

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.6>

УДК: 538.9

ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ GaN {LT-In_xGa_{1-x}N/GaN}

Е.Р. Бурмистров^{1,2}, Л.П. Авакянц¹, Н.А. Парфентьева², С.Н. Гаврилин²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет.
119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2

² Московский государственный строительный университет,
институт цифровых технологий и моделирования в строительстве,
кафедра общей и прикладной физики,
129337 Москва, Ярославское шоссе, 26

Статья поступила в редакцию 3 июня 2025 г.

Аннотация. Предложена многослойная структура на основе низкотемпературного нитрида галлия (LT-GaN), выращенного на сапфировой подложке Al₂O₃ с кристаллографическим направлением (0001), для создания фотопроводящих антенн терагерцевого диапазона. Активная область исследуемых структур включает в себя 10 периодов In_xGa_{1-x}N/GaN с мольной долей индия в фотопроводящем слое 0.32. Показано, что при мощности лазерного возбуждения 57 мВт и напряжении смещения 15 В фотопроводящая антенна на основе LT-In_xGa_{1-x}N/GaN генерирует терагерцевые импульсы со средней выходной мощностью 4.5 мкВт. Частота повторения импульсов Ti:сапфирового лазера 60 МГц. Получены временные формы терагерцевых импульсов и соответствующие им частотные спектры фурье амплитуд, характеризующие излучение антенн на основе LT-GaN.

Ключевые слова: фотопроводящие антенны, нитрид галлия, терагерцевое излучение, оптическая накачка, временные формы.

Финансирование: Данная работа была поддержана грантом 2025 года на проведение фундаментальных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами НИУ МГСУ, проект № 15-661/130. Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Автор для переписки: Бурмистров Евгений Романович, burmistrover@my.msu.ru

Введение

В последнее время терагерцевый диапазон частот (0.1-10 ТГц) стал одним из приоритетных направлений исследований в области фотоники и оптоэлектроники [1]. Особое место занимают поиски эффективных методов генерации и детектирования импульсного терагерцевого излучения с использованием полупроводниковых материалов. Интерес обусловлен, прежде всего, свойством данных материалов преобразовывать оптическое излучение в терагерцевые электромагнитные волны, что, в свою очередь, открывает новые возможности не только для прикладных разработок, таких как получение изображений в терагерцевом диапазоне, но и для фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния [2].

Центральное место в импульсной терагерцевой спектроскопии занимают фотопроводящие полупроводниковые антенны (ФПА). Наибольший интерес представляют такие свойства ФПА, как прямое преобразование излучения фемтосекундного лазера в терагерцевые волны, так и обратное преобразование терагерцевого излучения в измеряемый электрический сигнал с сохранением информации о фазе и амплитуде исходного импульса. Активное применение ФПА находят, например, при решении задач импульсной терагерцевой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDs) [2,3].

При поглощении фотонов, испускаемых Ti:сапфировым лазером, с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны (E_g) фотопроводящего слоя, в ФПА рождаются электронно-дырочные пары. Терагерцевое излучение возникает в результате преобразования

фемтосекундных импульсов, подаваемых на ФПА, в излучение терагерцевого диапазона. Отметим, что эффективность данного процесса зависит от длины волны и интенсивности лазерного излучения, а также от свойств самого материала антенны.

При оптическом возбуждении носителей заряда выбор материала для изготовления ФПА, в первую очередь, определяется энергетическими характеристиками запрещенной зоны полупроводника, что обусловлено фундаментальным требованием к энергии поглощаемых фотонов. К примеру, при использовании ФПА на основе GaAs ($E_g = 1.42$ эВ) обычно применяют Ti:сапфировый лазер с длиной волны возбуждения 800 нм, в то время как для InGaAs ($E_g = 0.70$ эВ) предпочтительнее фотовозбуждение на второй гармонике, генерируемой, как правило, волоконным лазером на длине волны 1550 нм [3].

В современных исследованиях ФПА особое внимание уделяется структурам на основе низкотемпературного (LT-low temperature) LT-GaAs. Как демонстрируют исследования [4,5], в таких материалах носители заряда характеризуются низкой подвижностью ($\sim 200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), что связано с повышенной плотностью структурных дефектов кристаллической решетки. Сравнительный анализ характеристик терагерцевого излучения для ФПА на основе LT-GaAs с различными кристаллографическими направлениями, выполненный в работе [6] методом THz-TDS, выявил существенную анизотропию излучательных свойств ФПА. Показано, что образцы с направлением (111) демонстрируют четырехкратное превосходство по мощности генерируемого терагерцевого излучения по сравнению с аналогичным показателем в образцах с направлением (100). При этом максимальные значения подвижности носителей ($\sim 380 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) достигнуты в структурах с кристаллографическим направлением (100).

