

# 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

© Д.С. Пономарев<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1</sup>, А.Э. Ячменев<sup>1</sup>, А.Ю. Павлов<sup>1</sup>, Д.Н. Слаповский<sup>1</sup>, И.А. Глинский<sup>1,2</sup>, Д.В. Лаврухин<sup>1</sup>, О.А. Рубан<sup>1</sup>, П.П. Мальцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский технологический университет (МИРЭА), 119454 Москва, Россия

E-mail: [ponomarev\\_dmitr@mail.ru](mailto:ponomarev_dmitr@mail.ru)

(Получена 28 декабря 2016 г. Принята к печати 28 февраля 2017 г.)

Приведены результаты исследований электрических и тепловых свойств фотопроводящих антенн для генерации терагерцового излучения на основе выращенного в низкотемпературном режиме GaAs (low-temperature grown GaAs, LT-GaAs) и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с повышенным содержанием индия ( $x > 0.3$ ). Показано, что мощность джоулева разогрева  $P_H$  за счет влияния темнового тока в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в 3–5 раз превосходит аналогичную величину для LT-GaAs. Это обусловлено большой собственной проводимостью  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при  $x > 0.38$ . Была разработана и изготовлена теплоотводящая оснастка для фотопроводящей антенны. Результаты численного моделирования показали, что использование теплоотвода позволяет уменьшить рабочую температуру антенны на 16% для антенны на основе LT-GaAs на 40% для антенны на основе  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  и на 64% для антенны на основе  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ .

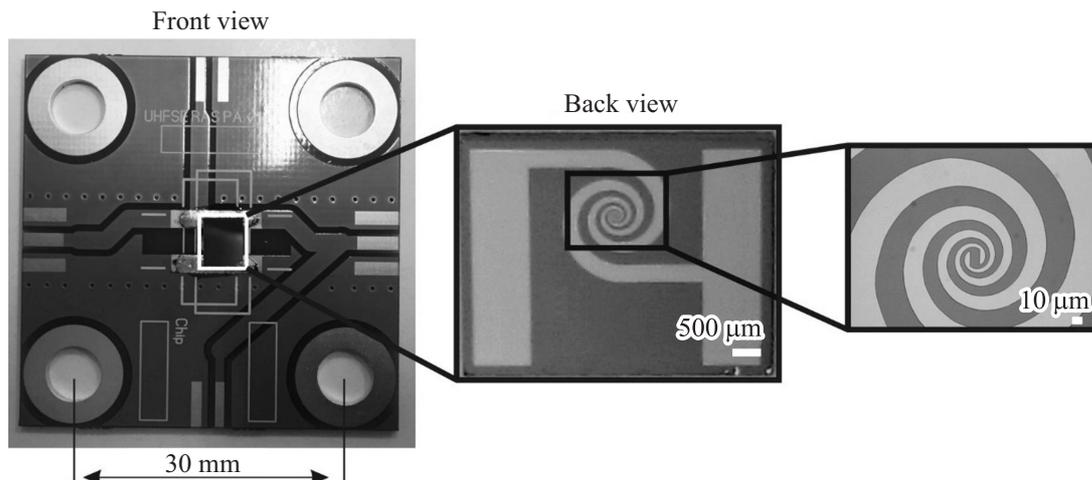
DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44893.8508

## 1. Введение

Фотопроводящие антенны (ФА, PCA) на основе полупроводников GaAs и InGaAs являются перспективными источниками импульсного и непрерывного излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот [1]. При облучении активной области ФА оптическим излучением в фотопроводящем слое антенны рождаются неравновесные (фотовозбужденные) носители заряда, которые впоследствии разделяются и ускоряются приложенным к контактным электродам ФА электрическим полем. Разделение фотовозбужденных носителей заряда приводит к появлению осциллирующего дипольного момента, который является источником излучения. В отличие от других источников ТГц излучения, принцип работы которых основан на нелинейных оптических процессах, ФА могут потенциально обеспечить высокую эффективность оптико-терагерцовой конверсии. Для увеличения выхода ТГц сигнала требуется разрабатывать структуры с фотопроводящим слоем с малыми эффективной массой и временем жизни фотовозбужденных носителей заряда [2,3]. В основном в качестве фотопроводящего слоя для ФА используют два материала: выращиваемый в низкотемпературном режиме GaAs (LT-GaAs) [4] и InGaAs [5]. Первый применяют для создания источников ТГц излучения под оптическую накачку фемтосекундного лазера (800 нм), а второй позволяет работать с более длинноволновой оптической накачкой в диапазоне 1.0–1.6 мкм [6,7]. Поскольку для изготовления антенны требуется высокое сопротивление фотопроводящего материала, а в InGaAs оно изначально ниже, чем в LT-GaAs, полупроводник эпитаксиально

