

УДК 535.14.+535.3

С.Ю. САРКИСОВ*, Ф.Д. САФИУЛЛИН*, М.С. СКАКУНОВ*, О.П. ТОЛБАНОВ*, А.В. ТЯЖЕВ*,
М.М. НАЗАРОВ**, А.П. ШКУРИНОВ***

ДИПОЛЬНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ SI-GaAs:Cr ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹

Разработаны конструкция и технология изготовления дипольных излучателей и приемников терагерцового излучения на основе полужизолирующего GaAs, компенсированного хромом, со временем жизни неравновесных носителей заряда порядка 100 пс. Экспериментально исследованы генерация и детектирование субтерагерцового излучения в изготовленных дипольных антеннах при возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами в зависимости от топологии контактов и параметров активной среды.

Ключевые слова: дипольная антенна, терагерцовое излучение, полужизолирующий арсенид галлия.

Введение

Для применений в импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС) дипольные излучатели и приемники являются альтернативой генераторам и детекторам, основанным на оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов и на электрооптическом эффекте в нелинейно-оптических кристаллах. Вместе с тем по ряду показателей применение дипольных антенн (ДА) может быть предпочтительным. Требования к оптическому качеству активной среды в случае ДА ниже, к тому же, как правило, в данных устройствах используются классические полупроводники с хорошо развитой технологией получения, например GaAs. При детектировании терагерцового излучения применение ДА упрощает схему приемной части установки. Кроме того, эффективность преобразования энергии лазерного излучения в терагерцовое излучение в ДА может достигать 10^{-4} , что на 1–2 порядка выше, чем в большинстве нелинейных кристаллов.

Впервые ДА были предложены в качестве источников терагерцового излучения [1, 2] и применены в ИТС [3] четверть века тому назад. К настоящему времени в научной литературе содержится большой объем результатов по исследованию влияния свойств активной среды и конфигурации ДА на их рабочие характеристики. Несмотря на принципиальную простоту конструкции ДА, физические процессы, происходящие в антенне при ее возбуждении ультракоротким лазерным импульсом, достаточно сложны. Для расчета характеристик генерируемого излучения необходимо совместное решение уравнений Максвелла и уравнения Больцмана с соответствующим набором начальных и граничных условий. Использование результатов такого расчета также требует знания ряда трудноизмеримых параметров используемого полупроводника. Явления, происходящие в ДА, являются быстропротекающими и оказывают комплексное влияние на эффективность процессов генерации и детектирования терагерцового излучения. Например, с ростом плотности мощности возбуждающего лазерного импульса возрастает число носителей заряда, однако возрастанию амплитуды генерируемого излучения препятствует эффект экранирования ускоряющего напряжения генерируемыми носителями. Сама генерация терагерцового излучения может возникать вследствие различных явлений в полупроводниковой среде антенны: ускорения фотовозбужденных носителей, оптического выпрямления, эффекта фото-Дембера, черенковского излучения. Выделить в эксперименте именно излучение, обусловленное «антенным» эффектом, сложно.

При моделировании спектров генерации ДА чаще всего используется упрощенный подход. Антенна рассматривается как диполь Герца, а излучение – в дальнем поле (рис. 1); влияние процессов в полупроводнике учитывается с помощью полуэмпирических зависимостей (например, [4]).

В настоящей работе разработаны и изготовлены корпусированные ДА на основе SI-GaAs:Cr. Проведено экспериментальное исследование процессов генерации и детектирования терагерцового излучения в изготовленных антеннах с различной топологией контактов при возбуждении фем-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-512.2012.2.

тосекундными импульсами титан-сапфирового лазера ($\lambda = 797$ нм, $\tau = 80$ фс), а также сравнение с типичными видами ДА.

Конструкция и технология изготовления дипольных антенн

Полупроводниковая ДА представляет собой оптоэлектронный ключ [1] и конструктивно состоит из полупроводниковой подложки с нанесенными на нее проводящими дорожками с выступами определенной формы (рис. 1, а). Оптическое возбуждение контактного зазора между выступами осуществляется фемтосекундным лазерным импульсом с энергией фотонов, большей ширины запрещенной зоны полупроводника. При этом в освещаемой области происходит резкое увеличение концентрации неравновесных носителей заряда. Образованные носители заряда ускоряются приложенным к диполю напряжением смещения и создают в них быстро изменяющийся ток $j(t)$. При длительностях лазерного импульса, фотоэлектрических параметрах полупроводника и геометрии антенны, обеспечивающих характерные времена изменения фототока на уровне пикосекунд, данный всплеск фототока будет приводить к излучению в свободное пространство электромагнитного импульса в терагерцовом диапазоне частот $E_{ТГц}(t)$. При использовании ДА для детектирования терагерцового излучения проводящие дорожки используются не для подачи напряжения, а для снятия тока. Фототок возникает под действием приходящего терагерцового поля и измеряется подключенным к дорожкам антенны синхронным токовым усилителем-измерителем. Носители заряда в приемной антенне возбуждаются таким же фемтосекундным лазерным импульсом, что и в антенне-генераторе. Волновая форма сигнала получается с помощью изменения временной задержки между зондирующим и терагерцовым импульсами t_n и записи ряда эквидистантных точек $E_{ТГц}(t_n)$ [5].

