

Генерация терагерцового излучения при облучении фемтосекундными лазерными импульсами $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, выращенного на подложке GaAs с метаморфным буферным слоем

© Д.С. Пономарев¹, Р.А. Хабибуллин¹, А.Э. Ячменев¹, П.П. Мальцев¹, М.М. Грехов², И.Е. Иляков³, Б.В. Шишкин³, Р.А. Ахмеджанов³

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

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

(Получена 26 сентября 2016 г. Принята к печати 3 октября 2016 г.)

Приведены результаты исследований генерации терагерцового (ТГц) излучения с помощью спектроскопии с временным разрешением в структуре с фотопроводящим слоем $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$. Исследуемая структура, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs с помощью метаморфного буфера, позволяет генерировать ТГц излучение с широким спектром частот (вплоть до 6 ТГц). Это связано с дополнительным вкладом фотовольтаического эффекта Дембера в генерацию ТГц излучения. Измеренная эффективность оптико-терагерцового преобразования в такой структуре составляет $\sim 10^{-5}$ при достаточно малом оптическом флюенсе ~ 40 мкДж/см², что почти на два порядка выше, чем в „низкотемпературном“ GaAs.

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44348.8413

1. Введение

Спектроскопия с временным разрешением (time-domain spectroscopy — TDS) имеет важное практическое применение в области исследования веществ и материалов. TDS позволяет получить временную и спектральную информацию об объекте исследования, а ее возможности широко используются при изучении молекул ДНК, раковых опухолей, протеинов, бактерий и т.д. [1,2].

Источники ТГц излучения, используемые в системах TDS, можно разделить на две группы. Первая основана на нелинейном преобразовании импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности, а вторая связана со сверхбыстрым изменением динамики фотовозбужденных носителей заряда в полупроводниках. Ко второй группе относятся так называемые фотопроводящие источники (photoconductive emitters), в которых в качестве фотопроводящего слоя используют полуизолирующий GaAs (SI GaAs — semi-insulating GaAs) [3], „низкотемпературный“ GaAs (LT GaAs — low temperature grown GaAs) [4,5], а также $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (где x — мольная доля индия).

В отличие от широко используемого LT GaAs, фотопроводник $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ позволяет работать с более длинноволновой оптической накачкой в диапазоне 1.0–1.6 мкм [6,7], излучаемой волоконными лазерными системами или лазерами на неодимовом стекле, подходящими для реализации недорогих и компактных устройств. При поглощении оптического импульса в приповерхностном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ рождаются электронно-дырочные пары, которые ускоряются встроенным электрическим полем, возникающим в области

искривления границ запрещенной зоны вблизи поверхности полупроводника [8,9].

Наиболее распространенными фотопроводящими источниками ТГц излучения являются фотопроводящие антенны (ФА), в которых ускорение фотовозбужденных носителей заряда достигается за счет приложения внешнего электрического поля [10,11]. Для увеличения мощности генерации ТГц излучения требуется, чтобы фотопроводящий слой ФА имел высокое сопротивление. Так как $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ изначально обладает малым сопротивлением, применяются различные техники для увеличения его сопротивления, например ионная имплантация [12,13], низкотемпературный рост с легированием атомами бериллия [14] и т.д.

Альтернативным источником ТГц излучения являются фотопроводящие источники на основе фотоэффекта Дембера. Данный эффект заключается в возникновении электрического поля в полупроводнике при воздействии на него фемтосекундными оптическими импульсами, за счет разницы в коэффициентах диффузии электронов и дырок [15,16] и не связан с влиянием встроенного электрического поля. В результате того, что подвижность электронов, как правило, выше подвижности дырок, в полупроводнике при поглощении оптического излучения возникает пространственное разделение электронно-дырочных пар и, как следствие импульс тока, который генерирует ТГц излучение. Фотоэффект Дембера сильнее проявляется в полупроводниках с узкой запрещенной зоной, например InAs или InN [17–19], а эффект ускорения электрон-дырочных пар встроенным электрическим полем — в полупроводниках с широкой запрещенной зоной, например GaAs.

