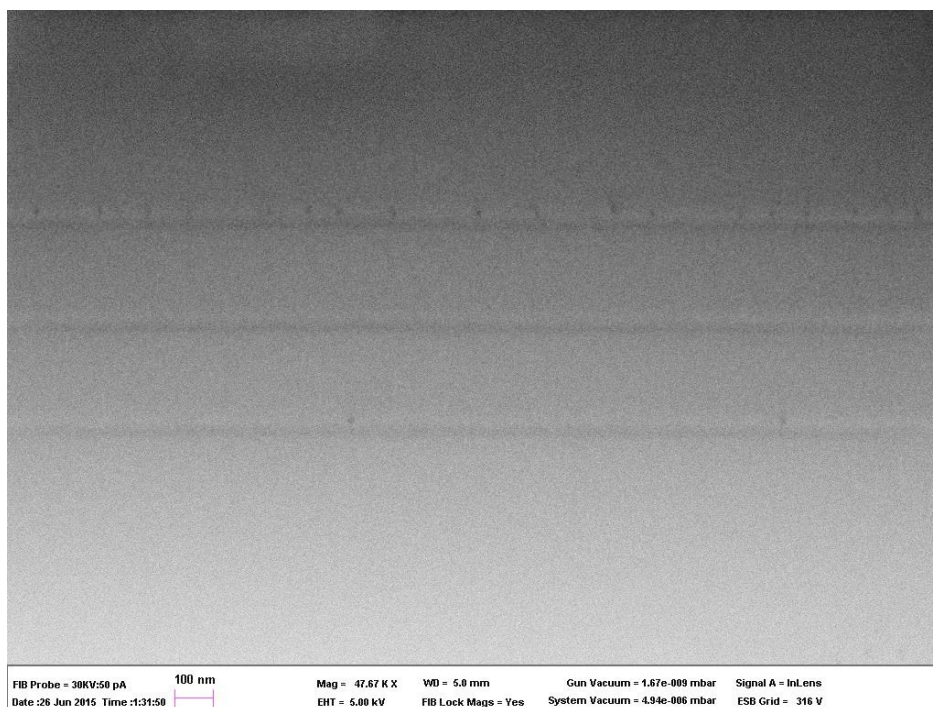
напряжении, с одной стороны от широкозонного барьера происходит накопление электронов, а с другой формируется обедненная область, ширина которой увеличивается по мере роста напряжения, что обуславливает соответствующее уменьшение барьерной емкости. Нелинейное изменение комплексного сопротивления ГБВ может быть использовано для реализации умножения частоты, при этом симметричная форма вольт-фарадной характеристики (ВФХ) позволяет реализовать генерацию только нечетных гармоник, что определяет преимущества ГБВ для реализации утроителей или пятикратных умножителей частоты [5]. Лучшие результаты для умножителей на основе ГБВ достигнуты с использованием выращенных на подложках InP гетероструктур InAlAs/InGaAs/AlAs с несколькими последовательно расположенными барьерными слоями (например, утроитель частоты с выходной мощностью 185 мВт и коэффициентом преобразования 23% на частоте пятой гармоники 107 ГГц с полосой рабочих частот 15%) [6]. В таких структурах наличие тонкого (единицы нм) слоя AlAs, вставленного в широкозонный барьерный слой InAlAs, позволяет эффективно подавить туннельные токи утечки, однако требуется тщательная оптимизация конструкции и технологии получения гетероструктуры из-за большого рассогласования параметров кристаллической решетки AlAs и решеточно-согласованных с подложкой InP слоев InAlAs (InGaAs). Для улучшения теплоотвода используется монтаж кристалла ГБВ планарной конструкции с удаленной InP подложкой на поверхности сверхтонкой кремниевой подложки-носителя, что обеспечивает продвижение в субмиллиметровый диапазон [7].