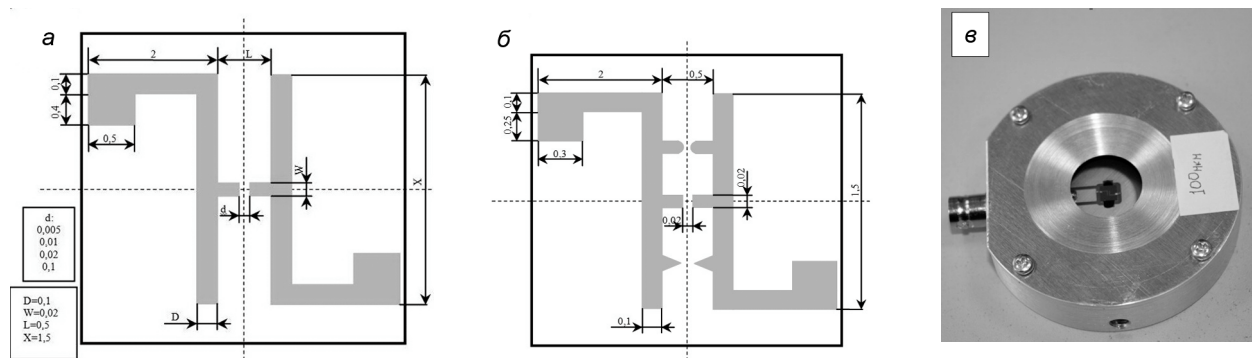


Рис. 1. Топология контактов дипольных антенн, изготовленных для исследования влияния: а – размеров межконтактных зазоров d и б – конфигурации зазора фотовозбуждаемой области на рабочие характеристики. Размеры показаны в миллиметрах; в – внешний вид дипольной антенны с зазором 100 мкм в корпусе

Характеристики дипольных антенн зависят от параметров активной среды (полупроводника), геометрии контактов, параметров возбуждающего лазерного импульса, приложенного напряжения, фокусирующей оптики (кремниевой линзы для ТГц-излучения). Среди параметров полупроводника важными являются удельное сопротивление, время жизни и подвижность неравновесных носителей заряда. Материал должен обладать максимально высоким темновым сопротивлением для обеспечения возможности подачи больших напряжений смещения. Время жизни неравновесных носителей должно быть низким. Это требование связано с необходимостью обеспечения резкого спада фототока после возбуждения. Высокая подвижность носителей заряда способствует большим величинам фототока. Кроме того, в некоторых случаях, высокая подвижность носителей способствует баллистическому транспорту носителей через контактный зазор, т.е. в таких условиях определяет скорость изменения фототока. Также ширина запрещенной зоны полупроводника должна обеспечивать возможность фотовозбуждения используемой длиной волны лазера. Геометрия металлических контактов, нанесенных на поверхность полупроводника, должна обеспечивать наибольшую напряженность поля смещения при отсутствии пробоя материала. Этому способствует большее отношение длины контактного выступа d к его ширине W (рис. 1, а). Большие размеры диполя X и L способствуют более высокой амплитуде генерируемого излучения. Резонансная частота антенны в приближении диполя Герца (рис. 1, а) определяется ее эффективной длиной L_e и

равняется $c/(2 \cdot L_e \cdot n)$, где c – скорость света, n – показатель преломления полупроводника на длине волны генерируемого излучения. Таким образом, длина дипольной антенны должна учитываться при оценке спектральной области максимальной эффективности устройства. Также на параметры генерируемого излучения влияет форма контактного зазора ДА [6, 7]. Для увеличения мощности излучения путем повышения достижимых напряжений смещения возможно использовать линейку антенн с чередующимися областями фотовозбуждаемого материала [8]. И, наконец, используемый лазерный импульс должен быть коротким, чтобы обеспечивать генерацию высоких терагерцовых частот, а также наибольшую плотность мощности излучения на поверхности полупроводника, но исключать его оптический пробой и явление насыщения (экранирование генерируемыми носителями заряда прикладываемого напряжения смещения [9]).

Как видно, на параметры полупроводникового материала накладываются довольно жесткие требования. В настоящее время для изготовления ДА наиболее часто используют LT-GaAs, который выращивается молекулярно-лучевой эпитаксией на низкотемпературной подложке и содержит кластеры мышьяка. Такой материал обладает чрезвычайно высоким сопротивлением, субпикосекундным временем жизни неравновесных носителей заряда и подвижностью носителей заряда в сотни $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Также используется объемный полуизолирующий SI-GaAs. Такой материал обладает преимуществом более простой технологии получения при достаточно близких к эпитаксиальному материалу достижимых параметрах.