Для $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0.4$) соотношение подвижностей электронов и дырок в Г-долине составляет ~ 40 , в то время как для ЛТ GaAs этот показатель < 20 [20]. По этой причине $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x > 0.4$ является отличным кандидатом для создания источника ТГц генерации на основе фотоэффекта Дембера. Важно отметить, что в таком случае не требуется, чтобы фотопроводник InGaAs обладал высоким сопротивлением, что является обязательным условием при изготовлении материала для ФА, а скейлинг ТГц излучения возможен за счет изменения области фотовозбуждения. В работе [20] также было показано, что источники генерации ТГц излучения на основе фотоэффекта Дембера имеют широкий спектр излучения до 5 ТГц.

Цель настоящей работы заключалась в разработке способа роста и исследовании структуры с фотопроводящим слоем $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, в котором генерация ТГц излучения достигается за счет двух механизмов: 1) ускорение фотовозбужденных носителей встроенным электрическим полем; 2) фотоэффекта Дембера. Для $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $0 < x < 0.4$ не существует подложек, подходящих по параметру кристаллической решетки, поэтому для роста данного материала в настоящей работе используется ступенчатый метаморфный буфер (МБ) на подложке GaAs.

2. Образцы и методы исследований

Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber 32P с твердотельными источниками. В качестве подложки использовались пластины полуизолирующего GaAs с разориентацией на 2° относительно (100). Схематическое изображение конструкции образца $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ приведено на рис. 1. Температура роста МБ равнялась 400°C . Ступенчатый МБ толщиной 1.0 мкм с инверсной ступенью $\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}$ состоял из последовательности семи слоев $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ с переменной мольной долей индия y , варьируемой в пределах $y = 0.10\text{--}0.46$. Принцип использования такого буфера заключается в плавном изменении параметра кристаллической решетки растущего эпитаксиального слоя при переходе от подложки GaAs к фотопроводящему слою [21]. Инверсная ступень с пониженной мольной долей In позволяет уменьшить упругие напряжения в активных слоях и увеличить их структурное совершенство [22,23]. Толщина фотопроводящего слоя $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ равнялась 1.0 мкм, температура роста составляла 490°C . Постростовой отжиг для кристаллических слоев без избыточного мышьяка не требуется.

Для сравнения был выращен образец ЛТ GaAs с фотопроводящим слоем GaAs толщиной 0.75 мкм на легированном буфере n^+ -GaAs толщиной 0.25 мкм, так чтобы суммарная толщина активных слоев была равна первому образцу. Известно, что наличие легированного буфера (концентрация δ -легирования кремнием $N_{\text{Si}} = 4.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) приводит к увеличению встроенного электрического поля на границе фотопроводящий

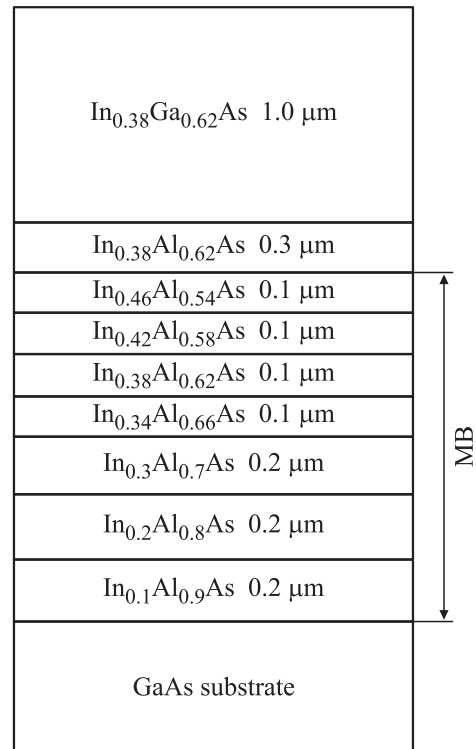


Рис. 1. Схематическое изображение эпитаксиальных слоев в структуре с $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ со ступенчатым метаморфным буфером.

