

Г. Б. Галиев, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., Е. А. Климов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Д. В. Лаврухин, науч. сотр., А. Э. Ячменев, науч. сотр., Р. Р. Галиев, науч. сотр., Д. С. Пономарев, ст. науч. сотр., e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru, Р. А. Хабибуллин, ст. науч. сотр., Ю. В. Федоров, зам. дир. по НИОКР, А. С. Бугаев, гл. технолог — зам. директора по базовым технологиям, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ГРУППЫ АЗВ5, ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА

Приведены результаты экспериментальных разработок в области создания перспективного материала для современной терагерцовой ЭКБ — низкотемпературного арсенида галлия, а также фотопроводящих антенн на его основе для генерации и детектирования терагерцового излучения. Разработаны и изготовлены антенны с различной топологией с максимальной частотой генерации ~ 2 ТГц.

Ключевые слова: наногетероструктура, АЗВ5, молекулярно-лучевая эпитаксия, генерация и детектирование терагерцового излучения, низкотемпературный арсенид галлия

Введение

Актуальность проблемы освоения терагерцового диапазона частот продиктована необходимостью практического применения терагерцового излучения в разных сферах жизнедеятельности человека: системе безопасности, медицине, материаловедении, радиоастрономии и локации и т. д.

Одним из источников терагерцового излучения служит полевой транзистор с нанометровым затвором, так называемый НЕМТ (*High Electron Mobility Transistor*). Пример такого НЕМТ с предельной частотой генерации $f_{\max} = 0,63$ ТГц, разработанного в ИСВЧПЭ РАН, приведен в работе [1].

В последние годы GaAs, выращенный при низких температурах, является одним из наиболее перспективных материалов для создания фотопроводящих антенн для генерации и детектирования терагерцового излучения. Полупроводник для создания фотопроводящей антенны должен обеспечивать фотогенерацию ультракоротких токов (длительностью 1 пс или даже короче), что достигается, прежде всего, малым временем жизни неравновесных носителей. Чаще всего в антеннах используется так называемый "низкотемпературный" арсенид галлия — *low-temperature grown* (LT)-GaAs, выращенный на подложках при температурах порядка 200...400 °С [2, 3]. Данный материал обладает высокой подвижностью носителей и малыми временами их жизни, которые составляют 0,1 пс для электронов и 0,4 пс для дырок. Спектром излучения такой антенны можно управлять посредством изменения времени жизни, подвижности и концентрации неравновесных носителей, а также топологии антенного элемента.

Экспериментальные данные

Образцы LT-GaAs были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в ИСВЧПЭ РАН на установках ЦНА-24 и Riber 32P на полуизолирующих подложках GaAs (100), разориентированных на 2° в направлении [0-1-1]. При росте LT-GaAs возникают преципитаты металлического мышьяка размером примерно 4...6 нм в диаметре и плотностью около 10^{17} см $^{-3}$.

Перед началом низкотемпературного роста выполняется отжиг подложки в камере роста установки МЛЭ в

потоке мышьяка. Для удаления естественного оксида с поверхности подложки она нагревалась от 20 до 590 °С в течение 20 мин и с выдержкой при этой температуре 20 мин. После этого температура подложки понижалась до 240 °С, и LT-GaAs выращивался при этой температуре. Во время низкотемпературного эпитаксиального роста соотношение потоков мышьяка и галлия $\gamma = P_{As}/P_{Ga}$ равнялась 10, а скорость роста GaAs составляла 14 нм/мин.

Всего было выращено и исследовано две структуры LT-GaAs. Отличие структур заключалось в том, что образец № 1 являлся нелегированной структурой, а образец № 2 содержал δ -легированные кремнием слои, расположенные эквидистантно и разделяющие слои LT-GaAs на четыре части одинаковой толщины. Суммарная толщина слоя LT-GaAs для обоих образцов составила 2,4 мкм. Температура кремниевой ячейки равнялась 1060 °С, а время легирования составляло 3 мин 20 с. Концентрация δ -легированного кремнием слоя составила $2,3 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. В образце № 2 плоскость нанесения δ -Si слоя может способствовать скоплению избыточного мышьяка в виде преципитатов в данной плоскости. Схематическое расположение эпитаксиальных слоев для обеих структур приведено на рис. 1, а и б.

