

УДК 53.084.85

## **СИСТЕМА НАКАЧКИ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ ИСТОЧНИКА НЕПРЕРЫВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**А.В. Веденеев, Н.В. Ионина, В.В. Орлов, А.С. Рохмин, Е.А.Седых, М.К. Ходзицкий, С.А. Козлов**

Создана система накачки инфракрасным излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного терагерцового излучения, на основе смешения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полуторамикронного диапазона. Данная система позволяет расширить рабочий диапазон перестройки терагерцовых спектрометров до 18 ТГц с шагом 0,125 ТГц. Дополнительно было разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее использовать систему накачки антенны в качестве прецизионного инфракрасного спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм.

**Ключевые слова:** система накачки, терагерцовое излучение, инфракрасная спектроскопия.

### **Введение**

Интерес к терагерцовой (ТГц) области электромагнитного спектра (0,1–10 ТГц) связан в значительной степени с характерными особенностями самого излучения, которые обуславливают возможность его эффективного применения в спектроскопии, медицине, биологии, промышленном техническом контроле, сфере обеспечения безопасности, экологическом контроле. Так как ТГц диапазон частот находится между оптическим (инфракрасным) и радиофизическим (миллиметровым) диапазонами, то его излучение характеризуется достаточно короткой длиной волны, но при этом слабо поглощается во многих средах, не прозрачных для видимого излучения. Эта особенность позволяет реализовывать технологии промышленного контроля изделий. Поскольку при этом ТГц излучение не является ионизирующим, такие технологии могут быть и достаточно безопасными для людей. С этой точки зрения применение ТГц излучения в определенных медицинских приложениях потенциально предпочтительнее широко используемого рентгеновского, обладающего ионизирующими свойствами, разрушительно действующими на живые ткани. Важным применением ТГц спектроскопии может быть обнаружение вредных и запрещенных к применению веществ по спектральным сигнатурам и контроль окружающей среды [1, 2].

Однако представленные в публикациях лабораторные макеты спектрометров для ТГц области спектра электромагнитного излучения, а также присутствующие на рынке коммерческие образцы таких приборов позволяют осуществить перестройку частоты лишь в диапазоне от 0,1 до 3–3,5 ТГц [3–5]. При этом сканирование частоты в этом диапазоне может производиться с шагом до 1 ТГц [6, 7].

В настоящей работе представлена система накачки инфракрасным (ИК) излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного ТГц излучения, на основе смешения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полуторамикронного диапазона, позволяющая расширить потенциальный диапазон перестройки частоты ТГц излучения до 18 ТГц и обеспечивающая шаг перестройки до 0,125 ТГц. Реальный диапазон перестройки будет ограничиваться резонансным контуром используемой фотопроводящей антенны. Для выпускаемых в настоящее время фотопроводящих антенн этот диапазон 0,1–5 ТГц.

Кроме того, для такой системы накачки разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в автоматизированном режиме управлять разностными частотами ИК-лазеров, а также использовать систему в качестве прецизионного ИК-спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм. Также была обеспечена фокусировка ИК-излучения в пятно диаметром 20 мкм при использовании стандартных оптических элементов.

### **Оптическая схема лабораторного макета**

Одним из наиболее часто используемых в последнее время способов генерации непрерывного излучения ТГц диапазона частот является облучение фотопроводящей антенны, на которую подано напряжение смещения, двумя источниками видимого или ИК-диапазона с близкими длинами волн. При сложении полей таких источников на фотопроводящей антенне появляется составляющая фототока с частотой, соответствующей разности этих длин волн, и находящаяся уже в ТГц частотном диапазоне. При этом необходимо решить задачи эффективной фокусировки излучения в плоскости фотопроводящей антенны в пятно диаметром 5–10 мкм, обеспечив плотность мощности до десятков кВт/см<sup>2</sup> и перестройки длины волны лазеров в требуемом диапазоне. В нашей работе для реализации системы накачки ТГц источника излучения применены перестраиваемые в широком диапазоне частот полупроводниковые лазеры Фабри–Перо с полуторамикронными диапазонами для обеспечения полосы разностных частот до 18 ТГц, а также возможности использования существующих развитых технологий оптоволоконной связи. Для фокусировки излучения использовались также стандартные промышленные оптические элементы (микрообъективы, линзы). Фотография и схема системы накачки для ТГц источника излучения приведены соответственно на рис. 1 и рис. 2.

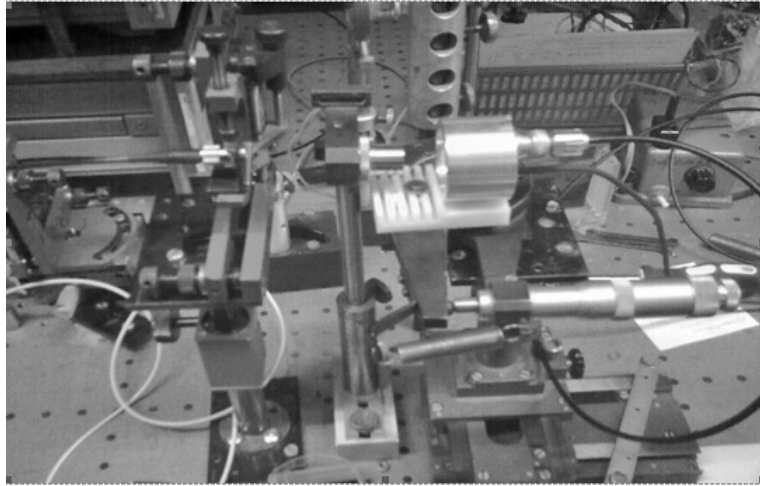


Рис. 1. Фотография лабораторного макета

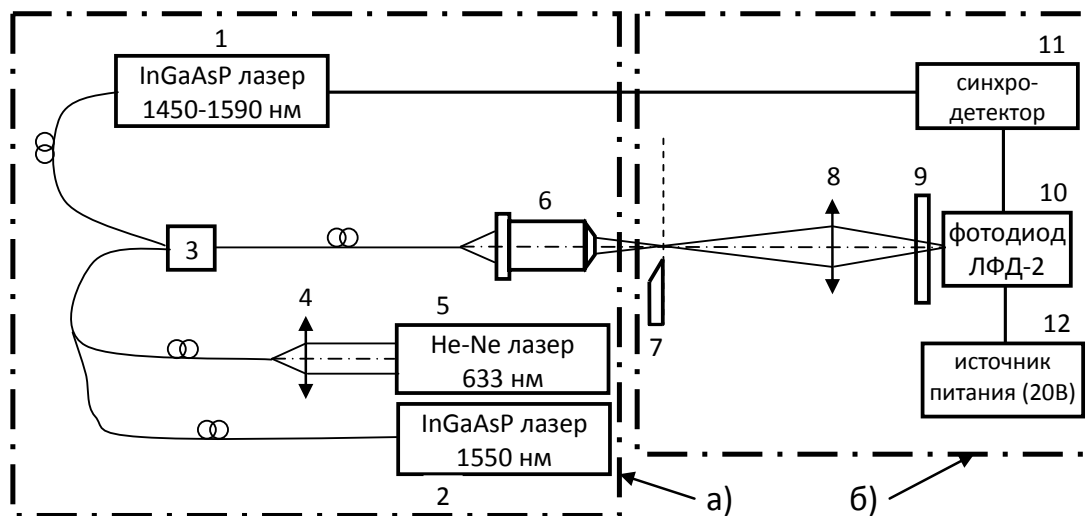


Рис. 2. Система накачки для ТГц источника излучения с блоком контроля параметров: а) система накачки ТГц источника излучения; б) блок контроля параметров системы накачки:

- 1, 2 – полупроводниковые перестраиваемые лазеры (1450–1590 нм); 3 – оптоволоконный разветвитель;  
 4 – фокусирующая линза; 5 – He-Ne юстировочный лазер; 6 – система фокусировки ИК-излучения;  
 7 – непрозрачный экран – нож; 8 – коллективная линза; 9 – диффузный экран (диффузор); 10 – приемник излучения ЛФД-2; 11 – синхронный детектор SR830; 12 – источник постоянного напряжения