Ранее нами были выполнены исследования по разработке технологии выращивания решеточно-согласованных с подложкой InP эпитаксиальных структур ГБВ методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и их предварительной приборной апробации. Исследуемые структуры содержали три барьерных слоя InAlAs/AlAs/InAlAs с толщиной AlAs вставок 1,5 нм [8]. Общая конструкция гетероструктур была аналогична использованной в работах [6,7]. Реализованные в интегральном исполнении ГБВ с шириной контакта 80 мкм были использованы для предварительной апробации в составе умножителя частоты мм диапазона. При этом на третьей гармонике (94 ГГц) была получена выходная мощность 40 мВт при эффективности преобразования около 10%. Максимальный размах амплитуды входного сигнала для созданных ГБВ был ограничен возрастанием тока утечки через гетеробарьеры. Как известно, существенное влияние на токи утечки оказывают общая толщина гетероструктурного барьера, и толщина AlAs вставок [9]. Попытки увеличить толщину AlAs вставок до рекомендованных в работах [5-7] значений 2.5-3 нм, приводили к генерации дислокаций и резкому ухудшению морфологии поверхности.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по оптимизации технологии получения эпитаксиальных структур InAlAs/InGaAs/AlAs для ГБВ методом МПЭ. Структуры выращивались в установке Riber Compact 21 на полуизолирующих подложках InP диаметром 50,8 мм с кристаллографической ориентацией (001). Базовая конструкция гетероструктур аналогична ранее использованной. Было исследовано влияние однородности распределения температуры держателя подложки, проведена оптимизация температуры держателя подложки и соотношения потоков элементов III и V групп для роста разных областей гетероструктуры, а также исследована возможность использования частичной компенсации структурных напряжений за счет преднамеренного рассогласования состава примыкающих к гетеробарьеру слоев относительно решеточно-согласованных с подложкой InP составов. Структурные параметры выращенных образцов исследовались методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии, а количество и распределение поверхностных дефектов анализировались с использованием рассеяния лазерного излучения на установке SurfScan. Для оценки связи структурных и электрофизических параметров в нескольких областях, изготовленных гетероструктур были

сформированы наборы тестовых диодов с разной площадью барьерного контакта, исследованы их вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВФХ.

На рисунке 1 приведено изображение поперечного скола гетероструктуры ГБВ, выращенной методом МПЭ в оптимизированных режимах, полученное на сканирующем электронном микроскопе. Наблюдается хорошее соответствие толщин эпитаксиальных слоев проектным значениям, для наглядности указанным на рисунке, и высокая степень планарности интерфейсов.



Модулирующий слой
n InGaAs (250нм)
Барьерный слой №3
InAlAs/AlAs/InAlAs
(14нм)
Модулирующий слой
n InGaAs (250нм)
Барьерный слой №2
InAlAs/AlAs/InAlAs
(14нм)
Модулирующий слой
n InGaAs (250нм)
Барьерный слой №1
InAlAs/AlAs/InAlAs
(14нм)
Модулирующий слой
n InGaAs (250нм)
Буферный слой
n⁺InGaAs (1000 нм)

Рис. 1. Полученное на сканирующем электронном микроскопе изображение поперечного скола и схематическая последовательность основных слоев эпитаксиальной гетероструктуры ГБВ

Рисунок 2, на котором приведены фотографии с экрана монитора установки SurfScan, характеризует качество поверхности двух образцов, выращенных в неоптимальных (а) и оптимизированных (б) условиях по температуре держателя подложки. В первом случае области с высокой шероховатостью поверхности, соответствующие светлым областям на изображениях поверхностей пластин, занимают около 60% от общей площади образца, а во втором – около 10%, в основном располагаясь вблизи края пластины, который имеет более высокую температуру в процессе эпитаксии из-за особенностей конструкции используемого держателя подложки.

На рисунке 3 показаны измеренные зависимости удельной барьерной емкости от напряжения смещения для серии гетероструктур ГБВ, которые отличаются толщинами AlAs вставок и режимами формирования барьерных областей. Приведенные данные демонстрируют высокую воспроизводимость абсолютной величины удельной барьерной емкости и формы ВФХ, которые преимущественно определяются толщиной и общим количеством барьерных слоев, толщиной и уровнем легирования модулирующих слоев InGaAs.

