

07

Эпитаксиальные структуры InGaAs/InAlAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов с низким током утечки

© Н.А. Малеев^{1,2}, М.А. Бобров¹, А.Г. Кузьменков^{1,3},
А.П. Васильев^{1,3}, М.М. Кулагина¹, С.Н. Малеев¹,
С.А. Блохин¹, В.Н. Неведомский¹, В.М. Устинов¹⁻³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2018 г.

Качество гетерограниц и оптимальные условия эпитаксиального выращивания являются критически важными параметрами для получения низких токов утечки гетеробарьерных варакторов (ГБВ) в системе материалов InGaAs/InAlAs/AlAs. Выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии трехбарьерные структуры ГБВ с примыкающими к барьерному слою InAlAs/AlAs/InAlAs дополнительными рассогласованными слоями InGaAs, испытывающими напряжение сжатия, при оптимальных режимах эпитаксии демонстрируют рекордно низкие уровни плотности тока утечки (не более 0.06 A/cm^2 при напряжении 5 V и температуре 85°C) при относительно тонких AlAs-вставках (толщиной 2 nm).

DOI: 10.21883/PJTF.2018.19.46678.17413

Создание компактных твердотельных источников для частотного диапазона 0.3–3 THz, работающих при комнатной температуре в непрерывном режиме, является актуальной научно-технической проблемой [1]. Квантово-каскадные лазеры, работающие в указанном диапазоне в качестве фундаментальных источников, требуют охлаждения до криогенных температур и не перекрывают диапазон частот ниже 1 THz [2], а максимальная выходная мощность активных схем

монолитных транзисторных усилителей частоты при продвижении в субмиллиметровый диапазон быстро убывает [3]. Умножители частоты, в которых используется генерация гармоник в нелинейных приборах, обеспечивают спектрально чистый сигнал, узкую линию генерации и более высокий уровень выходной мощности по сравнению с фундаментальными твердотельными источниками для рассматриваемого частотного диапазона. Базовым компонентом умножителей частоты субмиллиметрового диапазона являются диоды с барьером Шоттки, обеспечивающие минимальные паразитные параметры и позволяющие реализовать многокаскадные умножители с выходной частотой вблизи 1 THz [4]. Эффективное умножение частоты с подавлением четных гармоник может быть реализовано на приборах с симметричной вольт-фарадной характеристикой (ВФХ), например, при встречном включении двух диодов с барьером Шоттки. Симметричными ВФХ и вольт-амперными характеристиками (ВАХ) обладают гетеробарьерные варакторы (ГБВ), предложенные в 1989 г. [5]. ГБВ на основе выращенных на подложках InP структур с несколькими нелегированными барьерными слоями InAlAs/AlAs/InAlAs, расположенными между модулирующими слоями InGaAs *n*-типа, успешно используются при создании умножителей частоты с уровнем непрерывной выходной мощности от сотен mW в частотном диапазоне около 100 GHz до единиц mW на частотах вблизи 500 GHz [6]. Однако в настоящий момент технология ГБВ не достигла требуемого уровня воспроизводимости, надежности и приемлемой стоимости изготовления для широкого практического внедрения. Одним из ключевых требований к структурам ГБВ является низкий уровень тока утечки при напряжениях, соответствующих максимальной амплитуде входного сигнала. В настоящей работе приведены результаты исследований по оптимизации конструкции и технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) структур ГБВ, позволяющие добиться рекордно низких уровней тока утечки при одновременном повышении устойчивости технологии выращивания гетероструктур.

По результатам моделирования [7] оптимальная конструкция барьерного слоя ГБВ, обеспечивающая минимальные токи утечки, состоит из последовательности эпитаксиальных слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (8 nm)/AlAs (3 nm)/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (8 nm), окруженной слоями $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, однако в реальных приборных структурах для умножителей используются и другие варианты толщин слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, например 5 nm [8]. Проблемы при выращивании таких структур связаны с механическими

напряжениями, возникающими из-за наличия сильно рассогласованных по параметру кристаллической решетки слоев AlAs, что повышает риск формирования дефектов и дислокаций из-за накопления напряжений при последовательном выращивании нескольких барьерных слоев. Для преодоления данной проблемы была предложена конструкция трехбарьерных структур ГБВ с непосредственно примыкающими с двух сторон к гетеробарьеру $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{AlAs}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ тонкими рассогласованными слоями InGaAs, испытывающими напряжение сжатия, которые могут частично компенсировать механические напряжения, создаваемые AlAs-вставками [9]. В такой конструкции при толщине слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 6 nm и толщине AlAs-вставок 2.5 nm была достигнута плотность тока утечки на уровне лучших опубликованных значений [8] для трехбарьерных структур ГБВ с толщиной AlAs-вставок 3 nm.