Влияние на характеристики ДА оказывают свойства подложки в случае ее использования (например, подложка, на которой выращен LT-GaAs). Показатель преломления арсенида галлия в терагерцовом диапазоне составляет порядка 3,4. При таких показателях преломления значительная часть терагерцовой волны, которая в дипольной антенне имеет большой угол расходимости, испытывает полное внутренне отражение и не выводится наружу. Для устранения данной проблемы и фокусировки терагерцового импульса ДА приводится в контакт с полусферической линзой из кремния.

В настоящей работе для изготовления дипольных антенн использовался полуизолирующий арсенид галлия, легированный хромом SI-GaAs:Cr. Выращенные методом Бриджмена слитки разрезались на пластины толщиной порядка 400 мкм и отжигались. Легирование хромом проводилось путем диффузии. Материал обладал следующими параметрами: удельное сопротивление 500 МОм·см; подвижность электронов – 4000 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, дырок – 270 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. По данным измерения эффективности сбора заряда при облучении бета-частицами (CCE_β) время жизни неравновесных электронов проводимости в данном материале составляло порядка 83 пс (рис. 2). При таких временах жизни ожидалось получение наибольшей эффективности антенны в области низких терагерцовых частот. По этой причине длина антенны выбрана такая, чтобы обеспечивать резонанс в области низких частот, порядка 0,1 ТГц. Эффективная длина изготовленных антенн может быть оценена как $((L + 2 \cdot D)^2 + W^2)^{1/2}$ или как L [6], соответственно первая резонансная частота составляет 0,063 или 0,088 ТГц для параметров антенны, показанных на рис. 1, а. Топология контактов для основной части изготовленных и исследованных дипольных антенн показана на рис. 1, а. Была выбрана прямоугольная форма контактов; длины контактных зазоров составляли 5, 10, 20 и 100 мкм для исследования влияния на параметры генерируемого излучения. Контактные площадки выведены от рабочей области антенны для удобства приваривания проводных соединений. Вторым типом изготовленных и исследованных дипольных антенн является устройство, показанное на рис. 1, б. Такая антенна изготовлена для исследования влияния формы контактного зазора возбуждаемой области на спектр генерируемого излучения. В эксперименте такая антенна позволяет быстро провести три цикла измерений при последовательном возбуждении каждого контактного зазора без смены рабочей антенны и перенастройки оптической схемы.

Изготовление контактных поверхностей, показанных на рис. 1, а и б, проводилось с помощью фотолитографии. Фоторезист наносился на пластину SI-GaAs:Cr на установке mPG 101

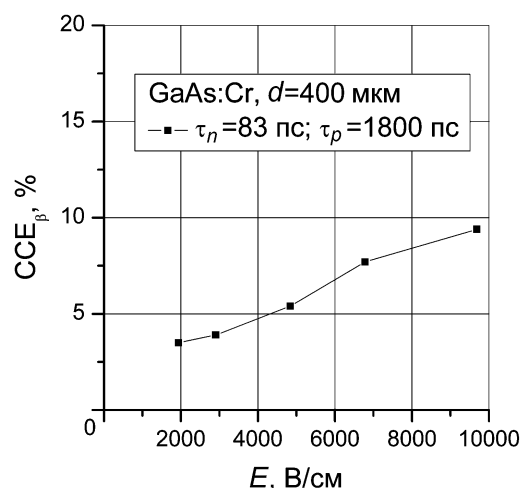


Рис. 2. Эффективность сбора заряда в GaAs:Cr в зависимости от напряженности приложенного поля

(Heidelberg, Германия). Металлические контакты из V/Al напылялись до толщин 0,05/1,0 мкм. Далее проводилось травление фоторезиста и резка пластины на кристаллы. Кристалл прикреплялся на разработанную монтажную плату. Антенна помещалась в специальный металлический корпус, обеспечивавший удобство крепления антенны в оптической схеме и снабженный BNC-разъемом для подключения к источнику напряжения и измерительным приборам (рис. 1, в).

Методы эксперимента

В качестве генераторов и детекторов терагерцового излучения изготовленные дипольные антенны исследовались на установке ИТС на основе фемтосекундного титан-сапфирового лазера Tsunami ($\lambda = 797$ нм, $\tau = 80$ фс) [10]. Терагерцовый спектрометр не был вакуумирован, что определяет присутствие известных пиков поглощения водяных паров на полученных спектрах. Антенна помещалась в оптическую схему, лазерное излучение фокусировалось в контактный зазор с помощью линзы ($f = 50$ мм). Точность фокусировки лазерного импульса в контактный зазор на поверхности кристалла контролировалась с помощью оптического микроскопа (рис. 3) и по измерениям сопротивления между контактами антенны.