выращивают при низкой температуре и легируют бериллием [5] или эрбием [8], применяют ионную имплантацию [9,10], а также используют сверхрешеточные структуры на основе последовательности слоев  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  с вкраплением островков ErAs [11] и легированного бериллием  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  [12]. ФА на основе LT-GaAs может иметь довольно широкий спектр ТГц излучения вплоть до 5.0 ТГц с максимумом генерации излучения в области 1.0 ТГц [13,14], в то время как ФА на основе InGaAs, легированного бериллием, показывают более интенсивную генерацию ТГц излучения, особенно при оптической накачке двумя лазерами с близкими частотами [6,15]. Например, в [7] было показано, что ФА на основе решеточно-согласованной структуры, состоящей из нескольких периодов сверхрешетки  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ , имеет высокую эффективность оптико-терагерцовой конверсии, а сама структура позволяет получить малое время жизни неравновесных носителей заряда без применения легирования бериллием.

Однако в настоящее время эффективность оптико-терагерцовой конверсии все равно остается невысокой из-за быстрого затухания осциллирующего дипольного момента. Прежде всего это связано с рассеянием носителей заряда в фотопроводящем слое и подложке [16]. Для увеличения эффективности применяются различные подходы: расширение активной области ФА для уменьшения электронного экранирования и вероятности теплового пробоя [8,16], использование плазмонных нанополостей, формируемых на поверхности фотопроводящего слоя [9], создание трехмерных плазмонных контактов с высоким аспектным соотношением [17] и т.д.



**Рис. 1.** Спроектированная оснастка на основе текстолитовой платы с ФА для помещения в держатель с фокусирующей линзой для измерения ТГц сигнала.

Несмотря на достигнутые успехи в области инженерии ФА [9,10,18], они крайне подвержены влиянию темновых токов [19,20]. Это сопровождается выделением джоулева тепла [21] одновременно с нагревом от воздействия оптической накачки лазером, что приводит к тепловому пробою антенны. В [22] было показано, что использование теплоотводящих элементов может заметно снизить максимальную температуру работы ФА, а в [20] авторы показали, что на величину темнового тока и отвод тепла влияет металлизация электродов.

В настоящей работе проведено исследование электрических и тепловых свойств ФА на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с повышенным содержанием индия ( $x = 0.38\text{--}0.53$ ). Мы предложили оригинальный способ монтажа кристаллов ФА на текстолитовую плату без приклеивания кремневой линзы непосредственно на антенну, с возможностью отвода тепла от активной области. Такая ФА на плате может быть помещена в держатель с фокусирующей линзой для проведения измерений ТГц сигнала. С помощью численного моделирования мы сравнили максимальную температуру работы ФА при непрерывном режиме питания с учетом теплоотвода и без него.

## 2. Образцы и методы исследований

Образцы структур на основе LT-GaAs и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x > 0.3$ ) были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber 32P с твердотельными источниками. В качестве подложек использовались пластины полуизолирующего GaAs с разориентацией на  $2^\circ$  относительно (100). Всего было изготовлено 3 образца: LT-GaAs с фотопроводящим слоем GaAs толщиной 0.75 мкм на легированном буфере  $n^+$ -GaAs толщиной 0.25 мкм;  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  толщиной 1.0 мкм с метаморфным буферным слоем (МБ/МВ);  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной 1.0 мкм с МБ. Схематическое изображение конструкции образца на примере  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  с МБ приведено в статье [23].

