

09,03

## Возбуждение терагерцового излучения в $p-n$ -гетероструктурах на основе $a\text{-Si} : \text{H}/c\text{-Si}$

© А.В. Андрианов<sup>1</sup>, А.Н. Алешин<sup>1</sup>, С.Н. Аболмасов<sup>1,3</sup>, Е.И. Теруков<sup>1,2,3</sup>, А.О. Захарьин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: alex.andrianov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2023 г.

В окончательной редакции 2 марта 2023 г.

Принята к публикации 13 марта 2023 г.

Приведены результаты исследования генерации терагерцового (THz) излучения в  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a\text{-Si} : \text{H}/c\text{-Si}$  при их фотовозбуждении излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 nm. Свойства наблюдаемого ТГц-излучения позволяют объяснить его возбуждением в структурах быстрого фототока неравновесных носителей заряда, созданных фемтосекундным межзонным фотовозбуждением в области потенциального барьера. Быстрый фототок в свою очередь излучает ТГц-электромагнитную волну. Волновые формы и амплитудные спектры наблюдаемого ТГц-излучения отражают динамику фотовозбужденных носителей заряда в структурах. По интенсивности ТГц-излучения, наблюдаемое в исследованных  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a\text{-Si} : \text{H}/c\text{-Si}$ , сопоставимо с ТГц-излучением, генерируемым в кристаллах  $n\text{-InAs}$ , широко применяемых как эмиттеры в системах ТГц-спектроскопии во временной области. Поэтому  $a\text{-Si} : \text{H}/c\text{-Si}$   $p-n$ -гетероструктуры могут найти применение в качестве ТГц-эмиттеров для решения задач ТГц-спектроскопии.

**Ключевые слова:** фемтосекундное лазерное фотовозбуждение, гетероструктуры, быстрый фототок, терагерцовое электромагнитное излучение.

DOI: 10.21883/FTT.2023.05.55503.27

### 1. Введение

Методика генерации электромагнитных волн терагерцового (ТГц) частотного диапазона (частоты от 0.1 до 10 THz) с использованием техники ультракоротких импульсов лазеров видимого или ближнего ИК-диапазонов в настоящее время широко применяется в ТГц-спектроскопии во временной области (THz time domain spectroscopy (THz-TDS)) и ТГц-визуализации самых различных объектов [1–3]. Достоинством THz-TDS техники является то, что все основные компоненты измерительной системы (как источник, так и приемник ТГц-излучения) работают при комнатной температуре, а соотношение сигнал/шум по амплитуде сигналов может достигать  $10^4$  и более (и не менее  $10^8$  по мощности) [4].

Генерация импульсов ТГц-излучения, содержащих несколько циклов электромагнитных колебаний, наблюдалась при фемтосекундном лазерном возбуждении многих полупроводников и полупроводниковых структур. В самом общем случае механизм такой ТГц-генерации обусловлен возбуждением в материале или структуре быстрого диполя или короткого всплеска фототока [5,6]. В дальнем поле амплитуда генерируемой таким образом ТГц-электромагнитной волны,  $E_{\text{THz}}$ , пропорциональна  $\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$  или  $\frac{\partial J}{\partial t}$ , где  $P(t)$  и  $J(t)$  есть, соответственно, меняю-

щиеся во времени дипольный момент или фототок, индуцированные фемтосекундным лазерным излучением.

Среди полупроводниковых ТГц-эмиттеров наибольшее применение нашли эмиттеры на основе фотопроводящих антенн со смещением [7], а также ТГц-„поверхностные“ эмиттеры, основанные на возбуждении поверхности полупроводника. В последнем случае возможны два вклада в генерацию ТГц-излучения: быстрый всплеск фототока неравновесных носителей в приповерхностном электрическом поле, а также демберовский фототок (или демберовский диполь) направленный в объем кристалла и обусловленный разностью коэффициентов диффузии неравновесных электронов и дырок. Эффект Дембера является основным механизмом ТГц-генерации в „поверхностных“ эмиттерах на основе кристаллов InAs [8], которые рассматриваются на сегодняшний день как наиболее простые и эффективные источники ТГц-излучения.