В работе исследована возможность дальнейшего снижения токов утечки за счет оптимизации условий выращивания структур ГБВ методом МПЭ. Для улучшения морфологии поверхности при росте AlAs-вставок поток мышьяка снижался на 1/3 по сравнению со стандартным соотношением потоков элементов III и V групп ($\text{III/V} \sim 1 : 3$), а при росте слоев InGaAs использовалось повышенное соотношение III/V. Скорости роста бинарных соединений отдельных слоев выбирались таким образом, чтобы точное согласование постоянных решетки слоев InAlAs и InGaAs с подложкой InP достигалось при ее температуре в процессе эпитаксии (500–510°C). Используемый подход в сочетании с предложенной конструкцией барьерного слоя позволяет добиться высокого качества гетероинтерфейсов при увеличенной толщине AlAs-вставок. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены изображения в просвечивающем электронном микроскопе поперечного сечения барьерных слоев InAlAs/AlAs/InAlAs для двух структур: решеточно-согласованной, за исключением барьерных вставок AlAs с толщиной 1.5 nm, и структуры с примыкающими к барьерному слою дополнительными тонкими рассогласованными слоями InGaAs и толщиной AlAs-вставки 2.5 nm. В обоих случаях наблюдаются гладкие гетероинтерфейсы и отсутствуют выраженные структурные дефекты.

Несмотря на возможность получения качественных интерфейсов для барьерных слоев с AlAs-вставками толщиной 2.5–3 nm при использовании дополнительных напряженных слоев InGaAs, создаваемое механическое напряжение достаточно велико. Для исследования возможности

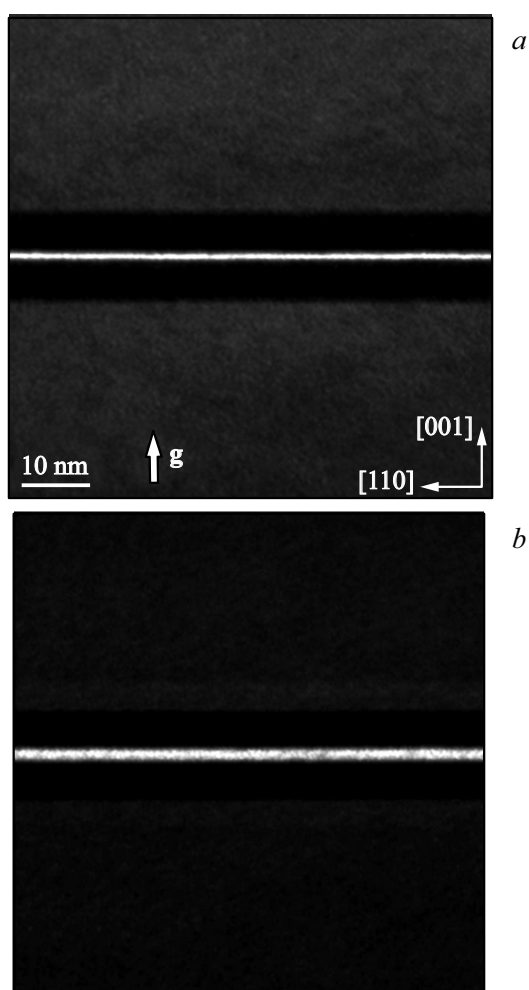


Рис. 1. Изображения в просвечивающем электронном микроскопе поперечного сечения барьерных слоев InAlAs/AlAs/InAlAs: решеточно-согласованной структуры с толщиной AlAs-вставки 1.5 nm (*a*) и структуры с примыкающими к барьерному слою тонкими рассогласованными слоями InGaAs и толщиной AlAs-вставки 2.5 nm (*b*).

