

Генерация и детектирование терагерцевого излучения в низкотемпературных эпитаксиальных пленках GaAs на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A

© Г.Б. Галиев¹, С.С. Пушкарёв^{1,¶}, А.М. Буряков², В.Р. Билык², Е.Д. Мишина²,
Е.А. Климов¹, И.С. Васильевский³, П.П. Мальцев¹

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

² Московский технологический университет „МИРЭА“, 119454 Москва, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

¶ E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

(Получена 20 сентября 2016 г. Принята к печати 26 сентября 2016 г.)

Методом терагерцевой спектроскопии исследована эффективность генерации и детектирования ТГц-излучения в диапазоне до 3 ТГц пленками LT-GaAs, содержащими легирующие эквидистантные δ -слои Si и выращенными методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A. На поверхности пленок были изготовлены микрополосковые фотопроводящие антенны. Генерация ТГц-излучения происходила при облучении зазора антенны фемтосекундными оптическими лазерными импульсами. Показано, что интенсивность ТГц-излучения от фотопроводящей антенны на LT-GaAs/GaAs (111)A в 2 раза больше, чем от такой же антенны на LT-GaAs/GaAs (100), а чувствительность антенны на LT-GaAs/GaAs (111)A как детектора ТГц-излучения в 1.4 раза превосходит чувствительность антенны на LT-GaAs/GaAs (100).

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44347.8408

1. Введение

Терагерцевая спектроскопия с временным разрешением — актуальный и активно развивающийся в настоящее время метод диагностики различных материалов и биологических объектов с помощью малоинтенсивного электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот (100 ГГц–3 ТГц). Для генерации и детектирования терагерцевого излучения в этом методе используются фотопроводящие антенны (ФП антенны) на основе специфических полупроводниковых материалов. Такие материалы должны обладать либо малым временем релаксации импульса фотовозбужденных носителей заряда, либо их малым временем жизни. К первому типу материалов относятся бездефектные монокристаллические пленки GaAs [1], а ко второму — пленки GaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре подложки (low-temperature GaAs, LT-GaAs) [2].

Пониженная температура роста приводит к тому, что реиспарение мышьяка с поверхности растущей пленки подавлено, и она захватывает до 1.5% избыточных атомов мышьяка (в то время как в стехиометрическом соединении GaAs атомов Ga и As ровно по 50%) [3–5]. Вследствие этого пленка LT-GaAs обладает высокой концентрацией антиструктурных дефектов As_{Ga} (атом As в узле атома Ga) порядка 10^{20} см^{-3} [6]. В заряженном состоянии As_{Ga}^+ эти дефекты действуют как ловушки для электронов и тем самым обеспечивают крайне малое время жизни фотовозбужденных электронов (менее пикосекунды) [7].

Для увеличения концентрации заряженных дефектов As_{Ga}^+ материал LT-GaAs легируют акцепторной примесью (как правило, бериллием) [7]. В работах [8,9] показано, что структуры LT-GaAs:Be могут быть использованы в оптоэлектронных устройствах терагерцевого диапазона частот, причем такие устройства имеют лучшие параметры по сравнению с устройствами на базе нелегированного LT-GaAs. Однако из-за высокой токсичности Be его использование при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в последнее время снижается и мало распространено в промышленном производстве, поскольку требует дополнительных мер безопасности. Кроме того, наличие в установке МЛЭ источника Be приводит к повышению фоновой примеси p -типа, что отрицательно сказывается на качестве в последующем выращиваемых в ней гетероструктур n -типа (например, НЕМТ-гетероструктур с высокой подвижностью электронов).

Хорошо известно, что кремний проявляет ярко выраженные амфотерные свойства как легирующая примесь в эпитаксиальных пленках GaAs, выращенных на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (111)A при стандартных температурах роста (500–600°C). В этом случае, меняя соотношение потоков мышьяка и галлия γ , на подложке GaAs (111)A можно вырастить легированные кремнием слои GaAs как с n -, так и с p -типом проводимости [10,11]. Однако легирующие свойства Si в пленках LT-GaAs, выращенных на подложке GaAs (111)A, ранее не исследовались.