Объемный кремний считается не вполне подходящим материалом в качестве „поверхностного“ ТГц-эмиттера [9] главным образом вследствие слабого поглощения излучения фемтосекундного лазера накачки в материале и, соответственно, большой толщине области генерации неравновесных носителей заряда в сравнении с областью локализации приповерхностного электрического поля. Тем не менее, в работе [10] было показано, что Si  $p-i-n$ -фотодиод может служить эффективным

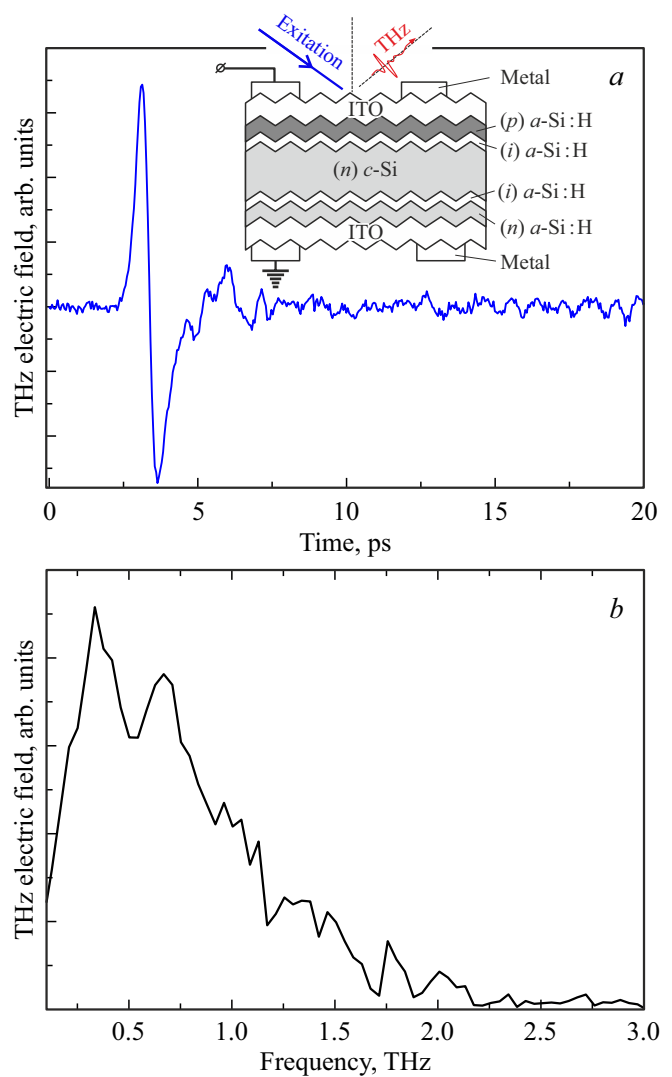
ТГц-эмиттером при фотовозбуждении его ультракороткими лазерными импульсами за счет генерации в структуре быстрого фототока. Высокая эффективность такого эмиттера может быть обеспечена, в случае если глубина поглощения света сопоставима или меньше размера  $i$ -области, в которой сосредоточено электрическое поле.

В настоящей работе сообщается о наблюдениях и исследовании генерации ТГц-излучения в  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при их фотовозбуждении фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 800 nm.

## 2. Детали эксперимента

Исследованные структуры представляют собой кремниевые солнечные элементы (СЭ), полученные по гетероструктурной (НТ) технологии [11,12], захватывающие значительную часть спектра солнечного излучения и имеющие достаточно высокий КПД. На вставке в рис. 1, *a* показан вид сечения исследованной структуры. Структуры формировались на кремниевой подложке  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$  и толщиной порядка  $140 \mu\text{m}$ , текстурированной с двух сторон путем химического травления для увеличения поглощения солнечного света и минимизации его отражения от поверхности СЭ [11]. Толщины контактных слоев ИТО (оксид индия с оловом, прозрачный в видимом и ближнем ИК-диапазонах) оставляли по 100 nm. Близкий к внешней поверхности СЭ слой  $(p) a\text{-Si:H}$  имел толщину порядка 15 nm и был легирован бором до уровня  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Последующий слой  $(i) a\text{-Si:H}$ , также как слой  $(i) a\text{-Si:H}$ , расположенный с нижней стороны подложки, имели толщину порядка 5 nm. Нижний слой  $(n) a\text{-Si:H}$  имел толщину порядка 15 nm и легировался фосфором до уровня  $10^{21} \text{cm}^{-3}$ . На верхний и нижний слой ИТО были нанесены полоски металла (серебро) шириной порядка  $40 \mu\text{m}$ , которые используются для сбора тока в преобразователях солнечной энергии. Расстояние между полосками металла составляло 1 mm на верхней поверхности и 1.5 mm на нижней поверхности СЭ.