Температура роста LT-GaAs равнялась  $215^\circ\text{C}$ . Постростовой отжиг проводился *in situ* сразу после окончания роста LT-GaAs при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 20 мин. Температура роста МБ равнялась  $400^\circ\text{C}$ . Ступенчатый МБ состоял из последовательности семи слоев  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  с переменной мольной долей индия  $y$ , варьируемой в пределах  $y = 0.10\text{--}0.42$ . Постростовой отжиг для кристаллических слоев без избыточного мышьяка не требуется. Принцип работы МБ подробно описан в [24,25].

Для формирования ФА на выращенных структурах был разработан и изготовлен фотошаблон, содержащий несколько различных типов антенн (дипольная, „бабочка“ и спиральная с разной степенью закрутки) с контактными площадками. Зазор между электродами составлял 10 мкм. 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 осуществлялось удаление окислов арсенида галлия в водном растворе соляной кислоты. После напыления системы металлов Ti/Pt/Au (30/25/300 нм) проводилась двухстадийная операция „взрыва“ (lift-off), промывка пластины в деионизованной воде и сушка на центрифуге. Таким образом, на пластине были сформированы антенны 6 различных топологий.

Резка пластины на отдельные кристаллы ФА осуществлялась методом дисковой резки. Непосредственно перед началом разделения пластины на кристаллы лицевая сторона пластины покрывалась защитным слоем фоторезиста S1818 толщиной 2.5 мкм, а затем приклеивалась с обратной стороны на ленту-спутник

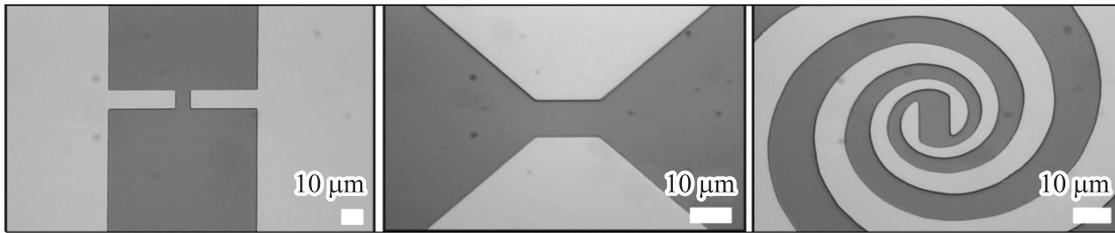


Рис. 2. Изготовленные ФА на основе LT-GaAs и  $In_xGa_{1-x}As$  с  $x > 0.3$ . Зазор между электродами 10 мкм.

ADWILL D-628, которая крепилась на стальную рамку. Далее рамка с лентой-спутником крепилась на вакуумном столике машины резки, в машину вводилась программа, на основании которой пластина разделялась на кристаллы. Для резки GaAs были подобраны следующие режимы: скорость вращения шпинделя 30 000 об/мин, скорость подачи диска 1.5 мм/с. Данный режим резки обеспечил разделение пластины практически без сколов с выходом годных кристаллов после резки 95%.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных ФА проводились при 300 К на зондовой станции с игольчатыми зондами, подключенной к измерителю характеристик полупроводниковых приборов Tektronix 370A Curve Tracer.

Оснастка для держателя с фокусирующей линзой для проведения измерений ТГц сигнала была изготовлена на основе печатной платы из фольгированного с двух сторон стеклотекстолита FR4 толщиной 1 мм. Размеры платы составляли  $40 \times 40$  мм, расстояние между монтажными отверстиями было 30 мм, а их диаметр равнялся 5 мм. Печатная плата имеет два стандартных разъема и два разъема под коаксиальный кабель.

„Посадка“ антенного чипа на текстолитовую плату осуществлялась с помощью обратного монтажа антенны на плату, в центре которой было проделано отверстие диаметром 2.5 мм. Посадочные места для размещения антенны и контактные площадки имели покрытие, нанесенное иммерсионным золочением. Монтаж ФА на текстолитовую плату осуществлялся с помощью припоя ПОС-61 на термостойке при температуре 200–230°C. Перед монтажом для снижения поверхностного натяжения припоя на посадочные места наносился нейтральный гелеобразный флюс. Спроектированная оснастка показана на рис. 1.