слой/буферный слой и, как следствие к усилению интенсивности генерации ТГц излучения [24]. Температура роста ЛТ GaAs равнялась 215°C . Постростовой отжиг проводился *in situ* сразу после окончания роста ЛТ GaAs при температуре 600°C в течение 20 мин. Известно, что при высокотемпературном отжиге точечные дефекты As_{Ga} , образующиеся из-за внедрения избыточного потока мышьяка при пониженной температуре роста, формируют преципитаты, служащие центрами рекомбинации [25].

Структурный анализ образца с фотопроводящим слоем $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ проводился с помощью высокоразрешающей двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии. Кривые дифракционного отражения (КДО) были измерены на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. Методика измерения подробно описана в работе [26].

Частотный спектр ТГц излучения вычислялся Фурье преобразованием ТГц импульса, регистрируемого методом TDS. Оптическая накачка выполнялась импульсным излучением Ti:sapphire лазера с длиной волны 800 нм и длительностью 50 фс (энергия импульсов составляла 800 мкДж, частота следования импульсов — 1.0 кГц, диаметр пучка 7.0 мм). Генерируемое ТГц излучение коллимировалось параболическим зеркалом и фокусировалось в кристалл GaP толщиной 200 мкм, а временной профиль ТГц импульса регистрировался при помощи стандартной эллипсометрической схемы [27].

3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведена КДО, измеренная в режиме $\theta/2\theta$ -сканирования (θ — угол между отражающей плоскостью и падающим пучком, 2θ — угол между падающим и отраженным рентгеновскими пучками) для образца $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с метаморфным буферным слоем. Она позволяет определить параметры кристаллической решетки в различных направлениях по угловым положениям пиков [26]. Для симметричных отражений была выбрана плоскость (400). Правый узкий пик соответствует подложке GaAs, а крайний левый — толстому слою $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$. Соседний с фотопроводящим слоем пик на КДО относится к инверсной ступени $\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}$, а справа от него расположен пик от МБ.

Согласно данным работы [28] были определены латеральный a_{\parallel} и релаксированный a параметры кристаллической решетки фотопроводящего слоя $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ ($a_{\parallel} = 5.8010 \text{ \AA}$ и $a = 5.8211 \text{ \AA}$ соответственно) и вычислена остаточная деформация данного слоя, которая составила $\epsilon_{\text{res}} \sim 0.0015$. Для этого были дополнительно измерены КДО с использованием асимметричных отражений от плоскости (411). Полученное значение ϵ_{res} для указанного слоя подтверждает его кристалличность и хорошее качество [26,28], что является косвенным доказательством высокого соотношения подвижностей электронов и дырок, необходимого для проявления фотоэффекта Дембера. Стоит отметить, что поскольку использование МБ позволяет предотвратить распространение дислокаций несоответствия в направлении активной (фотопроводящей) области полупроводника, и это дает возможность варьировать содержание индия в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ вплоть до 100% [21,23]. Другими словами, с помощью МБ возможно изменять ширину запрещенной зоны в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и подстраивать ее под диапазон оптической накачки.

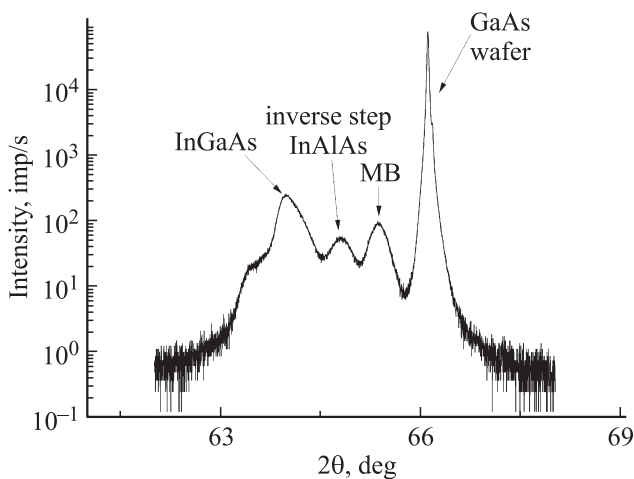


Рис. 2. Кривая дифракционного отражения в образце со ступенчатым метаморфным буфером.

