

06:07

## Влияние режима отжига на свойства терагерцевой фотопроводящей антенны на основе LT-GaAs

© С.А. Номоев<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>,  
К.И. Козловский<sup>1</sup>, А.А. Чистяков<sup>1</sup>, Е.Д. Мишина<sup>2</sup>,  
Д.И. Хусяинов<sup>2</sup>, А.М. Буряков<sup>2,¶</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский технологический университет „МИРЭА“, Москва, Россия

¶ E-mail: bello16@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2017 г.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены пленки LT-GaAs (low temperature gallium arsenide — арсенид галлия, выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой температуре роста) на подложках GaAs(100) при температуре 230°C и проведен постростовой отжиг. На поверхности пленок изготовлены фотопроводящие антенны с флажковой геометрией. Получены мощностные зависимости терагерцевого отклика при различных значениях напряжения смещения и температуры постростового отжига. Методом терагерцевой спектроскопии исследованы спектральные характеристики изготовленных фотопроводящих антенн. Определен диапазон оптимальной температуры постростового отжига (670–720°C) пленок LT-GaAs.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45459.16947

Источники и детекторы терагерцевого (THz) излучения являются перспективными компонентами систем высокоскоростной беспроводной связи, медицинской и фармацевтической диагностики, бесконтактного контроля качества материалов и дистанционного обнаружения опасных объектов [1].

В качестве функционального слоя фотопроводящих антенн (ФПА) главным образом используются полупроводниковые материалы. Основным свойством таких материалов должно быть малое время жизни фотовозбужденных носителей заряда. Один из наиболее часто используемых полупроводников — низкотемпературный арсенид галлия

Параметры отжига структур и интегральная ТНз-мощность ФПА на их основе

Образец	Температура отжига $T_{ann}$ , °C	Время отжига $t_{ann}$ , min	Мощность ТНз-отклика $P$ , $\mu W^*$
LT-GaAs-1	670	6	5
LT-GaAs-2	700	6	4.2
LT-GaAs-3	720	6	1.4

\* При напряжении смещения 160 V.

(LT-GaAs). LT-GaAs имеет малое время жизни (1–10 ps) [2] и относительно высокую подвижность фотовозбужденных носителей заряда. Высокая концентрация структурных дефектов LT-GaAs создает глубокие центры, возникающие в процессе роста и постростового отжига благодаря избытку мышьяка. Эти глубокие центры обеспечивают рекордно низкие времена жизни неравновесных носителей [2]. Поэтому при оптическом возбуждении структуры LT-GaAs способны генерировать пикосекундные (и более короткие) электрические импульсы, имеющие спектральный максимум в ТНз-области [3].

В большинстве исследований по созданию LT-GaAs [4,5] постростовой отжиг проводится в *in situ* в камере эпитаксиальной установки при температурах до 600°C от одной до нескольких минут с избыточным давлением мышьяка 0.5%. При этом возможны процессы частичной потери мышьяка с поверхности, которые можно устранить, например, закрытием поверхности пластиной GaAs. Уоррен с соавторами [6] в качестве фотопроводящего материала использовали LT-GaAs, отожженный при 600°C. Низкотемпературный арсенид галлия, отожженный при 600°C, может генерировать более высокочастотное ТНз-излучение (до 3 ТНз) с повышенной мощностью, чем неотожженный LT-GaAs.

Таким образом, несмотря на значительное количество экспериментальных исследований, оптимальные режимы отжига LT-GaAs определены недостаточно. Основная цель настоящей работы — определение оптимальной температуры отжига LT-GaAs для получения максимальной мощности ТНз-излучения в фотопроводящих антеннах с флажковой геометрией контактов в системах ТНз-спектроскопии временного разрешения.

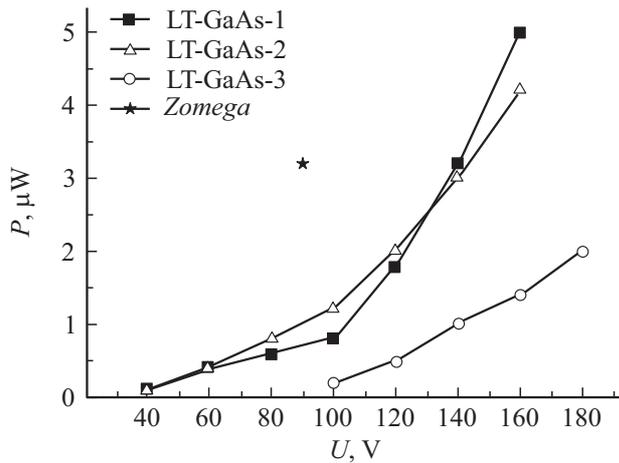
Пленки LT-GaAs выращивались на подложках GaAs(100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии [7]. Температура роста LT-GaAs составляла  $T_g = 230^\circ\text{C}$ . Значение отношения потоков мышьяка As<sub>4</sub> и галлия ( $\gamma = P_{\text{As}}/P_{\text{Ga}}$ ) равнялось 19. Это значение было выбрано в соответствии с исследованиями, проведенными в работе [8], в которой отношение потоков мышьяка и галлия равнялось 20, что намного больше, чем обычное отношение мышьяка к галлию — 6 [9]. Параметры отжига созданных образцов LT-GaAs, а также их обозначения приведены в таблице.

Рост в условиях, близких к стехиометрическим ( $J_{\text{As}}/J_{\text{Ga}} \approx 1$ ), позволяет даже при весьма низких температурах ( $T_g \approx 150^\circ\text{C}$ ) получать слои LT-GaAs с малой плотностью дефектов и параметрами, близкими к параметрам слоев, выращенных при стандартных температурах. Как отмечается в [10], увеличение потока мышьяка в процессе роста слабо влияет на концентрацию мышьяка в GaAs. Однако в других исследованиях [8,11] приводятся данные о высокой концентрации структурных дефектов As при больших значениях его потока. Поэтому нами выбраны высокие значения  $\gamma$ , которые позволят создать высокую концентрацию дефектов мышьяка и соответственно при последующем высокотемпературном отжиге сформировать глубокие центры и обеспечить низкое время релаксации носителей заряда в GaAs.

Образцы подвергались отжигу в высоковакуумной камере при температуре ( $T_{\text{анн}}$ ) от 670 до 720°C. Время отжига составило 6 min в вакууме  $10^{-7}$  Торр без стабилизации потоком мышьяка, при этом лицевая сторона структуры плотно закрывалась подложкой GaAs. Достаточно малое время отжига использовалось для того, чтобы предотвратить сильное снижение плотности кластеров мышьяка, а также сегрегацию мышьяка к поверхности структуры и последующее его испарение.

После роста структур на всех образцах методом контактной фотолитографии были сформированы ФПА Ni/AuGe/Ni/Au с шириной зазора 200  $\mu\text{m}$  и флажковой геометрией.

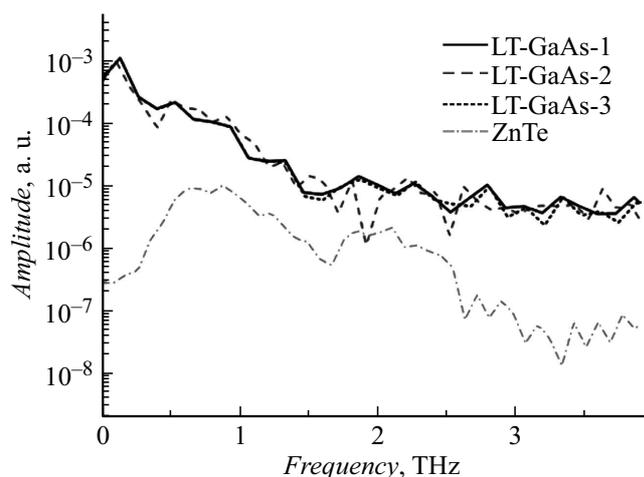
Для измерения абсолютного значения генерируемой мощности THz-излучения ФПА использовалась оптическая установка с пироэлектрическим детектором. На рис. 1 представлены зависимости мощности THz-отклика ФПА на основе LT-GaAs-1,2,3 от напряжения смещения. На рисунке также указано значение THz-излучения коммерческой антенны *Zomega*. Видно, что кривая для всех ФПА представляет собой нелинейно возрастающую зависимость (аппроксимация дает зависи-



