

УДК 621.382

Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения

Березная С. А., Кобцев Д. А., Саркисов С. Ю.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
пр. Ленина 36, г. Томск, Российская Федерация
atom@mail.tsu.ru, danbers27@gmail.com, sarkisov@mail.tsu.ru*

Получено: 27 февраля 2022 г.

Отрецензировано: 12 марта 2022 г.

Принято к публикации: 14 марта 2022 г.

Аннотация: *Исследованы процессы генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения фотопроводящими дипольными антеннами на основе полупроводниковых материалов с малым и большим временем жизни носителей заряда. Проведено моделирование процессов генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения. Изучено влияние параметров активной полупроводниковой среды на генерационные и детектирующие характеристики фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs и SI-GaAs:Cr.*

Ключевые слова: *терагерцовая спектроскопия, GaAs, время жизни, фотопроводящая дипольная антенна, фотомиксер.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Березная С. А., Кобцев Д. А., Саркисов С. Ю. Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 4. С. 308—321.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Березная, С. А. Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения / С. А. Березная, Д. А. Кобцев, С. Ю. Саркисов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 308—321.

Photoconductive Dipole Antennas Based on Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection

S. A. Bereznaya, D. A. Kobtsev, and S. Yu. Sarkisov

*National Research Tomsk State University
Lenin ave. 36, Tomsk, Russian Federation
atom@mail.tsu.ru, danbers27@gmail.com, sarkisov@mail.tsu.ru*

Received: December 28, 2021

Peer-reviewed: January 12, 2022

Accepted: January 14, 2022

Abstract: *CW and pulsed terahertz generation and detection by photoconductive dipole antennas based on semiconductor materials with short and long charge carrier lifetimes has been studied. The modeling of pulsed and CW terahertz generation has been carried out. The influence of the parameters of the active semiconductor medium on the generation and detection characteristics of photoconductive dipole antennas has been studied.*

Key words: *terahertz spectroscopy, GaAs, charge carrier lifetime, photoconductive dipole antenna, photomixer.*

For citation (IEEE): S. A. Bereznaya et al. “Photoconductive Dipole Antennas Based on Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 308–321, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Фотопроводящие полупроводниковые структуры широко используются для генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения при возбуждении их лазерным излучением, как импульсным, так и непрерывным. Фотопроводящие дипольные антенны (ФДА) на основе таких структур начали применяться в качестве источников терагерцового излучения в схемах импульсной терагерцовой спектроскопии 30 лет назад [1]. К настоящему времени полученные результаты исследований влияния свойств активной среды и конфигурации дипольных антенн на их рабочие характеристики позволили создать коммерческие ФДА с высокими характеристиками.

Процессы, наблюдаемые в дипольной антенне, являются быстропротекающими и оказывают комплексное влияние на эффективность генерации и детектирования. Характеристики дипольных антенн зависят от параметров активной полупроводниковой среды, параметров фотовозбуждающего лазерного излучения, геометрии металлической дипольной структуры, приложенного напряжения смещения и фокусирующей оптики [2—4].

Важнейшими параметрами полупроводниковой среды являются ее удельное сопротивление, время жизни неравновесных носителей заряда и их подвижность [4—6]. Время жизни влияет на детектирующую способность антенн, и, в меньшей мере, на способность к генерации и должно быть достаточно малым для обеспечения резкого спада фототока. Большая величина фототока наблюдается в материалах с высокой подвижностью носителей заряда. Также в некоторых случаях высокая подвижность способствует экстракции носителей зарядов в металлическую структуру через контактный зазор. Параметр темнового сопротивления определяет предельное напряжение смещения. Геометрия металлических контактов должна обеспечивать максимальное значение напряженности поля смещения в контактном зазоре при отсутствии пробоя полупроводникового материала.

Способность генерировать непрерывное терагерцовое излучение является важным свойством фотопроводящей дипольной антенны. В этом случае возбуждение активной среды происходит с помощью двух непрерывных лазерных источников. Частоты этих лазеров должны отличаться на величину до нескольких терагерц. При таком способе фотовозбуждения фотопроводящую дипольную антенну называют фотомиксером. В настоящее время генераторы непрерывного терагерцового излучения на основе фотомиксеров имеют небольшие размеры и используют в качестве накачки лазерные диоды [7].