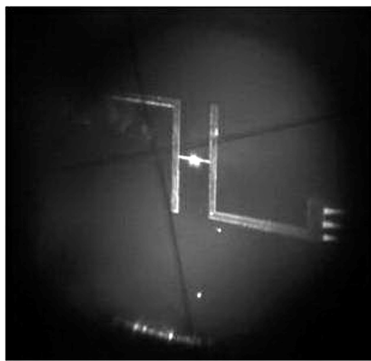


Рис. 3. Увеличенное изображение дипольной антенны на основе SI-GaAs:Cr с зазором 5 мкм, возбуждаемой сфокусированным излучением фемтосекундного Ti:Sa-лазера

Частота следования лазерных импульсов составляла 80 МГц. Лазерное излучение модулировалось оптомеханическим модулятором с частотой порядка 1,5 кГц для обеспечения регистрации сигнала синхронным детектором. Средняя мощность лазерного излучения, попадавшего на антенну, регулировалась поляризационным ослабителем и составляла 25 мВт. В экспериментах также использовались зарубежные коммерчески доступные дипольные излучатели и приемники терагерцового излучения для сравнения спектральных форм и эффективностей [10]. Основным детектором служила линейка ДА на пластине LT-GaAs (контактный зазор каждой дискретной антенны 5 мкм, общая площадь антенн 1×1 мм², время жизни неравновесных носителей заряда – 200 фс, темновое сопротивление – 3 кОм). Также использовалась дискретная ДА на основе LT-GaAs ($d = 5$ мкм, $W = 20$ мкм, $L = 40$ мкм, время жизни неравновесных носителей заряда – 500 фс, темновое сопротивление – 30 МОм, сопротивление при засветке используемым лазерным излучением – 1 МОм), обе стандартные антенны были снабжены кремниевыми полусферическими линзами. Для изготовленных ДА при $d = 5$ мкм указанные сопротивления составляли 150 МОм и 10 кОм соответственно.

Частота следования лазерных импульсов составляла 80 МГц. Лазерное излучение модулировалось оптомеханическим модулятором с частотой порядка 1,5 кГц для обеспечения регистрации сигнала синхронным детектором. Средняя мощность лазерного излучения, попадавшего на антенну, регулировалась поляризационным ослабителем и составляла 25 мВт. В экспериментах также использовались зарубежные коммерчески доступные дипольные излучатели и приемники терагерцового излучения для сравнения спектральных форм и эффективностей [10]. Основным детектором служила линейка ДА на пластине LT-GaAs (контактный зазор каждой дискретной антенны 5 мкм, общая площадь антенн 1×1 мм², время жизни неравновесных носителей заряда – 200 фс, темновое сопротивление – 3 кОм). Также использовалась дискретная ДА на основе LT-GaAs ($d = 5$ мкм, $W = 20$ мкм, $L = 40$ мкм, время жизни неравновесных носителей заряда – 500 фс, темновое сопротивление – 30 МОм, сопротивление при засветке используемым лазерным излучением – 1 МОм), обе стандартные антенны были снабжены кремниевыми полусферическими линзами. Для изготовленных ДА при $d = 5$ мкм указанные сопротивления составляли 150 МОм и 10 кОм соответственно.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены результаты эксперимента по сравнению генерации терагерцового излучения в изготовленных дипольных антеннах в сравнении с коммерчески доступными приборами. Эксперимент проводился в одинаковых условиях. Напряжение смещения, подаваемое на каждую антенну, составляло 5 В. Терагерцовое излучение антенн, не имевших встроенных кремниевых линз, собиралось линзой (числовая апертура равнялась 1), выставлявшейся после антенны; расстояние выбиралось по максимуму сигнала. Как видно из рис. 4, а, спектр излучения ДА на основе LT-GaAs имеет максимум в районе 0,4–0,5 ТГц и простирается в область высоких частот вплоть до 1,5 ТГц. Наличие встроенной кремниевой линзы слабо влияет на спектр излучения, но позволяет увеличить амплитуду регистрируемого сигнала в 5 раз (см. рис. 4, сплошная и точечная линии). Спектр излучения ДА на основе SI-GaAs:Cr с контактным зазором 5 мкм имеет максимум излучения на частоте 0,1 ТГц и заметные амплитуды высокочастотных компонентов до 0,7 ТГц. Пик спектра излучения исследуемой ДА находится близко к резонансной частоте, оценка которой описана выше. Временные формы импульсов ДА на LT-GaAs обладают выраженными главными максимумами с ширинами на полувысоте 0,5 и 0,7 пс соответственно (рис. 4, б). По сравнению с исследуемой ДА, значения амплитуды вторичных пиков, которые можно связать с переотражениями в кристалле, меньше. Наличие линзы позволяет лучше собирать высокочастотные компоненты (рис. 4, а). В случае антенны из SI-GaAs:Cr главный пик имеет ширину на полувысоте

3,7 пс, генерируемый спектр терагерцового излучения имеет узкий пик в районе 0,1 ТГц. Таким образом, для достижения более высоких терагерцовых частот необходимо обеспечить более быстрое изменение фототока. Стоит отметить, что времена жизни неравновесных носителей заряда в исследованных ДА составляют 200–500 фс и 83 пс для LT-GaAs и SI-GaAs:Cr соответственно.