Исследование процессов теплопереноса в ФА с учетом теплоотвода и без него проводилось посредством моделирования методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics.

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведены изображения ФА с различной топологией, полученные в оптическом микроскопе.

Стоит отметить, что ранее мы проводили измерения методом ТГц спектроскопии с разрешением по времени (time-domain spectroscopy, TDS) на исследуемых в работе образцах, но без антенн, при оптической накачке с длиной волны 800 нм. Результаты измерений волновой формы ТГц импульса и спектра ТГц генерации, а также времени жизни фотовозбужденных носителей заряда в указанных образцах приведены в статье [26]. В настоящей работе измерения ТГц сигнала от ФА не проводились, так как основное внимание было сосредоточено на исследовании влияния темнового тока на работу ФА с разными фотопроводящими слоями и изготовлении оснастки для отвода тепла. Измерения методом TDS для ФА будут приведены в следующей статье. Для проведения электрических измерений была выбрана ФА с топологией типа „бабочка“. Стоит отметить, что предельные значения напряжения, характерные для ФА на основе  $In_xGa_{1-x}As$  в несколько раз ниже, чем для ФА на основе LT-GaAs. Обычно они составляют  $V_b = 1–10$  В для  $In_xGa_{1-x}As$  при  $x = 0.3–0.5$  по сравнению с  $V_b = 15–20$  В для LT-GaAs.

Из приведенных на рис. 3 ВАХ для трех исследуемых образцов отчетливо видно, что самый низкий темновой ток  $I_D$  как раз характерен для LT-GaAs и  $In_{0.38}Ga_{0.62}As$ , в то время как для  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  он составляет  $I_D \approx 5$  мА для  $V_b = 5$  В. При этом важно отметить, что интенсив-

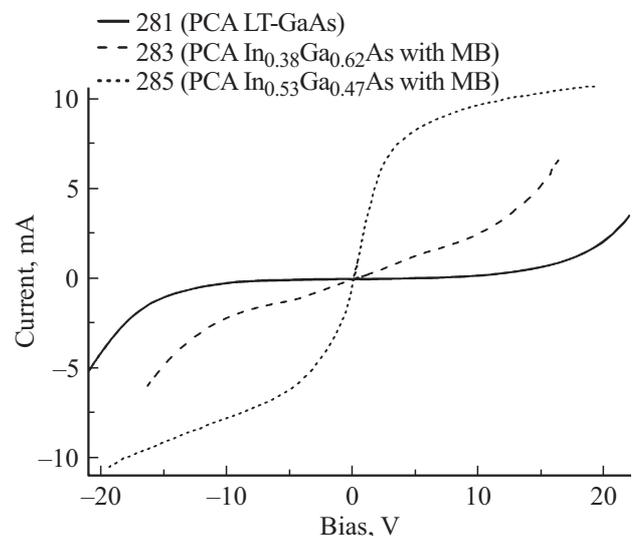


Рис. 3. ВАХ трех исследуемых образцов ФА.

ность ТГц генерации и собственно сама величина генерируемого фототока  $J_{\text{THz}}$  определяются параметрами фотопроводящего материала согласно выражению

$$J_{\text{THz}}(t) \sim N(t)e\mu E_b, \tag{1}$$

где  $N(t)$  — концентрация фотовозбужденных носителей заряда,  $\mu$  — подвижность электронов, а  $E_b$  — электрическое поле, возникающее при приложении напряжения  $V_b$  к антенне. Это означает, что даже при относительно большом темновом токе возможно получить интенсивную генерацию ТГц излучения в ФА на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (для  $x > 0.5$ ) за счет большого значения фототока. В [25] мы показали, что фотопроводящий материал на основе  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ , эпитаксиально выращенного с использованием МБ на подложке GaAs (100), на несколько порядков превосходит LT-GaAs по интенсивности ТГц генерации за счет существенного вклада фотоэффекта Дембера в генерацию ТГц излучения. Поскольку увеличение  $x$  в слое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  сопровождается увеличением соотношения диффузионных подвижностей электронов и дырок, что крайне важно для проявления фотоэффекта Дембера [27,28], это должно привести к возрастанию  $J_{\text{THz}}$ . Мощность джоулева разогрева, выделяемую в единицу времени с учетом генерируемого ТГц фототока в ФА, можно определить согласно [21] как

