

УДК 621.373.826+535.012.22+535.581

Д.-Г. ХУАНГ¹, Ж.-М. ХУАНГ¹, Ю.М. АНДРЕЕВ^{2,3}, К.А. КОХ^{5,6},
Г.В. ЛАНСКИЙ^{2,3}, А.И. ПОТЕКАЕВ^{3,4}, В.А. СВЕТИЧНЫЙ^{3,6}

ДИСТАНЦИОННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НАНОСЕКУНДНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО СПЕКТРОМЕТРА С ВЫНОСНЫМ ДЕТЕКТОРОМ*

Сообщается о создании и применении для дистанционной визуализации изображений спектрометра на основе мощного наносекундного терагерцового источника излучения с выносным некриогенным детектором. С его помощью зарегистрированы 2D-изображения металлических объектов, скрытых в непроводящих (диэлектрических) материалах при работе в режиме на пропускание. Получено изображение металлических объектов, размещенных на кремниевых оптических пластинах, в режиме работы на отражение с одновременным определением параметров пластин (толщины/материала).

Ключевые слова: нелинейная кристаллооптика, твердый раствор, кристалл $GaSe_{1-x}S_x:Al$, генератор разностной частоты, ТГц-спектрометр, получение изображений.

Введение

В настоящее время известно большое количество разнообразных по принципу действия и назначению систем визуализации терагерцовых изображений (СВТИ), ни одна из которых, даже в коммерческом исполнении, пока не совершенна [1]. Наибольший интерес представляют активные СВТИ, позволяющие дополнительно проверить дистанционный высокоселективный спектральный анализ исследуемого объекта для определения его состава. Однако при разработке таких систем возникают и самые большие трудности. Для решения этой задачи желательным является создание надежных некриогенных систем с мощными узкополосными перестраиваемыми источниками терагерцового (ТГц) излучения, пригодных для полевых применений. На практике же наибольшие успехи достигнуты в создании СВТИ на основе пикосекундных маломощных источников ТГц-излучения с рабочим диапазоном 0.1–4 ТГц, спектральным разрешением 0.1–1 ТГц. Их дальность действия ограничена, как правило, несколькими метрами [1, 2]. Двухмерные (2D) изображения различных объектов получают с помощью таких систем при работе в режиме на пропускание или отражение, а трехмерные (3D) – при работе в режиме на отражение, за счет высокого временного разрешения регистрируемых сигналов, или методом ТГц-томографии.

Цель данной работы – создание дистанционного ТГц-спектрометра, оснащенного выносным детектором и мощным узкополосным перестраиваемым источником ТГц-излучения, имеющего ряд оригинальных возможностей:

- получение 2D-изображения в режиме работы и на пропускание, и на отражение, на трассах длиной более 110 м;
- использование в качестве отражателей неполированных металлических пластин, различных природных материалов и полированных оптических пластин, с возможностью определения параметров и материала последних;
- применение в полевых условиях;
- проведение высокоселективного спектрального анализа визуализируемых объектов методом дифференциального поглощения.

Экспериментальная часть

В качестве базового был использован ранее созданный ТГц-спектрометр с выносным детектором излучения [3]. Источником излучения в нем является генератор разностной частоты (ГРЧ) излучения Nd:YAG-лазера и параметрического генератора света (ПГС) на нелинейном кристалле КТР. В качестве активного элемента ГРЧ задействованы нелинейные кристаллы GaSe, кристаллы твердого раствора $GaSe_{1-x}S_x$, где x – отношение смещения, и кристаллы твердого раствора $GaSe_{1-x}S_x$, леги-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-10021).