В данной работе исследуются генерация и детектирование терагерцевого излучения фотопроводящими

антеннами на пленках LT-GaAs, эпитаксиально выращенных на подложках GaAs как со стандартной кристаллографической ориентацией (100), так и с ориентацией (111)А и легированных атомами Si. Цель работы — установить, на какой подложке эпитаксиальная пленка LT-GaAs обладает лучшими свойствами как материал для фотопроводящей терагерцевой антенны. При этом имеется в виду, что на свойства пленки LT-GaAs влияет не только возможное проявление амфотерности атомов Si, но и особенности кристаллической структуры, приобретаемые пленкой LT-GaAs при росте на разных подложках. Кроме того, свойства исследуемых ФП антенн сравниваются со свойствами традиционно применяемого для тех же целей нелинейного кристалла ZnTe.

2. Образцы и методика эксперимента

Исследуемые в данной работе образцы одинакового дизайна были выращены на полуизолирующих подложках GaAs(100) и (111)А методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Образец на подложке GaAs(100) обозначается в дальнейшем LT-GaAs/GaAs(100) (номер ростового процесса 975-3.3), а образец на подложке GaAs(111)А — LT-GaAs/GaAs(111)А (номер ростового процесса 978-6.3). Дизайн образцов представлен на рис. 1. Образцы состоят из двух слоев: слоя *i*-GaAs толщиной 0.2 мкм, выращенного при температуре 560°C, и слоя LT-GaAs толщиной 1 мкм, выращенного при температуре 230°C. Слой LT-GaAs содержит три δ -слоя кремния, расположенных на расстоянии 0.255 мкм друг от друга. Концентрация атомов Si в каждом из δ -слоев указана на рис. 1. Отношение потоков As₄ и Ga во время роста составляло ~ 20 . После роста образцы были подвергнуты отжигу в камере роста установки молекулярно-лучевой эпитаксии в потоке As₄ при температуре 590°C в течение 1 ч. Морфология поверхности, кривые дифракционного отражения и спектры фотолюминесценции этих образцов обсуждаются в работе [12].

На поверхности выращенных образцов методом фотолитографии были изготовлены микрополосковые фотопроводящие антенны. Они представляли собой омические контакты Ti/Au (50/800 нм) в виде двух параллельных полосок шириной 100 мкм и с расстоянием между ними 200 мкм (рис. 2, а).

Экспериментальная установка для исследования генерации и детектирования ТГц-излучения показана на рис. 2, б. В качестве источника оптической накачки ФП антенн использовался твердотельный лазер на кристалле сапфира, легированного ионами титана, с длиной волны 800 нм (энергия фотона 1.55 эВ), длительностью импульса 100 фс и частотой следования импульсов 80 МГц. Плотность средней мощности накачки составляла $3.71 \cdot 10^3$ Вт/см², зондирования — $0.88 \cdot 10^3$ Вт/см². Оптическое излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром ~ 12 мкм между электродами ФП антенны. Для достижения оптимальных условий генерации ТГц-излучения пятно луча накачки было

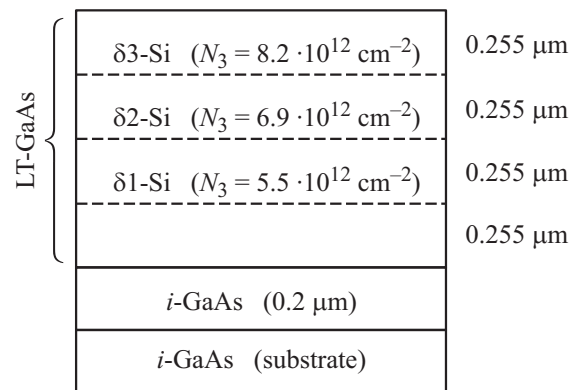


Рис. 1. Дизайн исследуемых образцов.