2. Фотопроводящие дипольные антенны

Фотопроводящая дипольная антенна представляет собой оптоэлектронный ключ Астона [8], который конструктивно состоит из полупроводникового материала с нанесенной на его поверхность металлической дипольной структурой определенной формы с контактными зазорами порядка 1—5 мкм. В настоящей работе в качестве основы для антенн были выбраны два типа высокоомных арсенид-галлиевых структур: *LT-GaAs* и полупроводящий *SI-GaAs:Cr*. Запрещенная зона обоих материалов составляет 1,42 эВ, что позволяет использовать для фотовозбуждения импульсные и непрерывные лазерные источники с длиной волны ~780 нм. Испол-

зовался *LT-GaAs* производства компании *Batop*, Германия. Этот материал обладает субпикосекундным временем жизни неравновесных носителей заряда, что делает ФДА на его основе эффективными для генерации высоких терагерцовых частот (>1 ТГц) и детектирования терагерцового излучения. Второй материал *SI-GaAs:Cr* обладает подвижностью носителей зарядов порядка $4000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Время жизни в этом материале достигает 10 нс. На основе каждого материала было изготовлено три типа ФДА: полосковая (ПФДА), в виде периодической спирали (ПСФДА) и в виде логарифмической спирали (ЛСФДА) (рис. 1).

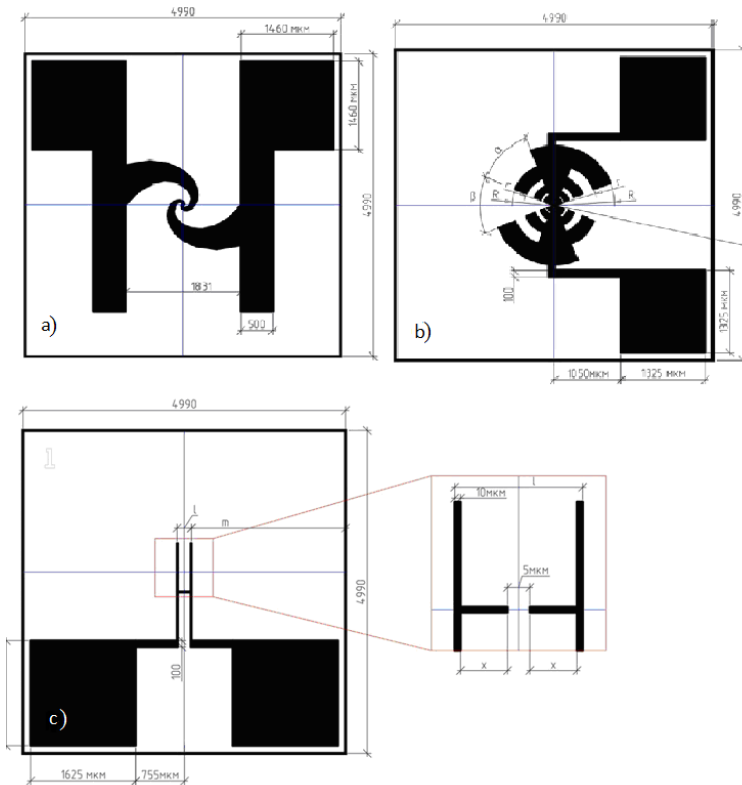


Рис. 1. Топологии исследуемых ФДА: (а) — ФДА в виде логарифмической спирали, (b) — ФДА в виде периодической спирали, (c) — полосковая ФДА. Размеры представлены в микрометрах.

Fig. 1. Topologies of the investigated photoconductive dipole antennas: (a) – photoconductive dipole antenna in the form of a logarithmic spiral, (b) – photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral, (c) – stripe photoconductive dipole antenna. Dimensions are in micrometers

ПФДА были изготовлены в конфигурациях с различным длинами антенны от 176 до 23 мкм. Фотовозбуждение в контактном зазоре в импульсном режиме осуществляется фемтосекундным лазерным импульсом с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны. В засвеченной области возникает резкое увеличение концентрации неравновесных носителей заряда. Носители заряда разделяются и ускоряются приложенным к металлической структуре напряжением смещения, и в зазоре образуется переменный ток $j(t)$. При соответствующей скорости изменения фототока в пространство излучается электромагнитный импульс в терагерцовом диапазоне частот.

В режиме детектирования на металлическую структуру ФДА не подается напряжение смещения, но регистрируется протекающий через нее ток. Фототок возникает под действием электрического поля падающей на антенну терагерцовой волны. Измерение тока происходит подключенным к металлической дипольной структуре синхронным токовым измерителем-усилителем.