рованные Al в концентрации 0.01–0.05 ат. %. В качестве детектора излучения используется кремниевый (Si) болометр («Infrared Laboratories Inc.», США) модели Hi-Res, работающий при температуре 4.2 К. Важной особенностью спектрометра является возможность формирования сложной измерительной трассы длиной более 110 м в виде открытого волновода с использованием, как минимум, до 16 линз из полиэтилена высокого давления собственного изготовления и 8 плоских металлических зеркал. Недостатками спектрометра являются нестабильность амплитуд ТГц-импульсов, обусловленная многомодовой структурой и нестабильностью амплитуды выходных импульсов ПГС в пределах $\pm 15\%$, а также потребность в жидком гелии.

Модифицированный наносекундный даун-конвертор ТГц-диапазона

Источником ТГц-излучения в усовершенствованном спектрометре является ГРЧ, близкий по конструкции к известным ГРЧ [3, 4]. Чистый кристалл GaSe ГРЧ, в отличие от [4], заменен на апробированный в [3] кристалл GaSe, легированный двумя элементами (S и Al) в оптимальных концентрациях, а именно использован кристалл твердого раствора $\text{GaSe}_{0.91}\text{S}_{0.09}\text{Al}$ (0.03 ат. %). Он был выращен методом Бриджмена с вращением температурного поля расплава. Такой метод выращивания дает снижение коэффициента оптических потерь до 3 раз по отношению к кристаллам, выращенным традиционным методом. Легирование дает дополнительное снижение коэффициента оптических потерь в 2–3 раза, в основном за счет примеси серы [5, 6], и увеличение твердости примерно в 3 раза, в основном за счет примеси алюминия [7–9]. Установлено, что двойное легирование дает кумулятивный эффект в изменение оптических и механических свойств кристалла GaSe по отношению к случаям легирования каждым элементом в отдельности. Кристалл $\text{GaSe}_{0.91}\text{S}_{0.09}\text{Al}$ (0.03 ат. %) продемонстрировал, в отличие от легко расщлаиваемых кристаллов GaSe, способность к растрескиванию под сильными механическими воздействиями, высокие эксплуатационные свойства в обычной эксплуатации и возможность использования во вне лабораторных условиях. В качестве источников накачки задействованы многомодовый Nd:YAG-лазер с длительностью импульсов 7.8 нс и ПГС на кристалле КТР с длительностью импульсов излучения 3.8 нс. Nd:YAG-лазер работал на длине волны 1.0642 мкм с заправкой излучением полупроводникового лазера со спектральной шириной линии излучения $\Delta\nu = 0.003 \text{ см}^{-1}$, а перестраиваемый ПГС в диапазоне 0.475–1.74 мкм с $\Delta\nu = 0.075 \text{ см}^{-1}$. ГРЧ реализован в пределах 0.05–4 ТГц с пиковой мощностью свыше 20 Вт и длительностью импульсов излучения ~ 3 нс. Условия фазового синхронизма соответствовали расчетным данным, полученным с использованием методики оценки, представленной в [10]. Определение частоты ТГц-излучения было полностью автоматизировано. Спектральная ширина линии излучения составила около 2.36 ТГц (0.1 см^{-1}).

Для обеспечения работоспособности спектрометра в полевых условиях вместо охлаждаемого жидким гелием Si-болометра с эквивалентной мощностью шума $\text{NEP} = 4.3 \text{ пВт/Гц}^{1/2}$ и вольтовой чувствительностью $6.1 \cdot 10^5 \text{ В/Вт}$ в качестве детектора излучения использован квазиоптический диод Шоттки 2DL 12C LS 2500 A1 («ACST GmbH», Германия), смонтированный на кремниевой линзе. Диод размещен в корпусе совместно с интегрированным усилителем, с полосой пропускания в пределах $10\text{--}10^6 \text{ Гц}$, и работает при комнатной температуре. Он имеет вольтовую чувствительность $S_v(\text{В/Вт}) = 27000@70\text{GHz}/1400@1000\text{GHz}$, $\text{NEP} = 6 \text{ пВт/Гц}^{1/2}$ и демонстрирует на порядок более высокий вольтовый отклик, по отношению к Si-болометру, благодаря меньшей постоянной времени отклика (1 мкс против ~ 1 мс у Si-болометра). Модернизированный таким образом спектрометр был использован для получения изображений на отражение. Его оптическая блок-схема показана на рис. 1.