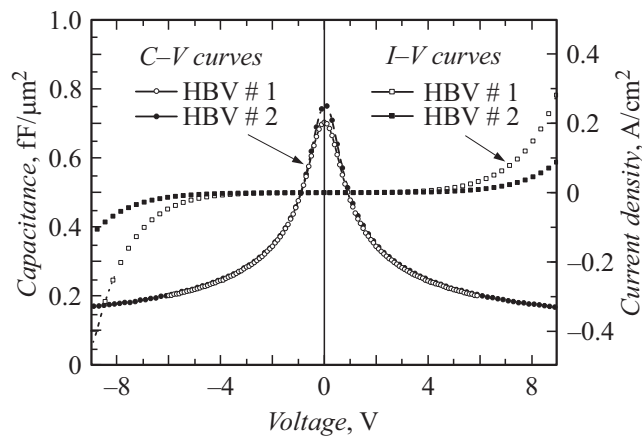


Рис. 2. Типичные вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики тестовых ГБВ, изготовленных из двух выращенных гетероструктур, измеренные при комнатной температуре.

сохранения низких токов утечки при снижении толщины AlAs-вставок на установке МПЭ Riber Compact 21 в предварительно оптимизированных условиях были последовательно выращены две трехбарьерные структуры ГБВ с толщиной AlAs-вставок 2 nm: структура HBV#1 с решеточно-согласованными, за исключением барьерных вставок AlAs, слоями и структура HBV#2 с дополнительными тонкими несогласованными слоями InGaAs с двух сторон от каждого барьерного слоя. Из выращенных гетероструктур были изготовлены тестовые ГБВ с размерами барьерного контакта 47×47 и $100 \times 100 \mu\text{m}$, для которых проведены измерения ВАХ и ВФХ в диапазоне температур от 20 до 95°C .

На рис. 2 приведены типичные ВФХ и ВАХ тестовых ГБВ, изготовленных из двух выращенных гетероструктур, измеренные при комнатной температуре. Сравнение ВФХ показывает, что введение дополнительных слоев оказывает влияние на форму ВФХ только вблизи нулевого напряжения смещения, а в остальном диапазоне форма ВФХ совпадает, поскольку она определяется параметрами одинаковых для двух исследуемых структур модулирующих слоев InGaAs *n*-типа, разделяющих барьерные слои. ВАХ двух структур существенно различаются, при этом структура ГБВ с дополнительными тонкими несо-

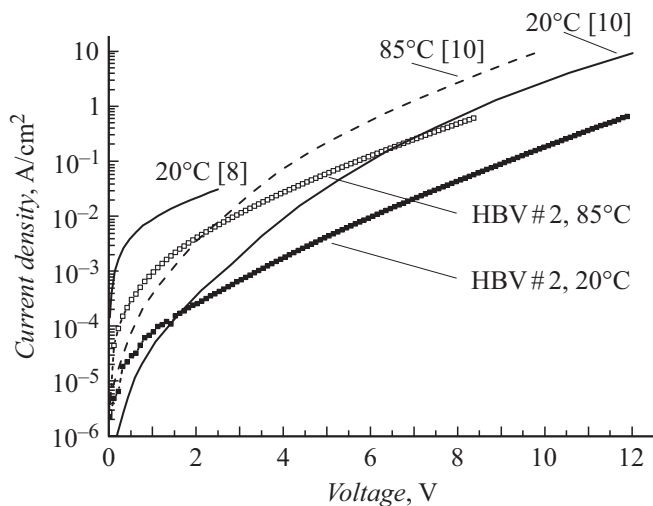


Рис. 3. Зависимости тока утечки от напряжения при комнатной температуре и температуре 85°C для исследуемой трехбарьерной структуры HBV#2 и структур ГБВ с барьерными слоями $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (5 nm)/AlAs (3 nm)/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (5 nm): двухбарьерной (в пересчете на три барьера) [10] и трехбарьерной [8].

гласованными слоями InGaAs демонстрирует существенное снижение плотности тока утечки по сравнению со стандартной конструкцией (менее 0.1 A/cm^2 и более 0.3 A/cm^2 при напряжении смещения 9 V соответственно).