$$P_H \sim \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} V_b i(t) dt \approx \frac{\tau}{T_0} V_b^2 \frac{n_0 e \mu A}{d}, \tag{2}$$

где  $T_0$  — период импульсной накачки лазером,  $\tau$  — время жизни фотовозбужденных носителей заряда,  $d$  — величина зазора между электродами,  $n_0$  — равновесная концентрация носителей заряда, а  $A$  является произведением ширины электродов и глубины поглощения фотовозбужденных носителей заряда. В рамках настоящей статьи была проведена оценка мощности джоулева разогрева исключительно под действием темнового тока. Для исследуемых образцов ФА ее можно оценить как  $P_H \sim I_D^2 R \sim I_D V_b$ . Начальные значения  $P_H$ , соответствующие подаче минимального напряжения питания к антеннам  $V_b \approx 0.5$  В, составляют  $P_H \approx 0.02, 0.1$  и  $0.8$  мВт для ФА на основе LT-GaAs,  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  и  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  соответственно. Значения  $P_H$ , соответствующие рабочим напряжениям питания  $V_b = 15$  В (для LT-GaAs), 10 В (для  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ ) и 5 В (для  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ), приведены в таблице. Следует отметить, что темновой ток для ФА на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при  $x > 0.5$  начинает резко расти, что связано с возрастанием собственной проводимости фотопроводящего слоя по мере увеличения содержания индия.

При разработке оснастки для монтажа ФА решалось несколько задач. Во-первых, необходимо было иметь возможность подвести питание к ФА при помощи различных разъемов, в том числе и через коаксиальный кабель. Во-вторых, была предусмотрена возможность облучения ФА с одной стороны и свободного выхода

Значения мощности джоулева разогрева  $P_H$  при рабочих напряжениях  $V_b$  для исследуемых образцов

Фотопроводящая антенна	Рабочее напряжение $V_b$ , В	Мощность джоулева разогрева $P_H$ , мВт
LT-GaAs	15	10.5
$\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$	10	25
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	5	40.5

ТГц излучения с обратной стороны кристалла антенны. В-третьих, печатная плата должна эффективно отводить тепло от кристалла ФА, чтобы скомпенсировать негативное влияние темнового тока.

Для исследования процессов теплопереноса в ФА была построена трехмерная модель оснастки, приведенная на рис. 4. Стоит отметить, что область плотности максимальной рассеиваемой мощности в кристалле ФА локализована в фотопроводящем слое между контактами и соответствует области с максимальной плотностью темнового тока ( $\sim 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3$ ). Влияние воздействия фемтосекундным лазером на ФА не учитывалось, поскольку время жизни фотовозбужденных носителей заряда, образовавшихся после облучения, не велико ( $< 10$  пс), в то время как воздействие производится с частотой 1 кГц (т.е. период равен 1 мс) и влияние данного эффекта на разогрев будет крайне малым. Необходимые для расчетов свойства материалов (ФА, текстолитовой платы и припоя) были использованы согласно [29–31]. Граничное условие отвода тепла соответствует естественной воздушной конвекции