3. Импульсный режим генерации ФДА

Исследование спектров генерации изготовленных фотопроводящих дипольных антенн из $SI-GaAs:Cr$ и $LT-GaAs$ производилось с использованием установки импульсной терагерцовой спектроскопии во временной области (ИТС) [6]. Фотовозбуждение активной среды производилась импульсным лазерным излучением с длиной волны 780 нм и длительностью импульса 100 фс. Средняя оптическая мощность составляла 100 мВт. На антенну подавалось напряжение смещения, равное 9, 18 и 27 В. Регистрация временной формы терагерцового импульса производилась электрооптическим детектором на основе балансных фотодиодов и электрооптического кристалла $ZnTe$. Для увеличения эффективности детектирования использовалась модуляция терагерцового сигнала на частоте 1,5 кГц. Далее из временной формы сигнала при помощи преобразования Фурье получался спектр генерации ФДА (рис. 2).

Для всех изготовленных ФДА характерным является увеличение мощности генерации при увеличении подаваемого напряжения смещения. Полосковые ФДА как на основе $SI-GaAs:Cr$, так и на основе $LT-GaAs$ показали тенденцию к увеличению мощности генерации и к расширению спектра генерации при уменьшении длины антенны (Рис. 2). ПФДА с максимальной длиной, равной 176 мкм, имеет ширину спектра генерации до 2 ТГц (Рис 2а, 2б). Напротив, антенна длиной 33 мкм генерирует терагерцовое излучение с частотой уже до 2,8 ТГц. Далее с уменьшением длины антенны происходит только увеличение мощности генерируемого излучения без расширения спектра генерации.

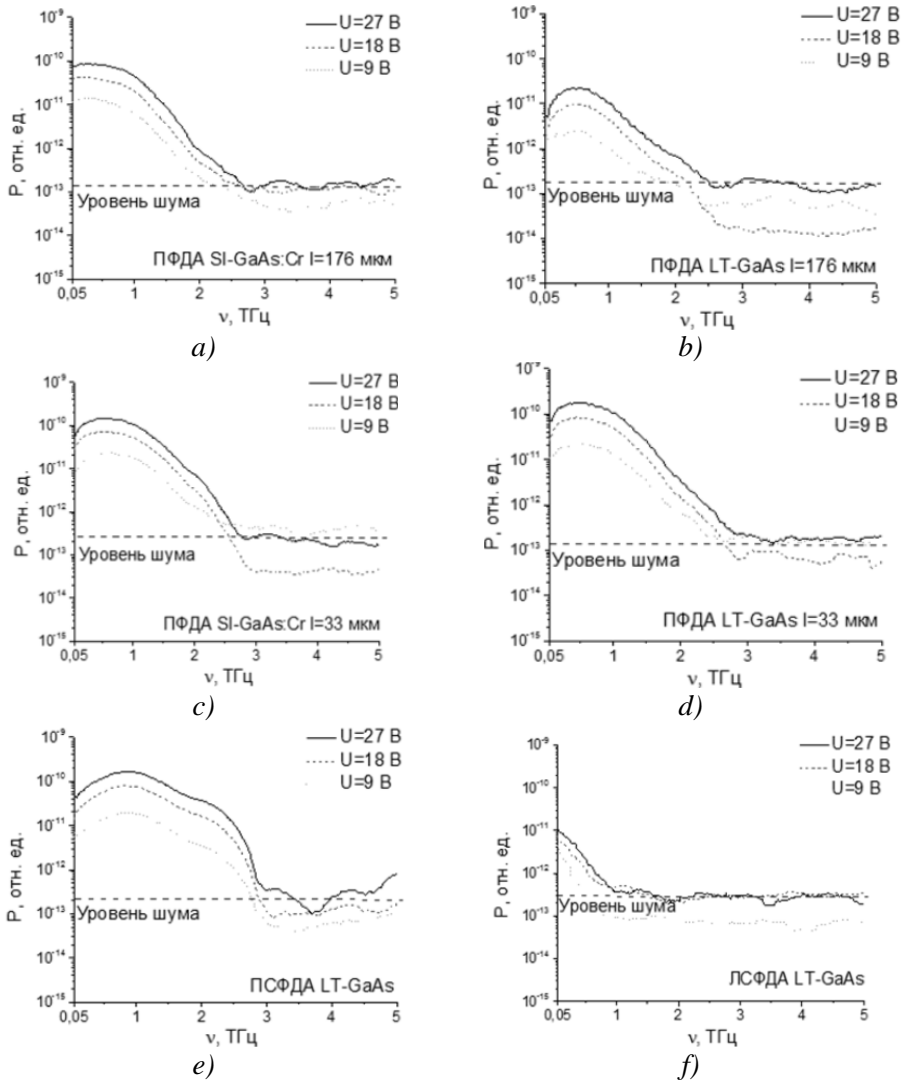


Рис. 2. Спектры терагерцового излучения, генерируемого ПФДА на основе *SI-GaAs:Cr* (a, c) и *LT-GaAs* (b, d) длиной 176 мкм (a), (b) и 33 мкм (c), (d), ПСФДА (e) и ЛСФДА (f) на основе *LT-GaAs* при возбуждении лазерными импульсами длительностью 100 фс при различных приложенных напряжениях.