При исследовании на частоте 340 ТГц (длина волны 0.98 мм) установлено, что после модификации работоспособность спектрометра сохраняется при измерительных трассах длиной до 110 м из-за малых потерь на линзах (показатель преломления 1.52), металлических зеркалах, из-за открытого волновода и малого поглощения в атмосфере. Более того, отношение сигнал/шум увеличивается на порядок из-за малой постоянной времени диода Шоттки 2DL 12C LS 2500 A1 (1 нс против 1 мс у Si-болометра). Этот факт и малые потери в атмосфере указывают на возможность использования измерительных трасс километровых длин. Важно, что оказалась возможной замена металлических зеркал на неполированные металлические пластины или фольгу и отражатели из природных материалов. То есть модифицированный спектрометр является прототипом первого в мире дистанционного бистатического лидара ТГц-диапазона с использованием топографических объектов в качестве отражателей.

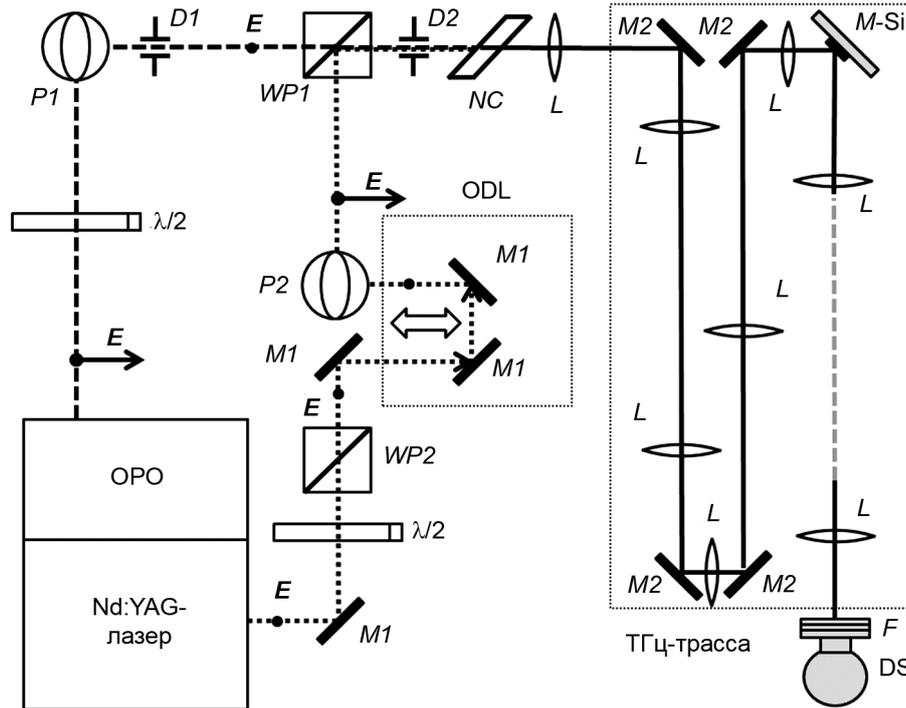


Рис. 1. Оптическая схема ТГц-спектрометра: $P1$, $P2$ – перископы; $D1$, $D2$ – диафрагмы; $WP1$, $WP2$ – призмы Волластона; ODL – оптическая линия задержки для совмещения во времени импульсов накачки; $M1$ – диэлектрические зеркала ИК-диапазона; $M2$ – металлические зеркала ТГц-диапазона; $M-Si$ – металлическая пластина, закрепленная на кремниевой подложке; L – полиэтиленовые линзы открытого волновода; $\lambda/2$ – полуволновая пластинка; F – фильтры для блокировки излучения накачки и фона; NC – нелинейный кристалл $GaSe_{0.91}S_{0.09}Al$ (0.03 ат. %), DS – диод Шоттки; стрелками показано направление поляризации излучений накачки E