сдвинуто к анодному электроду ФП антенны, поскольку электрическое поле между двумя далеко отстоящими металлическими линейными электродами сильно неоднородно и концентрируется возле анода [13,14].

Одни и те же изготовленные образцы ФП антенн на пленках LT-GaAs(100) и LT-GaAs(111)А тестировались как в режиме генерации, так и в режиме детектирования ТГц-излучения. В качестве эталонного генератора и детектора использовался нелинейный кристалл ZnTe. При генерации ТГц-излучения ФП антеннами к их контактам прикладывалось напряжение смещения, тем самым создавалось внешнее электрическое поле в зазоре между контактами, которое ускоряло фотовозбужденные носители заряда. Напряжение смещения варьировалось в диапазоне 0–60 В. При детектировании ТГц-излучения ФП антеннами напряжение смещения не прикладывалось, а фототок в антенне появлялся из-за действия на фотовозбужденные носители заряда электрического поля терагерцевого излучения. Этот фототок являлся электрическим сигналом терагерцевой частоты, полностью соответствующим детектируемому ТГц-импульсу. Для его измерения использовался синхронный усилитель SR 830, который позволяет извлечь сигнал с заданной длиной волны в зашумленной среде (даже тогда, когда шум и сигнал неразличимы во временной области, но сигнал имеет определенную полосу частот и нет больших пиков шума в пределах этого диапазона, то шум и сигнал могут быть отделены друг от друга).

В схеме с нелинейно-оптическим кристаллом ZnTe принцип детектирования ТГц-излучения основан на методе электрооптического стробирования широкого терагерцевого импульса короткими фемтосекундными импульсами [15,16]. Принцип работы основан на взаимодействии терагерцевого и оптического излучений в нелинейной среде за счет модуляции фазы оптического излучения терагерцевой волной. Сканирование фазы терагерцевой волны осуществляется с помощью временной линии задержки. В качестве детекторов и генераторов используют нелинейные кристаллы с высокой нелинейной восприимчивостью второго порядка LiTaO₃, LiNbO₃, ZnTe [14].

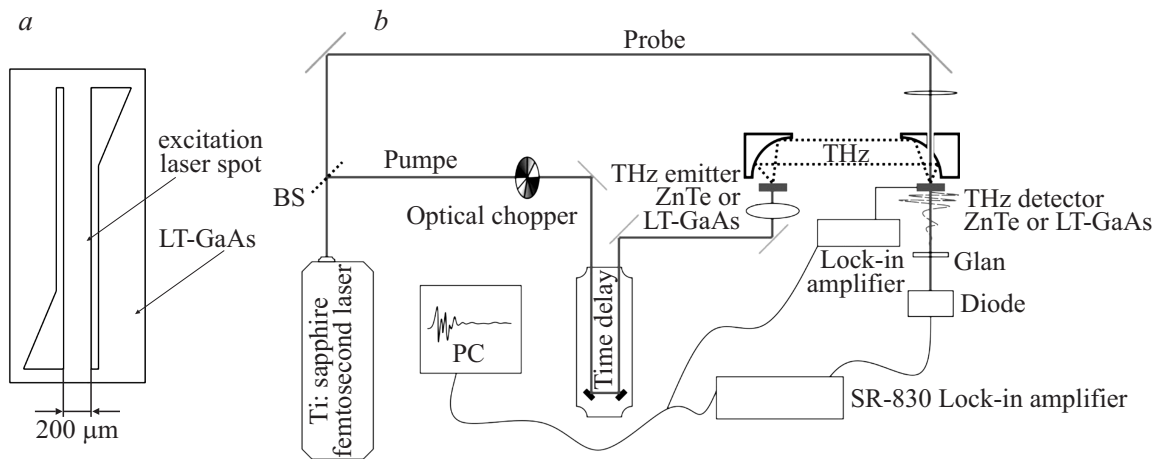


Рис. 2. Схема ФП антенн на LT-GaAs (a) и экспериментальной установки для генерации и детектирования ТГц-излучения от нелинейного кристалла ZnTe (b).

