

А. С. Бугаев, гл. технолог, зам. директора, И. А. Глинский, инж.-исследователь,
 С. С. Пушкарев, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Д. В. Лаврухин, науч. сотр.,
 А. Э. Ячменев, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., Р. А. Хабибуллин, канд. физ.-мат. наук, уч. секр.,
 Д. С. Пономарев, канд. физ.-мат. наук, зам. директора, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru
 Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук
 (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО (ТГц) ИЗЛУЧЕНИЯ

Поступила в редакцию 01.11.2016

Показано, что $In_{0,38}Ga_{0,62}As$ обладает высокой эффективностью оптико-ТГц конверсии, а также имеет широкий спектр излучения вплоть до 6 ТГц. Разработана оснастка с фотопроводящей антенной (ФА) с теплоотводом на печатную плату. Показано, что использование теплоотвода позволяет снизить рабочую температуру ФА на 16–40 %. Разработанные ФА на основе LT GaAs и $In_{0,38}Ga_{0,62}As$ с динамическим диапазоном по интенсивности в 2–3 порядка имеют спектр генерации до 3 ТГц.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, фотопроводящие антенны, фотоэффект Дембера, фотопроводящий материал, InGaAs, GaAs, низкотемпературный GaAs

Введение

Излучение терагерцового (ТГц) диапазона (0,1...10 ТГц) находит важное практическое применение в области спектроскопии (обнаружение взрывчатых веществ и вредных газов), медицины (диагностика раковых опухолей), безопасности, биологии и т.д. Кроме того, в автомобильной, авиационной и космической промышленности необходимы все более совершенные системы неразрушающего контроля.

Фотопроводящие антенны (ФА) являются перспективными источниками импульсного и непрерывного излучения ТГц диапазона частот [1]. При облучении активной области ФА оптическим излучением в фотопроводящем слое антенны рождаются фотовозбужденные носители заряда, которые впоследствии разделяются и ускоряются приложенным к контактным электродам ФА электрическим полем. Разделение фотовозбужденных носителей заряда приводит к появлению дипольного момента, который является источником генерируемого ТГц излучения. В отличие от других источников ТГц излучения, принцип работы которых основан на нелинейных оптических процессах, ФА могут потенциально обеспечить высокую эффективность оптико-ТГц конверсии. В основном в качестве фотопроводящего слоя для ФА используют два материала: "низкотемпературный" (*low-temperature grown* — LT GaAs) [2, 3] и InGaAs [4]. Первый применяют для создания источников ТГц излучения под оптическую накачку ~800 нм, а второй позволяет работать с более длинноволновой оптической накачкой в диапазоне 1,0...1,6 мкм [5].

Альтернативным источником ТГц излучения являются фотопроводящие источники на основе

фотоэффекта Дембера. Данный эффект заключается в возникновении электрического поля в полупроводнике при воздействии на него фемтосекундными оптическими импульсами за счет разницы в коэффициентах диффузии электронов и дырок [6] и не связан с влиянием встроенного электрического поля. Ввиду большого соотношения диффузионных подвижностей электронов и дырок $In_xGa_{1-x}As$ является хорошим кандидатом для создания источника ТГц генерации на основе фотоэффекта Дембера.

В настоящей работе приведены результаты работ ИСВЧПЭ РАН в области создания и исследования материалов LT GaAs и $In_xGa_{1-x}As$ для $x \geq 0,4$ и ФА на их основе для генерации широкополосного ТГц излучения.

Генерация ТГц излучения в LT GaAs и $In_{0,38}Ga_{0,62}As$

Образцы структур для генерации ТГц излучения были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке Riber 32P. В качестве подложки использовали пластины полупроводящего GaAs. Поскольку в $In_{0,38}Ga_{0,62}As$ возникает сильное рассогласование по параметру кристаллической решетки с подложкой GaAs, для роста данного фотопроводящего материала был использован ступенчатый метаморфный буфер (МБ). Схематическое изображение на примере конструкции образца $In_{0,38}Ga_{0,62}As$ с МБ, а также последовательность ростовых процессов приведены в работе [7]. Толщина фотопроводящего слоя $In_{0,38}Ga_{0,62}As$ была равна 1,0 мкм, температура роста составляла 490 °С. Для сравнения был выращен образец LT GaAs с фотопроводящим слоем

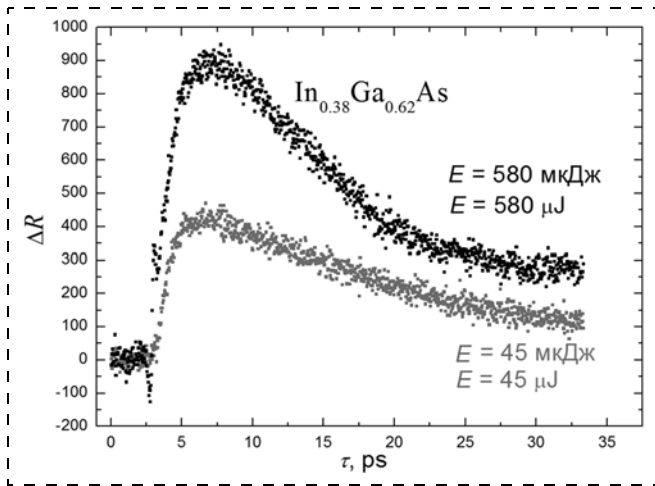


Рис. 1. Временная динамика фотовозбужденных носителей заряда для $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ при разной энергии оптической накачки

Fig. 1. Time-resolved dynamics of the photoexcited charge carriers for $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ with MB at different energies of the optical pumping

GaAs толщиной 0,75 мкм на легированном буфере $n + \text{GaAs}$ толщиной 0,25 мкм так, чтобы суммарная толщина активных слоев была равна первому образцу.

Спектр ТГц излучения определяли по временной форме, зарегистрированной с помощью спектроскопии с временным разрешением (*time-domain spectroscopy* — TDS). Измерения проводили в ИПФ РАН. Оптическая накачка выполнялась импульсным излучением Ti:S-лазера с длиной волны 800 нм и длительностью 50 фс (энергия импульсов составляла 800 мкДж, частота следования импульсов — 1,0 кГц, диаметр пучка 7,0 мм) [8].

Временную динамику фотовозбужденных носителей заряда для $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ исследовали с помощью схемы "накачка—зондирование" в геометрии отражения света от поверхности образца при комнатной температуре. Результаты измерений приведены на рис. 1. Накачка осуществлялась с помощью воздействия фемтосекундным лазером с двумя разными флюенсами с энергией 45 и 580 мкДж. Экспоненциально аппроксимируя временную компоненту, соответствующую длительной задержке (другими словами, эта компонента связана с временем пребывания электрона на уровне ловушки до момента его рекомбинации с дыркой в валентной зоне), мы получили время жизни фотовозбужденных носителей заряда τ .