Fig. 2. Spectra of terahertz radiation generated by a stripe photoconductive dipole antenna based on *SI-GaAs:Cr* (a, c) and *LT-GaAs* (b, d) with a length of 176 μm (a), (b) and 33 μm (c), (d), a photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral (e) and a photoconductive dipole antenna in the form of a logarithmic spiral (f) based on *LT-GaAs* when excited by laser pulses with a duration of 100 fs at various applied voltages

Самый широкий спектр генерации наблюдается для ПСФДА на основе *LT-GaAs* (Рис 2e). Сигнал в этом случае существенно превышает уровень шума до самого края генерации. Напротив, для ЛСФДА на основе обоих материалов получены наиболее узкие спектры генерации. Край спектра генерации едва доходит до 1 ТГц. Отчасти, такой результат объясняется круговой поляризацией терагерцовой волны, притом, что схема электрооптического детектирования оптимизирована для линейно поляризованного излучения.

4. Генерация непрерывного терагерцового излучения фотомиксерами на основе фотопроводящих дипольных антенн

Схема для исследования генерации непрерывного терагерцового излучения фотомиксерами на основе *SI-GaAs:Cr* и *LT-GaAs* ФДА схожа со схемой для генерации импульсного терагерцового излучения. В этом случае импульсный источник лазерного излучения заменяется на два непрерывных лазерных диода, частоты которых отличались на 0,36 ТГц и 1,22 ТГц. Излучение диодов совмещалось с помощью системы зеркал и светоделительной пластины. Светоделительная пластина делила мощность падающего лазерного излучения на две части в соотношении 1:1. Одна из частей использовалась для возбуждения ПСФДА-генератора на основе *LT-GaAs*, т. к. эти антенны имели самый широкий спектр генерации импульсного терагерцового излучения. Вторая часть использовалась для накачки ПФДА-детектора на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм. В результате чего в антенне-генераторе возникали биения интенсивности засветки с частотой, равной разностной частоте лазерных источников. Сканирование производилось при смещении линии задержки с шагом 10 мкм. Таким образом, были получены временные формы терагерцовой волны. Далее при помощи преобразования Фурье получались спектры генерации непрерывного терагерцового излучения фотомиксеров (рис. 3).

Выяснено, что изготовленные ФДА на основе *SI-GaAs:Cr* не подходят для создания фотомиксеров. Большое значение времени жизни неравновесных носителей зарядов не позволяет обеспечить необходимый для генерации спад тока в контактном зазоре, который должен повторять огибающую интенсивности оптической засветки.

5. Детектирование терагерцового излучения

Для исследования детектирующих характеристик в качестве генератора использовался кристалл *InAs*, а сама генерация происходила от поверхности кристалла при его возбуждении фемтосекундными лазерными

импульсами. В качестве детекторов использовались изготовленные антенны, включенные в схему с синхронным токовым измерителем-усилителем SR-830 (*Stanford Research*, США).