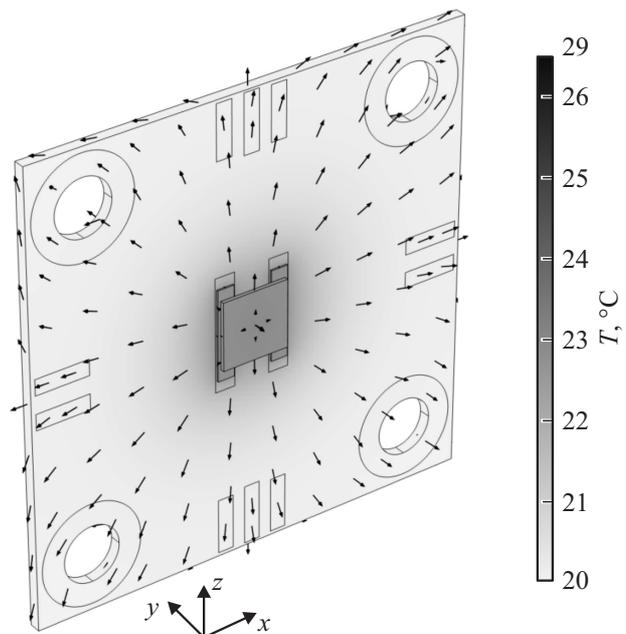
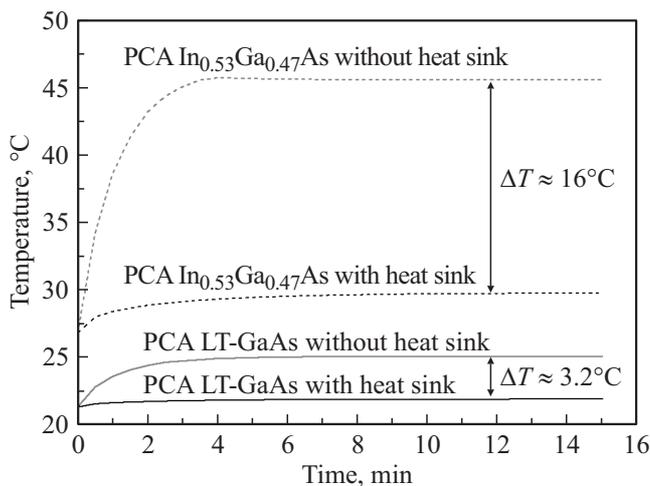


Рис. 4. Распределение температуры в трехмерной модели оснастки с ФА на основе  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . Стрелки указывают направление теплового потока.



**Рис. 5.** Рассчитанная температурная зависимость работы ФА на примере двух фотопроводящих материалов LT-GaAs ( $V_b = 15$  В) и  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  с МБ ( $V_b = 5$  В) от времени при непрерывном протекании тока с теплоотводом и без него.

в воздухе ( $\sim 5$  Вт/м<sup>2</sup>·К). На рис. 4 показано распределение температуры в модели оснастки с ФА на основе  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ , полученное в результате численного моделирования (стрелки указывают направление теплового потока).

На рис. 5 приведена рассчитанная температурно-временная зависимость работы ФА на основе LT-GaAs и  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  с МБ с учетом отвода тепла на текстолитовую плату и без отвода тепла. Видно, что использование платы-теплоотвода позволяет уменьшить рабочую температуру антенны на 13% для ФА на основе LT-GaAs (абсолютное изменение температуры  $\Delta T \approx 3.2^\circ C$ ) и на 64% для ФА на основе  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  с МБ ( $\Delta T \approx 16^\circ C$ ). Важно 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 основе  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  испытывает резкий скачок с градиентом по температуре от 20 до  $46^\circ C$ . Поскольку ФА на  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  имеет больший темновой ток и соответственно больше джоулева тепла выделяется в единицу времени, использование теплоотводящей поверхности позволяет существенно скомпенсировать негативное воздействие темнового тока на работу антенны. При использовании теплоотвода для ФА на основе  $In_{0.38}Ga_{0.62}As$  абсолютное изменение температуры составляет 10 гр.С. Это означает, что использование теплоотвода уменьшает рабочую температуру на 40%.

Стоит отметить, что еще сильнее снизить рабочую температуру ФА возможно за счет использования плат на медной или алюминиевой основе. Однако следует учитывать, что платы на металлической основе включают в себя диэлектрические слои с низкой теплопроводностью, препятствующие эффективному переносу тепла от кристалла ФА. Кроме того, существенным недостатком таких плат является невозможность выполнения иммерсионного золочения контактов, что резко усложнит

процесс установки на них антенны. Решением данной проблемы может являться комбинация текстолитовой платы и медного теплоотвода.