Характерные значения τ находятся в диапазоне 10...15 пс для обеих энергий накачки. То, что τ для $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ больше, чем для LT GaAs [9], является следствием высокой подвижности носителей заряда в слое $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ за

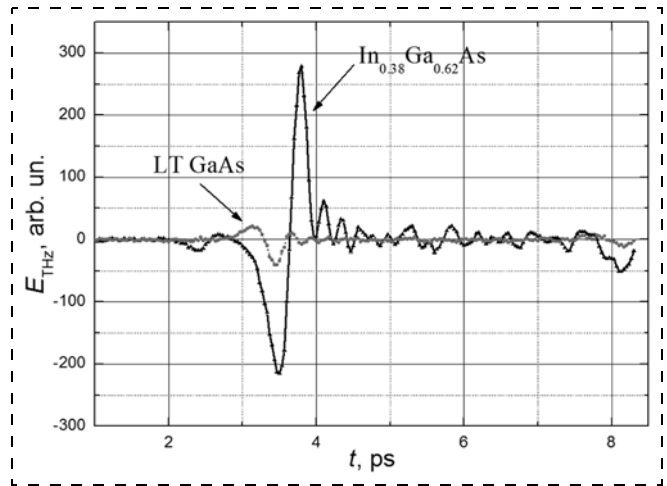


Рис. 2. Временная форма ТГц импульса, измеренная для двух исследуемых образцов ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ и LT GaAs)

Fig. 2. Wave form of a THz pulse measured for the two investigated samples ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ and LT GaAs)

счет использования МБ по сравнению с дефектным LT GaAs. Важно отметить, что увеличение времени жизни фотовозбужденных носителей заряда не повлияло на интенсивность ТГц генерации в $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$, а, напротив, привело к ее существенному увеличению за счет вклада фотоэффекта Дембера в ТГц генерацию.

На рис. 2 приведена временная форма ТГц импульса (E_{THz}), измеренная для двух исследуемых образцов. С помощью Фурье-преобразования от волновой формы был получен спектр ТГц излучения (рис. 3).

Видно, что мощность излучения P_{rel} в образце $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ на два порядка превосходит аналогичную величину для LT GaAs. К тому же его частотный диапазон имеет широкий спектр излучения вплоть до 6,0 ТГц. Это связано с тем,

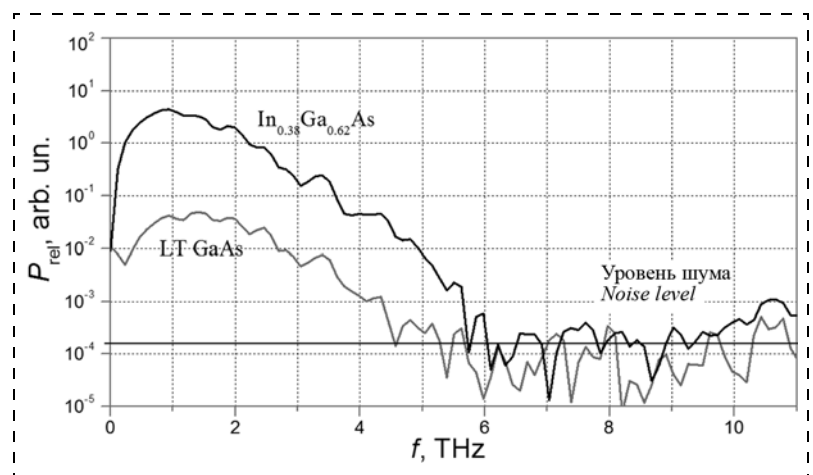


Рис. 3. Спектр ТГц импульса, построенный для двух исследуемых образцов ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ и LT GaAs) [11]

Fig. 3. Spectrum of a THz pulse constructed for the two investigated samples ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ and LT GaAs) [11]

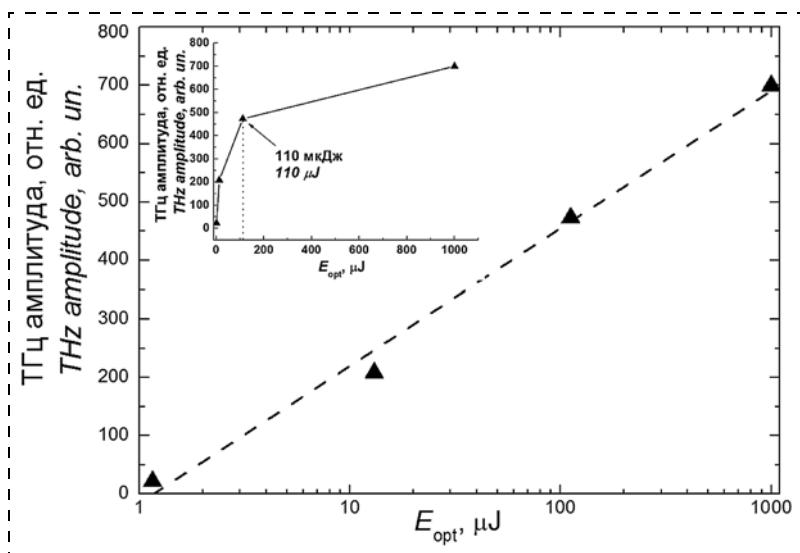


Рис. 4. Зависимость амплитуды ТГц излучения от энергии накачки фемтосекундного лазера для образца $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ в логарифмическом масштабе. На вставке приведена данная зависимость в линейном масштабе
Fig. 4. Dependence of the amplitude of the THz radiation on the energy of pumping of a femtosecond laser for $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ sample with MB in a logarithmic scale. The insert presents the given dependence in a linear scale

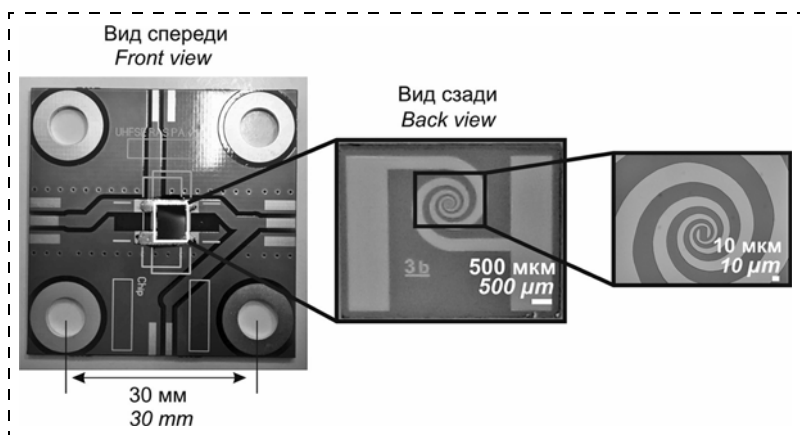


Рис. 5. Спроектированная оснастка на основе текстолитовой платы с ФА для помещения в держатель с фокусирующей линзой для измерения ТГц сигнала
Fig. 5. Equipment on the basis of a textolite board with PCA designed for the holder with a focusing lens for measurement of the THz signals