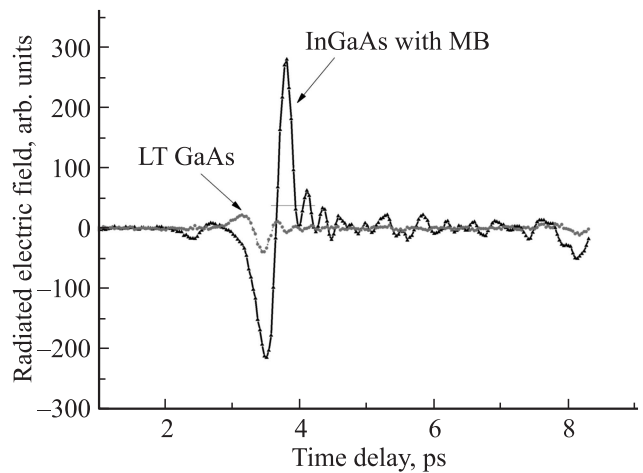


Рис. 3. Временная форма ТГц импульса при облучении образца $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ со ступенчатым метаморфным буфером фемтосекундным лазерным импульсом.

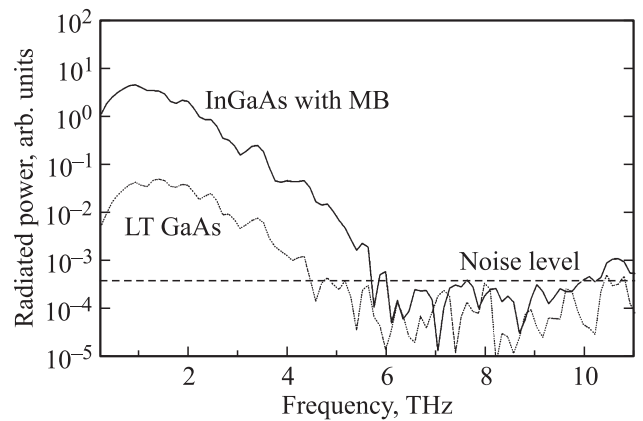


Рис. 4. Спектр ТГц импульса при облучении образцов фемтосекундным лазерным импульсом (сплошная линия — образец с метаморфным буфером, пунктирная линия — образец LT GaAs). Серым пунктиром показан уровень шума.

На рис. 3 приведена временная форма ТГц импульса, измеренная для двух исследуемых образцов. С помощью фурье-преобразования от волновой формы был получен спектр ТГц излучения (см. рис. 4). Видно, что максимумы излучения для обоих образцов приходятся на частоту ≥ 1.0 ТГц, что хорошо согласуется с результатами работ [1,4]. При этом мощность излучения в образце $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ на 2 порядка превосходит аналогичную величину для LT GaAs. К тому же его частотный диапазон имеет широкий спектр излучения вплоть до 6.0 ТГц, а интенсивность ТГц генерации в $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ существенно выше, чем в LT GaAs (см. рис. 3). Мы связываем это с тем, что вклад в генерацию ТГц излучения в образце $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ, помимо ускорения фотовозбужденных носителей встроенным электрическим полем, вносит фотоэффект Дембера.

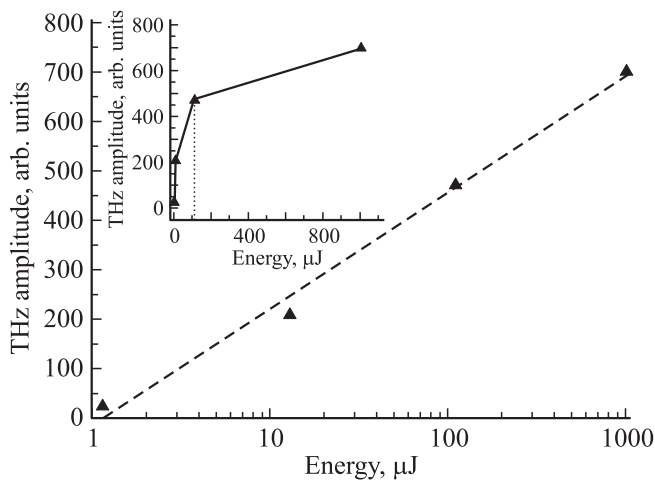


Рис. 5. Зависимость амплитуды ТГц излучения от энергии накачки фемтосекундного лазера для образца $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ в логарифмическом масштабе. На вставке приведена данная зависимость в линейном масштабе.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды ТГц излучения от энергии накачки фемтосекундного лазера для образца $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ. Видно, что амплитуда ТГц излучения линейно возрастает в логарифмическом масштабе с увеличением энергии накачки. При достижении энергии накачки ~ 110 мкДж данная зависимость выходит на насыщение (см. вставку на рис. 5), что связано с уменьшением подвижности электронов в фотопроводящем слое $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ за счет междолинного рассеяния при забросе электронов из Г-долины в более высокие долины с большей эффективной массой. При достаточно малом оптическом флюенсе ~ 40 мкДж/см² эффективность оптико-ТГц конверсии в такой структуре составила $\sim 10^{-5}$, что на два порядка выше, чем в LT GaAs.

Таким образом, фотопроводящий материал на основе $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ имеет высокую эффективность оптико-ТГц конверсии и широкий спектр ТГц излучения, что позволит в дальнейшем использовать данный материал для изготовления ФА и фотопроводящих источников на основе латерального фотоэффекта Дембера [20,29].

4. Заключение

В работе исследована структура $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии на ступенчатом метаморфном буферном слое на подложке GaAs, с кристаллографической ориентацией в плоскости (100), предназначенная для генерации ТГц излучения. Измерения двухкристальной рентгеновской дифрактометрии подтверждают высокое структурное качество и кристалличность слоя $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$. Измерения спектроскопии с временным разрешением показали, что такая структура позволяет генерировать излучение с широким (вплоть до 6 ТГц) спектром при облучении фем-

тосекундными лазерными импульсами. Интенсивность генерации ТГц излучения для структуры с $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ с МБ приблизительно на два порядка выше по сравнению с „низкотемпературным“ GaAs. Мы считаем, что это связано с дополнительным вкладом фотовольтаического эффекта Дембера в генерацию ТГц излучения. Таким образом, фотопроводящий материал на основе $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ может быть использован для изготовления фотопроводящих антенн и фотопроводящих источников на основе латерального фотоэффекта Дембера.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 16-29-03033 офи_м, 16-32-50047 и 16-29-14029 офи_м.

Список литературы

- [1] C.W. Berry, N. Wang, M.R. Hashemi, M. Unlu, M. Jarrahi. *Nature Commun.*, **4**, 1622 (2013).
- [2] Р.Р. Галиев, Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **80** (4), 523 (2016).
- [3] J.T. Kindt, C.A. Schumuttenmaer. *J. Phys. Chem.*, **100**, 10373 (1996).
- [4] N.T. Yardimci, S.-H. Yang, C.W. Berry, M. Jarrahi. *IEEE Trans. Ter. Sci. Technol.*, **5**, 223 (2015).
- [5] Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. *ФТП*, **49** (7), 932 (2015).
- [6] A. Takazato, M. Kamakura, T. Matsui, J. Kitagawa, Y. Kadoya. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 011102 (2007).
- [7] S.-P. Han, H. Ko, N. Kim, H.-C. Ryu, C.W. Lee, Y.A. Leem, D. Lee, M.Y. Jeon, S.K. Noh, H.S. Chun, K.H. Park. *Optics Lett.*, **36** (16), 3094 (2011).
- [8] A.A. Bernussi, C.F. Souza, W. Carvallio, D.I. Lubyshv, J.C. Rossi, P. Rasmaji. *Braz. J. Phys.*, **24** (1), 460 (1994).
- [9] X.-C. Zhang, D.H. Auston. *J. Appl. Phys.*, **71** (1), 326 (1992).
- [10] A. Takazato, M. Kamakura, T. Matsui, J. Kitagawa, Y. Kadoya. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 011102 (2007).
- [11] R. Huber, A. Brodschelm, F. Tauser, A. Leitenstorfer. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (22), 3191 (2000).
- [12] N. Chimot, J. Mangency, P. Mounaix, M. Tondusson, K. Blary, J.F. Lampin. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 083519 (2006).
- [13] M. Suzuki, M. Tonouchi. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 163504 (2005).
- [14] D. Vignaud, J.F. Lampin, E. Lefebvre, M. Zaknounc, F. Mollot. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (22), 4151 (2002).
- [15] V. Malevich, R. Adomavicius, A. Krotkus. *C.R. Phys.*, **9**, 130 (2008).
- [16] M.C. Beard, G.M. Turner, C.A. Schmuttenmaer. *J. Appl. Phys.*, **90**, 5915 (2001).
- [17] A. Reklaitis. *J. Appl. Phys.*, **108**, 053102 (2010).
- [18] K. Liu, J.Z. Xu, T. Yuan, X.-C. Zhang. *Phys. Rev. B*, **73**, 155330 (2006).
- [19] P. Gu, M. Tani, S. Kono, K. Sakai, X.-C. Zhang. *J. Appl. Phys.*, **91** (7), 5533 (2001).
- [20] G. Klatt, F. Hilser, W. Qiao, M. Beck, R. Gebbs, A. Bartels, K. Huska, U. Lemmer, G. Bastian, M.B. Johnston, M. Fischer, J. Faist, T. Dekorsy. *Opt. Express*, **18** (5), 4939 (2010).
- [21] Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, М.М. Грехов, С.С. Пушкарев, Д.В. Лаврухин, П.П. Мальцев. *ФТП*, **50** (2), 195 (2016).

