

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 519.2:537.226;534.538

DOI: 10.17223/00213411/63/11/148

*Д.А. КОБЦЕВ, А.В. ТЯЖЕВ, И.И. КОЛЕСНИКОВА, Р.А. РЕДЬКИН***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕПРЕРЫВНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ \***

Разработана конструкция и изготовлены лабораторные образцы фотопроводящих дипольных антенн на основе SI-GaAs:Cr и LT-GaAs для генерации и детектирования терагерцового излучения. Экспериментально исследованы их рабочие характеристики в импульсном режиме и в режиме работы в качестве фотомиксеров.

**Ключевые слова:** GaAs, фотопроводящие дипольные антенны, терагерцовое излучение, фотомиксер.

Фотопроводящие дипольные антенны (ФДА) на основе полупроводниковых материалов являются перспективными источниками терагерцового излучения. Параметры неравновесных носителей заряда в полупроводниках имеют большое значение для работы устройств импульсной и непрерывной генерации и детектирования излучения терагерцового диапазона частот. Для эффективной генерации требуются материалы с малым временем жизни носителей заряда. Поэтому важной является разработка методов и технологий модификации полупроводниковых материалов. Для этого могут быть использованы соответствующие технологии: легирование из расплава, диффузионное легирование, ионная имплантация и облучение, температурная обработка [1, 2].

В настоящей работе были изготовлены и исследованы ФДА на основе SI-GaAs:Cr (полуизолирующий арсенид галлия, компенсированный хромом) и LT-GaAs (выращенный в низкотемпературном режиме). Арсенид галлия является наиболее часто используемым материалом для создания ФДА (под оптическую накачку 800 нм), так как он удовлетворяет всем необходимым требованиям: максимально высокое темновое сопротивление для обеспечения возможности подачи больших напряжений смещения, низкое время жизни неравновесных носителей заряда для обеспечения резкого спада фототока после возбуждения, высокая подвижность носителей заряда, которая способствует большим величинам фототока [3]. Кроме того, в некоторых случаях высокая подвижность носителей способствует быстрому уходу носителей заряда через контакты и определяет скорость изменения фототока. Ширина запрещенной зоны полупроводника также должна обеспечивать возможность фотовозбуждения на длине волны излучения используемого лазера. Созданные устройства были испытаны как импульсные терагерцовые источники и детекторы в условиях возбуждения фемтосекундными лазерными импульсами. ФДА также были испытаны в качестве терагерцовых фотомиксеров при возбуждении лазерными диодами. Важно отметить, что время жизни носителей заряда в LT-GaAs может составлять всего 100–500 фс, в то время как в SI-GaAs:Cr оно может быть ~ 1–100 нс в объеме.

Параметры генерируемого ФДА-излучения зависят не только от параметров активной среды, но и от топологии антенной структуры, параметров возбуждающего лазерного импульса, величины приложенного напряжения. Геометрия металлических контактов должна обеспечивать наибольшую напряженность поля смещения при отсутствии пробоя материала. Этому способствует большее отношение длины контактного выступа к его ширине. Большие размеры диполя способствуют более высокой амплитуде генерируемого излучения.

Для экспериментального исследования рабочих характеристик были выбраны антенны в виде логарифмической и периодической спиралей и полосковые антенны (рис. 1). Резонансные условия для полосковых антенн выбирались так, чтобы резонансные частоты попадали в полосы прозрачности атмосферы. Коэффициент преломления для GaAs составляет 3.4.

Первым материалом, на основе которого изготавливались ФДА, был SI-GaAs:Cr. Легирование хромом проводилось путем диффузии. Материал обладал следующими параметрами: удельное сопротивление не менее 500 МОм·см, подвижность носителей заряда электронов – 4000 см<sup>2</sup>/(В·с), дырок – 270 см<sup>2</sup>/(В·с). Время жизни неравновесных носителей заряда в данном материале состав-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-44-06001 и гранта Гельмгольца № HRSF-0004.

ляло  $\sim 20$  нс по данным электрофизических измерений. При таких временах жизни ожидалось получение наибольшей эффективности антенны в области низких терагерцовых частот.