что вклад в генерацию ТГц излучения в образце $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ, помимо ускорения фотовозбужденных носителей встроенным электрическим полем, вносит фотоэффект Дембера [10]. На рис. 4 приведена зависимость амплитуды ТГц излучения от энергии накачки фемтосекундного лазера E_{opt} для образца $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ. Видно, что амплитуда ТГц излучения линейно возрастает в логарифмическом масштабе с увеличением энергии накачки.

При достижении энергии накачки $E_{\text{opt}} \approx 110$ мкДж данная зависимость выходит на насыщение, что связано с уменьшением подвижности электронов в фотопроводящем слое $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$. При достаточно малом оптическом флюенсе (~ 40 мкДж/см²) эффективность оптико-ТГц конверсии в такой

структуре составила $\sim 10^{-5}$, что на несколько порядков выше, чем в LT GaAs. В дальнейшем это позволит использовать данный материал в фотопроводящих источниках на основе латерального фотоэффекта Дембера [12].

Разработка фотопроводящих антенн и исследование их электрических и тепловых свойств

Основное применение ФА связано с системами ТГц спектроскопии для анализа биологических объектов, взрывчатых веществ и холодного оружия, а также для терапии недоброкачественных опухолей, в частности при диагностике рака кожи [13].

Для увеличения эффективности оптико-ТГц конверсии в ФА применяются различные подходы [15]: расширение активной области ФА, использование плазмонных нанополостей, создание трехмерных плазмонных контактов и др. Несмотря на достигнутые успехи в области инженерии ФА, они крайне подвержены воздействию темновых токов [16]. Это сопровождается выделением джоулевой теплоты [17, 18] одновременно с нагревом от воздействия оптической накачки лазером, что приводит к тепловому пробою антенны.

Мы провели исследование электрических и тепловых, а также частотных свойств ФА на основе LT GaAs и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ и предложили оригинальный способ монтажа кристаллов ФА на текстолитовую плату без приклеивания кремниевой линзы непосредственно на антенну, с возможностью отвода теплоты от активной области. Такая оснастка с ФА на текстолитовой

плате может быть помещена в держатель с фокусирующей линзой для проведения измерений ТГц сигнала. Для формирования ФА на выращенных структурах был разработан и изготовлен фотошаблон, содержащий несколько различных типов антенн с контактными площадками. Резку пластины на отдельные кристаллы ФА осуществляли методом дисковой резки. Оснастка для держателя с фокусирующей линзой для проведения измерений ТГц сигнала была изготовлена на основе печатной платы из фольгированного с двух сторон стеклотекстолита (рис. 5). Последовательность технологических операций подробно описана в работе [19].

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводили при 300 К на зондовой станции с игольчатыми зондами, подключенной к измери-

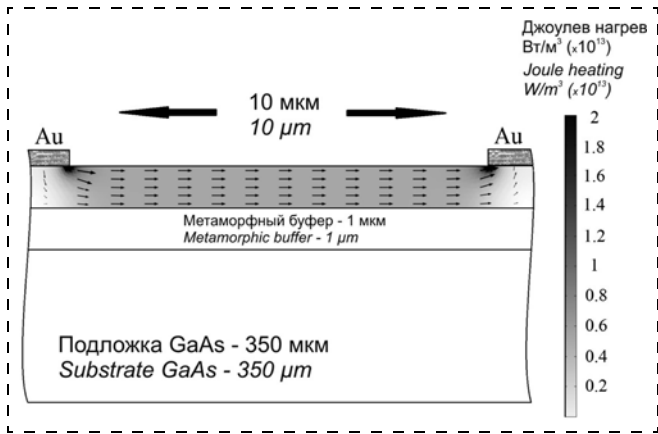


Рис. 6. Структура ФА и картина распределения плотности тепловыделения в фотопроводящем слое ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$, $V_b = 10 \text{ В}$). Стрелки указывают направление электрического поля
Fig. 6. PCA structure and a picture of distribution of the density of the thermal emission in the photoconducting layer ($\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$, $V_b = 10 \text{ V}$). The arrows indicate the direction of the electric field

тению характеристик полупроводниковых приборов Tektronix 370A Curve Tracer.

Исследование процессов протекания тока и джоулевого нагрева в фотопроводящем слое ФА было проведено с помощью моделирования методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics. Структура ФА и картина распределения плотности джоулевого нагрева P_H на примере $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ представлена на рис. 6. Видно, что максимальная плотность тепловыделения сосредоточена у краев металлизации (стрелками показано направление электрического поля). Максимальные расчетные значения P_H для темного тока составляют $7,43 \times 10^{12} \text{ Вт/м}^3$ для ФА на LT GaAs при приложении напряжения $V_b = 15 \text{ В}$ и $3,72 \times 10^{13} \text{ Вт/м}^3$ для ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ при $V_b = 10 \text{ В}$.

На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных и теоретических ВАХ для ФА на основе двух исследуемых материалов. Видно, что теоретическая кривая для темного тока I_d (COMSOL) хорошо согласуется с экспериментальной I_d (exp.). Воздействие на ФА фемтосекундным импульсом с энергией накачки $\sim 1 \text{ мДж}$ (длина волны 800 нм) приводит к появлению наведенного фототока I_{ph} и, как следствие, к возрастанию джоулевой теплоты P_H . Расчетные максимальные значения величины P_H с учетом фото- и темного токов составляют $P_H \approx 3,02 \times 10^{13} \text{ Вт/м}^3$ для ФА на LT GaAs при $V_b = 15 \text{ В}$ и $P_H \approx 8,22 \times 10^{13} \text{ Вт/м}^3$ для ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ при $V_b = 10 \text{ В}$. Таким образом, воздействие оптической накачки лазером приводит к возрастанию P_H в 4 раза для ФА на LT GaAs и более чем в 2 раза для ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$.