Для формирования антенн на выращенных структурах был разработан и изготовлен фотошаблон, содержащий несколько антенн различных типов с контактными площадками. Размер контактных площадок (3 × 3 мм) позволял припаивать проводники с помощью индия паяльником, нагретым чуть выше температуры плавления

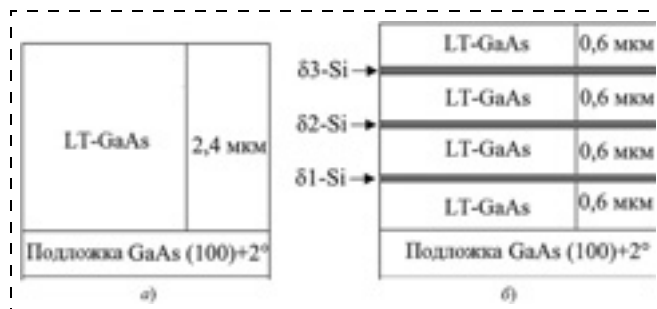


Рис. 1. Схематическое расположение эпитаксиальных слоев в образце № 1 (а) и в образце № 2 (б)

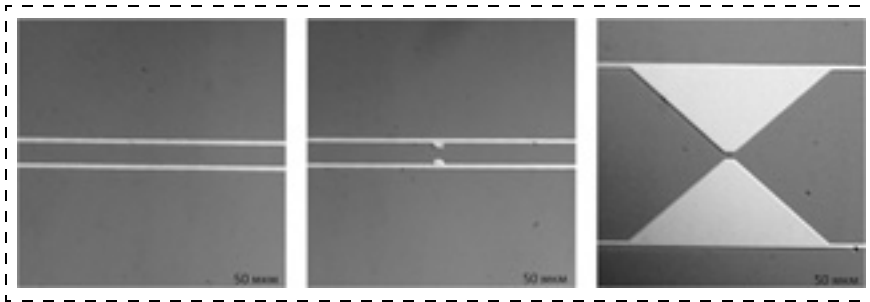


Рис. 2. Изготовленные фотопроводящие антенны с различной топологией

индия без использования флюсов. На рис. 2 приведена разработанная топология для фотошаблона антенны для генерации терагерцового излучения. Расстояние между контактными площадками составляет 4 мм, ширина полоски — 5 мкм. При такой топологии вектор поляризации расположен в плоскости пластины. Для формирования рисунка использовались двухслойная система фоторезистов LOR5A/S1813 и установка контактной ультрафиолетовой фотолитографии SUSS MJB4. Проявление проэкспонированного фоторезиста проводилось в проявителе на основе тетраметил аммония гидроксида (ТМАН), не содержащего ионов металлов. Для удаления следов фоторезиста в проявленных окнах использовалась обработка в кислородной плазме. Непосредственно перед термическим напылением металлов проводилось удаление оксидов арсе-

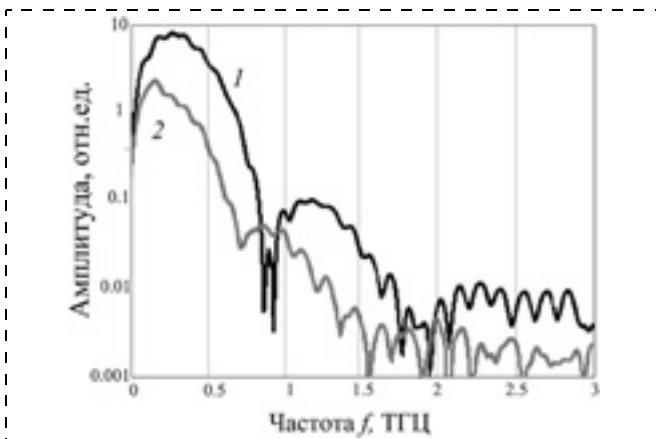


Рис. 3. Расположение эпитаксиальных слоев структур LT-GaAs для фотопроводящих антенн: слой LT-GaAs (кривая 1); слой LT-GaAs с промежуточными δ -легированными кремнием слоями (кривая 2)