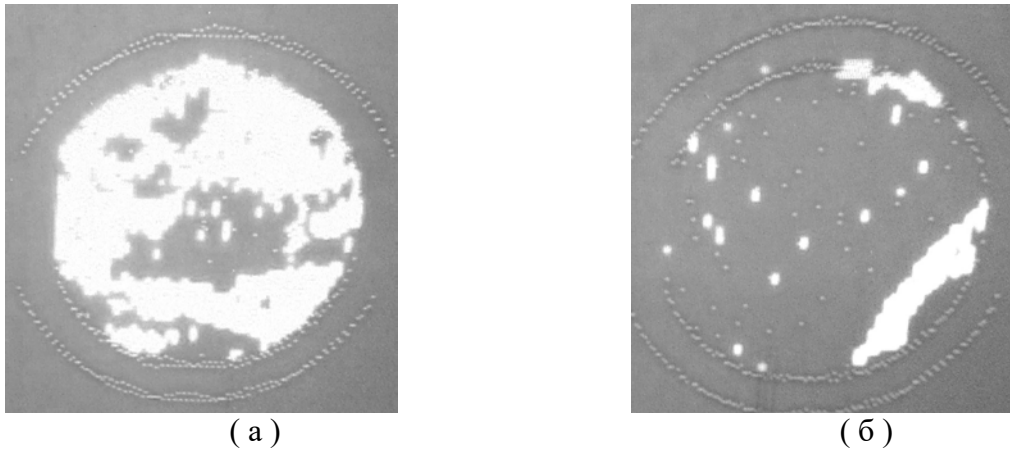


Рис. 2. Фотографии с экрана монитора установки SurfScan, характеризующие качество поверхности двух образцов структур ГВВ, выращенных в неоптимальных (а) и оптимизированных (б) условиях по температуре держателя подложки

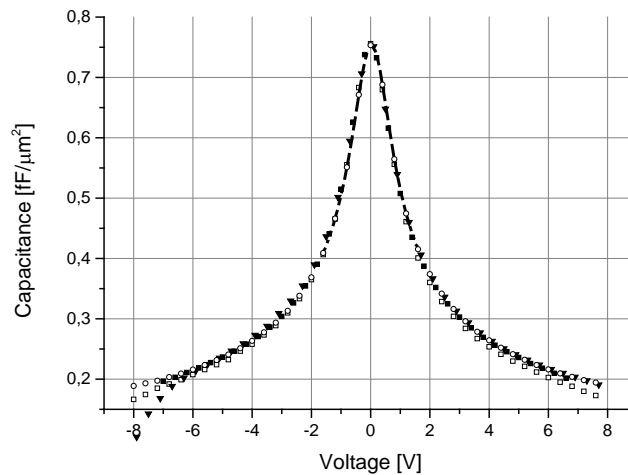


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики тестовых ГВВ, изготовленных из гетероструктур, отличающихся толщиной AlAs вставок и режимами формирования барьерной области в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии

В то же время, как следует из приведенного на рисунке 4 набора ВАХ, величина токов утечки ГВВ чувствительна как к абсолютному значению толщины AlAs вставок, так и к особенностям технологии эпитаксиального выращивания барьерных слоев. С ростом толщины AlAs вставок наблюдается возрастание величины напряжения, соответствующего заданному уровню тока утечки. Данная закономерность прослеживается как для образцов, выращенных по стандартной схеме (образцы RC_0660 и RC_0661), так и для структур с частичной компенсацией напряжений (образцы RC_0680 и RC_0710). Следует отметить, что использование частичной компенсации напряжений приводит к существенному снижению токов утечки при одинаковой толщине AlAs вставок (образцы RC_0661 и RC_0680), а измеренный уровень токов утечки ГВВ для структур, выращенных с использованием частичной компенсации напряжений (образцы RC_0680, RC_0710) существенно ниже, чем у опубликованных приборов с аналогичной толщиной AlAs вставок [9,10].