На рис. 8 приведены рассчитанные температурно-временные зависимости работы ФА на основе

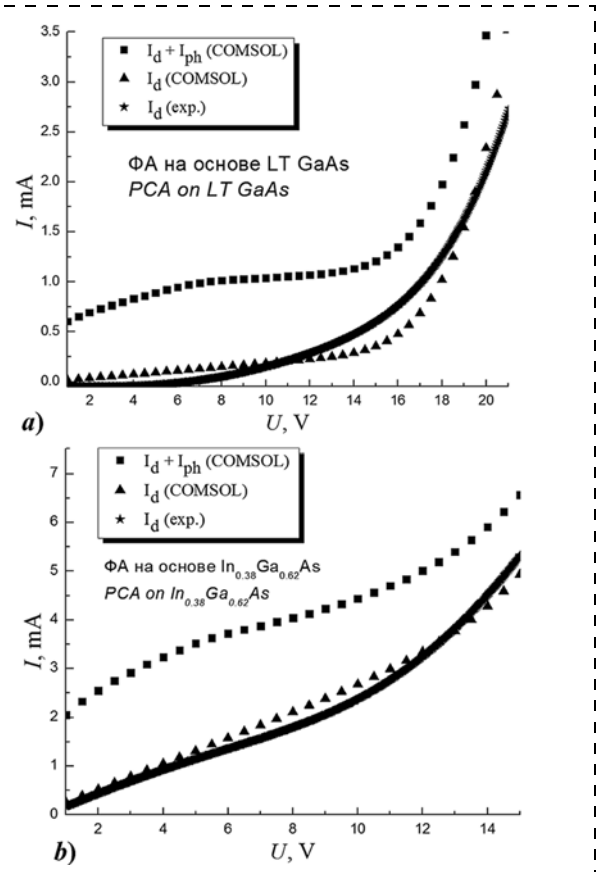


Рис. 7. Сравнение экспериментальной и теоретической ВАХ с учетом влияния фототока и без учета фототока для ФА на основе LT GaAs при $V_b = 15 \text{ В}$ (а) и на основе $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ при $V_b = 10 \text{ В}$ (б)
Fig. 7. Comparison of the experimental and theoretical VAC taking into account the influence of a photocurrent and without a photocurrent for PCA on the basis of LT GaAs at $V_b = 15 \text{ V}$ (a) and on the basis of $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ at $V_b = 10 \text{ V}$ (b)

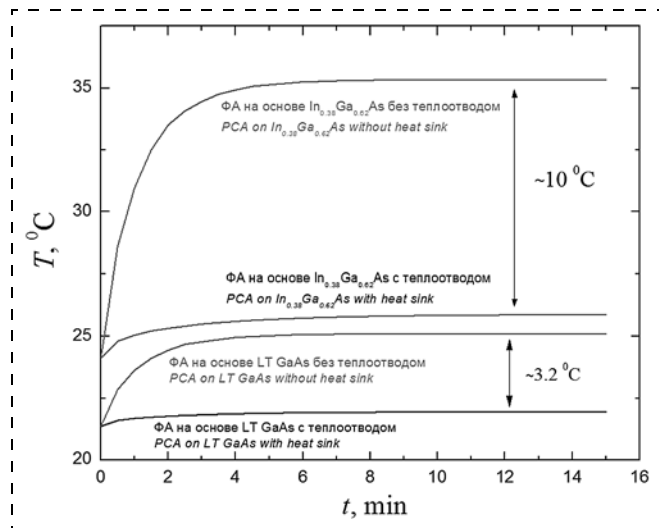


Рис. 8. Рассчитанные температурные зависимости работы ФА на основе LT GaAs (для $V_b = 15 \text{ В}$) и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ (для $V_b = 10 \text{ В}$) от времени при непрерывном протекании тока с теплоотводом и без него
Fig. 8. The calculated temperature dependences of operation of PCA on the basis of LT GaAs (for $V_b = 15 \text{ V}$) and $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ with MB (for $V_b = 10 \text{ V}$) on time at a continuous current with a heat sink and without it

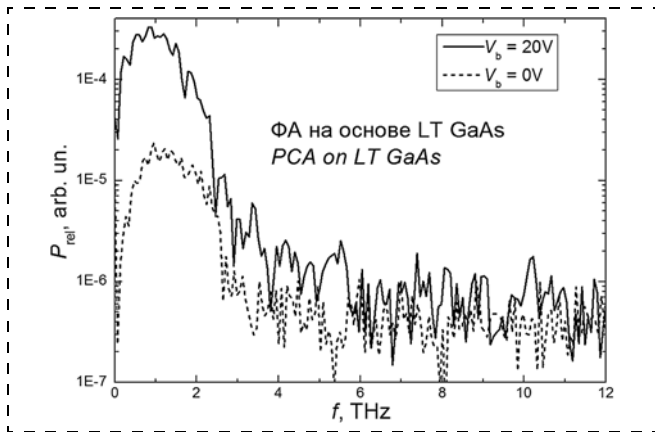


Рис. 9. Спектр ТГц импульса, построенный для ФА на LT GaAs, при приложении напряжения $V_b = 0$ и 20 В

Fig. 9. Spectrum of a THz pulse constructed for PCA on LT GaAs at the applied voltage of $V_b = 0$ and 20 V

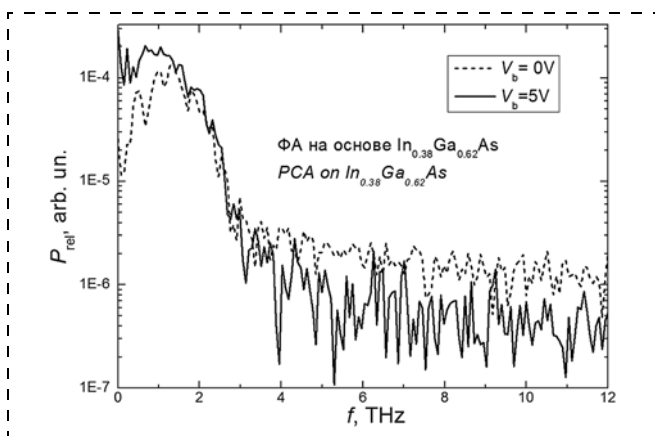


Рис. 10. Спектр ТГц импульса, построенный для ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$, при приложении напряжения $V_b = 0$ и 5 В

Fig. 10. Spectrum of a THz pulse constructed for PCA on $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ at the applied voltage of $V_b = 0$ and 5 V

LT GaAs с учетом отвода теплоты на текстолитовую плату и без отвода теплоты. Видно, что использование теплоотвода на текстолитовую плату позволяет уменьшить рабочую температуру антенны на 16 % для ФА на основе LT GaAs и на 40 % для ФА на основе $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ. Стоит отметить, что ФА на LT GaAs без теплоотвода почти не нагревается и выходит на насыщение по температуре в течение 3—4 мин, в то время как ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ испытывает скачок с градиентом по температуре от 25 до 35 °С. Поскольку ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ имеет больший темновой ток и, соответственно, больше джоулевой теплоты выделяется в единицу времени, то использование теплоотводящей поверхности позволяет скомпенсировать негативное воздействие темнового тока на работу антенны.