Современные исследования выявили фундаментальные ограничения ФПА на основе LT-InGaAs/GaAs такие, как низкая подвижность носителей заряда ($< 500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), существенное ограничение выходной мощности

терагерцевого излучения и высокий уровень шумов при комнатной температуре [7]. Отметим, что LT-GaN, выращенный при низких температурах, обладает рядом уникальных свойств, среди которых можно выделить широкую запрещенную зону (3.5 эВ), низкий темновой ток и высокую подвижность основных носителей заряда ($\sim 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) [8]. Процесс низкотемпературного роста ($T < 500^\circ\text{C}$) приводит к встраиванию избыточного N_2 в решетку GaN, формированию N-вакансий и появлению глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне. Как следствие, время жизни основных носителей заряда в фотопроводящем материале существенно сокращается, достигая пикосекундных значений ($\sim 10^{-12} \text{ с}$). Таким образом, LT-GaN представляет собой перспективную альтернативу традиционным материалам, используемым в процессе изготовления ФПА.

Как правило, генерация широкополосного импульсного терагерцевого излучения осуществляется посредством оптического выпрямления в материалах с квадратичной нелинейностью [7], фотопроводимостью в электрооптических материалах [8] или излучением Черенкова в сегнетоэлектриках [9]. Однако, в полупроводниковых материалах основным механизмом генерации терагерцевого излучения остается фотопроводимость [10]. Механизм излучения терагерцевых импульсов заключается в следующем. К структурам прикладывается внешнее электрическое поле, под действием которого в области квантовых ям (КЯ) рождаются электронно-дырочные пары. Это ведет к генерации переменного во времени дипольного момента $\vec{P}(t)$. В исследованиях [11,12] представлены результаты по генерации терагерцевого излучения в гетероструктурах InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ). Установлено, что механизм генерации связан с процессами динамической поляризации в активной области структуры, где фотовозбужденные электронно-дырочные пары вызывают нестационарное экранирование внутреннего электрического поля.

В данной работе впервые демонстрируется возможность создания ФПА на основе LT-GaN.

2. Экспериментальные образцы фотопроводящих терагерцевых антенн на основе LT-GaN

Важную роль в задачах импульсной терагерцевой спектроскопии играют ФПА, которые, как правило, состоят из металлизированного слоя, выращенного на полупроводниковой подложке. Данные устройства служат как для генерации, так и для детектирования терагерцевых импульсов. В таблице 1 представлены основные характеристики полупроводниковых материалов, которые в последнее время наиболее часто применяются для создания ФПА [13,14].

Таблица 1. Основные параметры полупроводниковых материалов GaN, ZnSe и 6H-SiC.

п	E_g , эВ	μ , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	τ , пс	ρ , Ом·см	C , $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
GaN	3.40	1250	>150	$>10^8$	1.30
ZnSe	2.67	300-600	>500	10^{12}	0.18
6H-SiC	3.20	200-300	1000	$>10^{12}$	3.70

Таблица 1 демонстрирует значения удельного сопротивления (ρ), теплопроводности (C), подвижности (μ) и времени релаксации (τ).

Экспериментальные исследования генерации импульсного терагерцевого излучения ФПА из материалов, представленных в табл. 1, ширина запрещенной зоны которых превышает энергию кванта Ti:сапфирового лазера, проводились с использованием излучения 2 и 3 гармоник, где поглощение излучения накачки приводило к эффективному возбуждению тока [13,14]. Помимо этого использовались алмазы, и алмазы с примесными центрами, в которых генерация также демонстрировалась с возбуждением излучения различных гармоник Ti:сапфирового лазера [15,16].

Из данных таблицы 1 видно, что носители заряда в GaN обладают более коротким временем релаксации τ по сравнению, например, с ZnSe, традиционно используемым в качестве подложки для стандартных ФПА. Одним из ключевых достоинств ФПА на основе LT-GaN является большая ширина запрещенной зоны E_g (~3.4 эВ). Это свойство позволяет достичь высокой мощности терагерцевого излучения при приложении к ФПА большого напряжения

смещения U_{DC} . Еще одной важной особенностью ФПА на основе LT-GaN является высокая подвижность носителей заряда ($1000-2000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), что, в свою очередь, способствует более эффективной генерации слабых сигналов в терагерцевом диапазоне. Таким образом, LT-GaN становится перспективным материалом для создания ФПА, превосходящим традиционно используемые ZnSe и 6H-SiC, которые, несмотря на относительную простоту в изготовлении, уступают ему в производительности и эффективности.

В настоящей работе генерация и детектирование терагерцевых импульсов проводятся с использованием ФПА на основе LT-GaN. Структуры были выращены с использованием техники металлоорганического химического осаждения (MOCVD). Исследовались образцы производителей АО «Светлана-Рост». На рис.1 представлено схематичное изображение ФПА на основе LT-GaN и ее слоевая схема.