#### 4. Заключение

В работе проводились исследования электрических и тепловых свойств ФА на основе фотопроводящих материалов LT-GaAs и  $In_xGa_{1-x}As$  с повышенным содержанием индия ( $x = 0.38–0.53$ ), выращенного с помощью метаморфного буфера на подложках GaAs (100). Было показано, что мощность джоулева разогрева  $P_H$  за счет действия темнового тока в  $In_xGa_{1-x}As$  в 3–5 раз превосходит аналогичную величину для LT-GaAs. Это связано с возрастанием собственной проводимости фотопроводящего слоя  $In_xGa_{1-x}As$  по мере увеличения содержания индия ( $x > 0.38$ ). Результаты численного моделирования показали, что использование теплоотвода позволяет уменьшить рабочую температуру антенны на 13% для ФА на основе LT-GaAs и на 64% для ФА на основе  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ , тем самым частично компенсируя негативное влияние темнового тока.

Работы по изготовлению ФА выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-29-00277 следующими авторами: А.Э. Ячменев выполнял работы по эпитаксиальному выращиванию структур с фотопроводящим слоем LT-GaAs и  $In_xGa_{1-x}As$ ; Д.С. Пономарев занимался проектированием ФА; Д.В. Лаврухин проводил работы по изготовлению оснастки.

Работы по исследованию электрических и тепловых свойств ФА выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ 17-32-80009 мол\_эв\_а, 16-29-14029 офи\_м и 16-07-00187 А.

#### Список литературы

- [1] A. Rogalski, F. Sizov. Opt. Electron. Rev., **19** (3), 346 (2011).
- [2] Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. ФТП, **49** (7), 932 (2015).
- [3] Р.Р. Галиев, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Ю.В. Федоров, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. Изв. РАН. Сер. физ., **80** (4), 523 (2016).
- [4] A. Krotkus. J. Phys. D: Appl. Phys., **43**, 273001 (2010).
- [5] D. Vignaud, J.F. Lampin, E. Lefebvre, M. Zaknourne, F. Mollet. Appl. Phys. Lett., **80** (22), 4151 (2002).
- [6] J.C. Delagnes, P. Mounaix, H. Němec, L. Fekete, F. Kadlec, P. Kužel, M. Martin, J. Mangency. J. Phys. D: Appl. Phys., **42** (19), 195103 (2009).
- [7] R.J.B. Dietz, M. Gerhard, D. Stanze, M. Koch, B. Sartorius, M. Schell. Opt. Express, **19** (27), 122 (2011).
- [8] S. Preu, M. Mittendorff, H. Lu, H.B. Weber, S. Winnerl, A.C. Gossard. Appl. Phys. Lett., **101**, 101105 (2012).
- [9] N. Chimot, J. Mangency, P. Mounaix, M. Tondusson, K. Blary, J.F. Lampin. Appl. Phys. Lett., **89**, 083519 (2006).
- [10] M. Suzuki, M. Tonouchi. Appl. Phys. Lett., **86**, 163504 (2005).