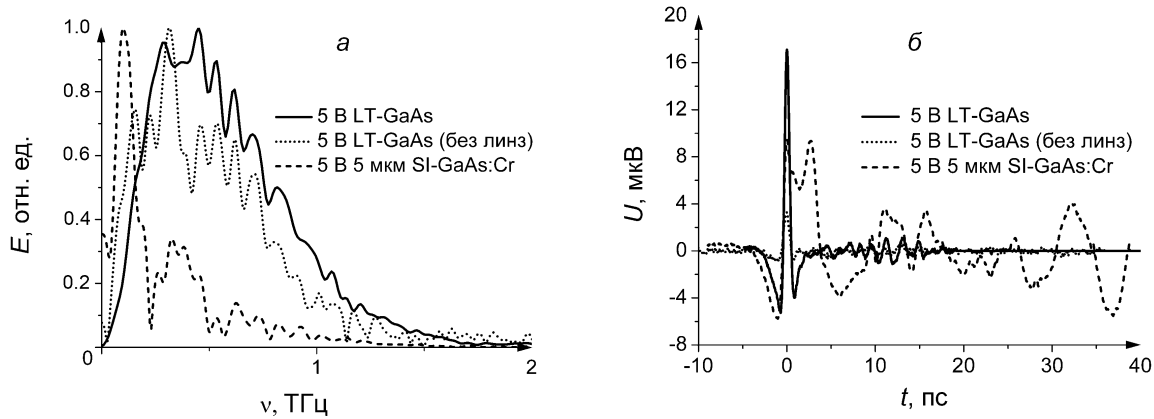


Рис. 4. Волновые (а) и амплитудно-временные (б) формы терагерцового излучения, генерированного дипольной антенной на основе SI-GaAs:Cr с зазором 5 мкм и антеннами на основе LT-GaAs

Полученный спектр излучения для изготовленной ДА в целом согласуется с данными, имеющимися в литературе для антенн с близкими параметрами активной среды [4]. Для получения более широкого спектра в области частот 1–3 ТГц возможно применение материала с более низким временем жизни неравновесных носителей заряда. Для этой цели можно использовать LT-GaAs, а также проводить послеростовую обработку SI-GaAs, например, его ионную имплантацию или радиационное облучение. Кроме того, на скорость изменения фототока оказывает влияние не только время жизни носителей заряда в материале, но и конфигурация антенны. При высоких значениях подвижности в материале и коротких контактных зазорах возможно ожидать пролетного механизма протекания тока. По-видимому, при высоких значениях времени жизни неравновесных носителей заряда проявляются другие механизмы, обеспечивающие скорости изменения фототока, достаточные для генерации излучения в терагерцовом диапазоне. В работах [9, 10] отмечается, что время жизни не является определяющим фактором для вида спектра генерации терагерцового излучения.

Напряженности электрического $E_{\text{ТГц}}(t)$ и магнитного $H_{\text{ТГц}}(t)$ полей терагерцовой волны должны удовлетворять уравнениям Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{E}_{\text{ТГц}}(t) = -\frac{\partial \mu(t) \mathbf{H}_{\text{ТГц}}(t)}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_{\text{ТГц}}(t) = \sigma(t) \mathbf{E}_{\text{ТГц}}(t) + \frac{\partial \varepsilon(t) \mathbf{E}_{\text{ТГц}}(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Решение данных уравнений в общем виде предполагает выбор граничных и начальных условий, с учетом протяженности активной среды, возможных переотражений электромагнитных волн в ней. В данных уравнениях свойства материала учтены в его проводимости $\sigma(t)$, которая зависит от времени и определяется скоростью генерации и рекомбинации носителей заряда в полупроводнике при фотовозбуждении. Напряженность ускоряющего поля сама является функцией времени, так как на нее влияет экранирование генерированными носителями заряда.

Временная форма генерируемого терагерцового излучения пропорциональна скорости изменения плотности тока через антенну $j(t)$:

$$E_{\text{ТГц}}(t) \sim \frac{\partial j(t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Плотность тока под действием приложенного поля $E(t)$ можно записать как

$$j(t) = e\mu N(t)E(t), \quad (4)$$

где μ – подвижность носителей заряда; $N(t)$ – число носителей заряда; e – заряд электрона. Число носителей заряда определяется скоростью их генерации $G(t)$, пропорциональной временному профилю интенсивности падающего импульса $I(t)$, и скоростью их рекомбинации, определяемой временем жизни носителей заряда τ_c :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau_c} + G(t). \quad (5)$$

Дрейфовая скорость носителей заряда $v(t)$, определяющая ток под действием приложенного электрического поля, определяется уравнением

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau_s} + \frac{e}{m^*} E(t). \quad (6)$$

Здесь m^* – эффективная масса электрона; τ_s – время релаксации. Поляризация среды $P(t)$, экранирующая внешнее приложенное поле V/d , определяется уравнением

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau_c} + j(t), \quad (7)$$

и, наконец, поле, ускоряющее носители заряда в антенне (ϵ – диэлектрическая проницаемость среды), выражением

$$E(t) = \frac{V}{d \cdot \epsilon} - \frac{P}{\epsilon}. \quad (8)$$

Решая систему уравнений (4) – (8), можно найти зависимость $j(t)$ и затем рассчитать $E_{\text{ТГц}}(t)$.

На рис. 5 представлены проинтегрированные временные формы спектров генерации (см. рис. 4, б), которые должны быть пропорциональны соответствующим плотностям тока через антенны. Изображенная на рис. 5 аппроксимирующая кривая получена решением системы уравнений (4) – (8) с использованием гауссова профиля распределения интенсивности лазерного импульса. В расчетах использовалось значение эффективной массы электрона в GaAs равное $0,07m_e$. Время релаксации $\tau_s = 950$ фс определялось не на основе данных по электрофизическим свойствам SI-GaAs:Cr, а в процессе численной оптимизации. Значения τ и τ_c указаны на рис. 5.

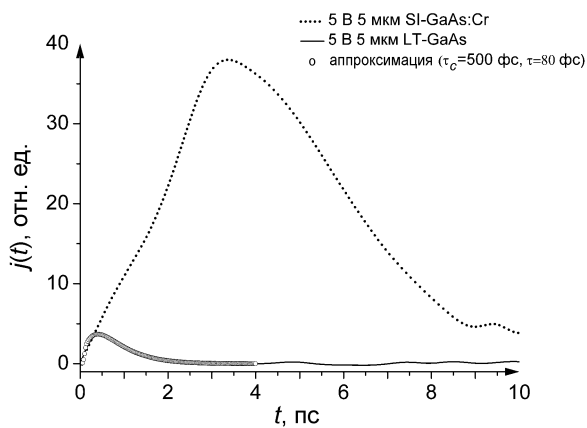


Рис. 5. Интегрированные временные формы (рис. 4, б) спектров генерации в районе главных максимумов ДА на основе LT-GaAs и SI-GaAs:Cr и аппроксимации главных максимумов уравнениями (4) – (8)

На рис. 6 показаны спектры генерации ДА с различными длинами контактных зазоров 5, 10, 20 и 100 мкм при одних условиях возбуждения и напряжениях питания. В случае ДА с зазором 100 мкм использовано более высокое напряжение смещения 30 В и более высокая мощность лазерного импульса (50 мВт). Все исследованные ДА имели главный максимум генерации на частоте 0,1 ТГц. Как следовало ожидать, антенны с более коротким зазором обеспечивали наилучшую форму спектра генерации, то есть более широкий, более высокочастотный спектр.

Полученные кривые свидетельствуют, что LT-GaAs с $\tau_c = 500$ фс обеспечивает главный пик нарастания и спада фототока длительностью порядка 1–2 пс, который хорошо моделируется системой уравнений (4) – (8). В случае SI-GaAs:Cr данный пик имеет ширину 4–5 пс и не описывается приведенными модельными уравнениями. В этом случае спад фототока не определяется временем жизни носителей. Имеющиеся особенности плотности тока в SI-GaAs:Cr на временных интервалах, значительно более коротких, чем соответствующее время жизни носителей заряда (83 пс), можно связать с изменением тока при уходе носителей через контакты. При уровнях напряженности поля, подвижности носителей заряда и размерах контактного зазора в ДА на основе SI-GaAs:Cr времена пролета находятся на уровне наблюдаемых времен изменения фототока, что не учтено в уравнениях (4) – (8).

Согласно упрощенной модели, максимальная амплитуда терагерцового сигнала пропорциональна приложенному напряжению смещения, деленному на квадрат длины контактного зазора V/d^2 [9]:

$$E_{\text{ТГц_max}} \sim e\mu t_{\text{int}} \frac{1-R}{h\nu} \frac{pV}{d^2}, \quad (9)$$

где R – коэффициент отражения полупроводника; $h\nu$ – энергия фотона излучения накачки; p – средняя мощность лазерного излучения; t_{int} – временной интервал между соседними импульсами накачки. На рис. 7 показаны значения всех полученных в эксперименте амплитуд сигналов детектора (точки), а также аппроксимация их линейной зависимостью вида (9).