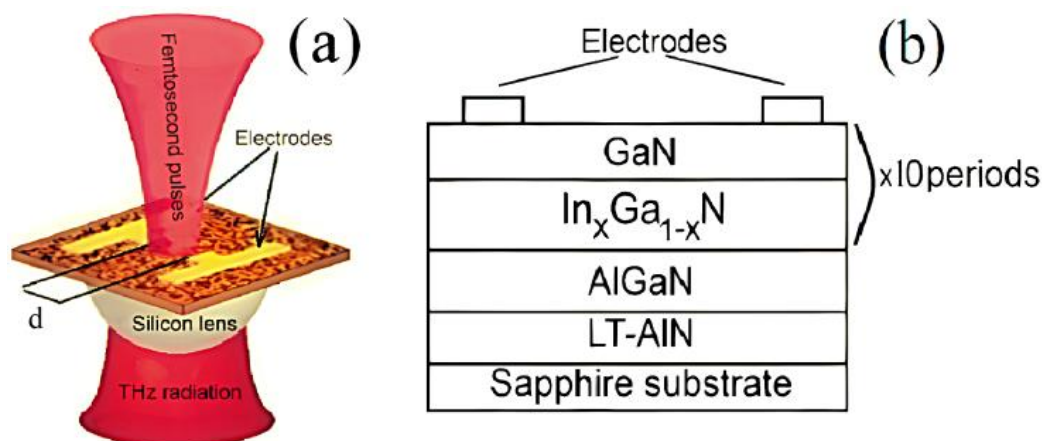


Рис. 1. (a) – Внешний вид и (b) – слоевая структура фотопроводящей терагерцевой антенны на основе LT-GaN.

На сапфировой подложке с кристаллографическим направлением (0001) выращивался буферный слой LT-AlN толщиной 100 нм, предназначенный для уменьшения рассогласования постоянных кристаллических решеток. Затем формировался промежуточный слой AlGaN толщиной 50 нм, препятствующий утечке носителей заряда из фотопроводящего слоя. Активная область включает в себя 10 периодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ толщиной 5/15 нм, сформированных при пониженной температуре 450°C и давлении 50 Торр. Слой GaN выступает

в качестве защиты от поверхностного пробоя. Содержание In в области КЯ составляет 32 %.

Для создания омических контактов использовался следующий технологический процесс. Многослойная система Ti/Al/Ni/Au толщиной 300 нм наносилась методом термического напыления. Титановый слой обеспечивал адгезию к поверхности полупроводника. Алюминиевая основа использовалась в качестве основного проводящего канала. Никелевая прослойка применялась для предотвращения взаимной диффузии носителей заряда, а золотое покрытие защищало поверхность от окисления. Зазор между электродами составил $d = 10$ мкм (см. рис. 1а). Завершающая стадия технологического процесса изготовления ФПА заключалась в быстром термическом отжиге всей структуры при температуре 450°C в течение 1 минуты и последующем охлаждении со скоростью 10°C/s в атмосфере N_2 . Режимы отжига были оптимизированы с учетом требований к терагерцевым ФПА, где критически важны низкое переходное сопротивление и высокая подвижность носителей в контактных областях.

Отметим, что по сравнению с однослойными структурами многослойные обладают лучшими электрическими и оптическими свойствами за счет интерфейсных эффектов, например шероховатостей гетерограницы, которые способствуют транспорту носителей зарядов в активной области. Благодаря глубоким дефектным уровням в данных структурах можно достичь пикосекундного времени жизни и значительно снизить скорость рассеяния фотовозбужденных носителей заряда, что, в свою очередь, сопровождается уменьшением времени релаксации и темнового тока.

При генерации терагерцевого излучения электроды ФПА соединялись с источником питания (рис. 2). Импульс тока J , возникающий в процессе поглощения фемтосекундных лазерных импульсов в ФПА, прямо пропорционален напряженности внешнего электрического поля, создаваемого внешним DC-источником:

$$J = \langle N \rangle e \mu E_{DC}, \quad (1)$$

где $\langle N \rangle$ – средняя концентрация фотовозбужденных носителей, $E_{DC} = U_{DC} / d$ – внешнее электрическое поле, U_{DC} – напряжение смещения внешнего источника. С целью регистрации терагерцевых импульсов электроды ФПА подсоединялись к высокочувствительному измерителю тока ($\sim 10^{-16}$ А). Формирование тока детектирования осуществлялось при одновременном взаимодействии фемтосекундного и терагерцевого импульсов в межэлектродном зазоре на поверхности ФПА. Если напряженность электрического поля терагерцевого импульса E_{THz} , то возникающий при этом импульс тока $J \sim E_{THz}$. При этом длительность лазерного импульса много меньше периода колебаний терагерцевой электромагнитной волны.