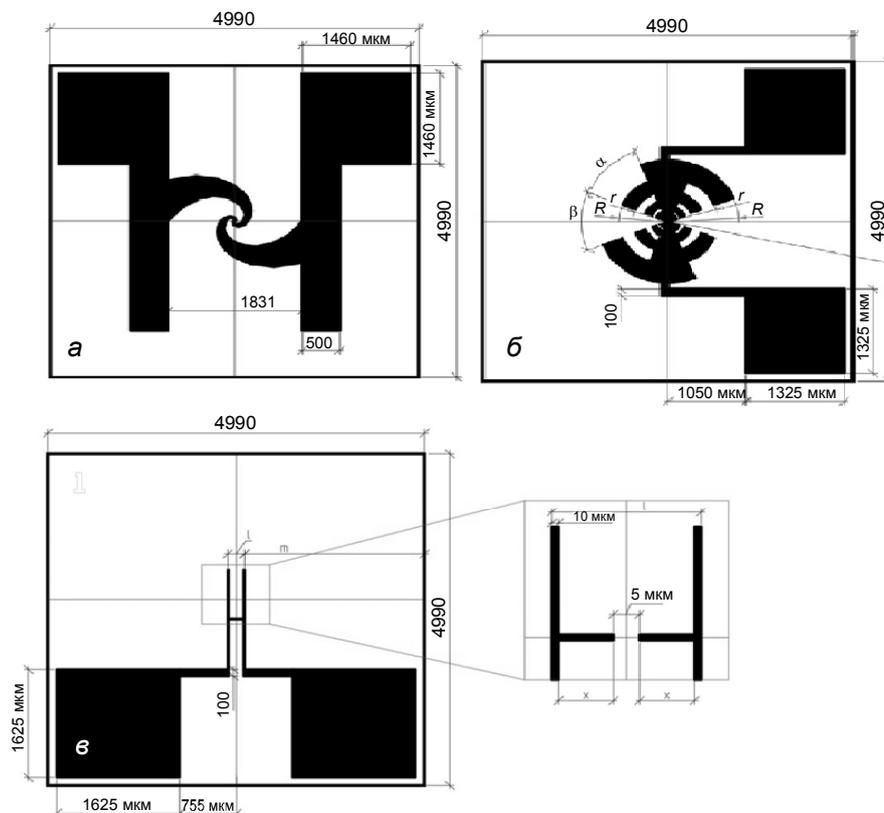
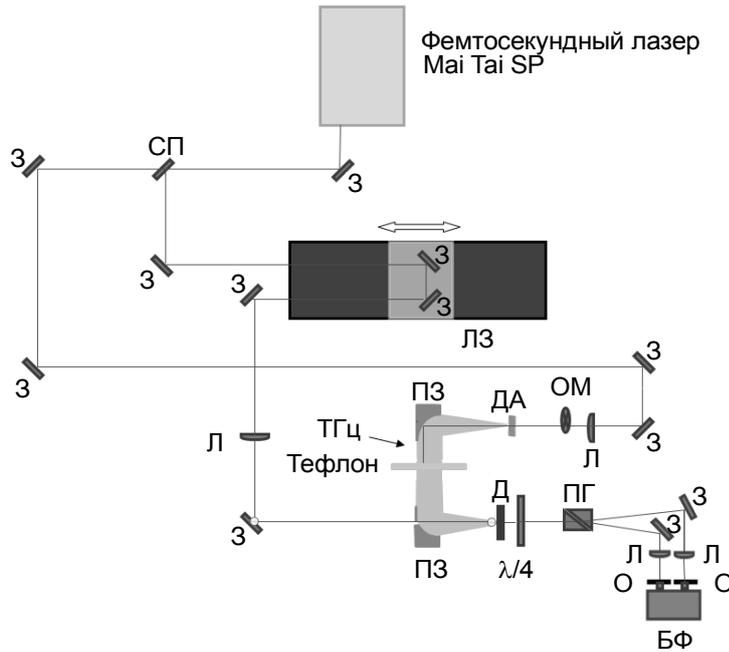


Рис. 1. Геометрические параметры фотопроводящих дипольных антенн: полосковая (а), логарифмически спиралевидная (б) и периодически спиралевидная (в)