На вставке в рис. 1, *a* показана также геометрия ТГц-эксперимента. Исследуемые структуры возбуждались излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 nm и длительностью импульсов порядка 15 fs, следующих с частотой 80 MHz. Возбуждающее излучение, имеющее  $p$ -поляризацию, фокусировалось в промежуток между полосками металла в пятно размером порядка  $250 \mu\text{m}$ . Максимальная энергия возбуждающего импульса составляла 5 nJ. Излучение падало на структуру под углом близким к 45 градусам. ТГц-излучение, генерируемое в структуре, собиралось в направлении зеркального отражения от входной поверхности структуры с помощью параболической зеркальной оптики и доставлялось к ТГц-детектору. Детектирование осуществлялось методом электрооптического стробирования ТГц волновых форм в кристалле (110) ZnTe толщиной 1 mm (более полное описание использованной экспериментальной установки может быть найдено в [13]).



**Рис. 1.** *a*) Характерная волновая форма ТГц-излучения, генерируемого в  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ . Напряжение обратного смещения 9 V, средняя мощность излучения накачки 117 mW. На вставке схематически показан состав исследуемой структуры и геометрия ТГц-эксперимента. *b*) Амплитудный спектр ТГц-излучения, полученный путем Фурье-преобразования ТГц волновой формы, соответствующей рис. 1, *a*.

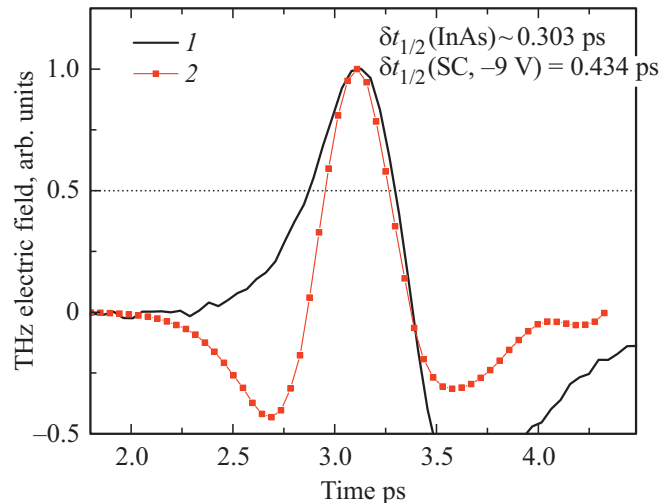
## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Было установлено, что при нулевом смещении на исследуемой структуре сигнал ТГц-излучения очень слаб и его амплитуда сопоставима с шумом (соотношение сигнал/шум не более 1.5–2), а при небольшом прямом смещении сигнал отсутствует. Сигнал ТГц-излучения появляется при приложении обратного смещения, и его амплитуда значительно возрастает с ростом напряжения смещения. Так при напряжении  $-9 \text{V}$  сигнал ТГц-излучения выше примерно в 70 раз по сравнению с его величиной при 0 V. На рис. 1, *a* приведена характерная

волновая форма ТГц-излучения (временная развертка напряженности электрического поля ТГц электромагнитной волны) при напряжении смещения  $-9\text{ V}$ , а рис. 1, *b* показывает его амплитудный спектр. Спектр ТГц-излучения простирается до частот порядка  $2.2\text{ THz}$  (такое значение верхней граничной частоты соответствует уровню  $0.01$  от максимума). В наблюдаемой волновой форме ТГц-излучения и форме его амплитудного спектра сказывается влияние поглощения генерируемого в структуре излучения на парах воды (измерения проводились на открытом воздухе), а также незначительные отражения ТГц-излучения, генерируемого в структуре, от ее внутренних слоев.