На рис. 9 и 10 приведены спектры ТГц излучения для двух исследуемых ФА на LT GaAs и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ. Видно, что динамический

диапазон (по оси ординат) по излучаемой мощности составляет примерно два порядка для обеих антенн. Приложение напряжения $V_b = 20$ В к ФА на LT GaAs приводит к увеличению интенсивности ТГц генерации более чем на порядок, в то время как приложение напряжения $V_b = 5$ В к ФА на $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ увеличивает интенсивность незначительно. Вероятно, это связано с тем, что антенны с фотопроводящим слоем $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ сильнее "текут", поэтому для них дополнительно требуется вытравливать мезу, чтобы уменьшить I_d .

Заключение

В работе приведены результаты разработок и исследования фотопроводящих материалов LT GaAs и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (для $x \geq 0,4$) и антенн на их основе для генерации ТГц излучения. Показано, что $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ имеет широкий спектр излучения (до 6 ТГц), а также высокую интенсивность ТГц генерации, которая на два порядка превосходит аналогичную величину для LT GaAs. На основе указанных материалов разработаны ФА, которые были смонтированы на текстолитовую плату для отвода теплоты от активной области антенны. Было показано, что использование теплоотвода позволяет снизить рабочую температуру ФА от 16 до 40 % в зависимости от фотопроводящего материала. Измерения частотных характеристик ФА на основе LT GaAs и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ с МБ показали, что обе антенны имеют спектр излучения до 3 ТГц.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПФ РАН И. Е. Илякову, Б. В. Шишкину и Р. А. Ахмеджанову за измерения спектроскопии с временным разрешением для фотопроводящих материалов LT GaAs и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$, сотрудникам МИРЭА А. М. Бурякову, Д. И. Хусяинову, Е. Д. Мишиной за измерения ФА на основе указанных материалов, а также сотрудникам ИСВЧПЭ РАН Д. Н. Слаповскому и О. А. Рубану за помощь в изготовлении ФА и монтаж кристаллов антенн на плату.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 16-07-00187 А, 16-29-14029 офи_м и 16-29-03033 офи_м.

Список литературы

1. Berry C. W., Wang N., Hashemi M. R., Unlu M., Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes // Nature Communications. 2013. vol. 4. P. 1622 (10 pp.).
2. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. N 27. P. 273001 (21 pp.).
3. Галиев Р. Р., Ячменев А. Э., Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Федоров Ю. В., Климов Е. А., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С., Мальцев П. П. Перспективные материалы электронно-компонентной базы для создания детекторов и генераторов ТГц диапазона частот (0,5—10 ТГц) // Изв. РАН. Сер. Физ. 2016. Т. 80, № 4. С. 523—525.

4. Vignaud D., Lampin J. F., Lefebvre E., Zaknoune M., Mollet F. Electron lifetime of heavily Be-doped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ as a function of growth temperature and doping density // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80, N. 22. P. 4151–4153.

5. Dietz R. J. B., Wilk R., Globisch B., Roehle H., Stanze D., Ullrich S., Schumann S., Born N., Koch M., Sartorius B., Schell M. Low Temperature Grown Be-doped InGaAs/InAlAs Photoconductive Antennas Excited at 1030 nm // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2013. Vol. 34, N. 3–4. P. 231–237.

6. Beck M., Schäfer H., Klatt G., Demsar J., Winner S., Helm M., Dekorsy T. Impulsive terahertz radiation with high electric fields from an amplifier-driven large-area photoconductive antenna // Opt. Express. 2010. Vol. 18. N 9. P. 9251–9257.

7. Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Ячменев А. Э., Мальцев П. П., Грегов М. М., Иляков И. Е., Шишкин Б. В., Ахмеджанов Р. А. Генерация терагерцового излучения при облучении фемтосекундными лазерными импульсами $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, выращенного на подложке GaAs с метаморфным буферным слоем // ФТП. 2017. Т. 51, № 4. С. 535.

8. Пыаков И. Е., Kitaeva G. Kh., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Terahertz time-domain electro-optic measurements by femtosecond laser pulses with an edge-cut spectrum // Optics Lett. 2016. Vol. 41, N 13. P. 2998–3001.

9. Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С., Мальцев П. П. Исследование оптических свойств GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах роста, с δ -легированными слоями Si // ФТП. 2015. Т. 49, № 7. С. 932–935.

10. Патент 2016126551 от 04.07.2016. Материал для эффективной генерации терагерцового излучения / Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Ячменев А. Э., Мальцев П. П.

11. Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E., Maltsev P. P., Pyakov I. E., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Intense Terahertz Radiation from $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ due to Photo-Dember Effect // IJHSES. 2016. vol. 25. N. 3 & 4. P. 1640023 (8 pp.).

12. McBryde D., Barnes M. E., Berry S. A., Gow P., Beere H. E., Ritchie D. A., Apostolopoulos V. Fluence and po-

larisation dependence of GaAs based Lateral Photo-Dember terahertz emitters // Opt. Exp. 2014. Vol. 22, N. 3. P. 3234–3243.

13. Галиев Г. Б., Климов Е. А., Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Галиев Р. Р., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Федоров Ю. В., Бугаев А. С. Разработка и исследование фотопроводящих антенн на основе полупроводников группы АЗВ5, выращенных при пониженных температурах эпитаксиального роста // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 28–30.

14. Chimot N., Mangeney J., Mounaix P., Tondusson M., Blary K., Lampin J. F. Terahertz radiation generated and detected by Br + irradiated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photoconductive antenna excited at 800 nm wavelength // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 083519 (3 p.).

15. Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M. 7,5 % Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters with Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes // IEEE Trans. Tera. Sci. Technol. 2014. Vol. 4. P. 575.

16. Wu D. H., Graber B., Kim C., Qadri S. B., Garzarella A. Coherent and incoherent terahertz beams measured from a terahertz photoconductive antenna // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, N. 5. P. 051126 (4 p.).

17. Collier C. M., Stirling T. J., Hristovski I. R., Krupa J. D. A., Holzman J. F. Photoconductive terahertz generation from textured semiconductor materials // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. P. 23185 (10 p.).

18. Глинский И. А., Зенченко Н. В. Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. 2015. Т. 44, № 4. С. 236–239.

19. Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Ячменев А. Э., Павлов А. Ю., Слаповский Д. Н., Глинский И. А., Лаврухин Д. В., Рубан О. А., Мальцев П. П. Электрические и тепловые свойства фотопроводящих антенн на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0,3$) с метаморфным буферным слоем для генерации терагерцового излучения // ФТП. 2017. Т. 51, принята к печати.

A. S. Bugaev, Deputy director, I. A. Glinskiy, engineer, S. S. Pushkarev, Senior Researcher, D. V. Lavrukhin, Researcher, A. E. Yachmenev, Researcher, R. A. Khabibullin, Scientific Secretary, D. S. Ponomarev, Deputy Director, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation

Corresponding author:

Ponomarev Dmitry S., Deputy Director, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

Fabrication of Materials and Photoconductive Antennas on their Basis for Generation and Detection of the Pulsed and Continuous-Wave Terahertz (THz) Radiation

Received on November 01, 2016

Accepted on November 14, 2016

It was demonstrated that $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ was characterized by a high efficiency of the optical-THz conversion and by a broadband spectra up to 6 THz. Rigging was developed with a photoconductive antenna (PCA) and a heat sink connected to a printed circuit board. It was also demonstrated that the use of a heat sink reduced the temperature of PCA by 16–40 %. The PCA developed on the basis of LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ and with the dynamic range of intensity of 2–3 orders had the spectra of generation up to 3 THz.

Keywords: terahertz radiation, photoconductive antennas, photo-Dember effect, photoconductor, InGaAs, LT GaAs

For citation:

Bugaev A. S., Glinskiy I. A., Pushkarev S. S., Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Fabrication of Materials and Photoconductive Antennas on their Basis for Generation and Detection of the Pulsed and Continuous-Wave Terahertz (THz) Radiation, *Nano- I Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 294–302.

DOI: 10.17587/nmst.19.294-302

Introduction

Radiation of the terahertz (THz) range (0.1...10 THz) finds important applications in spectroscopy (detection of explosives and harmful gases), medicine (diagnostics of cancer tumours), security, biology, etc. Besides, the automobile, aviation and space industries require more efficient systems of nondestructive control.

The photoconducting antennas (PCA) are promising sources of the pulse and continuous THz radiation [1]. An optical irradiation of the active area of PCA generates the photoexcited charge carriers in its photoconducting layer, which are divided and accelerated by the electric field applied to the contact electrodes of PCA. Division of the photoexcited charge carriers leads to appearance of a dipole moment, which is a source of the generated THz radiation. Unlike other sources of the THz radiation, the operating principle of which is based on nonlinear optical processes, PCA can potentially ensure high efficiency of the optical-THz conversion. As the photoconducting layer for PCA the *low-temperature grown* — LT GaAs [2, 3] and InGaAs [4] are used. The former is applied for creation of THz radiation sources for the optical pumping of ~800 nm, the latter allows us to work with a more long-wave optical pumping within the range of 1.0...1.6 μm [5].

The alternative sources of THz radiation are the photoconducting sources on the basis of the photo-Dember effect. It consists in appearance of the electric field in a semiconductor under the influence of the femtosecond optical pulses on it, due to the difference in the coefficients of diffusion of the electrons and holes [6], and it is not connected with the influence of the embedded electric field. Due to a big correlation of the diffusion mobilities of the electrons and the holes $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is a good candidate for creation of THz source generation on the basis of the photo-Dember effect.

The work presents the results of ISVChPE of RAS in the field of research and development of LT GaAs and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ materials for $x \geq 0.4$ and PCA on their basis for generation of a broadband THz radiation.

Generation of THz radiation in LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$

The samples of the structures for generation of THz radiation were grown by the method of the molecule-beam epitaxy (MME) on Riber 32P installation. As a substrate the plates of semi-insulating GaAs were used. Since in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ a strong mismatch may occur on the parameter of a crystal lattice with GaAs substrate, for growth of a photoconducting material the stepped metamorphic buffer (MB) was used. A schematic image of the design of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ sample with MB, and also the sequence of the growth processes are presented in [7]. The thickness of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ photoconducting layer was equal to 1.0 μm , the growth temperature was 490 °C. For comparison reasons, a sample of LT GaAs with the thickness of the photoconducting layer of GaAs of 0.75 μm was grown on the alloyed buffer of $n + \text{GaAs}$ with thickness of 0.25 μm , so that the total thickness of the active layers was equal to the first sample.

The spectrum of THz radiation was determined by the time form recorded by means of the *time-domain spectroscopy* — TDS. Measurements were done in IAP of RAS. The optical pumping was carried out by the pulse radiation of a Ti:S laser with the wavelength of 800 nm and duration of 50 fs (energy of the pulses was equal to 800 μJ , the frequency of their sequence — 1.0 kHz, diameter of the beam — 7.0 mm) [8].

The time dynamics of the photoexcited charge carriers for $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB was investigated by means of the "pumping-probing" scheme in the geometry of the light reflection from the surface of a sample at the room temperature. The results of the measurements are presented in fig. 1. The pumping was carried out by means of a femtosecond laser with two different fluences with the energy of 45 and 580 μJ . Exponentially, by approximating the time component corresponding to a long delay (this component is connected with the time of an electron's stay at the trap level till the moment of its recombination with a hole in the valency zone), we got the time of the life of the photoexcited carriers of the τ charges.

The typical values of τ are within the range of 10...15 ps for both energies of pumping. The fact that τ for $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ is more than for LT GaAs [9] is a consequence of high mobility of the charge carriers in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ layer due to the use of MB in comparison with the defective LT GaAs. It is important to point out, that the increase of the lifetime of the photoexcited charge carriers did not affect the intensity of the THz generation in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, but led to its essential increase due to contribution of the photo-Dember effect to the THz generation.

Fig. 2 presents the time form of THz pulse (E_{THz}) measured for the two investigated samples. By means of the Fourier transform the range of the THz radiation was obtained from a wave form (fig. 3).

It is visible, that the power of radiation P_{rel} in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ sample with MB by two orders surpasses the similar value of LT GaAs. Besides, its frequency range has a wide spectrum of radiation, up to 6.0 THz. This is connected with the fact that besides the acceleration of the photoexcited carriers by the embedded electric field, a contribution to generation of the THz radiation in sample $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB is brought by the photo-Dember effect [10]. Fig. 4 presents the dependence of the amplitude of the THz radiation on the energy of pumping of the femtosecond laser E_{opt} for $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ sample with MB. It is visible, that the amplitude of the THz radiation increases linearly in a logarithmic scale with an increase of the energy of pumping.