Вторым материалом для изготовления ФДА являлся LT-GaAs («Ватор», Германия). Слой LT-GaAs толщиной 3 мкм был выращен на подложке из полуизолирующего GaAs. В данном материале время жизни, по данным производителя, составляет 1 пс. Такие параметры материала определяли ожидаемую эффективность устройств на его основе для генерации высоких терагерцовых частот (выше 1 ТГц) и детектирования терагерцовых импульсов, а также для работы в режиме фотомиксеров. Для изготовления ФДА пластины диаметром 2 дюйма из LT-GaAs и SI-GaAs:Cr подвергались химической обработке. Формирование топологий, показанных на рис. 1, проводилось с помощью фотолитографии. Фоторезист наносился на пластины с помощью установки Mask Aligner MJB4 («SUSS MicroTec», Германия). Металлические контакты из Cr/Al напылялись до толщин 0.05–1.2 мкм. Далее проводилось снятие маски фоторезиста и резка пластины на чипы. Для обеспечения надежной защиты рабочего кристалла от внешних механических воздействий, а также удобства проведения измерения и монтажа в металлический корпус была разработана и изготовлена монтажная плата. Плата изготавливалась из текстолита, контактные площадки – из иммерсионного золота. Для проведения измерения чипы клеились по краям на плату с помощью эпоксидного клея. Далее осуществлялась микроразварка контактных площадок на чипе к площадкам на плате с помощью установки ЭМ-4320У («Планар», Беларусь). Разводка с платы была осуществлена двумя алюминиевыми проводами.

Измерения проводились с использованием стандартной установки импульсной терагерцовой спектроскопии (рис. 2). Антенны возбуждались лазерными импульсами на длине волны 780 нм и длительностью 100 фс. Средняя оптическая мощность составляла  $\sim 100$  мВт, приложенное к антеннам напряжение – 9, 18 и 24 В. Волновые формы регистрировались с помощью электрооптического детектирования в кристалле ZnTe толщиной 1 мм.



Для всех ФДА наблюдается увеличение мощности излучения при увеличении напряжения смещения на антенне. Заметно увеличение мощности генерируемого излучения и с уменьшением длины антенны. С уменьшени-

Рис. 2. Схема экспериментальной установки : ЛЗ – линия задержки; З – зеркало; Л – линза; ПЗ – параболическое зеркало; ПГ – призма Глана; О – ослабитель;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка; БФ – балансные фотодиоды; ДА – дипольная антенна; Д – детектор (ZnTe); ОМ – оптический модулятор; СП – светоделительная пластина

ем длины полосковой ФДА (ПФДА) в целом высокочастотный край спектра генерации движется вверх по частотам. Для ПФДА длиной 176 мкм он едва доходит до частоты 2 ТГц (рис. 3, а), для антенны длиной 33 мкм край генерации приближается к частоте равной 3 ТГц (рис. 3, б). При дальнейшем уменьшении длины антенны наблюдается увеличение уровня генерируемой мощности терагерцового излучения. При этом расширения спектра генерации в область высоких частот не происходит. Для ряда образцов спектр генерации достигает диапазона 0.05–2.8 ТГц с эффективностью преобразования до  $1.8 \cdot 10^{-5}$ .

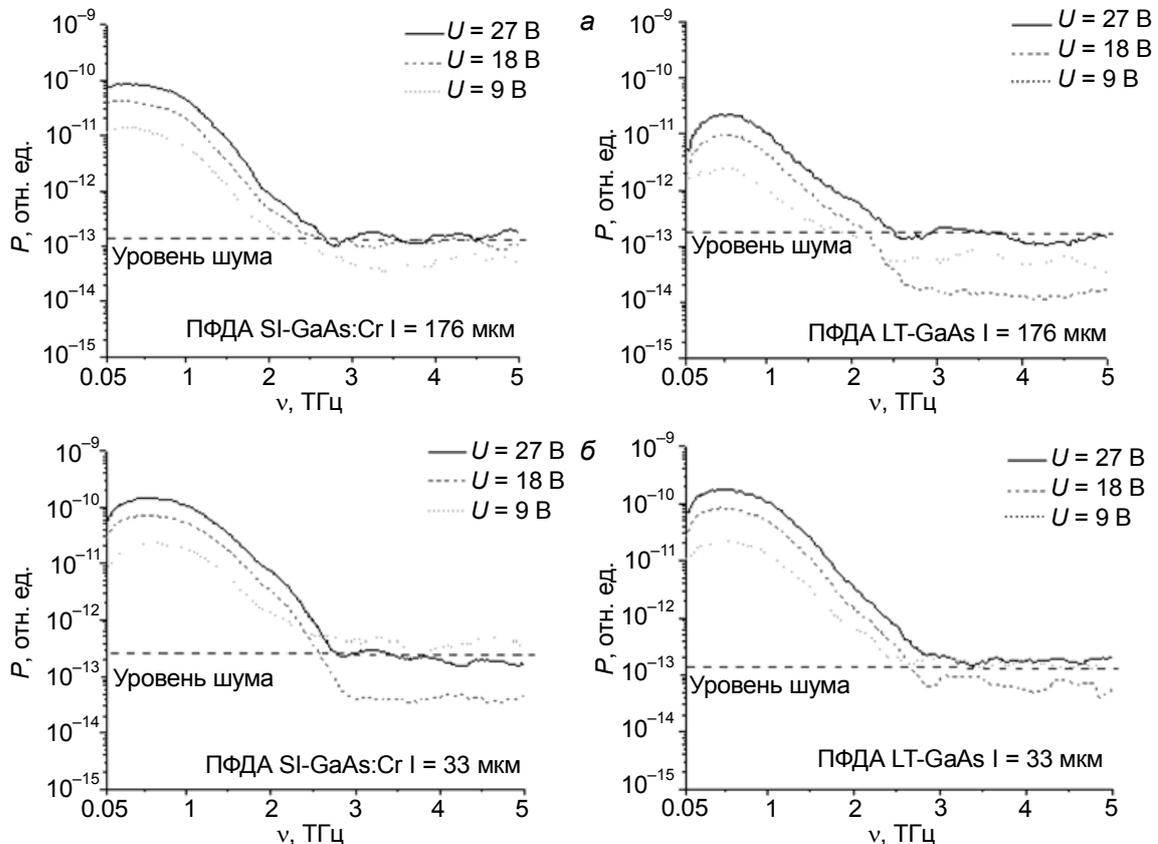


Рис. 3. Терагерцовые спектры, генерируемые ПФДА на основе SI-GaAs:Cr (слева) и LT-GaAs (справа) длиной 176 мкм (а) и 33 мкм (б) с идентичными геометрическими конфигурациями при возбуждении лазерными импульсами длительностью 100 фс при различных приложенных напряжениях

Наиболее широкий спектр генерации получен для периодически спиралевидной ФДА (ПСФДА) на основе LT-GaAs (рис. 4, а). Сигнал превышает уровень шума практически до самого края генерации. В случае логарифмически спиралевидной ФДА (ЛСФДА), наоборот, зарегистрирован наименьший уровень сигнала и положение высокочастотного края в районе 1 ТГц (рис. 4, б). Невысокий уровень сигнала в некоторой степени можно объяснить круговой поляризацией излучения, в то время как схема детектирования оптимизирована под детектирование линейной поляризации.