Фемтосекундное излучение лазера накачки с длиной волны  $800\text{ nm}$  проходит практически без поглощения через слои  $a\text{-Si:H}$  и полностью поглощается в объеме  $c\text{-Si}$ , в котором также сосредоточено основное электрическое поле  $p\text{-}n$ -перехода. Неравновесные носители, созданные накачкой, ускоряются в этом поле и дают всплеск фототока, который приводит к генерации наблюдаемого ТГц-излучения. Необходимо добавить, что слой ИТО, толщина которого ( $100\text{ nm}$ ) значительно меньше длины волны излучения и толщины скин-слоя, достаточно хорошо пропускает ТГц-излучение [14]. Это обуславливает наблюдение в геометрии отражения (рис. 1, *a*, вставка) ТГц-излучения, генерируемого в области  $p\text{-}n$ -перехода в исследуемой структуре.

Тот факт, что в исследованных нами структурах сигнал ТГц-генерации практически отсутствует при нулевом смещении, но появляется при обратном смещении структуры и значительно возрастает с ростом напряжения смещения, мог бы свидетельствовать в пользу того, что вклад в ТГц-генерацию дает индуцированное электрическим полем оптическое выпрямление (ИЭПОВ) [15,16]. Известно, что эффект оптического выпрямления, и ИЭПОВ в частности, при возбуждении материала ультракороткими лазерными импульсами приводят к генерации в материале быстрого дипольного момента, вызывающего ТГц-излучение [1–3]. При этом важно добавить, что нелинейно оптические эффекты, в том числе и эффект оптического выпрямления, практически безынерционны на временах порядка длительности лазерного импульса накачки ( $15\text{ fs}$  в нашем случае). На рис. 2 показаны нормированные на максимум волновые формы ТГц-излучения, генерируемого в кристалле  $n\text{-InAs}$  (стандартный эмиттер в используемой THz-TDS-установке [4,13]), и в исследуемой  $p\text{-}n$ -гетероструктуре на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при фотовозбуждении и детектировании в одинаковых условиях. Можно видеть, что полуширина (ширина на половине высоты) положительного всплеска импульса ТГц-излучения от исследуемой структуры составляет порядка  $434\text{ fs}$ , а полуширина положительного всплеска импульса ТГц-излучения от  $n\text{-InAs}$  составляет порядка  $303\text{ fs}$ . Т.е. имеется временное затягивание порядка  $130\text{ fs}$  импульса ТГц-излучения, генерируемого в исследуемой структуре, по сравнению с ТГц-импульсом от