нида галлия в водном растворе соляной кислоты. После напыления системы металлов Ti/Au (50 нм/300 нм) проводилась двухстадийная операция "взрыва" (*lift-off*), промывка пластины в деионизованной воде и сушка на центрифуге. На рис. 2 приведены примеры изготовленных фотопроводящих антенн с различной топологией.

Измерения изготовленных антенн проводились в МГУ им. М. В. Ломоносова на терагерцовом спектрометре, в котором стандартный источник терагерцового излучения заменен на разра-

ботанные антенны. Измеренные спектры терагерцового импульса приведены на рис. 3. Максимальная частота генерации составила 2 ТГц.

Выводы

В работе приведены результаты экспериментальных разработок ИСВЧПЭ РАН в области создания перспективного материала — низкотемпературного арсенида галлия, а также фотопроводящих антенн на его основе для генерации и детектирования терагерцового излучения в диапазоне 1...5 ТГц. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены два типа структур LT-GaAs: нелегированная и с четырьмя δ -слоями. Разработаны и изготовлены антенны с различной топологией и размером контактных площадок. Максимальная частота генерации в таких антеннах составила ~2 ТГц.

Авторы выражают благодарность И. А. Ожередову и А. П. Шкуринову за предоставленные измерения TDS.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 14-07-31108/14 от 19.02.2014 г.

Список литературы

1. Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Галиев Р. Р., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С., Федоров Ю. В., Мальцев П. П. МНЕМТ с предельной частотой усиления по мощности $f_{\max} = 0,63$ ТГц на основе наногетероструктуры $\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Ga}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{GaAs}$ // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. Вып. 1. С. 73.
2. Geizutis A., Krotkus A., Bertulis K., Molis G., Adomavicius R., Urbanowicz A., Balakauskas S., Valaika S. Terahertz radiation emitters and detectors // Optical Materials. 2008. V. 30. P. 786.
3. Prieto E. P., Vizcara S. B., Somintac A. S., Salvador A. A., Estacio E. S., Que C. T., Yamamoto K., Tani M. Terahertz emission enhancement in low-temperature-grown GaAs with an n-GaAs buffer in reflection and transmission excitation geometries // JOSA B. 2014. V. 31, Is. 2. P. 291.

G. B. Galiev, Head of Laboratory, E. A. Klimov, Senior Researcher, D. V. Lavrukhin, Researcher Associate, A. E. Yachmenev, Researcher Associate, R. R. Galiev, Researcher Associate, D. S. Ponomarev, Senior Researcher, R. A. Khabibullin, Senior Researcher, Yu. V. Fedorov, Deputy Director on NIOKR, A. S. Bugaev, Deputy Director on basic technologies, Institute Ultra High Frequency Semiconductor electronics, Russian Academy of Sciences

FABRICATION AND INVESTIGATION OF THE PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS BASED ON A3B5 SEMICONDUCTORS GROWN BY MBE WITH THE LOW-TEMPERATURE REGIME

Results of the experimental developments in the field of low-temperature GaAs and photoconductive antennas for generation and detection of THz waves based on it have been considered. Such antennas with the different topology are fabricated and show a cut-off generation frequency up to 2 THz.

Keywords: nanoheterostructure, A3B5 semiconductors, molecular-beam epitaxy, generation and detection of THz waves, low-temperature grown GaAs