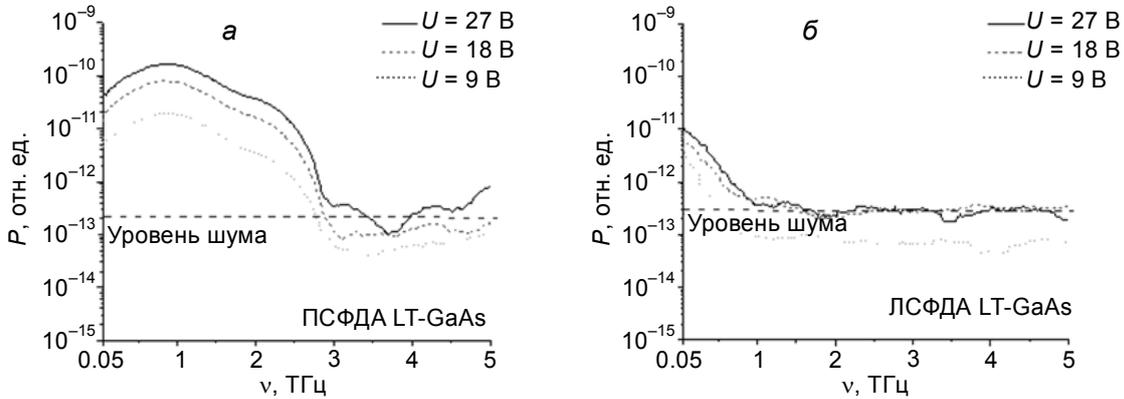


Рис. 4. Терагерцовые спектры, генерируемые ПСФДА на основе LT-GaAs (а) и ЛСФДА (б) с идентичными геометрическими конфигурациями при возбуждении лазерными импульсами длительностью 100 фс при различных приложенных напряжениях

В случае ПФДА на основе SI-GaAs:Cr наблюдаются зависимости спектров генерации терагерцового излучения от длины антенны и поданного напряжения, подобные полученным для генерации ПФДА на основе LT-GaAs. С уменьшением длины антенны спектр генерации незначительно смещается в высокочастотную область. Антенны длиной 220 и 176 мкм обладают заметно меньшей эффективностью преобразования по сравнению с более длинными антеннами (рис. 5, а). Для ПФДА на основе SI-GaAs:Cr длиной 52 мкм и менее наблюдаются сходные спектры генерации, превышающие уровень шума от 0.05 до 2.5 ТГц (рис. 5, б). При этом по эффективности преобразования антенны на основе SI-GaAs:Cr существенно не уступают ПФДА на основе LT-GaAs. Последние обладают несколько более широким спектром генерации для отдельных топологий антенн.

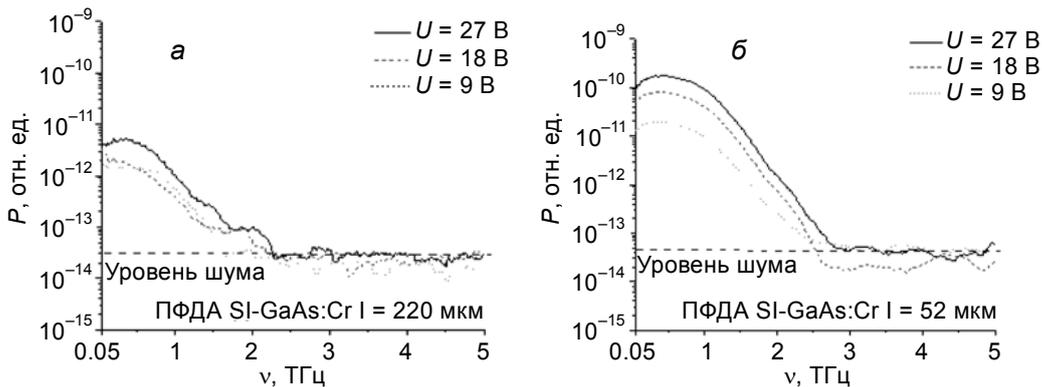


Рис. 5. Терагерцовые спектры, генерируемые ПФДА на основе SI-GaAs:Cr длиной 220 мкм (а) и 52 мкм (б) с идентичными геометрическими конфигурациями при возбуждении лазерными импульсами длительностью 100 фс при различных приложенных напряжениях

Для ПСФДА на основе SI-GaAs:Cr спектр генерации заметно уже, чем для аналогичного устройства на основе LT-GaAs. Для ЛСФДА, наоборот, спектр генерации на основе SI-GaAs:Cr существенно лучше, чем для ЛСФДА на основе LT-GaAs.

Для проверки работы ФДА в режиме детектирования спектры терагерцовых импульсов генерировались от поверхности кристалла InAs при возбуждении лазером с длительностью импульса 100 фс и центральной длиной волны 780 нм, детектирование проводилось дипольными антеннами

на LT-GaAs. Средняя мощность излучения, приходящегося на фотовозбуждение приемной ФДА, составляла 30 мВт. В результате проведенных измерений было обнаружено, что наиболее эффективным детектором среди изготовленных ФДА является ПФДА на основе LT-GaAs длиной 23 мкм. Для ПФДА эффективность детектирования монотонно уменьшается с увеличением длины антенны (рис. 6). ПСФДА в качестве детектора обладает средней эффективностью, тогда как наименее эффективным приемником является ЛСФДА.