**Рис. 1.** Мощность THz-отклика ФПА в зависимости от напряжения смещения.

мощь  $P(U) = 1.6 + 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot U^2$ ), что согласуется с теоретическими оценками [12]. Изготовленные нами антенны обладают более высокой мощностью THz-излучения при повышенных и напряжениях смещения (выше 140 V) по сравнению с антенной зарубежной фирмы *Zomega* и выдерживают работу при напряжениях до 160–180 V. Кроме того, видно, что максимальный THz-отклик мощностью 5.0 и 4.2  $\mu\text{W}$  наблюдался у структур LT-GaAs-1 и LT-GaAs-2. Вероятнее всего, это связано с тем, что постростовый отжиг приводит к образованию металлических кластеров As в матрице GaAs с характерными размерами от единиц до десятков нанометров и улучшает их качество, т.е. получаются четкие границы кристалла [13], которые придают материалу необходимые для эффективной генерации свойства: высокое удельное сопротивление (до  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ) и чрезвычайно малое (менее 1 ps) время жизни носителей заряда.

Для определения спектральных характеристик THz-излучения использовалась методика терагерцевой спектроскопии временного разрешения. Схема экспериментальной оптической установки подробно описана в [11]. Детектором THz-волны являлась антенна типа логарифмической спирали с плазмонной структурой. Методика измерения



**Рис. 2.** Сравнение спектров ТГц-излучения терагерцевых генераторов LT-GaAs-1, LT-GaAs-2, LT-GaAs-3 и ZnTe (детектор — кристалл ZnTe). Сигнал обработан с помощью быстрого преобразования Фурье, напряжение смещения 100 V, мощность луча накачки 300 mW, мощность зондирующего пучка 150 mW.

заключается в сканировании медленно изменяющегося поля ТГц-волны зондирующим фемтосекундным лазерным импульсом путем изменения разности оптических путей между лучами при помощи линии задержки. Таким образом при перемещении линии задержки регистрируется временная развертка поля ТГц-волны.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности ТГц-отклика ФПА на основе LT-GaAs-1,2,3 и ZnTe от частоты в диапазоне 0–4 THz при напряжении смещения 100 V. Проводилось сравнение характеристик созданных нами ФПА с характеристиками хорошо известного нелинейно-оптического кристалла ZnTe. Из рис. 2 видно, что основная часть ТГц-излучения сосредоточена в узком спектральном диапазоне от 0 до 1.5 THz. Кроме того, для этих ФПА наблюдается два резонансных пика при значении частот  $\sim 0.1$  и  $\sim 0.5$  THz. Максимум спектра излучения кристалла ZnTe сдвинут в сторону больших частот и находится в области 1 THz. Интенсивность ТГц-излучения от ФПА на основе

LT-GaAs на два порядка превосходит интенсивность THz-излучения от нелинейного кристалла ZnTe.

Резонансную частоту для антенны можно оценить с помощью формулы [14]

$$\nu_{res} = \frac{c}{2L_e n}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света,  $n$  — показатель преломления полупроводника на длине волны генерируемого излучения (для GaAs  $n \sim \sqrt{13}$ ),  $L_e$  — эффективная длина антенны, включающая ширину полосковой линии  $D$ :  $L_e = L + 2D$  ( $L$  — ширина антенны от внешнего края анода до внешнего края катода). Оценка дает для использованной нами топологии антенны ( $L = 200 \mu\text{m}$  и  $D = 100 \mu\text{m}$ ) частоту  $0.104 \text{ THz}$ , что согласуется с частотой резонансного пика полученных спектров. Из рис. 2 видно, что положение резонансных пиков одинаково для образцов LT-GaAs-1,2,3. Это обусловлено тем, что используемая большая эффективная длина антенны не позволяет получить более высокие частоты и выявить возможное различие во временах релаксации носителей заряда в данных образцах.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют, что изготовленная на основе LT-GaAs-1 ФПА обладает высокими характеристиками мощности излучения: THz-отклик мощностью  $5 \mu\text{W}$  при напряжении смещения  $160 \text{ V}$  и фототоке  $14 \text{ mA}$ . Показано, что изготовленная антенна обладает характеристиками, превосходящими по генерируемой мощности (в 1.5 раза) и фототоковой эффективности (в 3 раза) зарубежные аналоги. Определены оптимальные температуры отжига ( $670\text{--}720^\circ\text{C}$ ) LT-GaAs для генерации высокоинтенсивных THz-волн с использованием антенн с флажковой геометрией контактов. ФПА на основе LT-GaAs с флажковой геометрией генерируют THz-сигнал в спектральном диапазоне до  $1 \text{ THz}$  с резонансным максимумом  $0.1 \text{ THz}$ . Сравнение интенсивностей THz-излучения фотопроводящих антенн и ZnTe показывает, что интенсивность THz-излучения от ФПА на основе LT-GaAs приблизительно на два порядка превосходит интенсивность THz-излучения от нелинейного кристалла ZnTe.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 3.7331.2017/9.10), РФФИ (проект № 16-29-14029 офи\_м) и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