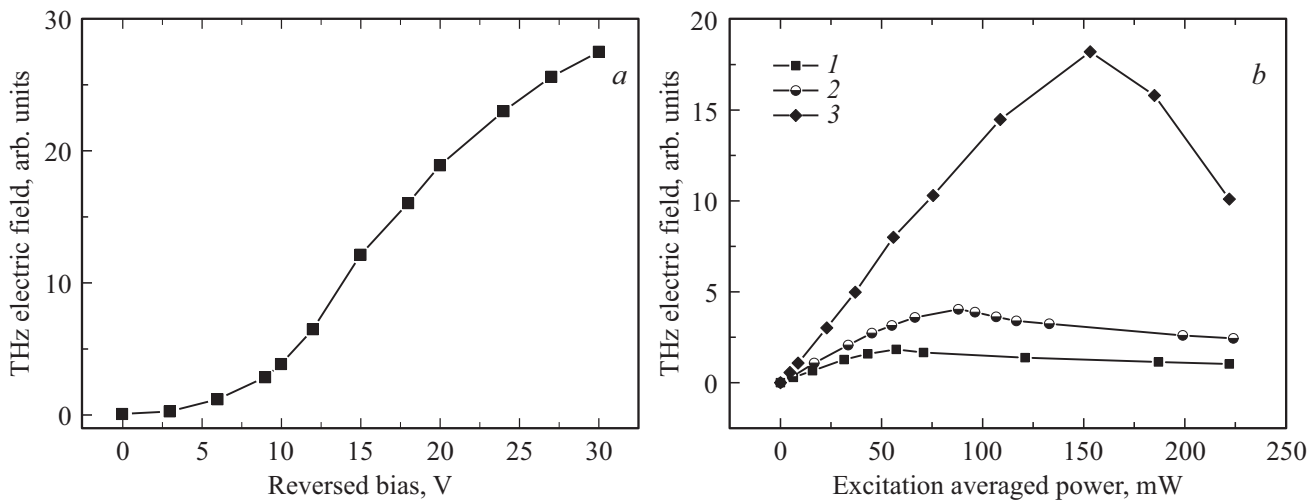


**Рис. 2.** Волновые формы ТГц-излучения, генерируемого в  $p\text{-}n$ -гетероструктуре на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при напряжении обратного смещения  $9\text{ V}$  (1) и в кристалле  $n\text{-InAs}$  (2) при возбуждении импульсами титан-сапфирового лазера длительность  $15\text{ fs}$  и длиной волны  $800\text{ nm}$  при средней мощности лазерного излучения порядка  $117\text{ mW}$ . Сигналы нормированы на максимум. Как в том и другом случае ТГц-излучение детектировалось методом электрооптического стробирования ТГц волновых форм в пластинке  $(110)\text{ ZnTe}$  толщиной  $1\text{ mm}$ .

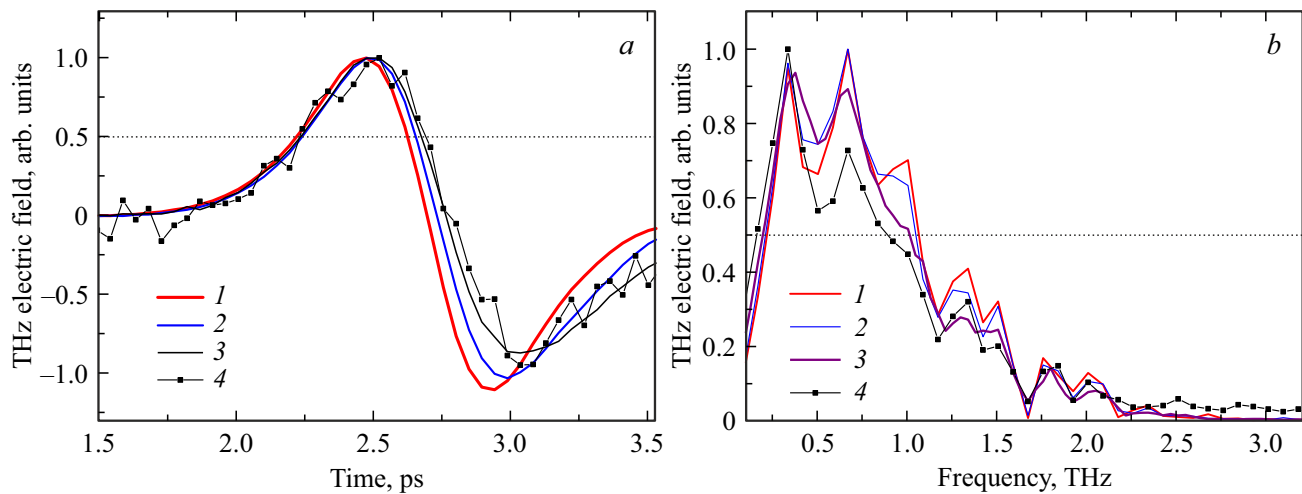
$n\text{-InAs}$ . Это говорит о том, что ТГц-генерация в  $p\text{-}n$ -гетероструктуре на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  более инерционна чем даже в кристалле  $n\text{-InAs}$ , в котором, как было отмечено выше, ТГц-генерация обусловлена главным образом эффектом Дембера. Поэтому наблюдаемое в  $p\text{-}n$ -гетероструктурах на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  ТГц-излучение не связано с эффектом ИЭПОВ, а обусловлено формированием быстрого фототока неравновесных электронов и дырок в структуре при фемтосекундном межзонном фотовозбуждении.

На рис. 3, *a* показана зависимость амплитуды импульса ТГц-излучения от напряжения обратного смещения на структуре. Ход этой зависимости объясняется ростом протяженности области, в которой сосредоточено электрическое поле  $p\text{-}n$ -перехода, а также ростом скорости движения неравновесных носителей заряда в этом поле при увеличении напряжения обратного смещения. Интересно, что при напряжении  $-30\text{ V}$  на исследуемой структуре амплитуда сигнала ТГц-излучения всего в 3 раза меньше чем в случае использования в качестве ТГц-эмиттера кристалла  $n\text{-InAs}$ , который служит основным источником ТГц-излучения в используемой THz-TDS-установке [4,13]. Поэтому ТГц-эмиттер на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$   $p\text{-}n$ -гетероструктуры вполне может быть использован для решения задач ТГц-спектроскопии.