Электрическое поле терагерцевых импульсов, генерируемых с помощью ФПА, можно описать в приближении дипольного излучения без учета конкретного типа колебательной релаксации носителей заряда с использованием следующего выражения:

$$E_{THz} = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu U_{DC}, \quad (3)$$

где A – площадь пятна в зазоре между электродами, $N(t)$ – зависящая от времени концентрация фотовозбужденных носителей с подвижностью μ , r – расстояние от ФПА до точки пространства, для которой мы хотим рассчитать значение электрического поля терагерцевой электромагнитной волны. При выводе соотношения (3) учитывалось, что расстояние между ФПА и какой-либо точкой пространства, для которой требуется рассчитать значение терагерцевого поля, превышает размеры самой ФПА.

3. Методика эксперимента

Наша исследовательская группа разработала экспериментальную установку для изучения спектральных характеристик ФПА на основе LT-GaN, которая реализует стандартную схему THz-TDs. Данная методика уже доказала свою эффективность ранее в работе [17] и была успешно применена

для плазмонного детектирования терагерцевого излучения в многослойных полупроводниковых гетероструктурах InGaN/AlGaIn/GaN. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

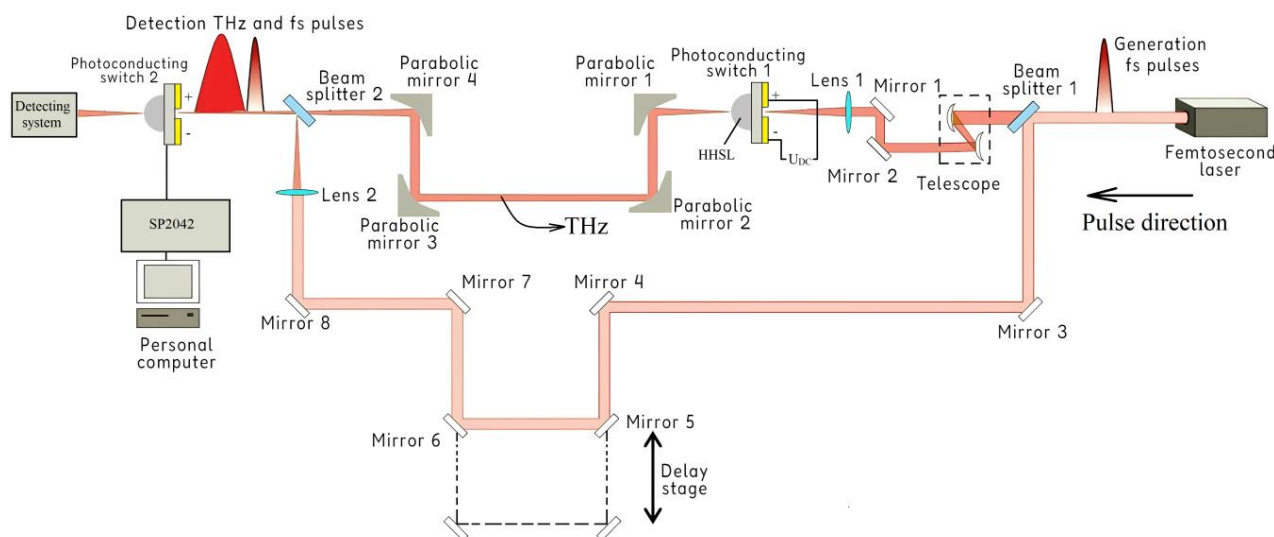


Рис. 2. Схема экспериментальной установки THz-TDs.

Экспериментальная установка включала в себя Ti:сапфировый лазер ($\lambda = 800$ нм, длительность импульса 130 фс, средняя выходная мощность излучения 57 мВт и частота повторения 60 МГц). Делитель пучка (Beam splitter 1) разделял излучение диаметром пучка 1.8 мм на пучок накачки и референс, которые следовали по различным оптическим путям. Пучок накачки использовался в канале генерации терагерцевых импульсов в ФПА1 (Photoconducting switch 1). Референс проходил через оптическую линию задержки (Delay stage), образованную зеркалами 4-7 (Mirrors 4-7) и использовался в когерентной схеме детектирования. Регулированием расстояния между Mirror 4 и Mirror 5 достигалась синхронизация времени прихода одного импульса относительно другого на ФПА2-детектор (Photoconducting switch 2). Детектирующая антенна ФПА2 ничем не отличалась от ФПА1-эмиттера. В режиме детектора электрический ток на ФПА2 пропорционален мгновенной напряженности электрического поля терагерцевых импульсов.