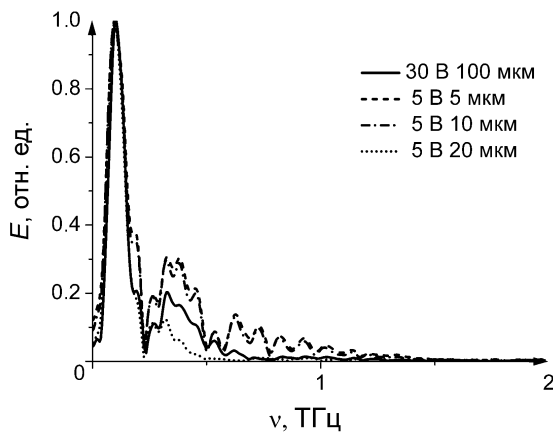


Рис. 6. Волновые формы терагерцового излучения, генерированного ДА на основе SI-GaAs:Cr с контактными зазорами 5, 10, 20 и 100 мкм

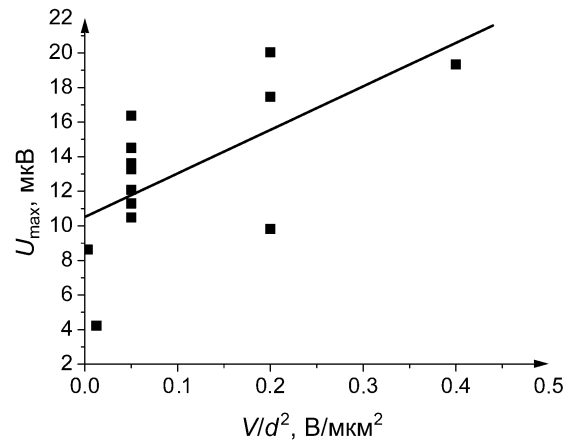


Рис. 7. Зависимость максимальной амплитуды генерируемого излучения (сигнал детектора) от геометрического фактора и приложенного напряжения смещения V . Точками показаны экспериментальные значения, полученные при испытаниях всех изготовленных ДА

Результаты эксперимента по исследованию влияния формы контактного зазора на характеристики генерируемого терагерцового излучения показаны на рис. 8. Как видно, форма контактных зазоров слабо влияет на частный спектр. Прямоугольная форма контактов обеспечивает наиболее широкий спектр генерации и наибольшую амплитуду сигнала (см. вставку на рис. 8). На прямоугольном контакте напряженность поля выше, с чем можно связать увеличение амплитуды.

В проведенных исследованиях в качестве приемных антенн использованы ДА с прямоугольной формой контактного зазора и его длиной 5 мкм. Использование максимально короткого контактного зазора необходимо для увеличения напряженности поля, создаваемого терагерцовым импульсом. Эксперимент по детектированию терагерцового излучения проводился для трех антенн в идентичных условиях (рис. 9). В качестве измеряемого терагерцового импульса использованы импульсы, генерированные от поверхности кристалла LT-GaAs [10].

Антенны-стандарты были снабжены встроенными фокусирующими линзами на входе. Средняя мощность пробного лазерного излучения составляла 25 мВт. Как видно из рис. 9, наиболее гладкий и широкий спектр детектирования обеспечивает линейка ДА, при этом дискретная антенна на LT-GaAs не уступает в области более высоких терагерцовых частот, несмотря на большее время жизни носителей заряда в ее активной среде. В исследуемой ДА на SI-GaAs:Cr сигнал был на порядок слабее по сравнению с антеннами-стандартами. В первую очередь это должно быть связано с отсутствием фокусирующей линзы на входе, наличие которой более критично в случае приемной антенны. По максимуму спектральной чувствительности при работе в качестве детектора изготовленная антенна идентична антенне-генератору.

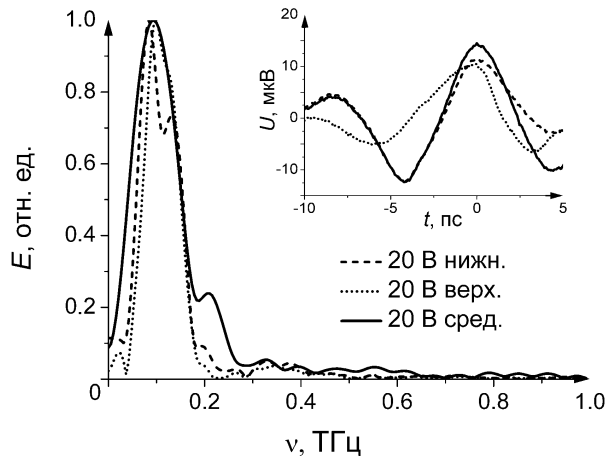


Рис. 8. Волновые формы терагерцового излучения, генерированного изготовленной ДА на основе SI-GaAs:Cr с тремя областями для фотовозбуждения шириной 20 мкм. Конфигурация контактов показана на рис. 1, б. Соответствующие амплитудно-временные формы (участки в районе главного максимума) показаны на вставке