- [11] F. Ospald, D. Maryenko, K. von Klitzing, D.C. Driscoll, M.P. Hanson, H. Lu, A.C. Gossard, J.H. Smet. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 131117 (2008).
- [12] B. Sartorius, H. Roehle, H. Künzel, J. Böttcher, M. Schlak, D. Stanze, H. Venghaus, M. Schell. *Opt. Express*, **16**, 9565 (2008).
- [13] M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, S. Nakashima. *Appl. Optics*, **36** (30), 7853 (1997).
- [14] I.S. Gregory, C.M. Tey, A.G. Cullis, M.J. Evans, H.E. Beere, I. Farrer. *Phys. Rev. B*, **73** (19), 195201 (2006).
- [15] M. Suzuki, M. Tonouchi. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (5), 051104 (2005).
- [16] M. Beck, H. Schäfer, G. Klatt, J. Demsar, S. Winnerl, M. Helm, T. Dekorsy. *Opt. Express*, **18**, 9251 (2010).
- [17] S.-H. Yang, M.R. Hashemi, C.W. Berry, M. Jarrahi. *IEEE Trans. Tera. Sci. Technol.*, **4**, 575 (2014).
- [18] C.W. Berry, M.R. Hashemi, M. Jarrahi. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 081122 (2014).
- [19] D.H. Wu, B. Graber, C. Kim, S.B. Qadri, A. Garzarella. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 051126 (2014).
- [20] W. Shi, L. Hou, Z. Liu, T. Tongue. *J. Opt. Soc. Am. B*, **26** (9), A107 (2009).
- [21] C.M. Collier, T.J. Stirling, I.R. Hristovski, J.D.A. Krupa, J.F. Holzman. *Sci. Rep.*, **6**, 23185 (2016).
- [22] S.-P. Han, N. Kim, H. Ko, H.-C. Ryu, J.-W. Park, Y.-J. Yoon, J.-H. Shin, D.H. Lee, S.-H. Park, S.-H. Moon, S.-W. Choi, H.S. Chun, K.H. Park. *Opt. Express*, **20** (16), 18432 (2012).
- [23] Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, А.Э. Ячменев, П.П. Мальцев, М.М. Грехов, И.Е. Иляков, Б.В. Шишкин, Р.А. Ахмеджанов. *ФТП*, **51** (4), 535 (2017).
- [24] G.B. Galiev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, A.E. Yachmenev, A.S. Bugaev, P.P. Maltsev. *Nanotechnol. Rus.*, **10** (7), 593 (2015).
- [25] Д.В. Лаврухин, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. *ФТП*, **49** (9), 1254 (2015).
- [26] D.S. Ponomarev, R.A. Khabibullin, A.E. Yachmenev, P.P. Maltsev, I.E. Ilyakov, B.V. Shiskin, R.A. Akhmedzhanov. *IJHSES*, **25**, 1640023 (2016).
- [27] V. Apostolopoulos, M.E. Barnes. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 374002 (2014).
- [28] D. McBryde, M.E. Barnes, S.A. Berry, P. Gow, H.E. Beere, D.A. Ritchie, V. Apostolopoulos. *Opt. Express*, **22** (3), 3235 (2014).
- [29] P.P. Maltsev, S.V. Redkin, I.A. Glinskiy, N.V. Poboikina, M.P. Duknovskiy, Yu.Yu. Fedorov, A.K. Smirnova, E.N. Kulikov, S.V. Shcherbakov, I.A. Leontiev, O.Yu. Kudryashov, A.S. Skripnichenko. *Nanotechnol. Rus.*, **11** (7–8), 480 (2016).
- [30] J.S. Blakemore. *J. Appl. Phys.*, **53**, R123 (1982).
- [31] S. Mei, I. Knezevic. *J. Appl. Phys.*, **118**, 175101 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

## 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

D.S. Ponomarev<sup>1</sup>, R.A. Khabibullin<sup>1</sup>, A.E. Yachmenev<sup>1</sup>, A.Yu. Pavlov<sup>1</sup>, D.N. Slapovskiy<sup>1</sup>, I.A. Glinskiy<sup>1,2</sup>, D.V. Lavrukhin<sup>1</sup>, O.A. Ruban<sup>1</sup>, P.P. Maltsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Ultra High Frequency

Semiconductor Electronics,  
Russian Academy of Sciences,  
117105 Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Technological University (MIREA),  
119454 Moscow, Russia

**Abstract** We demonstrate the results of investigation electrical and thermal properties of photoconductive antennas for THz radiation based on low-temperature grown GaAs (LT-GaAs) and  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with high indium content ( $x > 0.3$ ) metamorphic buffer. It was shown that the power of Joule heating  $P_H$  due to influence of dark current in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  is 3–5 times higher than for LT-GaAs. This is due to high intrinsic conductivity of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  at  $x > 0.5$ . We have also designed and fabricated special rigging with heat sink from a photoconductive antenna on a textolite plate. By means of numerical calculations we showed that the use of such a heat sink allows reducing the antenna temperature by 16% for LT-GaAs and 33% for  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ .