

Мощный терагерцовый лазер на свободных электронах: метрологические аспекты*

Н.А. ВИНОКУРОВ, М.Г. ВЛАСЕНКО, В.В. ГЕРАСИМОВ, М.А. ДЕМЬЯНЕНКО, Д.Г. ЕСАЕВ,
Б.А. КНЯЗЕВ, Г.Н. КУЛИПАНОВ, А.К. НИКИТИН, В.С. ЧЕРКАССКИЙ, Ю.Ю. ЧОПОРОВА

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является на сегодняшний день наиболее интенсивным источником терагерцового излучения. Он генерирует когерентное монохроматическое излучение в виде непрерывного потока 100 пс импульсов с частотой 5,6 МГц. Длина волны излучения в настоящее время плавно перестраивается в диапазонах 120–240 мкм и 40–70 мкм. Средняя мощность излучения на пользовательских станциях достигает нескольких сотен ватт. Уникальные свойства излучения Новосибирского ЛСЭ потребовали разработки новых методов и средств визуализации терагерцового излучения. Детальное описание четырех методов визуализации описаны в данной работе. Использование этих средств, позволило провести эксперименты по спекл-фотографии, голографии, тальбот-метрологии, спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения и исследованию поверхностных плазмонов.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, лазер на свободных электронах, визуализация, спектроскопия, метрология.

ВВЕДЕНИЕ

Рост публикаций, посвященных развитию источников терагерцового излучения и его применению, отражает ожидание прорыва к новым технологиям с использованием этой полосы частот. Изобретение широкополосных импульсных источников на основе фемтосекундных лазеров дало старт исследованиям в областях терагерцовой визуализации и томографии, спектроскопии, нелинейной оптики, биологии и медицины, материаловедения, безопасности и других приложений.

Генераторы обратной волны, параметрические генераторы и генераторы разностной частоты широко используются в приложениях, требующих перестраиваемого монохроматического когерентного излучения, однако средняя мощность этих очень низка. Методы генерации и детектирования с использованием всех вышеперечисленных источников приведены в обзоре [1].

Излучение релятивистских электронов в магнитных структурах дало возможность для генерации более интенсивного терагерцового излучения, таких как синхротроны и лазеры на свободных электронах [2]. Новосибирский лазер на свободных электронах (NovoFEL) был введен в эксплуатацию в 2004 году [3, 4], теперь это пользовательская установка. В этой статье дается обзор последних экспериментальных достижений в терагерцовой оптике и фотонике на одной из пользовательских станций.

1. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Визуализация в режиме реального времени

Отсутствие коммерчески доступных устройств, предназначенных для визуализации мощного терагерцового излучения, потребовало разработки новых или адаптации уже существующих методов и техник. На пользовательской станции «Спектроскопия и рентгеноско-

* Получена 29 мая 2012 г.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и частичной финансовой поддержке Минобрнауки России, а также ГК РФ № 02.740.11.0556.

пия» были использованы три устройства для создания изображений. Два из них работают как «вторичные» записывающие устройства, распознавая не непосредственно терагерцовое излучение, а его тепловой «отпечаток» на экране (см. рис. 1, а).

1.2. Термочувствительный люминесцентный экран (ТЧЛЭ)

Набор экранов Macken Instruments, Inc, содержащий восемь термочувствительных люминесцентных экранов [5] и ртутную лампу, был первоначально разработан для визуализации излучения ближнего и среднего ИК диапазона. Мы же использовали эту систему для визуализации терагерцового излучения [6, 7]. Площадь экрана, равная 75×75 мм, позволяет записывать изображения большого размера. Недостатком системы является низкая чувствительность к терагерцовому излучению, вследствие высокой прозрачности слоя люминофора в ТГц диапазоне. Изображение, полученное с помощью ТЧЛЭ, экран № 7, и высокоскоростной ПЗС камеры производства Princeton Instruments PIMax2 для окончательной записи изображений, показано на рис. 2, а. Металлическая маска с прорезью в форме слова «FEL» (рис. 1, б) была использована в качестве объекта в этом и последующих экспериментах.

1.3. Термограф (ТГ)

Матричный термограф 128×128 , изготовленный для излучения ближнего инфракрасного диапазона, был использован для визуализации терагерцового пучка на различных поглощающих экранах [8]. Обладающий довольно высокой чувствительностью, но сравнительно низким пространственным разрешением этот прибор используется для юстировки оптических систем. Изображение маски, записанное с использованием ТГ, показано на рис. 2, б.