Ширина запрещенной зоны фотопроводящего слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ составляет 2.6 эВ. Так как длина волны Ti:сапфирового лазера 800 нм, то энергия кванта

фемтосекундного излучения равна 1.55 эВ. В результате двухфотонного поглощения лазерных импульсов фемтосекундной длительности в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ генерировались пространственно разделенные электроны и «дырки». В силу гексагональной сингонии GaN вюрцитной модификации, выращенного в кристаллографическом направлении (0001), на гетерогранице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ формируются встроенные электрические поля, вызванные спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями. Генерируемые в процессе фотовозбуждения электронно-дырочные пары оказываются под действием встроенного пьезоэлектрического поля. В полупроводниковых структурах в условиях фотовозбуждения одним из ключевых процессов является механизм генерации терагерцевых электромагнитных волн за счет динамического экранирования встроенного поля. Неравновесные носители частично компенсируют встроенное поле, снижая его эффективность. Возникающая нестационарная поляризация служит источником терагерцевого излучения. Математически данный процесс описывается уравнением:

$$P(t) \propto \int_0^t J_{\text{смещ}}(t') dt', \quad (4)$$

где $J_{\text{смещ}}$ – ток смещения, связанный с поляризацией, t – длительность фемтосекундного импульса.

В ФПА на основе LT-GaN генерация терагерцевого излучения под действием фемтосекундных оптических импульсов возможна и без приложения внешнего электрического поля. Для корректного изучения свойств таких ФПА нужно было как-то подавить эту «паразитную» генерацию. Условия эксперимента специально были подобраны нами таким образом, чтобы нивелировать вклад динамического экранирования встроенного поля. Для этого к ФПА прикладывалось внешнее электрическое поле, противоположное по полярности внутреннему полю.

Световой пучок накачки с P -поляризацией падал на поверхность ФПА1 под углом Брюстера, что обеспечило максимальное поглощение света в материале при минимальном отражении. Размер пятна фемтосекундного лазера

в межэлектродном зазоре составил 4 мкм, что соответствует высокой степени пространственной локализации возбуждения. Данный размер близок к дифракционному пределу, что является важным условием для когерентного возбуждения. Для сравнения, при использовании стандартных фокусирующих линз минимальный достижимый размер пятна составляет 5.1 мкм.

Со стороны подложки ФПА1 расходящееся терагерцевое излучение фокусировалось гиперполусферической линзой из высокоомного кремния (HNSSL) диаметром 15 мм и направлялось на ФПА2-детектор. Детектирование токовых импульсов, сгенерированных с помощью ФПА2, производилось с помощью синхронного усилителя SP2042 при одновременном освещении зазора между электродами терагерцевым и фемтосекундным импульсами.

Мощность терагерцевого излучения измерялась с помощью оптоакустического преобразователя – ячейки Голя. Ввод и фокусировка терагерцевых электромагнитных волн на входное окно приемника осуществлялись с помощью системы телескоп, состоящей из большого и малого сферических зеркал, которые рассеивали значительную часть энергии падающего терагерцевого излучения, сводя к минимуму его поглощение (рис. 3).

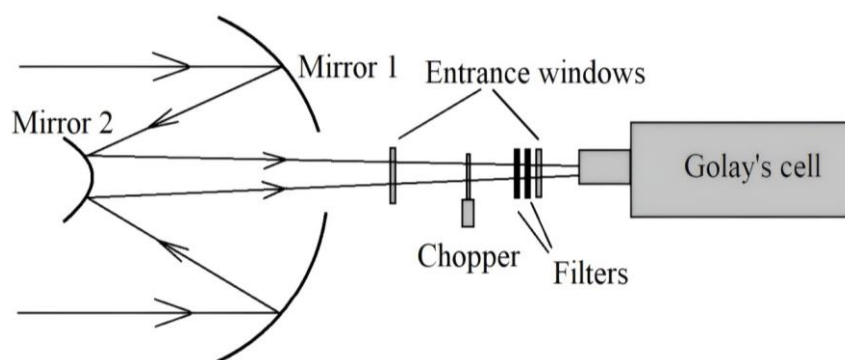


Рис. 3. Схематическое изображение детектирующей системы с использованием ячейки Голя.

Для отрезания коротковолновой части излучения перед входным окном приемника устанавливались фильтры. Затем располагался механический прерыватель (чоппер) с задаваемой частотой модуляции терагерцевого излучения. В качестве активной среды в ячейке Голя использовался ксенон. Поглощение терагерцевого излучения полупрозрачной входной пластиной

приводило к локальному нагреванию газа. С другой стороны камеры находилась гибкая мембрана, задняя поверхность которой отражала падающий на нее луч от светодиода. В процессе нагревания газа поверхность мембраны искривлялась. При этом менялась интенсивность света, отраженного от ее задней поверхности, давая возможность измерения мощности терагерцевого излучения.

Холловская подвижность и концентрация фотовозбужденных носителей заряда в ФПА на основе LT-GaN определялись в геометрии Ван дер Пау на установке «EсорiaHMS-3000» в магнитных полях до 3 Тл в темноте при комнатной температуре.