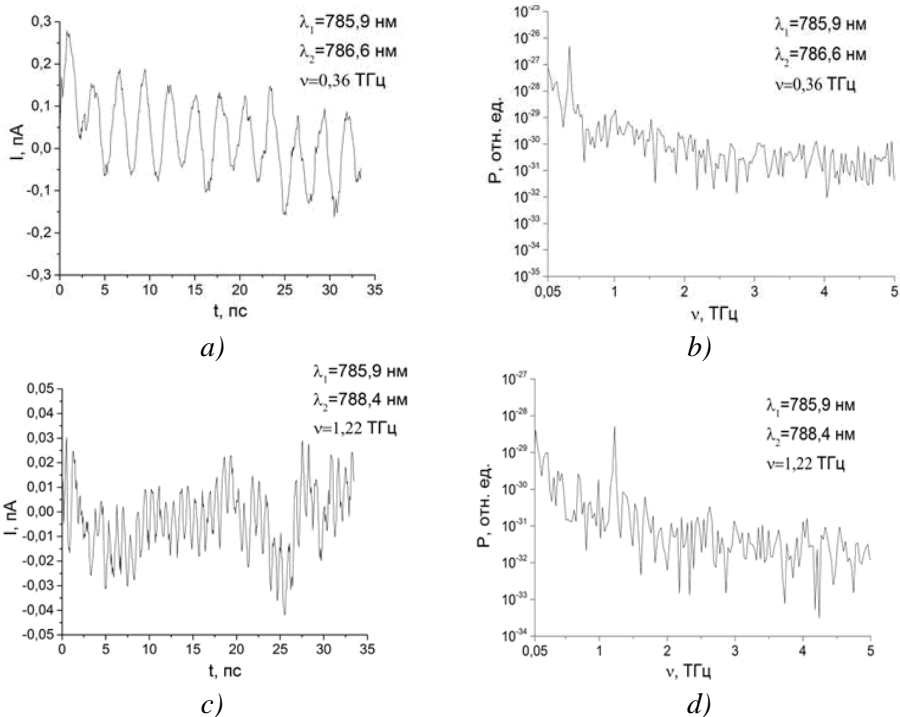


Рис. 3. Временные и спектральные формы терагерцового излучения, генерируемого ПСФДА в режиме фотомиксера при поданном напряжении смещения 45 В при возбуждении излучением лазерных диодов на длинах волн $\lambda_1 = 785,9$ нм и $\lambda_2 = 786,6$ нм (a) и (b); $\lambda_1 = 785,9$ нм и $\lambda_2 = 788,4$ нм (c) и (d). Детектирование осуществлялось ПСФДА на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм.

Fig. 3. Temporal and spectral forms of terahertz radiation generated by a photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral in the photomixer mode at a bias voltage of 45 V when excited by laser diode radiation at wavelengths $\lambda_1 = 785.9$ nm and $\lambda_2 = 786.6$ nm (a) and (b); $\lambda_1 = 785.9$ nm and $\lambda_2 = 788.4$ nm (c) and (d). Detection was carried out by a stripe photoconductive dipole antenna based on *LT-GaAs* with a length of 23 μm

Обнаружено, что наиболее эффективным детектором терагерцового излучения является полосковая ФДА на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм — уровень сигнала, регистрируемого токовым измерителем, в этом случае составил 56 пА (максимальный ток, соответствующий главному максимуму детектируемого терагерцового импульса). Для антенн наибольшей длины регистрируемый сигнал падает до 15 пА. Для ЛСФДА и ПСФДА на

основе LT-GaAs регистрируемые сигналы составляли 13 пА и 30 пА соответственно.

Обнаружено, что изготовленные на основе *SI-GaAs:Cr* антенны не пригодны для работы в качестве детекторов терагерцового излучения. Большое значение времени жизни неравновесных носителей зарядов, порядка 10 нс, не позволяет в полной мере рекомбинировать электронно-дырочным парам до прихода на детектор следующего возбуждающего лазерного импульса. В связи с этим при фиксированном времени задержки падающих на антенну терагерцового и оптического импульсов наблюдаются осцилляции тока через антенну. Это делает невозможным регистрацию временных форм терагерцовых импульсов.

6. Моделирование генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения

Моделирование проводилось в среде *MathCad*. Модель являлась упрощенной и не учитывала диффузию. Материал помещался в постоянное ускоряющее электрическое поле, генерация неравновесных носителей заряда была обусловлена лазерным импульсом. Упрощение также заключалось в пренебрежении наличием контактных барьеров и исключением уменьшения неравновесной концентрации за счет ухода носителей заряда через контакты.

Напряженность терагерцового поля $E_{\text{ТГц}}(t)$ пропорциональна скорости изменения плотности тока $j(t)$:

$$E_{\text{ТГц}}(t) \sim \frac{\partial j(t)}{\partial t} \quad (1)$$

Плотность тока под действием ускоряющего электрического поля $E(t)$ записывается следующим образом:

$$j(t) = en(t)v(t) \quad (2)$$

где $v(t)$ — скорость носителей заряда, $n(t)$ — концентрация неравновесных носителей заряда, e — заряд электрона.

Ввиду различных источников фотовозбуждения в непрерывном и импульсном режимах работы, концентрация носителей заряда определялась уравнениями непрерывности с различными генерационными членами. Для импульсного режима использовался импульсный лазерный источник и уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + G(t) \quad (3)$$

где $G(t)$ — скорость генерации носителей заряда, пропорциональная временному профилю интенсивности лазерного импульса длительностью 100 фс, τ_c — время жизни неравновесных носителей заряда

$$G(t) = \exp\left(-4 \frac{(t-100-\tau/2)^2}{\tau^2}\right) / \int_0^\infty \exp\left(-4 \frac{(t-100-\tau/2)^2}{\tau^2}\right) dT \cdot \frac{\lambda \cdot P_{\text{лаз}} \cdot 4}{N_{\text{имп}} \cdot h \cdot c \cdot \pi \cdot d^2 \cdot d_\alpha}. \quad (4)$$