## Список литературы

- [1] *Krishna M.G., Kshirsagar S.D., Tewari S.P.* // Photodetectors / Ed. S. Gateva. InTech, 2012. Ch. 6.
- [2] *Gupta S., Frankel M.Y., Valdmanis J.A., Whitaker J.F., Mourou G.A., Smith F.W., Calawa A.R.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 25. P. 3276–3278.
- [3] *Smith F.W., Le H.Q., Diadiuk V., Hollis M.A., Calawa A.R., Gupta S., Franke M., Dykaar D.R., Mourou G.A., Hsiang T.Y.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 10. P. 890–892.
- [4] *Harmon E.S., Melloch M.R., Woodall J.M., Nolte D.D., Otsuka N., Chang C.L.* // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. N 16. P. 2248–2250.
- [5] *Liu T.-A., Tani M., Nakajima M., Hanyo M., Pan C.-L.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. N 7. P. 1322–1324.
- [6] *Warren A.C., Woodall J.M., Kirchner P.D., Yin X., Pollak F., Melloch M.R., Otsuka N., Mahalingam K.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. N 8. P. 4617–4620.
- [7] *Леваиова А.Е., Пастор А.А., Сердобинцев П.Ю., Чалдышев В.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 37–43.
- [8] *Youn D.-H., Lee S.-H., Ryu H.-C., Jung S.-Y., Kang S.-B., Kwack M.-H., Kim S., Choi S.-K., Baek M.-C., Kang K.-Y., Kim C.-S., Yee K.-J., Ji Y.-B., Lee E.-S., Jeon T.-I., Kim S.-J., Kumar S., Kim G.-H.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. N 12. P. 123528.
- [9] *Zhang D.H., Radhakrishnan K., Yoon S.F.* // J. Cryst. Growth. 1994. V. 135. N 3-4. P. 441–446.
- [10] *Берт Н.А., Вейнгер А.И., Вилисова М.Д., Голощанов С.И., Ивонин И.В., Козырев С.В., Куницын А.Е., Лаврентьева Л.Г., Лубышев Д.И., Преображенский В.В., Семягин Б.Р., Третьяков В.В., Чалдышев В.В., Якубеня М.П.* // ФТП. 1993. Т. 35. В. 10. С. 2609–2625.
- [11] *Галиев Г.Б., Пушкарёв С.С., Буряков А.М., Билык В.Р., Мишина Е.Д., Климов Е.А., Васильевский И.С., Мальцев П.П.* // ФТП. 2017. Т. 51. В. 4. С. 529–534.
- [12] *Kim J.O., Lee S.J., Yee D.S., Noh S.K., Shin J.H., Park K.H., Kang C., Kee C.-S., Kim D.W., Kim J.S.* // J. Korean Phys. Soc. 2011. V. 58. N 5. P. 1334–1338.
- [13] *Kasai S., Watanabe M., Ouchi T.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2007. V. 46. N 7A. P. 4163–4165.
- [14] *Yano R., Gotoh H., Hirayama Y., Miyashita S., Kadoya Y., Hattori T.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. N 10. P. 103103.