When the energy of pumping reaches $E_{\text{opt}} \approx 110 \mu\text{J}$ the given dependence comes to the level of saturation, which is connected with a lower mobility of the electrons in the photoconducting layer of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$. At a rather small optical fluence (~40 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) the efficiency of the optical-THz conversion in such a structure was $\sim 10^{-5}$, which is by several orders higher than in LT GaAs. Later it will allow us to use the given material in the photoconducting sources on the basis of the lateral photo-Dember effect [12].

Development of the photoconducting antennas and study of their electric and thermal properties

The basic application of PCA is connected with the systems of the THz spectroscopy for analysis of biological objects, explosives and cold arms, and also for therapy of malignant tumours, in particular, during diagnostics of a skin cancer [13].

In order to increase the efficiency of the optical-THz conversion in PCA various approaches are applied [15]: extension of the active area of PCA, use of plasmon nanoantennas, development of 3D plasmon contacts, etc. Notwithstanding the success in the field of PCA engineering, they are extremely subjected to the influence of the dark currents [16]. This is accompanied by allocation of the Joulean heat [17, 18] simultaneously with heating under the influence of an optical pumping laser, which leads to a thermal breakdown of an antenna.

We carried out research of the electric, thermal and also frequency properties of PCA on the basis of LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB and offered a way of installation of PCA crystals on a textolite board without gluing of a silicon lens directly to an antenna with a possibility of a heat sink from the active area. Such equipment with PCA on a textolite board can be placed in a holder with a focusing lens for carrying out of measurements of the THz signals. For formation of PCA on the grown structures a photo mask was developed and manufactured containing several various types of antennas with the contact platforms. The plates were cut in PCA crystals by a disk cutter. The device for the holder with a focusing lens for measurement of THz signals was made of a printed-circuit board from a glass-fiber plastic, foil-coated on both sides (fig. 5). The sequence of operations is described in detail in [19].

Measurements of the volt-ampere characteristics (VAC) were done at 300 K on a probe station with needle probes, connected to Tektronix 370A Curve Tracer, measuring instrument of characteristics of the semi-conductor devices.

Research of the processes of the current behavior and Joule heating in the photoconducting layer of PCA was done by means of simulation by the method of final elements in COMSOL Multiphysics program. The structure of PCA and a picture of distribution of the density of the Joule heating P_H are presented in fig. 6 on the example of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$. It is visible that the maximal density of the thermal emission is concentrated at the edges of metallization (the arrows show the direction of the electric field). The maximal calculated values of P_H for the dark current are $7.43 \times 10^{12} \text{ W/m}^3$ for PCA on LT GaAs at the applied voltage $V_b = 15 \text{ V}$ and $3.72 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ for PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ at $V_b = 10 \text{ V}$.

Fig. 7 presents a comparison of the experimental and theoretical VAC for PCA on the basis of the two investigated materials. It is visible, that the theoretical curve of the dark current I_d (COMSOL) agrees well with the experimental I_d (exp.). The influence of femtosecond pulse with the pumping energy of $\sim 1 \text{ mJ}$ (wavelength 800 nm) on PCA leads to appearance of an induced photocurrent I_{ph} and growth of Joule heating P_H . The maximal calculation data of P_H taking into account the photo- and dark currents are equal to $P_H \sim 3.02 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ for PCA on LT GaAs at $V_b = 15 \text{ V}$ and $P_H \sim 8.22 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ for PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ at $V_b = 10 \text{ V}$. Thus, the influence of an optical pumping by a laser leads to a 4-times increase of P_H for PCA on LT GaAs and more than 2 times for PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$.

Fig. 8 presents the calculated temperature-time dependencies of operation of PCA on the basis of LT GaAs with account of a heat sink to a textile board and without a heat sink. It is visible, that the use of a heat sink to a textolite board allows us to reduce the working temperature of an antenna by 16 % for PCA on the basis of LT GaAs and by 40 % for PCA on the basis of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB. It should be pointed out that PCA on the basis of LT GaAs without a heat-conducting path almost does not heat up and comes to saturation by temperature during 3–4 min., while PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ demonstrates a jump with a gradient by temperature from 25 up to 35 °C. Since PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ has a higher dark current and more of Joule heating is emitted in a unit of time, the use of a heat-removing surface allows us to compensate for the negative influence of the dark current on operation of the antenna.

Fig. 9 and 10 present the spectra of the THz radiation for the two investigated PCA on LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB. It is visible, that the dynamic range (by the axis of ordinates) by the radiation power is about two orders for both

antennas. Application of voltage $V_b = 20 \text{ V}$ to PCA on LT GaAs leads to an increase of the intensity of the THz generation by more, than 10 times, at that, application of voltage $V_b = 5 \text{ V}$ to PCA on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ increases the intensity only insignificantly. Possibly, this is connected with the fact that the antennas with a photoconducting layer of $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ "flow" more intensively, therefore, they require additional etching of mesa to reduce I_d .

Conclusion

The work presents the research of the photoconducting materials of LT GaAs and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (for $x \geq 0.4$) and antennas on their basis for generation of the THz radiation. It was demonstrated, that $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB had the spectrum of radiation up to 6 THz, and also a high intensity of the THz generation, which by two orders surpassed the similar value for LT GaAs. On the basis of the specified materials PCA were developed, assembled on a textolite board, to ensure a heat sink from the active area of the antenna. It was demonstrated, that the use of a heat sink made it possible to lower the working temperature of PCA from 16 up to 40 %, depending on a photoconducting material. The measurements of the frequency characteristics of PCA on the basis of LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ with MB proved that both antennas had the spectrum of radiation up to 3 THz.

The authors express their gratitude to the employees of IAP of RAS I. E. Ilyakov, B. V. Shishkin and R. A. Ahmedzhanov for the spectroscopic measurements with the time resolution for the photoconducting materials of LT GaAs and $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, to the employees of MIREA A. M. Burjakov, D. I. Khusjainov and E. D. Mishina for measurements of PCA on the basis of the specified materials, and also to the employees of ISVChPE of RAS D. N. Slapovsky and O. A. Ruban for assistance in manufacturing of PCA and installation of the dice of antennas on a board.

The work was done with a partial financial support of the RFFI grants 16-07-00187 And, 16-29-14029 ofi_m and 16-29-03033 ofi_m.

References

1. Berry C. W., Wang N., Hashemi M. R., Unlu M., Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, pp. 1622 (10 p.).
2. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, pp. 273001 (21 p.).
3. Galiev R. R., Yachmenev A. E., Bugaev A. S., Galiev G. B., Fedorov Yu. V., Klimov E. A., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S., Maltsev P. P. Promising Materials for an Electronic Component Base Used to Create Terahertz Frequency Range (0.5–10 THz) Generators and Detectors, *Bul. Rus. Ac. Sci.*, 2016, vol. 80, no. 4, pp. 476–478.
4. Vignaud D., Lampin J. F., Lefebvre E., Zaknoute M., Mollet F. Electron lifetime of heavily Be-doped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ as a function of growth temperature and doping density, *Appl. Phys. Lett.*, 2002, vol. 80, no. 22, pp. 4151–4153.
5. Dietz R. J. B., Wilk R., Globisch B., Roehle H., Stanze D., Ullrich S., Schumann S., Born N., Koch M., Sartorius B., Schell M. Low Temperature Grown Be-doped InGaAs/InAlAs Photoconductive Antennas Excited at 1030 nm, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, 2013, vol. 34, no. 3–4, pp. 231–237.
6. Beck M., Schäfer H., Klatt G., Demsar J., Winner S., Helm M., Dekorsy T. Impulsive terahertz radiation with high electric fields from an amplifier-driven large-area photoconductive antenna, *Opt. Express*, 2010, vol. 18, pp. 9251–9257.
7. Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E., Maltsev P. P., Grekhov M. M., Ilyakov I. E., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. THz radiation in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ grown on GaAs wafer with metamorphic buffer layer under femtosecond laser excitation, *Fizika i tekhn. poluprovod.*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 535.

8. Ilyakov I. E., Kitaeva G. Kh., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Terahertz time-domain electro-optic measurements by femtosecond laser pulses with an edge-cut spectrum, *Optics Lett.*, 2016, vol. 41, no. 13, pp. 2998–3001.
9. Lavrukhin D. V., Galiev G. B., Klimov E. A., Yachmenev A. E., Bugaev A. S., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S., Maltsev P. P. Investigation of the optical properties of GaAs with δ -Si doping grown by molecular-beam epitaxy at low temperatures, *Semicond.*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 911–914.
10. Patent RF, N. 2016126551 from 04.07.2016, *Photoconductive material for THz generation*. Authors: D. S. Ponomarev, R. A. Khabibullin, A. E. Yachmenev, P. P. Maltsev.
11. Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E., Maltsev P. P., Ilyakov I. E., Shishkin B. V., Akhmedzhanov R. A. Intensive Terahertz Radiation from $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ due to Photo-Dember Effect, *IJHSES*, 2016, vol. 25, no. 3 & 4, pp. 1640023 (8 p.).
12. McBryde D., Barnes M. E., Berry S. A., Gow P., Beere H. E., Ritchie D. A., Apostolopoulos V. Fluence and polarisation dependence of GaAs based Lateral Photo-Dember terahertz emitters, *Opt. Exp.*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 3235–3243.
13. Galiev G. B., Klimov E. A., Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Galiev R. R., Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Fedorov Yu. V., Bugaev A. S. Fabrication and investigation of photoconductive antennas based on A3B5 semiconductors, grown at low temperatures, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2014, no. 6, pp. 28–30.
14. Chimot N., Mangeney J., Mounaix P., Tondusson M., Blary K., Lampin J. F. Terahertz radiation generated and detected by Br + irradiated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photoconductive antenna excited at 800 nm wavelength, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 083519 (3 p.).
15. Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M. 7.5 % Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters with Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes, *IEEE Trans. Tera. Sci. Technol.*, 2014, vol. 4, pp. 575.
16. Wu D. H., Graber B., Kim C., Qadri S. B., Garzarella A. Coherent and incoherent terahertz beams measured from a terahertz photoconductive antenna, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 5, pp. 051126 (4 p.).
17. Collier C. M., Stirling T. J., Hristovski I. R., Krupa J. D. A., Holzman J. F. Photoconductive terahertz generation from textured semiconductor materials, *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, pp. 23185 (10 p.).
18. Glinskii I. A., Zenchenko N. V. Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors, *Rus. Microelectr.*, 2015, vol. 44, no. 4, pp. 236–239.
19. Ponomarev D. S., Khabibullin R. A., Yachmenev A. E., Pavlov A. Yu., Slapovskii D. N., Glinskiy I. A., Lavrukhin D. V., Ruban O. A., Maltsev P. P. Electrical and thermal properties of photoconductive antennas based on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0.3$) grown on metamorphic buffer for generation of THz radiation, *Fizika i tekhn. poluprovod.*, 2017, accepted for publishing.

УДК 620.179

DOI: 10.17587/nmst.19.302-316

Е. А. Климов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Д. В. Лаврухин, науч. сотр.,
С. С. Пушкарев, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., О. А. Рубан, мл. науч. сотр., e-mail: мух.05@mail.ru,
А. Н. Алешин, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб.

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АРСЕНИДНЫХ И НИТРИДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

Поступила в редакцию 11.11.2017

Рассматриваются неразрушающие методы контроля нитридных и арсенидных гетероструктур с квантовой ямой: спектроскопия фотолюминесценции, рентгеновская дифрактометрия, измерение вольт-фарадных характеристик. Объяснены основные принципы этих методов и границы их применимости. Описаны особенности применения этих методов к нитридным и арсенидным гетероструктурам $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{N}$ и $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{As}$, а также их различия.

Ключевые слова: наноструктуры, вольт-фарадные характеристики, фотолюминесценция, рентгеновская дифракция, неразрушающий анализ

Введение

Современные тенденции развития технологии НЕМТ (high electron mobility transistor) направлены на утонение барьерного слоя полупроводниковой гетероструктуры для уменьшения подзатворной емкости, чтобы обеспечить более высокие рабочие частоты транзисторов. Разработка монолитных интегральных схем на основе НЕМТ значительно упрощается при использовании систем автоматизированного проектирования. Для применения систем автоматизированного проектирования необходимы модели, дающие комплексное представление о гетероструктуре: состояние слоев, образующих двумерную потенциальную яму, наличие и природа электронных ловушек, концентрация и подвижность электронов в канальном слое. Поэтому неразрушающий контроль исходных гетерострук-

тур является одним из ключевых моментов при проектировании и изготовлении монолитных интегральных схем. В работе рассмотрены основные методы неразрушающего контроля полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами и двумерным электронным газом — как арсенидных $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{As}$, так и нитридных $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{N}$. Первые обычно выращивают методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (100) и InP (100), а вторые — методом металлорганической газофазной эпитаксии на подложках Al_2O_3 (0001) и 6H-SiC (0001).

1. Спектроскопия фотолюминесценции

Качество полупроводниковых гетероструктур можно контролировать спектроскопией фотолюминесценции (ФЛ) [1]. Этот метод применим к по-