В случае непрерывного режима генерации для накачки использовались два непрерывных лазерных источника, вследствие этого уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + \frac{N_{ph}(t)}{S d_\alpha} \quad (6)$$

где, $N_{ph}(t)$ — число носителей заряда, генерируемых в единицу времени

$$N_{ph}(t) = \frac{S c \epsilon_0 E^2(t)}{h \nu}. \quad (7)$$

Здесь $E(t)$ — напряженность поля суммарного лазерного излучения двух непрерывных лазерных источников с длинами волн λ_1 и λ_2 , и мощностями P_1 и P_2 .

$$E(t) = \sqrt{\frac{2P_1}{c d^2 \epsilon_0}} \sin\left(\frac{2\pi c t}{\lambda_1}\right) + \sqrt{\frac{2P_2}{c d^2 \epsilon_0}} \sin\left(\frac{2\pi c t}{\lambda_2}\right) \quad (8)$$

Уравнение для скорости носителей заряда записывается в виде

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau_s} + \frac{e}{m^*} E_{эл}(t), \quad (9)$$

где $E_{эл}$ — напряженность электрического поля в контактном зазоре:

$$E_{эл} = \frac{U}{d} - \frac{P(t)}{\epsilon}. \quad (10)$$

Здесь ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, U — напряжение смещения, d — величина контактного зазора, g — геометрический фактор. Также учтено экранирование встроенного поля за счет поляризации среды $P(t)$:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau_c} + n(t) \cdot v(t) \cdot e. \quad (11)$$

Система уравнений и (3—11) решалась численно при различных значениях параметров τ_c (500, 1000, 2000, 5000, 500000 пс), τ_s (3, 30, 57, 100, 1500 фс), U (8, 18 и 27 В), $P_{\text{лаз}}$ (2, 20, 200, 2000 мВт). В расчетах использовались параметры лазерного излучения ($N_{\text{имп}} = 84 \cdot 10^6$, $\lambda = 780$ нм). Полученные зависимости $v(t)$ и $n(t)$ использовались для расчета плотности тока по формуле (2). Полученные зависимости дифференцировались, далее проводилось преобразование Фурье, что давало временной и спектральный профиль электрического поля терагерцовой волны $E_{ТГц}(t)$.

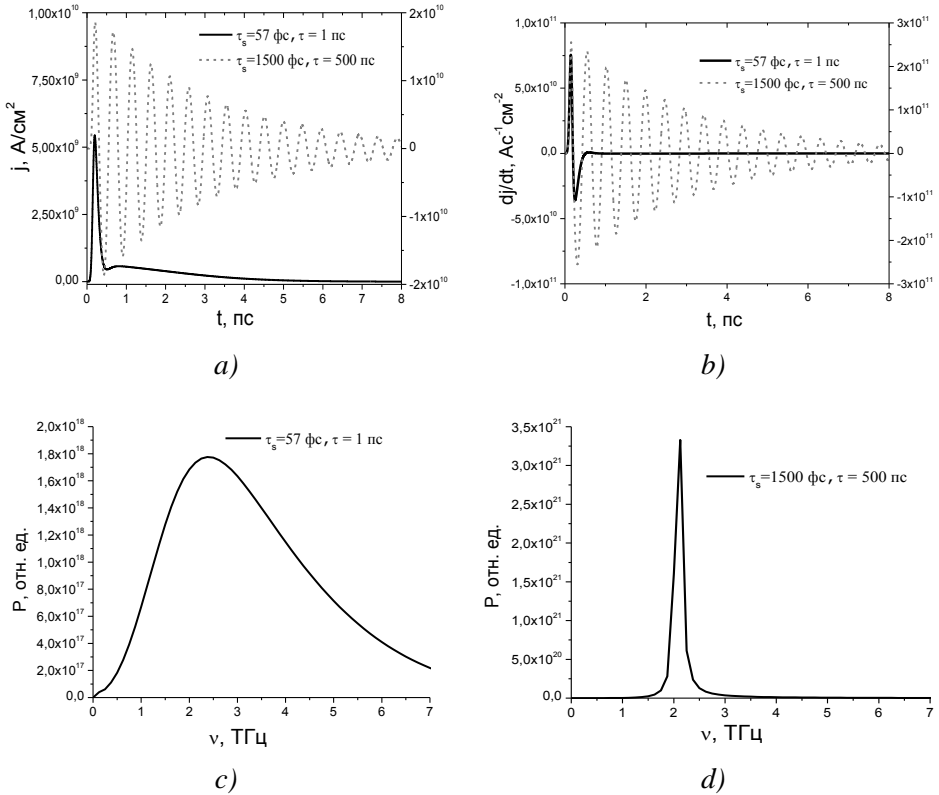


Рис. 4. Результаты моделирования генерации импульсного терагерцового излучения: (a) плотность тока, (b) — производная плотности тока по времени, (c) и (d) — спектр генерируемого терагерцового излучения.