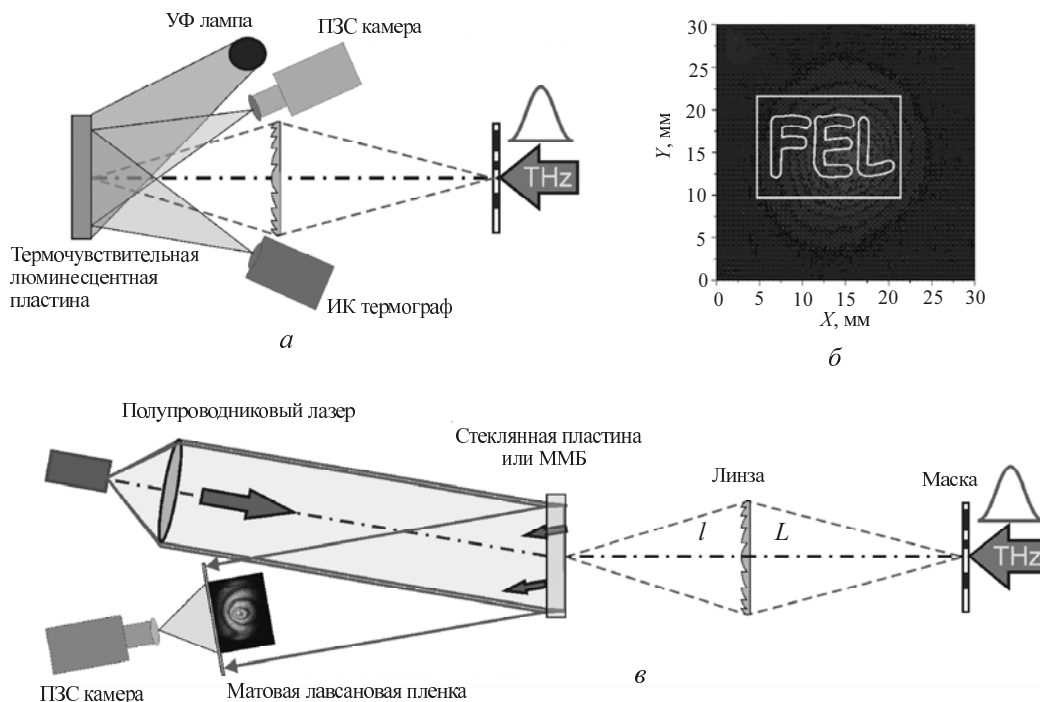


Рис. 1. Три устройства визуализации терагерцового излучения:

а – термограф и система, основанная на температурном гашении люминесценции; б – рисунок одной из масок и сечение терагерцового пучка; в – термочувствительный интерферометр

1.4. Матричный микроболометрический приемник излучения (ММБП)

Неохлаждаемый 320×240 ММБП из оксида ванадия был применен для прямой записи «терагерцового видео» с частотой до 90 кадров в секунду [9]. Было установлено [10, 11], что чувствительность ММБП является самой высокой среди всех других регистраторов изображений, но гораздо меньше в терагерцовом диапазоне, чем в средней инфракрасной области спектра, для которого матрица видеопреобразователя и была первоначально разработана. Чтобы узнать причину, мы измерили поглощение материалов матрицы и обнаружили, что они абсолютно не поглощают терагерцовое излучение. Механизм чувствительности стал очевидным после обнаружения того, что чувствительность гармонически зависит от угла поляризации излучения [12], что означает, что, вероятно, антенный эффект является основным механизмом нагрева микроболометров в терагерцовом диапазоне.

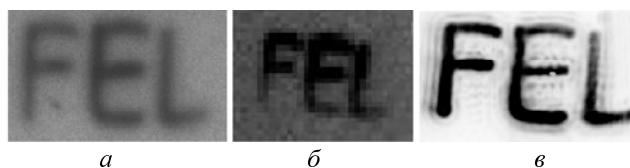


Рис. 2: Изображение маски «FEL» с использованием термочувствительного люминесцентного экрана (а); термографа (б) и матричного микроболометрического приемника (в)

1.5. Термочувствительный интерферометр физо (ТЧИ) как абсолютный измеритель мощности

Еще одна система для визуализации изображений с помощью терагерцового пучка – интерферометр Физо видимого света (рис. 1, в), – плоскопараллельная стеклянная пластинка которого подвергалась воздействию терагерцового излучения, использовалась в качестве абсолютного измерителя мощности [13]. Стеклянная пластинка освещалась плоским волновым фронтом когерентного монохроматического излучения красного полупроводникового лазера. Волны, отраженные от двух поверхностей этой пластинки, интерферировали на матовом экране, и картина интерференции была записана ПЗС-камерой. Терагерцовое излучение, будучи поглощаемым в тонком слое стеклянной пластинки, нагревало ее и меняло длину оптического пути в нагретых областях. Для стекла ВК7 одна интерференционная полоса соответствует поглощенной энергии 5.1 Дж/см^2 . Изображение пучка ЛСЭ представлено на рис. 3. Следует подчеркнуть, что это устройство может быть использовано для измерения распределения плотности мощности любого излучения, для которого стеклянные пластинки непрозрачны. Мы применили эту технику, например, для визуализации излучения ультрафиолетового KrF лазера.

Экспериментально полученные характеристики (временное и пространственное разрешение, оценка чувствительности и максимальная частота кадров) систем визуализации с использованием описанных выше устройств приведены в табл. 1. Решающую роль играло качество

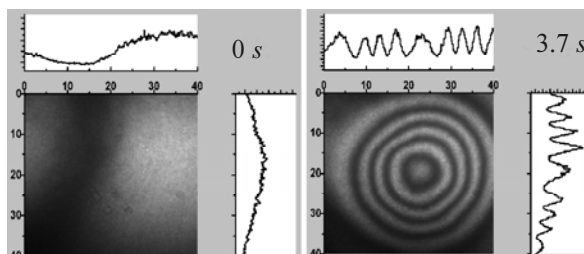


Рис. 3. Изображение пучка ЛСЭ. Интерферограммы, записанные с помощью ТЧИ до экспозиции и через 3,7 секунд после открытия затвора (кадры из видео, 17 кадров в секунду)

линзы, используемой в этих системах. Объемные линзы из материала TPX (Poly(4-methyl pentene-1)) искажали изображения и часто плавилась под пучком ЛСЭ. Полипропиленовые линзы Френеля толщиной 0,8 мм с $F = 80$ мм и диаметром 80 мм [14] давали наилучшее качество терагерцовых изображений и были устойчивы к мощному излучению.

Таблица 1

Экспериментально полученные характеристики устройств визуализации $\lambda = 130$ мкм

	ТГ	ТЧИ	ММБП	ТЧЛЭ	
				экран № 7	экран № 8
Δx (мм)	2	0.3	1	1	2
ΔT (сек)	*	0.02	0.02	0.4	1.3
Чувствительность	высокая	средняя	очень высокая	очень низкая	низкая
f (кадров в секунду)	25	10-50	10-50	4-25	4-25
* зависит от тепловых характеристик экрана					

Следует отметить, что термочувствительный интерферометр Физо, который был разработан скорее для измерения мощности излучения, может быть также использован в качестве устройства визуализации на начальном этапе облучения. Образы букв маски были хорошо видны с пространственным разрешением около 1 мм.

2. МЕТРОЛОГИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Вышеуказанные устройства визуализации были применены для разработки ряда квази-оптических систем.

2.1. Спекл-фотография

Спекл-картины в пространственной области впервые наблюдались в терагерцовом спектральном диапазоне при использовании излучения Новосибирского ЛСЭ [15]. Это дало возможность разработать первые квази-оптические системы спекл-фотографии в терагерцовом диапазоне. Спекл-фотография в режиме реального времени движущихся объектов, в том числе и скрытых, что важно в системах управления, промышленности и безопасности, была продемонстрирована с помощью оптической системы с ММБП.

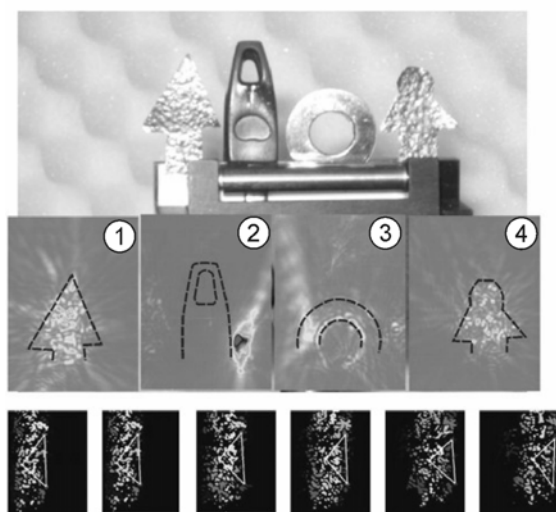


Рис. 4. Объекты и их изображения, извлеченные из терагерцового видео, записанного с помощью ммбп со скоростью 27 кадров в секунду. Нижний ряд: автоматическое измерение скорости объекта с помощью обнаружения движения по спекл-методике

Шероховатые объекты хорошо видны (см. объекты 1 и 4 на рис. 4). Металлические объекты можно увидеть только в том случае, если рефлексы от края поверхности попадают в приемный угол оптической системы (объект 3). Пластиковые объекты видны очень плохо (объект 2), но их можно обнаружить, если на заднем плане изображающей системы металлический экран-рассеиватель.

2.2. «Классическая» голография

С использованием ТЧЛЭ были разработаны системы осевой голографии и голографии с выделенным опорным пучком. Были записаны и восстановлены голограммы амплитудных и фазовых объектов. Пример осевой голограммы показан на рис. 5, а. Размер амплитудной маски был 10×10 мм, полная ширина гауссова пучка на половине максимума была равна 11 мм. Хотя условие Габора (см., например [16]), не удовлетворялось, качество восстановленного изображения, с учетом того, что $\lambda = 0,13$ мм, можно считать очень хорошим.

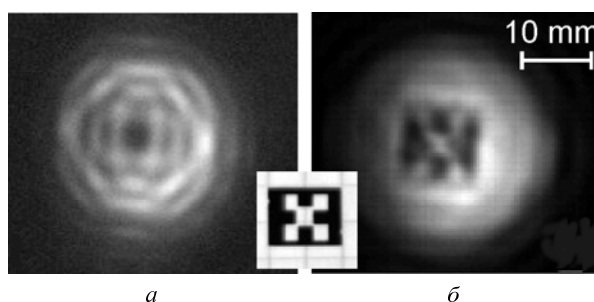


Рис. 5. Осевая голография:

а – голограмма маски, показанной на вставке, записанной ТЧЛЭ № 7;
 б – действительное изображение, восстановленное численно

2.3. Демонстрация и применение эффекта тальбота

Эффект Тальбота (самовоспроизведение периодических структур, освещенных монохроматическим когерентным излучением) был впервые обнаружен в терагерцовом спектральном диапазоне.

В экспериментах использовались двухмерные сетки с отверстиями с периодом от 0,6 мм до 2 мм и ММБП в качестве записывающего устройства (см. схему экспериментальной установки на рис. 6, а). Расстояния между тальботовскими плоскостями в зависимости от длины волны излучения и периода структуры приведены в табл. 2, где расчетные (правые колонки) и экспериментальные (левые колонки), расстояния для гауссова пучка с $fwhm = 11$ мм; $\lambda = 130$ мкм, на которых этот эффект исчезает. Из-за ограниченной ширины пучка, эффект исчезал на расстояниях, определяемых пределом Аббе. Характерные изображения тальботовских плоскостей представлены на рис. 6, б–г.

Было экспериментально продемонстрировано измерение длины волны NovoFEL со спектральной разрешающей способностью до 300, измерение расстояний, а также обнаружение искажений волнового фронта терагерцовых волн в реальном времени. «Четвертная» тальботовская плоскость дает уникальную возможность для единовременной записи фазосдвигающей

Таблица 2

Эффект Тальбота в ТГц и видимой областях

p, мм	λ , мм					
	0.656		50		130	
2.0	32 м	12 м	400 мм	160 мм	160 мм	62 мм
1.0	16 м	3 м	200 мм	40 мм	80 мм	15 мм
0.6	9.5 м	1.1 м	120 мм	14.4 мм	45 мм	5.5 мм

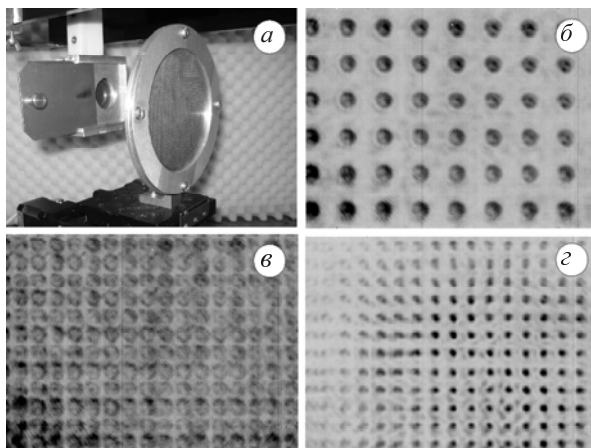


Рис. 6. Эффект тальбота в терагерцовой области:

a – экспериментальная установка; *б* – изображение, записанное в основной тальботовской плоскости ($Z_T = 2Np^2/\lambda$, где p – период сетки, а n – номер тальботовской плоскости; *в* – изображение в дробной плоскости тальбота ($N + 1/4$); *г* – искажение волнового фронта ЛСЭ линзой из *trx* с $f = 50$ мм; $\lambda = 126$ мкм

голограммы [17] (рис. 6, в), так как, согласно теории, каждая из окружностей с двойной частотой имеет сдвиг фазы на $\pi/2$.

Поверхностные плазмоны. Поверхностные плазмоны-поляритоны (ППП) являются предметом особого интереса при изучении тонких пленок и материалов. Эксперименты в терагерцовой области, выполненные с использованием техники высокого временного разрешения (time-domain spectroscopy), дали весьма противоречивые результаты. Мы еще раз рассмотрели основные экспериментальные схемы связывания и транспортировки ППП с использованием монохроматического излучения лазера на свободных электронах. Наиболее эффективным способом формирования ППП оказалась конфигурация (рис. 7), предложенная Гришковским и соавторами.

Из-за высокой чувствительности ММБП мы смогли выполнить первое исследование ППП с использованием визуализации терагерцовой волны в режиме реального времени для различных экспериментальных условий. Эти результаты будут опубликованы в позднее.

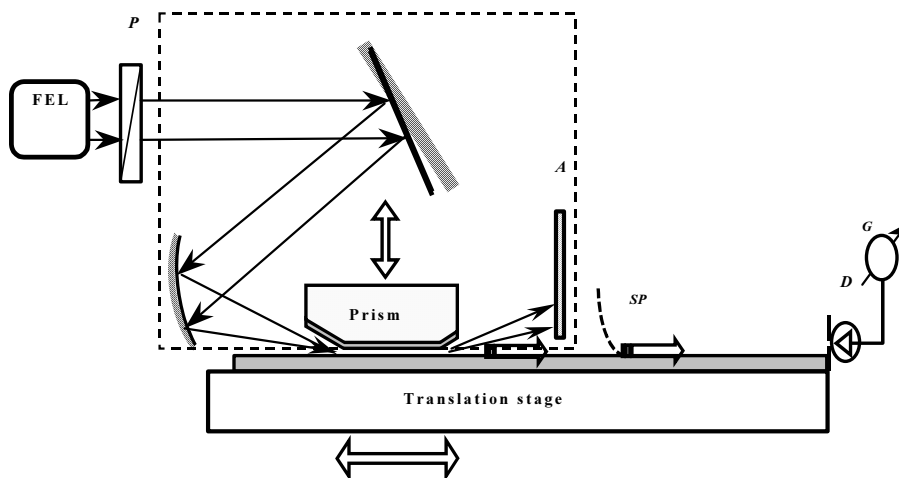


Рис. 7. Схема эксперимента для формирования поверхностных плазмонов

2.4. Изображающий спектрометр нарушенного полного внутреннего отражения

Спектрометр нарушенного полного внутреннего отражения с визуализацией в режиме реального времени был разработан и применен для изучения статических и динамических объектов в терагерцовой области. Набор изображений при фиксированной длине волны показан на рис. 8. Постепенно переставляя длину волны лазера на свободных электронах, можно записать видео на нескольких длинах волн.

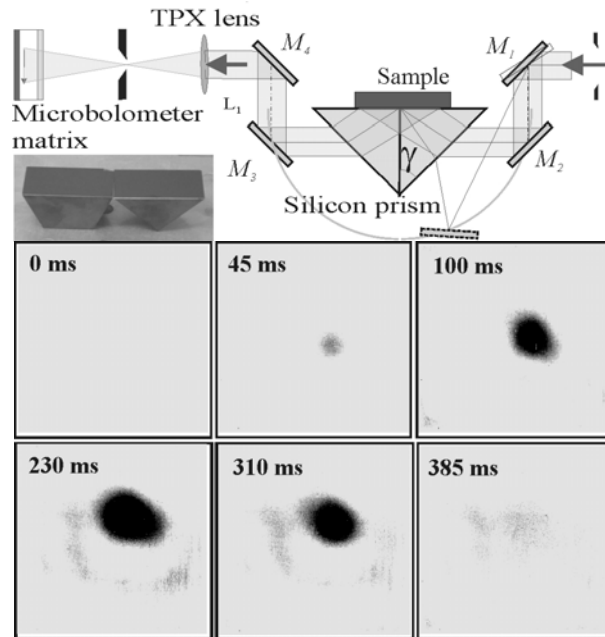


Рис. 8. Изображающий спектрометр нарушенного полного внутреннего отражения. Динамика растворения капли этилового спирта в кювете с водой (кадры из терагерцового видео, записанного с помощью ММБП, $f = 26$ кадров в секунду, $\lambda = 130$ мкм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложены и реализованы четыре системы для регистрации мощного излучения ЛСЭ. Детально исследованы их основные характеристики – чувствительность, пространственное и временное разрешение. Эти системы были использованы для визуализации изображений в экспериментах, продемонстрировавших возможность терагерцовой спекл-фотографии, голографии, тальбот-метрологии, спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения и спектроскопии поверхностных плазмонов.

Авторы признательны Я. В. Гетманову, В.В. Кубареву, Т.В. Саликовой, М.А. Щеглову, О.А. Шевченко и другим членам команды ЛСЭ, которые обеспечивали работу Новосибирского лазера на свободных электронах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Micken S.P., Zhang X.-C. T-ray Sensing and Imaging, Internat. J. of High Speed Electronics and Systems, 2003. – V. 13. – P. 601–676.
- [2] Carr G.L., Martin M.C., McKinney W.R., Jordan K., Neil G.R., Williams G.P. High-power terahertz radiation from relativistic electrons, Nature, 2002. – V. 420. – P. 153–156.

- [3] Antokhin E.A., Akberdin R.R., Arbutov V.S., Bokov M.A., Bolotin V.P., Burenkov D.B., Bushuev A.A., Veremeenko V.F., Vinokurov N.A., Vobly P.D., Gavrilov N.G., Gorniker E.I., Gorchakov K.M., Grigoryev V.N., Gudkov B.A., Davydov A.V., Deichuli O.I., Demytyev E.N., Dovzhenko B.A., Dubrovin A.N. et al. First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemistry research, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res., Sec. A, 2004. – V. 528. – P. 15–18.
- [4] Kuryshv G.L., Kovchavtzev A.P., Vainer B.G., Guzev A.A., Bazovkin V.M., Stroganov A.S., Subbotin I.M., Zakharov I.M., Efimov V.M., Postnikov K.O., Lee I.I., Valisheva N.A., Panova Z.V., Medical infrared imaging system based on a focal plane array for 2.8–3.05 spectral range, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 1998. – V.4. – P. 5–9.
- [5] <http://www.macken.com/thermal.shtml>.
- [6] Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A., Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements, Measurement Science and Technology, 2010. – V. 21, 054017. – P. 13.
- [7] Knyazev B.A., Kubarev V.V., Wide-field imaging using a tunable terahertz free electron laser and a thermal image plate, Infrared Physics and Technology, 2009. – V. 52. – P. 14–17.
- [8] Cherkassky V.S., Gerasimov V.V., Ivanov G.M., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Lukyanchikov L.A., Merzhievsky L.A., Vinokurov N.A., Techniques for microscopy of condensate matter in terahertz spectral region, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. A, 2007. – V. 575. – P. 63–67.
- [9] Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Ovsyuk V.N., Fomin B. I., Aseev A.L., Knyazev B. A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A., Microbolometer detector arrays for the infrared and terahertz ranges, Journal of Optical Technology, 2009. – V.76, Iss. 12. – P. 739–743.
- [10] Lee A., Qin Q., Kumar S., Williams B.S., Hu Q. Real-time terahertz imaging over a standoff distance (> 25 meters), Appl. Phys. Lett., 200. – V. 89.
- [11] Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A., Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser, Appl. Phys. Lett., 2008. – V. 92, 131116.
- [12] Knyazev B.A., Cherkassky V.S., Choporova Yu.Yu., Gerasimov V.V.; Vlasenko M.G.; Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application, J Infrared Milli Terahz Waves, 2011. – V. 32. – P. 1207–1222.
- [13] Vinokurov N.A., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Popik V.M., Cherkassky V.S., Shcheglov M.A., Visualization of radiation from a high-power terahertz free electron laser with a thermosensitive interferometer, Technical physics, 2007. – V. 52. – P. 911–919.
- [14] Vedernikov V.M., Dutov P.M., Kokarev A.I., Kir'yanov V.P., Knyazev B.A., Nikitin V.G., Pal'chikova I.G., Sametov A.R., Stupak M.F., Chugui Y.V., Chukanov V.V., Diffractive Elements for a Free Electron Laser, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2010. – V. 46. – № 4. – P. 365.
- [15] Chashchina O.I., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A., Real-time speckle metrology using terahertz free electron laser radiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. A, 2009. – V. 603. – P. 50–51.
- [16] Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H., Optical holography, New York and London: Academic Press, 1971.
- [17] Martinez-Leon L., Araiza-E M., Javidi B., Andres P., Climent V., Tajahuerce E., Single-shot digital holography by use of the fractional Talbot effect, Optics Express, 2009. – V. 17. – P. 12900–12909.

Винукуров Николай Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 200 публикаций. E-mail: N.A.Vinokurov@inp.nsk.su.

Власенко Максим Григорьевич, аспирант, инженер Института ядерной физики СО РАН, младший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основное направление научных исследований – оптика. Имеет 2 публикации. E-mail: vlasenko@ngs.ru.

Герасимов Василий Валерьевич, младший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН, младший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основное направление научных исследований – оптика. Имеет 10 публикаций. E-mail: einy@ngs.ru.

Демьяненко Михаил Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика полупроводников и диэлектриков. Имеет более 35 публикаций. E-mail: dem_yanenko@thermo.isp.nsc.ru.

Есаев Дмитрий Георгиевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика полупроводников и диэлектриков. Имеет более 100 публикаций. E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru.

Князев Борис Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН, академик МАН ВШ, заведующий лабораторией прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Основное направление научных исследований – оптика, физика плазмы. Имеет более 300 публикаций. E-mail: B.A.Knyazev@inp.nsk.su.

Кулипанов Геннадий Николаевич, академик РАН, профессор, заместитель директора Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 300 публикаций. E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su.

Никитин Алексей Константинович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НТЦ УП РАН. Основное направление научных исследований – оптическая спектроскопия, поверхностные плазмоны. Имеет более 50 публикаций. E-mail: alnikitin@mail.ru.

Черкасский Валерий Семенович, кандидат технических наук, профессор Новосибирского государственного университета. Основное направление научных исследований – численное моделирование. Имеет более 30 публикаций. E-mail: cherk@phys.nsu.ru.

Чопорова Юлия Юрьевна, аспирант Института ядерной физики СО РАН, младший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основное направление научных исследований – оптика. Имеет более 10 публикаций. E-mail: choporenok@ya.ru.

**V.A. Knyazev, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, M.G. Vlasenko,
M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, A.K. Nikitin, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov**
High-power monochromatic terahertz radiation: metrological aspects

The Novosibirsk free electron laser is nowadays the most intense source of terahertz radiation. It generates monochromatic coherent radiation as a continuous stream of 100-ps pulses with a repetition rate of 5.6 MHz. Radiation wavelength can be, at present, gradually tuned within the spectral ranges of 120–240 μm and 40–70 μm . Average power of the radiation at the user stations reaches several hundred watts. Unique features of NovoFEL radiation, from one hand, require development of techniques for radiation imaging and characterization and, from other hand, enable the development of new metrological methods and techniques. In this paper we deal with both these aspects. Unique results obtained at one of the user stations of the Novosibirsk free electron laser during past years are reviewed.

Key words: Terahertz region, free electron laser, imaging, spectroscopy, metrology.