4. Результаты эксперимента

Рисунок 4 демонстрирует полученные экспериментальные данные, характеризующие временные и спектральные характеристики терагерцевого излучения, генерируемого ФПА на основе LT-GaN. Напряжение смещения на ФПА составило 15 В.

Зарегистрированный однопериодный сигнал имеет четко выраженные положительные и отрицательные полуциклы. Из рис. 4(b)) видно наличие шумовой составляющей в высокочастотной области, проявившейся в виде характерного «хвоста». Измерения, проведенные с использованием ячейки Голя, показали, что интегральная мощность терагерцевого излучения составила 4.5 мкВт. Эффективность преобразования энергии фемтосекундного лазерного импульса в терагерцевое излучение достигла $8 \cdot 10^{-5}$.

Из рис. 4(a) видно, что ширина главного максимума, взятая на половине его высоты, составляет приблизительно 4000 фс. Шаг управляемой оптической линии задержки в экспериментальной установке равен 5 мкм, что соответствует 17 фс. Таким образом, временная форма терагерцевого импульса получена путем накопления выборки значений поля, объем которой равен 235 точек.

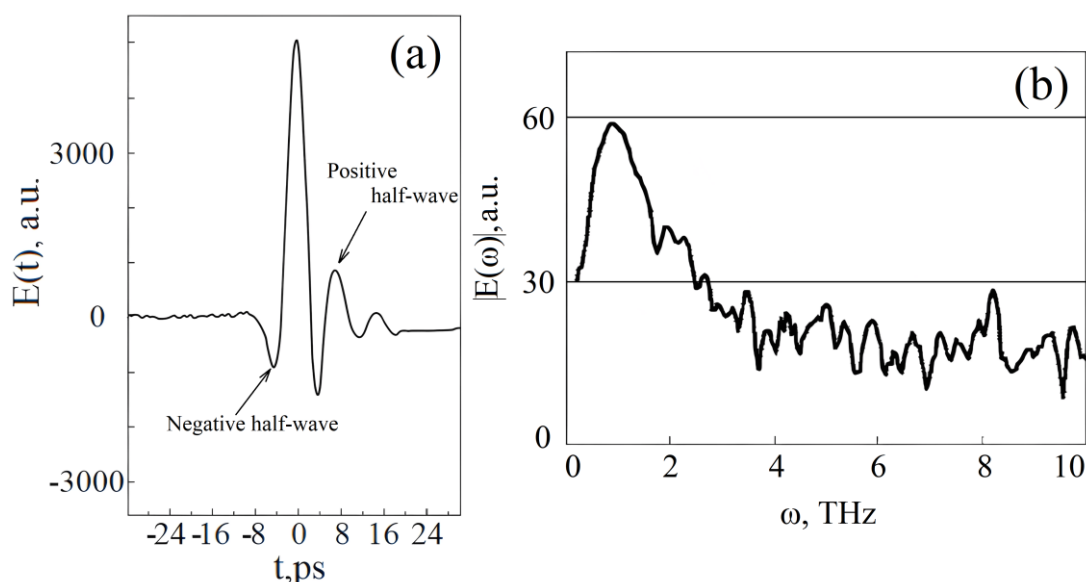


Рис. 4. (a) – Временная форма и (b) – частотный спектр фурье-амплитуды терагерцевого импульса, генерируемого фотопроводящей антенной на основе LT-GaN.

Проведенные холловские измерения показали, что в ФПА на основе LT-GaN подвижность и концентрация основных носителей заряда равны $\mu_H = 170 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $n_H = 5.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Сопротивление фотопроводящего слоя в темноте составило 90 МОм.

Исходя из общеизвестных тенденций, эффективная масса двумерных носителей m^* в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ должна быть меньше, чем в бинарном GaN, для которого и экспериментальные данные, и теоретические расчеты из первых принципов дают значения в диапазоне $0.18\text{--}0.24m_0$ (где m_0 – масса свободного электрона). Прямые измерения электронной эффективной массы в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x_{\text{In}} = 20\%$) дают с учетом флуктуаций состава In значения в диапазоне $0.194\text{--}0.197m_0$ [18]. Для более узкозонной КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x_{\text{In}} = 33\%$) авторы работы [19] приводят значения $0.204\text{--}0.205m_0$. Оценка времени релаксации фотовозбужденных носителей в ФПА на основе LT-GaN с использованием соотношения $\tau = \mu \cdot m^* / e$ дает значение 200 пс, что гораздо меньше по сравнению с аналогичным параметром в ZnSe и 6H-SiC. Такое время релаксации позволяет получить выигрыш в интенсивности излучения ФПА на основе LT-GaN в терагерцевом диапазоне. Более короткое время жизни

способствует уширению полосы пропускания устройства. Полоса пропускания ФПА на основе LT-GaN составила приблизительно 3 ТГц.