Регистрация изображений в ТГц-диапазоне

Благодаря высокому уровню отношения сигнал/шум на выходе спектрометра и малым потерям в атмосфере, получение 2D-изображений скрытых объектов на пропускание при работе в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах (0.2–0.5 ТГц) не представило проблем. Изображения металлических объектов (пластин, монет), пластиковых и деревянных панелей, скрытых в пенопласте, поролон или ткань были получены путем их крепления на управляемом компьютером двухмерном прецизионном линейном трансляторе TSA100 («Zolix», Китай) с приводом от шаговых двигателей, размещения транслятора на измерительной трассе и последующего 2-мерного смещения в поперечном направлении. Этот метод широко используется в пикосекундной технике ТГц-диапазона [11]. Для получения изображений на отражение вместо одного из угловых поворотных отражателей спектрометра на двухмерном линейном трансляторе устанавливалась полированная пластинка кремния толщиной 1 мм с наклеенной металлической пластинкой квадратной формы со стороной 2 см.

Результаты и их обсуждение

2D-изображения и характеристика исследуемого объекта

На рис. 2, *a* приведено фото измерительного узла для регистрации ТГц-изображений в оптической схеме на отражение. Угол падения ТГц-пучка на кремниевую пластинку с закрепленным металлическим объектом при получении изображений на отражение составлял 45° (рис. 1 и 2, *a*).

Отраженный от кремниевой пластинки ТГц-сигнал регистрировался диодом Шоттки. Сканирование транслятора позволяло получать позиционно зависимые сигналы, усреднение которых по локальным площадям до получения наиболее контрастного изображения с максимально возможным пространственным разрешением давало изображения металлической пластинки. Это первые из известных изображений, полученные активной ТГц-системой при общей длине трассы до исследуемого объекта в десятки метров. При работе на частоте 340 ГГц (длина волны ~ 0.98 мм) по-

лучены 2D-изображения с пространственным разрешением около 3 мм. При таком разрешении легко определяется положение центральной части металлической пластинки – ее положение отмечено белым прямоугольником на рис. 2, б. Деформированные при вырезании края пластины (верхний и правый на рис. 2, б) обуславливают некоторое ослабление регистрируемого пучка – более темный цвет изображения. Вариация интенсивности от одной к другой локальной площадке обусловлены, в том числе, нестабильностью амплитуды и сложной многомодовой структурой ТГц-пучка. Соседние с металлической пластинкой локальные площадки показывают более низкий коэффициент отражения кремния по отношению к металлу. Отстоящие далее области Si-пластины касаются металлического корпуса держателя (рис. 2, а), что вызывает увеличение коэффициента отражения – более светлый тон изображения.