На рис. 3, *b* показана зависимость амплитуды импульса генерируемого ТГц-излучения от средней мощности излучения лазера накачки. Видно, что эта зависимость



**Рис. 3.** *a)* Зависимость амплитуды импульса ТГц-излучения, генерируемого в  $p-n$ -гетероструктуре на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ , от напряжения обратного смещения при средней мощности излучения лазера накачки порядка 153 мВт. *b)* Зависимость амплитуды импульса ТГц-излучения от средней мощности излучения лазера накачки при разных значениях напряжения обратного смещения. 1 — 6, 2 — 9, 3 — 20 В.



**Рис. 4.** *a)* Нормированные на максимум волновые формы ТГц-излучения, генерируемого в  $p-n$ -гетероструктуре на основе  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при различных значениях напряжения обратного смещения (1–4). *b)* Нормированные на максимум амплитудные спектры ТГц-излучения при разных напряжениях обратного смещения (1–4). Средняя мощность излучения лазера накачки составляла 153 мВт. 1 — 30, 2 — 20, 3 — 10, 4 — 3 В.

немонотонная, с максимумом, за которым следует спад ТГц-амплитуды. Такую зависимость амплитуды ТГц-импульса от мощности фотовозбуждения можно объяснить эффектом экранирования электрического поля в  $p-n$ -гетероструктуре неравновесными носителями при высоком уровне фотовозбуждения. В пользу такого объяснения свидетельствует также то, что оптимальная мощность излучения лазера накачки, то есть мощность соответствующая максимуму ТГц-сигнала, увеличивается при увеличении напряжения обратного смещения. Надо отметить, что проявление эффекта экранирования электрического поля неравновесными носителями заряда в  $p-n$ -переходах на основе InGaAs и влияние этого

эффекта на генерацию ТГц-излучения при фемтосекундном лазерном фотовозбуждении таких структур ранее наблюдалось в работе [17].

На рис. 4, *a* приведены нормированные на максимум волновые формы ТГц-излучения, измеренные при разных значениях напряжения обратного смещения. Можно видеть, что ТГц-импульс сужается с ростом напряжения смещения. При переходе от  $-3$  к  $-30$  В полуширина (ширина импульса по уровню 0.5 от максимального значения) импульса ТГц-излучения сокращается на время порядка 70 fs. Также при этом положение максимума ТГц-импульса смещается к более ранним моментам времени с ростом напряжения смещения. На рис. 4, *b*

приведены амплитудные спектры ТГц-излучения при разных значениях напряжения смещения. Видно также, что спектр ТГц-излучения заметно уширяется с ростом напряжения смещения. Как волновые формы, так и амплитудные спектры ТГц-излучения отражают динамику неравновесных электронов и дырок, которые генерируются фемтосекундной лазерной накачкой в области электрического поля  $p-n$ -гетероструктуры. С ростом напряжения смещения, и соответственно с ростом электрического поля, увеличивается скорость нарастания фототока неравновесных носителей, созданных фемтосекундным лазерным импульсом, что в свою очередь приводит к сужению импульса генерируемого ТГц-излучения и к уширению его спектра.