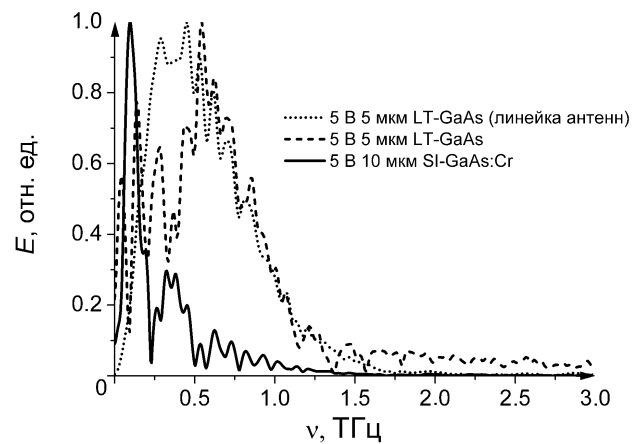


Рис. 9. Волновые формы терагерцового излучения, детектированного изготовленной ДА на основе SI-GaAs:Cr с зазором 5 мкм, а также линейкой ДА и дискретной ДА на основе LT-GaAs

Заключение

В результате проделанной работы разработана конструкция ДА на основе SI-GaAs:Cr, отработана технология их изготовления, а также проведены их испытания в схемах генерации и детектирования терагерцового излучения. По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- Полуизолирующий арсенид галлия, компенсированный хромом, позволяет реализовывать ДА с контактными зазорами 5 мкм, обеспечивающие генерацию импульсов терагерцового излучения в области низких терагерцовых частот 0,05–0,7 ТГц при пролетном механизме изменения тока неравновесных носителей через антенну; для расширения частотного диапазона в область более высоких частот необходимо применение активной среды с более низким временем жизни неравновесных носителей заряда, например LT-GaAs или SI-GaAs с дополнительно модифицированной поверхностью.

- Генерируемое терагерцовое излучение имеет широкую диаграмму направленности, что определяет необходимость использования коллимирующих линз.

- Спектральные характеристики генерируемого и детектируемого широкополосного терагерцового излучения слабо зависят от формы и ширины контактного зазора дипольной антенны; они определяются параметрами полупроводника и длиной антенны.

Для дальнейшего улучшения рабочих характеристик ДА планируется получить рабочий материал с более низким временем жизни носителей заряда, оптимизировать топологию контактов для работы в области более высоких частот. Также будет отработано сопряжение дипольной антенны с полусферической линзой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Auston D. H. // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 26. – No. 3. – P. 101–103.
2. Mourou G., Stancampiano C. V., Antonetti A., and Orszag A. // Appl. Phys. Lett. – 1981. – V. 39. – No. 4. – P. 295–296.
3. Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., and Fattinger C. // JOSA B. – 1990. – V. 7. – No. 10. – P. 2006–2015.
4. Shi W., Jia W.-L., Hou L., et al. // Chin. Phys. Lett. – 2004. – V. 21. – No. 9. – P. 1842–1844.
5. Han P. Y. and Zhang X.-C. // Meas. Sci. Technol. – 2001. – V. 12. – No. 11. – P. 1747–756.
6. Tani M., Matsuura S., Sakai K., and Nakashima S.-I. // Appl. Opt. – 1997. – V. 36. – No. 30. – P. 7853–7859.

7. Yano R., Gotoh H., Hirayama Y., et al. // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 103103-1–6.
8. Awad M., Nagel M., Kurz H., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2007. – V. 91. – P. 181124-1–3.
9. Tani M., Herrmann M., and Sakai K. // Meas. Sci. Technol. – 2002. – V. 13. – P. 1739–1745.
10. Назаров М.М., Шкуринов А.П., Ангелуц А.А., Сапожников Д.А. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – № 8. – С. 595–606.

*Сибирский физико-технический институт Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 15.06.12.

**Институт проблем лазерной и информационной техники РАН, г. Шатура, Московская область, Россия

***Московский государственный университет, г. Москва, Россия

E-mail: sarkisov@elefot.tsu.ru

Саркисов Сергей Юрьевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Сафиуллин Фарит Дигангереевич, студент;

Скакунов Максим Сергеевич, мл. науч. сотр.;

Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н., профессор;

Тяжев Антон Владимирович, зав. лабораторией;

Назаров Максим Михайлович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;

Шкуринов Александр Павлович, к.ф.-м.н., доцент.