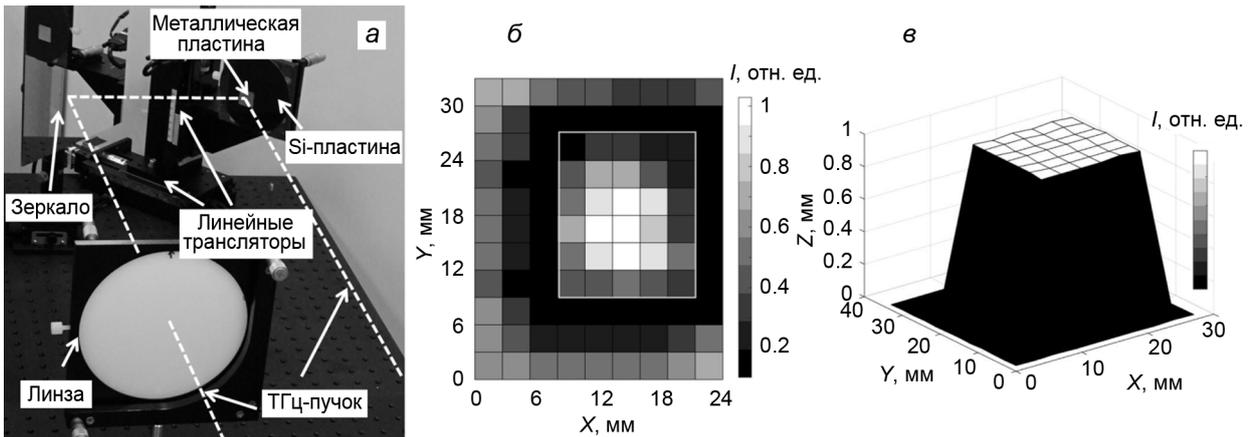


Рис. 2. Система из двух поворотных зеркал на измерительной трассе спектрометра, правым из которых является полированная Si-пластина с наклеенной металлической пластинкой (а), 2D- (б) и 3D-изображение (в) металлической пластинки на Si-пластине

Сканирование частоты ТГц-излучения спектрометра, при помещении пятна зондирующего пучка на близлежащие к металлической пластинке участки Si-пластины, не касающиеся металлических частей держателя, позволило получить частотную зависимость коэффициента отражения, связанную с интерференцией волн – вошедшей в пластинку и отраженной от ее задней поверхности (рис. 3, а). Сканирование частоты в диапазоне 0.31–0.49 ТГц было получено перестройкой длины волны ПГС с шагом ~ 0.02 нм в пределах 1065.3–1065.7 нм. Среднее отношение сигнал/шум в измерении достигало значения 180 без проведения какой-либо оптимизации оптической схемы.

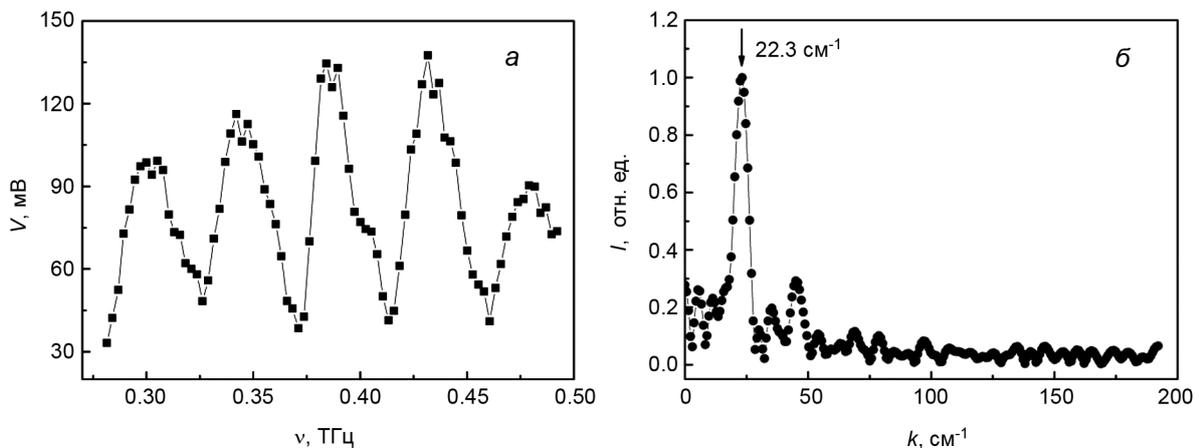


Рис. 3. Зависимость амплитуды зарегистрированного сигнала на выходе диода Шоттки при использовании Si-пластины в качестве отражателя и сканировании частоты ГРЧ (а) и фурье-образ этой зависимости (б)

Толщина пластинки определена с использованием выражения для разности пути Δ двух интерферирующих волн до места наблюдения по известному выражению [12]

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \lambda/2, \quad (1)$$

где n – значение показателя преломления кремния в ТГц-диапазоне (принято равным ~ 3.42 вне зависимости от рассматриваемой длины волны); α – угол падения пробного излучения на пластину (в эксперименте равен $\sim 45^\circ$); $\lambda = 0.98$ мм.