Согласно данным, представленным в работе [5], при мощности оптической накачки 19 мВт и напряжении смещения 30 В в ФПА на основе Si-GaAs достигается средняя мощность терагерцевого излучения 2.3 мкВт с эффективностью преобразования $1.2 \cdot 10^{-4}$. Аналогичные значения параметров были зарегистрированы в исследованиях ФПА на основе LT-GaAs и InGaAs [20, 2]. Проведенные измерения показали, что в случае LT-GaN наблюдается значительное увеличение как выходной мощности терагерцевого излучения, так и эффективности оптико-терагерцевого преобразования по сравнению с аналогичными параметрами в других материалах.

На рис. 5 представлены экспериментально полученные зависимости мощности терагерцевого излучения ФПА на основе LT-GaN от приложенного напряжения смещения и средней мощности фемтосекундного лазерного излучения.

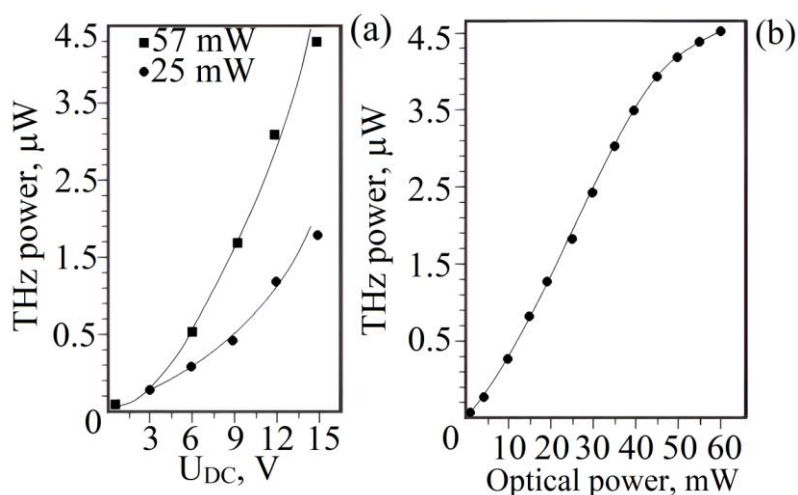


Рис. 5. Зависимость мощности терагерцевого излучения антенны на основе LT-GaN от (a) – напряжения смещения и (b) – от мощности оптической накачки при напряжении смещения равном 15 В/

Анализ экспериментальных кривых выявил суперлинейный характер зависимости мощности терагерцевого излучения от приложенного напряжения смещения в диапазоне 0-15 В. Полученная зависимость с высокой степенью точности описывается теоретической функцией вида $W \sim U_{DC}^b$, где при мощностях

оптической накачки 57 и 25 мВт показатель степени b принимает значения 1.8 и 1.5 соответственно.

Полученная зависимость мощности терагерцевого излучения от мощности оптической накачки также демонстрирует суперлинейный вид. Наблюдаемое насыщение сигнала при высоких уровнях накачки (выше ~50 мВт) обусловлено эффектом насыщения концентрации фотовозбужденных носителей в фотопроводящей антенне [5].

Заключение

В работе предложен новый материал LT-In_xGa_{1-x}N/GaN для генерации терагерцевых фотопроводящих антенн. В процессе создания структур использовалась техника металлоорганического химического осаждения. Исследуемые ФПА на основе LT-GaN выращивались на подложках Al₂O₃ с кристаллографическим направлением (0001). Мольная доля In выбрана равной 0.32. При напряжении смещения равном 15 В антенны на основе LT-In_xGa_{1-x}N/GaN излучали терагерцевые импульсы со средней мощностью 4.5 мкВт. Мощность оптической накачки Ti:сапфирового лазера составила 57 мВт при частоте следования 60 МГц. Конверсия мощности фемтосекундного импульса в мощность терагерцевого 0.008 %. Максимум излучения ФПА на основе LT-GaN находился вблизи 1.0-1.2 ТГц, а спектральная плотность мощности сосредоточена в области частот менее 2 ТГц. Зависимость мощности выходного терагерцевого излучения от напряжения смещения на ФПА продемонстрировала суперлинейный вид. При этом, зависимость мощности терагерцевого излучения от мощности оптической накачки имела вид кривой насыщения.

Работа вносит вклад в область физики полупроводников и генерации терагерцевого излучения, являясь шагом к созданию более эффективных источников и детекторов терагерцевого диапазона. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технологических параметров роста композитных структур и выходной мощности излучения приборов на их основе.

Благодарности

Авторы выражают благодарность проф., д.ф.-м.н., Г.Х. Китаевой за идею данной работы.