На рис. 3 приведены зависимости тока утечки от напряжения при комнатной температуре и температуре 85°C, измеренные для исследуемой трехбарьерной структуры HBV#2, и аналогичные зависимости для исследованной в работе [10] структуры ГБВ с двумя барьерными слоями $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (5 nm)/AlAs (3 nm)/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (5 nm), для которой были получены минимальные уровни плотности тока утечки. Для корректного сопоставления результатов приведенные в [10] ВАХ показаны в пересчете на три барьера. При использовании в умножителях в первую очередь важно обеспечить низкую утечку в диапазоне напряжений, близких к максимальной амплитуде входного умножаемого сигнала, и повышенных температур. Из сравнения приведенных данных следует,

что при напряжениях выше 2 В структура HBV#2 имеет более низкие токи утечки как при комнатной, так и при повышенной температуре (при напряжении 5 В и температуре 85°C плотность тока утечки в 3–4 раза ниже — не более 0.06 А/см²). Следует отметить, что использованные в лучших образцах умножителей миллиметрового диапазона трехбарьерные структуры [8] имеют существенно более высокие плотности тока утечки, как показано на рис. 3, что можно связать с деградацией качества гетероинтерфейсов при накоплении внутренних структурных напряжений с ростом числа барьеров. По сравнению с трехбарьерными аналогами структура HBV#2 обеспечивает плотность тока утечки при комнатной температуре практически на два порядка ниже. Для малых напряжений и низких температур в структурах ГБВ существенную роль играет туннельный ток утечки, а с ростом температуры доминирует термоэлектронная эмиссия, эффективность которой сильно зависит от высоты потенциального барьера. Измерения высоты потенциального барьера структур HBV#1 и HBV#2, выполненные по описанной в [10] методике, дают высоту потенциального барьера при малых напряжениях смещения на уровне 0.54–0.56 В, что близко к опубликованным значениям для структур с толщиной AlAs-вставок 3 нм [10]. Можно предположить, что существенное снижение уровней токов утечки для выращенных структур ГБВ обеспечивается улучшением качества гетероинтерфейсов за счет оптимизации конструкции барьерного слоя и режимов эпитаксиального выращивания.

Исследования выполнены при поддержке Программы Президиума РАН № 9 „Терагерцевая оптоэлектроника и спинтроника“.

Список литературы

- [1] *Hesler J.L., Crowe T.* High-power solid-state terahertz sources // SPIE Newsroom. 2015. DOI: 10.1117/2.1201506.005859
- [2] *Liang G., Liu T., Wang Q.J.* // IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. 2017. V. 23. P. 1200118.
- [3] *Zamora P.A., Mei G., Leong K.M.K.H., Lange M., Lee J., Yoshida W., Gorospe B.S., Padilla J.G., Deal W.R.* // IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. 2015. V. 25. N 9. P. 591–593.
- [4] *Maestrini A., Ward J.S., Gill J.J., Lee C., Thomas B., Lin R.H., Chattopadhyay G., Mehdi I.* // IEEE Trans. Microwave Theory Technol. 2010. V. 58. N 7. P. 1925–1932.

- [5] Kollberg E., Rydberg A. // *Electron. Lett.* 1989. V. 25. N 25. P. 1696–1698.
- [6] Stake J., Malko A., Bryllert T., Vukusic J. // *Proc. of the IEEE.* 2017. V. 105. N 6. P. 1008–1019.
- [7] Fu Y., Stake J., Dillner L., Willander M., Kollberg E.L. // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. N 11. P. 5568–5572.
- [8] Malko A., Bryllert T., Vukusic J., Stake J. High efficiency and broad-band operation of monolithically integrated W-band HBV frequency tripler // 24th Int. Conf. on indium phosphide and related materials. Santa Barbara, 2012. P. 92–94.
- [9] Малеев Н.А., Беляков В.А., Васильев А.П., Бобров М.А., Блохин С.А., Кулагина М.М., Кузьменков А.Г., Неведомский В.Н., Гусева Ю.А., Малеев С.Н., Ладенков И.В., Фефелова Е.Л., Фефелов А.Г., Устинов В.М. // *ФТП.* 2017. Т. 51. В. 11. С. 1484–1488.
- [10] Dastjerdi M.H.T., Sanz-Velasco A., Vukusic J., Kollberg E.L., Sadeghi M., Stake J. // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. V. 32. N 2. P. 140–142.