Fig. 4. Simulation results of generation of pulsed terahertz radiation: (a) current density, (b) time derivative of current density, (c) and (d) spectrum of generated terahertz radiation

Для антенн, работающих в импульсном режиме, при больших значениях времени релаксации для тока ($\tau_s = 1500$ фс) и времени жизни носителей заряда $\tau_c = 500$ пс возникают осцилляции скорости носителей заряда, т. е. носители в процессе рекомбинации успевают менять направление движения несколько раз. Это приводит и к осцилляции плотности тока (рис. 4). Данное явление связано с тем, что собственное поле разноименно заряженных частиц при удалении друг от друга экранирует внешнее поле смещения. Данные осцилляции затухают относительно долго из-за большого значения времени жизни носителей заряда.

При уменьшении значения времени жизни до 1 пс эффект экранирования быстро исчезает и происходит увеличение скорости носителей заряда. Влияние на спектр генерации заключается лишь в появлении более остро выраженного спектрального максимума при уменьшении параметра τ_c .

При генерации непрерывного терагерцового излучения в материале с малым времени жизни носителей заряда ($\tau_c = 1$ пс) профиль концентрации носителей заряда повторяет профиль биений интенсивности фотовозбуждения. Это и обуславливает спектр излучения. На частотные характеристики генерации антенны, в данном случае, изменение подвижности носителей заряда в материале влияния не оказывает.

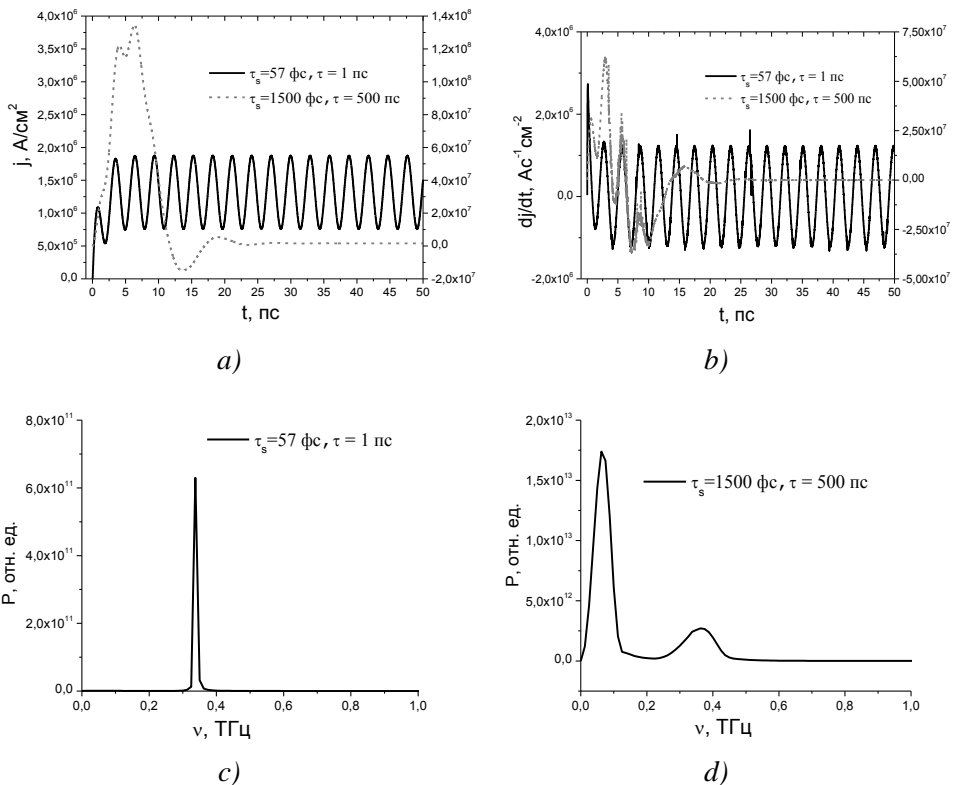


Рис. 5. Результаты моделирования генерации непрерывного терагерцового излучения: (а) плотность тока, (б) — производная плотности тока по времени, (с) и (д) — спектр генерируемого терагерцового излучения.