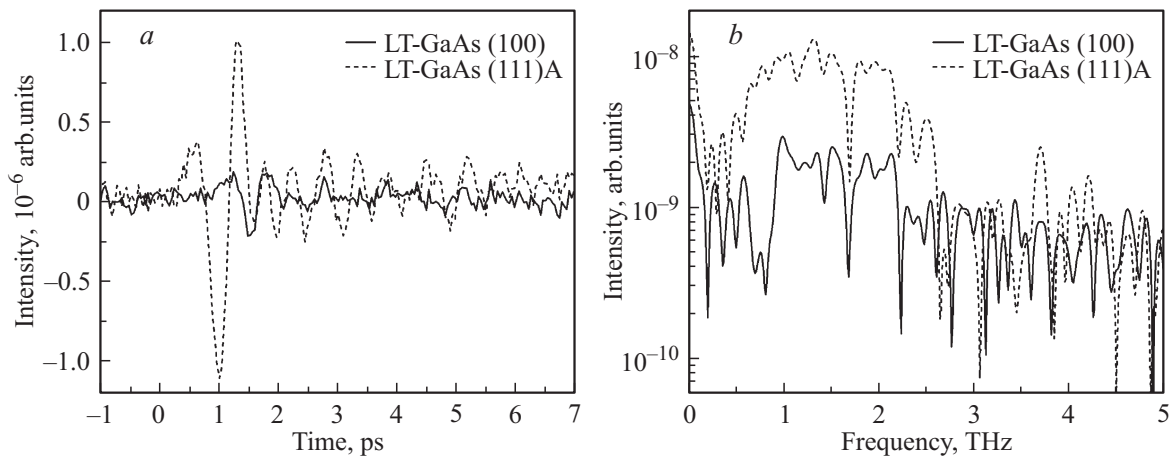


Рис. 3. Генерация ТГц-излучения пленками LT-GaAs без приложения внешнего электрического поля (детектор — кристалл ZnTe): a — временная зависимость ТГц-излучения пленками LT-GaAs (100) и (111)A; b — частотный спектр ТГц-излучения.

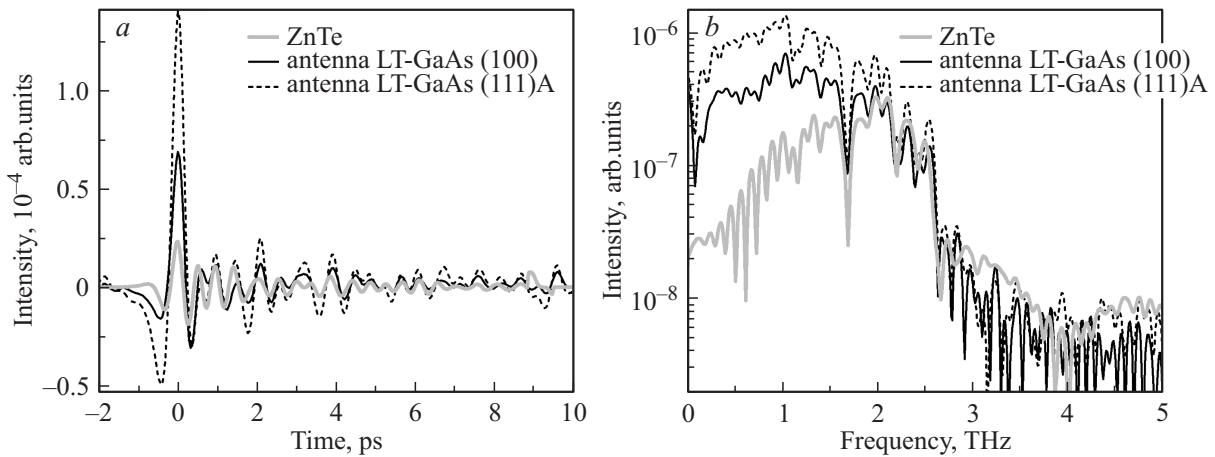


Рис. 4. Сравнение терагерцевых генераторов (детектор — кристалл ZnTe): a — временная форма ТГц-импульса при применении напряжения смещения 60 В; b — спектр ТГц-излучения.

Характеристики нелинейного кристалла ZnTe, пленок и ФП антенн, к которым приложено напряжение 60 В, в диапазоне частот 0–5 ТГц

	ZnTe	Пленка LT-GaAs		ФП антенна на LT-GaAs	
		Подложка GaAs (100)	Подложка GaAs (111)A	Подложка GaAs (100)	Подложка GaAs (111)A
Генерация					
$(f_{1/2})_{\min}$, ТГц*	1.00	~ 0.5**	0.60	0.42	0.28
$(f_{1/2})_{\max}$, ТГц*	2.37	~ 3.5**	2.17	1.97	1.58
Ширина полосы излучения, ТГц	1.37	~ 3.0**	1.57	1.55	1.30
Нормированная интегральная интенсивность ТГц-излучения	1	~ 0.014**	0.050	2.30	4.52
Детектирование					
$(f_{1/2})_{\min}$, ТГц	1.03	—	—	0.83	0.81
$(f_{1/2})_{\max}$, ТГц	2.32	—	—	2.13	2.13
Ширина полосы чувствительности, ТГц	1.29	—	—	1.30	1.32
Нормированная интегральная чувствительность к ТГц-излучению	1	—	—	1.28	1.80

Примечание.* Погрешность определения частоты составляет ± 0.04 ТГц. ** Величины указаны оценочно, так как малая интенсивность сигнала затрудняла анализ его спектра.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны временные формы и частотные спектры ТГц-излучения от ФП антенн без приложения напряжения к их контактам. В качестве детектора использовался кристалл ZnTe. В данном случае происходила генерация ТГц-излучения фотовозбужденными носителями заряда, которые ускорялись внутренними электрическими полями, существующими в пленке LT-GaAs. Спектры генерируемых ТГц-излучений одинаковы для обеих пленок, однако интенсивность спектра для пленки LT-GaAs(111)A в 3.6 раз больше. По сравнению с нелинейным кристаллом ZnTe пленки LT-GaAs (100) и LT-GaAs (111)A без приложения внешнего электрического поля генерируют на 1–2 порядка менее интенсивное ТГц-излучение. Наличие в спектре частоты порядка 0.1 ТГц связано с наличием шумового фона. Следует отметить, что наличие паров воды также снижает чувствительность установки в области линий поглощения. На частоте 1.67 ТГц виден небольшой провал в спектре, который соответствует интенсивному поглощению парами воды.

При подаче напряжения смещения 60 В к контактам ФП антенны интенсивность генерации терагерцевого излучения по отношению к интенсивности без смещения сильно возросла: в 164 раза для ФП антенны на LT-GaAs(100) и в 90 раз для ФП антенны на LT-GaAs (111)A. На рис. 4 показаны временные формы и частотные спектры ТГц-излучения от ФП антенн с приложенным напряжением смещения 60 В. Видно, что интенсивность излучения ФП антенны на LT-GaAs(111)A в 2 раза больше, чем интенсивность излучения ФП антенны на LT-GaAs(100). Спектры излучения ФП антенн похожи, их максимум лежит в области 1 ТГц, в

то время как максимум спектра излучения кристалла ZnTe сдвинут в сторону больших частот и находится в области 2 ТГц. Кроме того, ширина генерируемого спектра ТГц-частот в случае LT-GaAs оказывается выше для обоих типов образцов.

Зависимость интенсивности ТГц-излучения ФП антенны от напряжения смещения показана на рис. 5. Значительное повышение интенсивности наблюдается на фотопроводящей антенне LT-GaAs (111)A. Это повышение связано с большим фототоком, образующимся вследствие большей концентрации свободных носителей заряда в пленке LT-GaAs (111)A. Кроме того, зависимость интенсивности ТГц-излучения от напряжения смещения для антенны LT-GaAs (100) является сублинейной, тогда

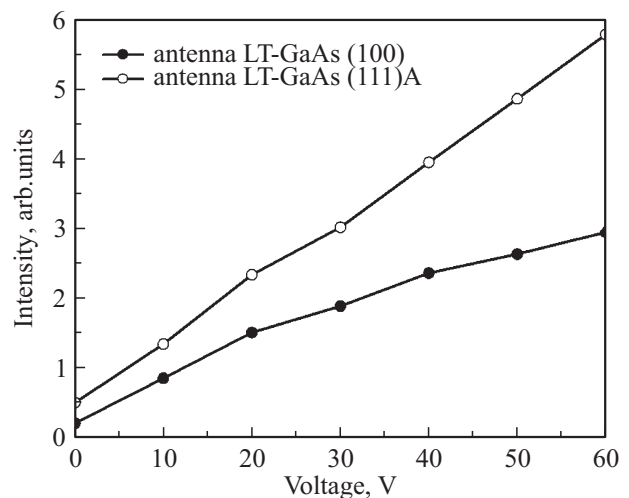


Рис. 5. Интенсивность излучения антенны в зависимости от напряжения смещения, нормированная на интенсивность излучения ZnTe.

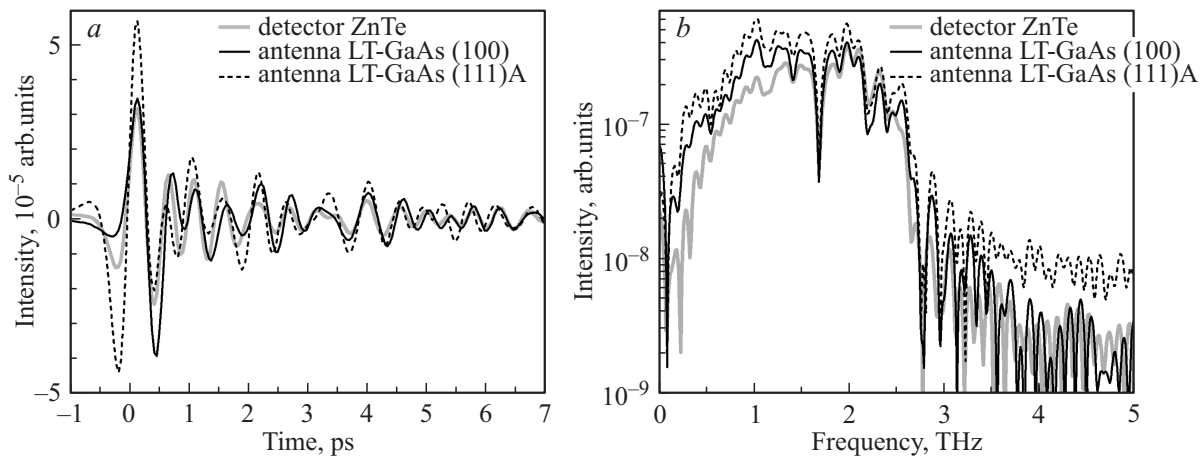


Рис. 6. Сравнение терагерцевых детекторов (генератор ТГц-излучения — кристалл ZnTe): *a* — временная форма электрического импульса с трех типов детекторов; *b* — частотный спектр электрического импульса с трех типов детекторов.

как для антенны LT-GaAs (111)A зависимость близка к линейной.

Также были исследованы детектирующие свойства ФП антенн на LT-GaAs (100) и LT-GaAs (111)A, ТГц-излучение при этом генерировалось нелинейным кристаллом ZnTe. На рис. 6 показаны временные формы и частотные спектры электрических ТГц-импульсов, измеренных ФП антеннами. Выявлено, что чувствительность ФП антенны на LT-GaAs (111)A в 1.5 раза больше чувствительности ФП антенны на LT-GaAs (100), а также нелинейного кристалла ZnTe. Также видно, что общая ширина спектра электрического сигнала составляет 3 ТГц для всех детекторов. Однако в спектре сигнала, измеренного нелинейным кристаллом ZnTe, сравнительно более интенсивна область частот возле 2 ТГц, а в спектре сигналов, измеренных ФП антеннами, присутствует дополнительная интенсивная область вблизи 1 ТГц, благодаря которой спектр становится более однородным.

Низкочастотную область в спектрах излучения и чувствительности ФП антенн можно объяснить их топологией: антенна в виде двух параллельных полосковых контактов с расстоянием d между ними является резонансной, ее резонансная частота определяется выражением

$$d = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{c}{2f_{\text{res}}\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{\text{GaAs}} + 1}{2} = 7$$

и равна 0.28 ТГц. Тем не менее, как показано в работе [14], в спектрах излучения полосковых ФП антенн не наблюдаются отчетливые пики, связанные с резонансными частотами. При изменении размеров ФП антенны спектр всего лишь несколько изменяет свою форму.

В результате более подробного анализа всех рассмотренных спектров (рис. 3, *b*, 4, *b*, 6, *b*) получены численные характеристики спектров, которые приведены в таблице. Полоса излучения/чувствительности определялась как диапазон частот, в котором излучается/детектируется 50% интегральной интенсивности, при

этом интенсивность на граничных частотах $(f_{1/2})_{\text{min}}$ и $(f_{1/2})_{\text{max}}$ приблизительно одинакова.

4. Заключение

В данной работе показано, что пленки LT-GaAs на подложках GaAs (100) и (111)A генерируют ТГц-излучение в диапазоне до 3 ТГц при облучении их фемтосекундными импульсами лазера с длиной волны 800 нм. Сравнение пленок показывает, что интенсивность ТГц-излучения от пленки LT-GaAs на несингулярной подложке GaAs (111)A в 3.6 раза больше, чем от пленки LT-GaAs на сингулярной подложке GaAs (100). Интенсивность ТГц-излучения от ФП антенны в виде двух параллельных полосок Ti/Au шириной 100 мкм и с расстоянием между ними 200 мкм, изготовленных на поверхности этих пленок, при приложении напряжения 60 В к контактам антенны на 2 порядка превосходит интенсивность ТГц-излучения от соответствующих пленок без антенн. Сравнение ФП антенн показывает, что интенсивность ТГц-излучения от ФП антенны на LT-GaAs/GaAs (111)A в 2 раза больше, чем от такой же ФП антенны на LT-GaAs/GaAs (100), и в 4.5 раза превосходит интенсивность ТГц-излучения от нелинейного кристалла ZnTe.

Чувствительность ФП антенны на LT-GaAs/GaAs (111)A, выступающей в роли детектора ТГц-излучения, в 1.4 раза превосходит чувствительность ФП антенны на LT-GaAs/GaAs (100) и в 1.8 раза превосходит чувствительность нелинейного кристалла ZnTe.

Как генератор ТГц-излучения, ФП антенна на LT-GaAs/GaAs (111)A значительно превосходит ФП антенну на LT-GaAs/GaAs (100). В то же время, как детектор ТГц-излучения, ФП антенна на LT-GaAs/GaAs (111)A лишь ненамного лучше, чем ФП антенна на LT-GaAs/GaAs (100).

Лучшие свойства ФП антенн на пленках LT-GaAs на подложках (111)A по сравнению с пленками LT-GaAs на подложках (100) следует приписать особенностям кристаллической структуры пленок LT-GaAs, образующимся при использовании несингулярной подложки GaAs (111)A для эпитаксиального роста пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-12-01080), Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.Z50.31.0034 и Государственное задание № 3.7331.2017/П220) и РФФИ (проект № 16-29-03294 офи_м).