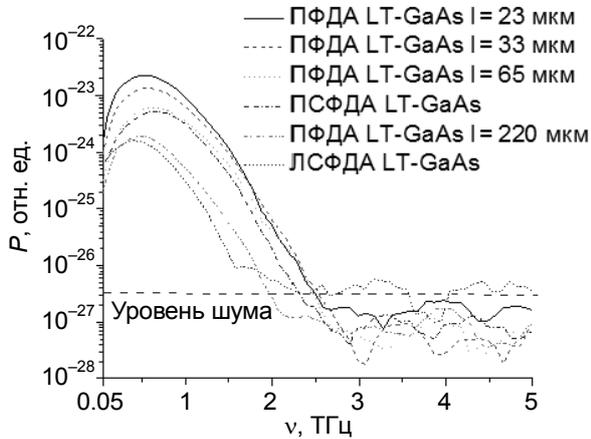


Рис. 6. Спектры терагерцовых импульсов, детектированных в ФДА на основе LT-GaAs и генерированных от поверхности кристалла InAs при возбуждении лазером

ние от двух лазерных диодов, которое совмещалось с помощью системы из четырех зеркал и светоделительной пластины. Обе светоделительные пластины делили мощность падающего излучения в отношении 1:1. Часть излучения подавалось на ПСФДА на основе LT-GaAs, которая использовалась в качестве генератора. Она позволяла получить самый широкий спектр излучения. В результате в ее контактном зазоре формировались биения интенсивности засветки на частоте, равной разностной частоте излучения диодов. В качестве приемника использовалась полосковая фотопроводящая дипольная антенна длиной 23 мкм, которая являлась наиболее эффективным детектором терагерцовых импульсов. Сканирование спектров осуществлялось с помощью передвижения линии задержки с шагом 10 мкм.

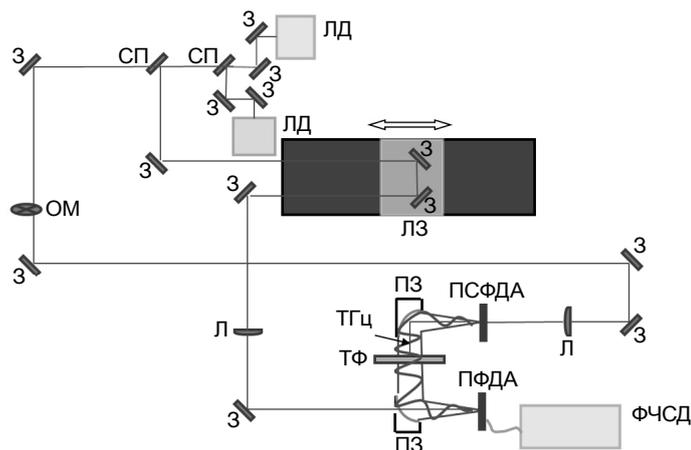


Рис. 7. Схема установки для измерения спектров генерации терагерцового излучателя на основе фотомиксера: ЛЗ – линия задержки; З – зеркало; Л – линза; ПЗ – параболическое зеркало; ОМ – модулятор; СП – светоделительная пластина; ЛД – лазерный диод; ФЧСД – фазочувствительный синхронный детектор; ТФ – тефлоновый фильтр

Далее, используя преобразование Фурье, нами были рассчитаны спектры излучения фотомиксера (рис. 8).

Обнаружено, что SI-GaAs:Cr не подходит для создания детекторов, это связано с большим временем жизни неравновесных носителей заряда в материале. Носители заряда, генерируемые в детекторе стробирующим лазерным импульсом, могут не успевать полностью рекомбинировать за время между приходом соседних лазерных импульсов (около 12 нс). В связи с этим при фиксированной задержке между приходом на ФДА на основе SI-GaAs:Cr терагерцового и зондирующего лазерного импульсов наблюдаются осцилляции тока через антенну. Это не позволяет осуществлять сканирование временных форм терагерцовых импульсов.