Fig. 5. Simulation results of generation of continuous terahertz radiation: (a) current density, (b) time derivative of current density, (c) and (d) spectrum of generated terahertz radiation

Для материала с большим временем жизни носителей заряда, равным 500 пс, наблюдается линейное увеличение концентрации носителей заряда, модулированной (с малой амплитудой) частотой биений интенсивности фотовозбуждения (Рис. 5). В начальный момент времени (при включении лазеров и попадании на кристалл переднего фронта световых волн) наблюдаются переходные процессы, сопровождаемые осцилляцией (с периодом около 20 пс) скорости носителей заряда, амплитуда которых растет с увеличением подвижности (эффект экранировки приложенного поля приводит к смене знака скорости). В сочетании с изменением концентрации носителей заряда это приводит к формированию всплеска тока, похожего по форме на наблюдаемый при возбуждении антенны фемтосекундным лазерным импульсом.

7. Заключение

Изготовленные фотопроводящие дипольные антенны на основе *SI-GaAs:Cr* и *LT-GaAs* позволяют получить спектры генерации в диапазоне от 0,05 до 2,8 ТГц. Время жизни носителей заряда в полупроводниковом материале имеет решающее значение при работе ФДА в качестве детекторов терагерцового излучения, а также фотомиксеров. Для корректной работы ФДА-детектора значение времени жизни не должно превышать десятки пикосекунд, как и для работы в режиме фотомиксера. По этой причине ФДА на основе *SI-GaAs:Cr* не могут применяться в качестве детекторов импульсного и генераторов непрерывного терагерцового излучения. В случае ПФДА, основанных на *LT-GaAs*, эффективность детектирования терагерцового излучения растет с уменьшением длины антенны. Продемонстрирована работоспособность фотомиксеров, созданных на основе ФДА на *LT-GaAs* при детектировании и генерации непрерывного терагерцового излучения как в области низких (0,36 ТГц), так и в области высоких (1,22 ТГц) терагерцовых частот. Обнаружено, что существенное влияние на процессы генерации оказывает эффект экранирования внешнего напряжения смещения. Этот эффект обеспечивает возможность использования материала с большим временем жизни носителей заряда в качестве генераторов терагерцового излучения. Эффект увеличивается при увеличении подвижности носителей заряда и мощности лазерного излучения.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

Список литературы

1. Auston D. H., Smith P. R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity // *Appl. Phys. Lett.* 1983. Vol. 43. P. 631–633.
2. Huang C. I., Li S. S. Injection dependence of the excess carrier lifetimes in Cr doped n type GaAs // *Journal of Applied Physics.* 1973. Vol. 44. P. 4214–4215.
3. A Comparison of Photoconductive Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection / D. A. Kobtsev, I. I. Kolesnikova, R. A. Redkin, Yu. S. Sarkisov // *IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference.* (Munich, Germany, Jun. 23–26, 2019). 2 p. URL: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872412 (date of access: 27.02.2022).
4. Dipole antennas based on SI-GaAs:Cr for generation and detection of terahertz radiation / S. Yu. Sarkisov, F. D. Safiullin, M. S. Skakunov [et al.] // *Russ. Phys. J.* 2013. Vol. 53, No 8, P. 890–898.
5. SI-GaAs<Cr> photoconductive dipole antennas for terahertz generation : the influence of antenna length and shape / S. Yu. Sarkisov, M. S. Skakunov, O. P. Tolbanov [et al.] // 25th Int. Crimean conf. “Microwave & Telecommunication Technology” – CriMiCo’2015 (Sevastopol, September 6–12, 2015). P. 455–456.
6. Bereznya S. A., Kobtsev D. A., Sarkisov S. Yu. Photoconductive dipole antennas based on semiconductors with long and short charge carrier lifetimes for pulsed and cw terahertz generation and detection // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.* 2021. № 3. С. 409—410.
7. First Demonstration of Continuous Wave Terahertz Radiation from Semi-Insulating GaAs Photomixer with Nanowire / S. Al-Daffaie, O. Yilmazoglu, A. Jumaah, F. Küppers // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018. 2 p. URL: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510294 (date of access: 27.02.2022).
8. Auston D. H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1975. Vol. 26. P. 101–103.

Информация об авторах

Березная Светлана Александровна, ведущий технолог Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Кобцев Даниил Александрович, аспирант Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Саркисов Сергей Юрьевич, к. ф-м. н., старший научный сотрудник Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Svetlana A. Bereznya, leading technologist, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Daniil A. Kobtsev, postgraduate student, junior researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Sergey Yu. Sarkisov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.