Расстояние между двумя соседними максимумами в зашумленной интерференционной картинке (рис. 3, *а*) определено как длина волны $\Lambda = 6.28$ мм ($k = 22.3$ см $^{-1}$), основной компоненты в ее фурье-разложении (рис. 3, *б*). С другой стороны, это расстояние равно разности ходов для двух волн, различающихся по длине волны на λ . Максимумы на рис. 3, *а* образуют волны с кратными длинами $m\lambda$ [12]. Отсюда искомую толщину можно определить из выражения для разности ходов двух соседних волн, равной длине волны основной гармоники в разложении Фурье:

$$\Lambda = \Delta_1 - \Delta_2 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \lambda/2, \quad (2)$$

где $\Delta_1 - \Delta_2 = 6.28$ мм.

Расчитанное по выражению (2) значение толщины $d = 0.97$ мм хорошо соответствует реальной толщине исследованной кремниевой пластины 1 мм и погрешности измерения толщин пленок интерференционным методом $\leq 5\%$. Погрешность измерений в значительной мере обусловлена неровностями металлической пластины и нестабильностью параметров пучка пробного излучения. Пример совместного представления полученного 2D-изображения и измерения толщины кремниевой пластинки показан на рис. 2, *в*. По сути, дистанционно получено 3D-изображение составного отражателя. При известной толщине полированной пластины предложенная методика позволяет определить ее материал с использованием банка данных о показателях преломления оптических материалов.

Спектрометр, как и в исходном варианте [3], также показал возможность регистрации фоновых спектров поглощения кристаллов GaSe и паров воды атмосферы в диапазоне 0.05–4 ТГц.

Улучшение характеристик ТГц-спектрометра

Для улучшения характеристик пучка ТГц-излучения и, как следствие, повышения качества получаемых изображений и увеличения спектрального разрешения была продолжена модификация спектрометра. Эффективность ГРЧ улучшена более чем на порядок, при принципиально уменьшенной ширине линии излучения, путем использования затравочного излучения от электронного перестраиваемого источника излучения («VDI», США). Этот источник состоит из задающего генератора (13.75–14.42 ГГц, $\Delta\nu = \pm 0.15$ Гц, шаг перестройки от 12 Гц, диапазон свипирования частоты ± 25 МГц) и трехкаскадного генератора высших гармоник. Первым каскадом является умножитель частоты 175X2[A] (коэффициент умножения частоты $\times 12$, рабочий диапазон 165–173 ГГц, шаг перестройки ΔS от 144 Гц, $\bar{P} = 0,1$ Вт), 315X2[B] ($\times 24$; 330–346 ГГц, ΔS от 288 Гц, 15 мВт) и 1.9X3[C] ($\times 36$; 495–519 ГГц; ΔS от 432 Гц, 2 мВт). Спектральная ширина линии излучения по крайней мере на порядок меньше шага перестройки. Кроме увеличения эффективности, затравка уменьшила вариации амплитуды ТГц-импульсов в 4–5 раз. В силу одномодовости пучка электронного источника, одномодовым стал и пучок ТГц-излучения. Отметим, что последние модели электронных источников ТГц-излучения позволяют перекрыть диапазон до 1.35 ТГц, что дает широкие возможности создания перестраиваемых сверхузкополосных источников когерентного излучения ТГц-диапазона.