Список литературы

- [1] M. Venkatesh, K.S. Rao, T.S. Abhilash, S.P. Tewari, A.K. Chaudhary. *Optical Mater.*, **36**, 596 (2014).
- [2] Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, Р.Р. Галиев, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, Ю.В. Федоров, А.С. Бугаев. *Нано- и микросистемная техника*, **6**, 28 (2014).
- [3] Z. Liliental-Weber, W. Swider, K.M. Yu, J. Kortright, F.W. Smith, A.R. Calawa. *Appl. Phys. Lett.*, **58**(19), 2153 (1991).
- [4] Z. Liliental-Weber, H.J. Cheng, S. Gupta, J. Whitaker, K. Nichols, F.W. Smith. *J. Electron. Mater.*, **22**(12), 1465 (1993).
- [5] M. Missous. *Microelectronics J.*, **27**, 393 (1996).
- [6] B. Grandidier, Huajie Chen, R.M. Feenstra, D.T. McInturff, P.W. Juodawlkis, S.E. Ralph. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1439 (1999).
- [7] Patent US 8835853. Photoconductive element / Toshihiko Ouchi, Kousuke Kajiki; Canon Kabushiki Kaisha, Tokyo. Publication date 16.09.2014.
- [8] J.-L. Coutaz, J.-F. Roux, A. Gaarder, S. Marcinkevicius, J. Jasinski, K. Korona, M. Kaminska, K. Bertulis, A. Krotkus. *XI Intern. Semiconducting and Insulating Material Conference* (Canberra, Australia, July 3–7, 2000) p. 89.
- [9] P. Specht, S. Jeong, H. Sohn, M. Luysberg, A. Prasad, J. Gebauer, R. Krause-Rehberg, E.R. Weber. *Mater. Sci. Forum*, **258–263**, 251 (1997).
- [10] Г.Б. Галиев, В.Г. Мокеров, В.В. Сарайкин, Ю.В. Слепнев, Г.И. Шагимурагов, Р.М. Имамов, Э.М. Пашаев. *ЖТФ*, **71**(4), 47 (2001).
- [11] G. Galiev, V. Kaminskii, D. Milovzorov, L. Velihovskii, V. Mokerov. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**(2), 120 (2002).
- [12] Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, М.М. Грехов, С.С. Пушкарёв, Д.В. Лаврухин, П.П. Мальцев. *ФТП*, **50**(2), 195 (2016).
- [13] P. Uhd Jepsen, R.H. Jacobsen, S.R. Keiding. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**(11), 2424 (1996).
- [14] Masahiko Tani, Shuji Matsuura, Kiyomi Sakai, Shin-ichi Nakashima. *Appl. Optics*, **36**(30), 7853 (1997).
- [15] S.P. Kovalev, G.Kh. Kitaeva. *JETP Lett.*, **94**(2), 95 (2011).
- [16] C. Winnewisser, P. Uhd Jepsen, M. Schall, V. Schyja, H. Helm. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3069 (1997).

Редактор А.Н. Смирнов

Generation and detection of terahertz radiation by low-temperature-grown epitaxial films GaAs on (100) and (111)A oriented GaAs substrates

G.B. Galiev¹, S.S. Pushkarev¹, A.M. Buriakov², V.R. Bilyk², E.D. Mishina², E.A. Klimov¹, I.S. Vasil'evskii³, P.P. Maltsev¹

¹ Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

² Moscow Technological University „MIREA“, 119454 Moscow, Russia

³ National Research Nuclear University „MEPhI“, 115409 Moscow, Russia

Abstract The efficiency of generation and detection of terahertz radiation in the bandwidth up to 3 THz by photoconductive strip-line antennas on low-temperature-grown GaAs was investigated by means of time-domain terahertz spectroscopy. LT-GaAs films were grown by molecular beam epitaxy on substrates GaAs with orientation (100) and (111)A and contained equidistant Si δ -layers. Generation and detection of THz-radiation realized when LT-GaAs film or photoconductive antenna gap was illuminated by femtosecond 800 nm laser pulses. THz-radiation from LT-GaAs/GaAs (111)A-based antenna was shown to be 2.0 more intensive than one from LT-GaAs/GaAs (100)-based antenna. The sensitivity of LT-GaAs/GaAs (111)A-based antenna was shown to be 1.4 times higher than one of LT-GaAs/GaAs (111)A-based antenna.