#### 4. Заключение

Исследована генерация ТГц-излучения в  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a-Si:H/c-Si$  (структуры СЭ на основе  $a-Si:H/c-Si$ , полученные по НТ-технологии) при их фотовозбуждении излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 нм. ТГц-излучение наблюдается при обратном напряжении смещения на структуре, и его интенсивность значительно возрастает с ростом напряжения смещения. Свойства наблюдаемого ТГц-излучения позволяют связать его с возбуждением быстрого фототока неравновесных носителей заряда, созданных фемтосекундным межзонным фотовозбуждением в области потенциального барьера в структуре. Быстрый фототок в свою очередь излучает ТГц электромагнитную волну. Обнаружена немонотонная зависимость амплитуды импульса ТГц-излучения от интенсивности лазерного фотовозбуждения, которая объясняется эффектом экранирования электрического поля в  $p-n$ -гетероструктуре неравновесными носителями при высоком уровне фотовозбуждения. Волновые формы и амплитудные спектры наблюдаемого ТГц-излучения отражают динамику фотовозбужденных носителей заряда в структурах. При оптимальной интенсивности межзонного лазерного фотовозбуждения, амплитуда импульсов ТГц-излучения, наблюдаемого в исследованных  $p-n$ -гетероструктурах на основе  $a-Si:H/c-Si$ , сопоставима с ТГц-излучением, генерируемым в кристаллах  $n-InAs$ , широко применяемых как эмиттеры в THz-TDS-системах. Поэтому  $a-Si:H/c-Si$   $p-n$ -гетероструктуры могут найти применение в качестве ТГц-эмиттеров для решения задач ТГц-спектроскопии. Кроме того, исследования процессов ТГц-генерации могут дать новые возможности для изучения деталей поведения неравновесных носителей заряда на субпикосекундных временах в структурах ТГц-солнечных элементов.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Yun-Shik Lee. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer Science + Business Media, LLC (2009). 340 p.
- [2] J. Neu, C.A. Schmuttenmaer. J. Appl. Phys. **124**, 231101 (2018).
- [3] Terahertz Spectroscopy and Imaging / Eds K.-E. Peiponen, J.A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2013). 641 p.
- [4] А.В. Андрианов, А.Н. Алешин, Л.Б. Матюшкин. Письма в ЖЭТФ **109**, 30 (2019).
- [5] Terahertz Optoelectronics / Ed. K. Sakai. Springer-Verlag, Berlin (2005). 387 p.
- [6] V.L. Malevich, P.A. Ziaziukia, R. Norkus, V. Pacebutas, I. Nevinskas, A. Krotkus. Sensors **21**, 4067 (2021).
- [7] A.E. Yachmenev, D.V. Lavrukhin, I.A. Glinsky, N.V. Zenchenko, Y.G. Goncharov, I.E. Spektor, R.A. Khabibullin, T. Otsuki, D.S. Ponomarev. Opt. Eng. **59**, 061608 (2019).
- [8] C. Song, P. Wang, Y. Qian, G. Zhou, R. Notzel. Opt. Express **28**, 25751 (2020).
- [9] G. Ramakrishnan, G.K.P. Ramanandan, A.J.L. Adam, M. Xu, N. Rumar, R.W.A. Hendriks, P.C.M. Planken. Opt. Express **21**, 16784 (2013).
- [10] L. Xu, X.-C. Zhang, D.H. Auston, B. Jalali. Appl. Phys. Lett. **59**, 3357 (1991).
- [11] E. Terukov, A. Kosarev, A. Abramov, E. Malchukova. From 11% Thin Film to 23% Heterojunction Technology (HJT) PV Cell: Research, Development and Implementation Related 1600 × 1000 mm<sup>2</sup> PV Modules in Industrial Production. IntechOpen, Solar Panels and Photovoltaic Materials (2018). Ch. 5.
- [12] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov. Silicon Heterojunction Technology: A Key to High Efficiency Solar Cells at Low Cost. In: High-Efficient Low-Cost Photovoltaics / Eds V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Nature Switzerland AG (2020). Ch. 7. P. 113–132.
- [13] A.V. Andrianov, A.N. Aleshin, V.N. Truhin, A.V. Bobylev. J. Phys. D **44**, 265101 (2011).
- [14] А.В. Андрианов, А.Н. Алешин, С.Н. Аболмасов, Е.И. Теруков, Е.В. Берегулин. Письма в ЖЭТФ **116**, 825 (2022).
- [15] J.F. Ward, J.K. Guha. Appl. Phys. Lett. **30**, 276 (1977).
- [16] S.L. Chuang, S. Smitt-Rink, B.I. Greene, P.N. Sacta, A.F.J. Levi. Phys. Rev. Lett. **68**, 102 (1992).
- [17] Y. Kadoya, T. Matsui, A. Takazato, J. Kitagawa. Joint Proc. of 32<sup>nd</sup> Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and the 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Terahertz Electronics (02–09 September 2007) Cardiff, UK. P. 987–988.

Редактор К.В. Емцев