Финансирование: Данная работа была поддержана грантом 2025 года на проведение фундаментальных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами НИУ МГСУ, проект № 15-661/130. Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Литература

1. Yeritsyan H. N. et al. In-Situ Study of Non-Equilibrium Charge Carriers' Behavior under Ultra-Short Pulsed Electrons Irradiation in Silicon Crystal //Journal of Modern Physics. – 2019. – Т. 10. – №. 9. – С. 1125-1133. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/27/273001>
2. Burford N. M., El-Shenawee M. O. Review of terahertz photoconductive antenna technology //Optical Engineering. – 2017. – Т. 56. – №. 1. – С. 010901-010901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.1.010901>
3. Pashnev D. et al. Investigation of two-dimensional plasmons in grating-gated AlGaIn/GaN heterostructures with terahertz time domain spectrometer //2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2020. – С. 1-1. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370916>
4. Yang S. H. et al. 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Т. 4. – №. 5. – С. 575-581. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2342505>
5. Castro-Camus E., Alfaro M. Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review //Photonics Research. – 2016. – Т. 4. – №. 3. – С. A36-A42. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000A36>

6. Kuznetsov K. et al. Improved InGaAs and InGaAs/InAlAs photoconductive antennas based on (111)-oriented substrates //Electronics. – 2020. – Т. 9. – №. 3. – С. 495. <https://doi.org/10.3390/electronics9030495>
7. Frankel M. Y. et al. High-voltage picosecond photoconductor switch based on low-temperature-grown GaAs //IEEE transactions on electron devices. – 2002. – Т. 37. – №. 12. – С. 2493-2498. <https://doi.org/10.1109/16.64523>
8. Valdmanis J., Mourou G., Gabel C. Subpicosecond electrical sampling //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1983. – Т. 19. – №. 4. – С. 664-667. <https://doi.org/10.1117/12.966086>
9. Liu X. et al. All-fiber femtosecond Cherenkov radiation source //Optics letters. – 2012. – Т. 37. – №. 13. – С. 2769-2771. <https://doi.org/10.1364/OL.37.002769>
10. Zeng L. et al. Characteristics comparison of SiC and GaN extrinsic vertical photoconductive switches //IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2024. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2024.3372596>
11. Xu G. et al. Investigation of terahertz generation due to unidirectional diffusion of carriers in centrosymmetric GaTe crystals //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2010. – Т. 17. – №. 1. – С. 30-37. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2046628>
12. Saleem M. F. et al. Factors Affecting Terahertz Emission from InGaN Quantum Wells under Ultrafast Excitation //International Journal of Optics. – 2023. – Т. 2023. – №. 1. – С. 5619799. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.02398>
13. Greene B. I. et al. Picosecond pump and probe spectroscopy utilizing freely propagating terahertz radiation //Optics letters. – 1991. – Т. 16. – №. 1. – С. 48-49. <https://doi.org/10.1364/OL.16.000048>
14. Wang Z. et al. Non-destructive evaluation of thermally grown oxides in thermal barrier coatings using impedance spectroscopy //Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Т. 39. – №. 15. – С. 5048-5058. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.06.053>

15. Yoneda H. et al. High-power terahertz radiation emitter with a diamond photoconductive switch array //Applied Optics. – 2001. – Т. 40. – №. 36. – С. 6733-6736. <https://doi.org/10.1364/AO.40.006733>
16. Chizhov P. A. et al. Photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped single-crystal diamond //Optics Letters. – 2021. – Т. 47. – №. 1. – С. 86-89. <https://doi.org/10.1364/OL.446750>
17. Burmistrov E. R., Avakyants L. P. Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) of LED Heterostructures with Three and Five In x Ga1-x N/GaN Quantum Wells //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2023. – Т. 136. – №. 5. – С. 593-604. <https://doi.org/10.1134/S1063776123050072>
18. Eljarrat A. et al. Quantitative parameters for the examination of InGaN QW multilayers by low-loss EELS //Physical Chemistry Chemical Physics. – 2016. – Т. 18. – №. 33. – С. 23264-23276. <https://doi.org/10.1039/C6CP04493J>
19. O'leary S. K. et al. Steady-state and transient electron transport within the III-V nitride semiconductors, GaN, AlN, and InN: a review //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2006. – Т. 17. – С. 87-126. <https://doi.org/10.1007/s10854-006-5624-2>
20. Пономарев Д. С. и др. Электрические и тепловые свойства фотопроводящих антенн на основе In_xGa_{1-x}As (x > 0.3) с метаморфным буферным слоем для генерации терагерцового излучения //Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – №. 9. – С. 1267-1272. <http://doi.org/10.21883/FTP.2017.09.44893.8508>

Для цитирования:

Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П., Парфентьева Н.А., Гаврилин С.Н. Фотопроводящие терагерцевые антенны на основе GaN {LT-In_xGa_{1-x}N/GaN}. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.6>