Заключение

Таким образом, показано, что использование ТГц-спектрометра на основе высокоэнергетичного наносекундного узкополосного генератора разностных частот на кристалле GaSe $_{0.91}$ S $_{0.09}$:Al (0.03 ат. %) с вынесенным на расстояние до 110 м детектором (квазиоптическим диодом Шоттки), работающим при комнатной температуре, позволяет получать изображения скрытых объектов в режиме работы как на пропускание, так и на отражение. При работе в режиме на отражение возможно получение 2D-изображений токопроводящих объектов, находящихся на полированных оптических пластинах, и определение толщины последних как варианта получения 3D-изображений. Пространственное разрешение 2D-изображений составляет 3 мм, а погрешность определения толщин оптических пластин не превысило $\pm 15\%$. Данные характеристики могут быть улучшены за счет уменьшения длины волны ТГц-излучения и использования высококачественных коммерче-

ских оптических элементов. Созданный спектрометр, исходя из своих характеристик, также пригоден для полевых применений, способен работать с использованием топографических объектов в качестве отражателей и проводить анализ химического состава скрытых объектов методом дифференциальной абсорбционной спектроскопии на километровых трассах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panwar A.K., Singh A., Kumar A., and Kim H. // *Int. J. Eng. Technol.* – 2013. – V. 13. – No. 2. – P. 33–39.
2. Woolard D.L., Brown E.R., Pepper M., and Kemp M. // *Proc. IEEE.* – 2005. – V. 93. – No. 10. – P. 1722–1743.
3. Kokh K.A., Lanskiy G.V., Lisenko A.A., and Svetlichnyi V.A. // *IEEE Conf. Publications, IRMMW-THz, 25–30 September 2016, Copenhagen, Denmark.* – P. 1–2.
4. Ding Y.J. // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2014. – V. 31. – No. 11. – P. 2696–2711.
5. Kokh K.A., Molloy J.F., Naftaly M., et al. // *Mater. Chem. Phys.* – 2015. – V. 154. – P. 152–157.
6. Guo J., Xie J.J., Li D.J., et al. // *Light: Sci. Appl.* – 2015. – V. 4. – Art. No. e362. – P. 1–12.
7. Guo J., Xie J.-J., Zhang L.-M., et al. // *Cryst. Eng. Comm.* – 2013. – V. 15. – P. 6323–6328.
8. Андреев Ю.М., Вайтулевич Е.А., Кох К.А. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 37–44.
9. Потеекаев А.И., Андреев Ю.М., Кох К.А., Светличный В.А. // *Деформация и разрушение материалов.* – 2016. – № 6. – С. 14–19.
10. Андреев Ю.М., Вайтулевич Е.А., Зуев В.В. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2011. – Т. 54. – № 9/2. – С. 124–131.
11. Chan W.L., Deibel J., and Mittleman D.M. // *Rep. Prog. Phys.* – 2007. – V. 70. – 1325–1379.
12. Ландсберг Г.С. *Оптика: учеб. пособие для вузов.* – 6-е изд. – М.: Физматлит, 2003. – С. 113.

¹ Шанхайский институт технической физики КАН, г. Шанхай, Китай

Поступила в редакцию 15.05.17.

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

⁴ Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета, г. Томск, Россия

⁵ Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁶ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Хуанг Дзин-Гуо, доктор наук, доцент, e-mail: jghuang@mail.sitp.ac.cn;

Хуанг Жи-Минг, доктор наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: zmhuang@mail.sitp.ac.cn;

Андреев Юрий Михайлович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр. ИМКЭС СО РАН, ведущ. науч. сотр. НИ ТГУ, e-mail: yuandreev@yandex.ru;

Кох Константин Александрович, к.г.-м.н., ст. науч. сотр. ИГМ СО РАН, инженер ИСЭ СО РАН, e-mail: k.a.kokh@gmail.com;

Ланский Григорий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИМКЭС СО РАН, ст. науч. сотр. НИ ТГУ, e-mail: lansky@yandex.ru;

Потеекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, профессор НИ ТГУ, директор СФТИ ТГУ, e-mail: kanc@spti.tsu.ru;

Светличный Валерий Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИ ТГУ, инженер ИСЭ СО РАН, e-mail: v_svetlichnyi@bk.ru.