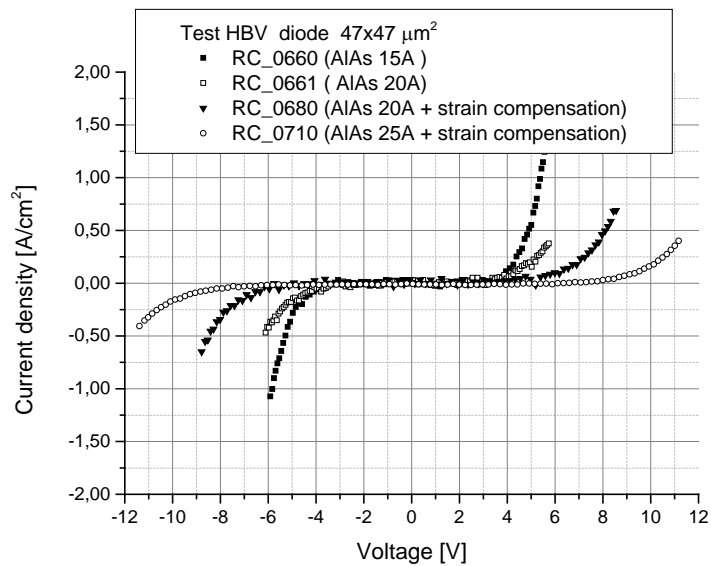


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики тестовых ГБВ, изготовленных из гетероструктур, отличающихся толщиной AlAs вставок и режимами формирования барьерной области в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии

Разработанный способ формирования барьерных слоев для выращенных методом МПЭ структур ГБВ в системе материалов InAlAs/InGaAs/AlAs, позволяет не только успешно продвинуться в увеличении толщины AlAs вставок, но и обеспечивает при номинальной толщине AlAs вставок 2.5 нм снижение величины плотности тока утечки, соответствующую лучшим опубликованным значениям для структур ГБВ с номинальной толщиной AlAs вставок 3 нм.

Библиографический список

1. J.L. Hesler, T. Crowe, High-power solid-state terahertz sources, SPIE Newsroom, 10.1117 / 2.1201506.005859, 2015.
2. N.R. Erickson, High efficiency submillimeter frequency multipliers, in Proc, IEEE MTT-S International, , 1990, P.1301-1304
3. J.S. Ward et al. Tunable Broadband Frequency-Multiplied Terahertz Sources, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008, P.1-3.
4. A. Rydberg, H. Grönqvist and E. Kollberg, Millimeter - and Submillimeter-Wave Multipliers using Quantum Barrier- Varactor (QBV) Diodes, IEEE Electron Device Letters, 1990, №11, P.373.
5. M. Ingvarson, Modelling and design of high-power HBV multipliers, PhD thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2004.
6. A. Malko, T. Bryllert, J. Vukusic, J. Stake, High efficiency and broad-band operation of monolithically integrated W-band HBV frequency tripler, 24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Satna Barbara , USA, 2012, P. 92-94
7. A. Malko, T. Bryllert, J. Vukusic, J. Stake, A 474 GHz HBV frequency quintupler integrated on a 20 mkm thick silicon substrate, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, №5, P.85
8. В.А. Беляков, С.В. Оболенский, Е.Л.Фефелова, И.В.Ладенков, Н.А.Малеев, А.П.Васильев, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, С.Н.Малеев, Гетрбарьерные варакторы на основе гетероструктур на подложках фосфида индия, Труды второй российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение», 17-19 ноября 2015 г. г. Нижний Новгород, Сборник тезисов, С.199-201
9. T. A. Emadi, T. Bryllert, M. Sadeghi, J. Vukusic, J. Stake, Optimum barrier thickness study for the InGaAs/InAlAs/AlAs heterostructure barrier varactor diodes, Applied Physics Letters, 90, 012108 (2007)
10. L. Dinner, J. Stake, S. Hollung, C. Mann, E. Kollberg, Heterostructure barrier varactors on copper substrate for generation of millimeter- and submillimeter-waves, Tenth Int. Symp. On Space Terahertz Technology, Charlottesville, March 1999, P.48-57