- [22] D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, R.R. Galiev, A.S. Bugaev, Y.V. Fedorov, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, P.P. Maltsev. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, **24**, (1–2), 1520001 (2015).
- [23] Г.Б. Галиев, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. *Рос. нанотехнол.*, **10** (7–8), 73 (2015).
- [24] E.A.P. Prieto, S.A.B. Vizcara, A.S. Somintac, A.A. Salvador, E.S. Estacio, C.T. Que, K. Yamamoto, M. Tani. *J. Opt. Soc. Am. B*, **31** (2), 291 (2014).
- [25] М.Д. Вилисова, И.В. Ивонин, Л.Г. Лаврентьева, С.В. Субач, М.П. Якубеня, В.В. Преображенский, М.А. Путятю, Б.Р. Семягин, Н.А. Берг, Ю.Г. Мусихин, В.В. Чалдышев. *ФТП*, **33** (8), 900 (1999).
- [26] И.С. Васильевский, С.С. Пушкарев, М.М. Грехов, А.Н. Виниченко, Д.В. Лаврухин, О.С. Коленцова. *ФТП*, **50** (4), 567 (2016).
- [27] I.E. Ilyakov, G.Kh. Kitaeva, B.V. Shishkin, R.A. Akhmedzhanov. *Optics Lett.*, **41** (13), 2998 (2016).
- [28] Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Е.А. Климов, П.П. Мальцев, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *Кристаллография*, **59** (2), 297 (2014).
- [29] V. Apostolopoulos, M.E. Barnes. *J. Phys. Dr: Appl. Phys.*, **47**, 374002 (2014).

Редактор А.Н. Смирнов

THz radiation in $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ grown on GaAs wafer with metamorphic buffer layer under femtosecond laser excitation

D.S. Ponomarev¹, R.A. Khabibullin¹, A.E. Yachmenev¹, P.P. Maltsev¹, M.M. Grekhov², I.E. Ilyakov³, B.V. Shishkin³, R.A. Akhmedzhanov³

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

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

³ Federal Research Center the Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract We demonstrate the results of time-domain spectroscopy for $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ photoconductor. The proposed $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ photoconductive layer grown on metamorphic buffer on GaAs wafer exhibits superior bandwidth up to 6 THz and optical-to-terahertz conversion efficiency $\sim 10^{-5}$ for rather low optical fluence $\sim 40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. The intensity of THz generation for the given structure is two orders higher than for low-temperature grown GaAs due additional contribution of photo-Dember effect.