Для проверки возможности реализации схемы фотомиксера были использованы ПСФДА на основе LT-GaAs. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 7. В этом случае вместо фемтосекундного лазера использовалось излуче-

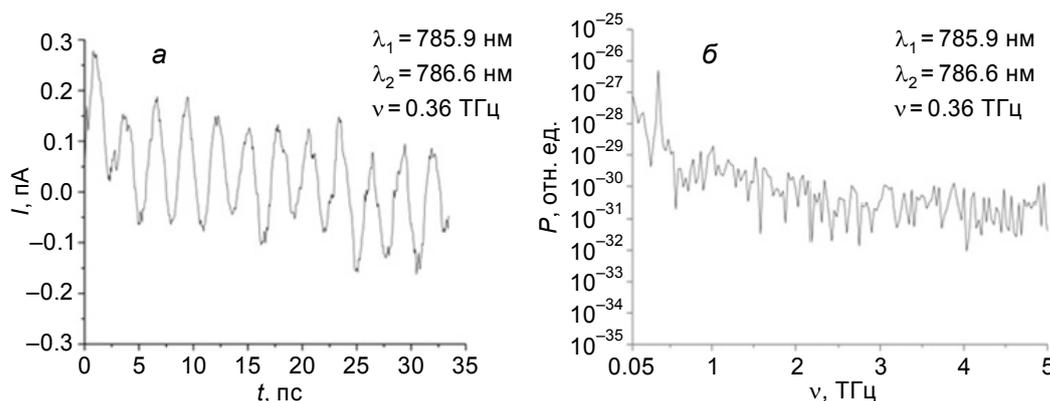


Рис. 8. Временная форма сигнала (а) и спектр генерации (б) терагерцового излучения с использованием фотомиксера

В работе проведена разработка конструкции и изготовлены тестовые образцы фотопроводящих дипольных антенн на основе SI-GaAs:Cr и LT-GaAs для генерации и детектирования терагерцового излучения. Экспериментально исследованы их рабочие характеристики в импульсном режиме и в режиме работы в качестве фотомиксеров. В результате проведенных исследований установлено, что разработанные ФДА как на основе LT-GaAs, так и на основе SI-GaAs:Cr позволяют получать спектры генерации терагерцового излучения в диапазоне 0.05–2.8 ТГц. Наибольшие эффективности преобразования наблюдаются для полосковых ФДА длиной 65 мкм и менее, а также для ПСФДА. Время жизни неравновесных носителей заряда важно для работы ФДА в качестве детекторов терагерцовых импульсов и в этом случае не должно превышать десятков пикосекунд. Созданные ФДА на основе SI-GaAs:Cr не могут применяться в качестве терагерцовых детекторов. Для ПФДА на основе LT-GaAs эффективность детектирования растет с уменьшением длины антенны. Продемонстрирована возможность генерации и детектирования излучения фотомиксерами на основе изготовленных ФДА как в области низких терагерцовых частот (0.24 и 0.36 ТГц), так и в области более высоких частот (1.22 ТГц). Реализован терагерцовый спектрометр на основе фотомиксеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh Abhishek, Pal Sanjoy, Surdi Harshad, et al. // Appl. Phys. Lett. – 2014. – V. 104. – P. 063501. DOI: 10.1063/1.4864623.
2. Deshmukh Prathmesh, Mendez-Aller M., Singh Abhishek, et al. // Opt. Lett. – 2015. – V. 40. – No. 19. – P. 4540. DOI: 10.1364/OL.40.004540.
3. Krotkus A. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – V. 43. – P. 273001.

Поступила в редакцию 20.11.2019.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

**Кобцев** Даниил Александрович, техник науч. лаб. терагерцовых исследований НИ ТГУ, e-mail: Danbers27@gmail.com;  
**Тяжев** Антон Владимирович, зав. лаб. детекторов ионизирующего излучения центра ПТМ ТГУ, e-mail: antontyazhev@mail.ru;  
**Колесникова** Ирина Игоревна, мл. науч. сотр. центра ПТМ ТГУ, e-mail: varsharova@mail.ru;  
**Редькин** Руслан Александрович, аспирант, мл. науч. сотр. центра ПТМ ТГУ, e-mail: ruseg89@mail.ru.