Излучение с волоконно-оптических выходов полупроводниковых ИК-лазеров 1, 2 с помощью волоконно-оптического разветвителя 3 подается на вход фокусирующей системы 6. Для юстировки в один из входных каналов волоконного разветвителя подается видимое излучения He-Ne лазера 5, с помощью которого юстируется фокусирующая система 6, располагающаяся на определенном расстоянии на выходе волоконного разветвителя. В качестве альтернативных рассматривались варианты фокусировки ИК-излучения одиночной линзой с фокусным расстоянием 10 мм, микрообъективом «ПЛАН 9×10». Для этих вариантов определялась плотность мощности излучения в перетяжке формируемого пучка, диаметр перетяжки, а также коэффициент пропускания фокусирующей системы. Для генерации ТГц излучения необходимо сфокусировать ИК-излучение, выходящее из оптического волокна, в зазор фотопроводящей антенны размером порядка  $5 \times 10 \text{ мкм}^2$ , пятно диаметром примерно 10 мкм. Для выбора наилучшего варианта фокусирующего объектива были измерены диаметры пятен, формируемых линзой с фокусным расстоянием 10 мм и микрообъективом «ПЛАН 9×0,20». Для измерения диаметра пятна был использован метод ножа [8]. Согласно этому методу, в поперечное сечение лазерного пучка вводилась диафрагма (нож), имеющая тонкий прямолинейный край, которая перекрывала часть пучка. Интенсивность другой части пучка, прошедшей мимо ножа, фокусировалась линзой на фотодиод, чувствительный к ИК-излучению. По измеренной зависимости интенсивности излучения от положения ножа находится распределение интенсивности в сечении пучка. В данном случае измерялся диаметр пятна излучения, который определялся как разность координаты положения ножа, где интенсивность излучения начинала возрастать, и координаты, где интенсивность достигала максимального значения и не изменялась при дальнейшем перемещении ножа. Устройство, реализующее метод «ножа», схематически показано на рис. 2.

Нож 7 устанавливался на поворотном столике, его перемещение в поперечном сечении пучка выполнялось в небольшом диапазоне углов поворота столика. Движение ножа происходило по окружности радиусом порядка 40 мм и длине дуги порядка 1 мм, поэтому траекторию движения можно с большой точностью аппроксимировать прямой линией. Поворот столика осуществлялся микрометрическим винтом. Положение ножа определяется по данным шкалы микрометрического винта, а величина перемещения ножа вычисляется с помощью выражения

$$L_{\text{н}} = L_{\text{мв}} \cdot R_{\text{н}} / R_{\text{ст}},$$

где  $L_{\text{н}}$  – перемещение ножа;  $L_{\text{мв}}$  – перемещение микрометрического винта;  $R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{ст}}$  – расстояния от центра вращения столика до края ножа и точки контакта столика с микрометрическим винтом соответственно.

Расположение ножа на поворотном столике позволяет увеличить точность перемещения ножа в  $R_{\text{ст}}/R_{\text{н}}$  раз по сравнению с точностью перемещения 0,01 мм, обеспечиваемой непосредственно микрометрическим винтом. В данном случае точность перемещения ножа увеличилась в 3,45 раз и составила 0,0029 мм. Для юстировки установки использовалось излучение He-Ne лазера, выходящее из того же оптического волокна, что и ИК-излучение. Измеренные значения диаметров пятен микрообъективом, сформированные линзой и микрообъективом, составили 0,165 и 0,02 мм соответственно. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности излучения от положения ножа при формировании пятна микрообъективом. Было также измерено пропускание линзы и микрообъектива для длины волны излучения 1550 нм, которые составили 0,92 и 0,43 соответственно. Отсюда следует, что, несмотря на меньшее пропускание, микрообъектив обеспечивает намного большую концентрацию энергии ИК-излучения на антенне, чем линза, благодаря меньшему диаметру пятна излучения.

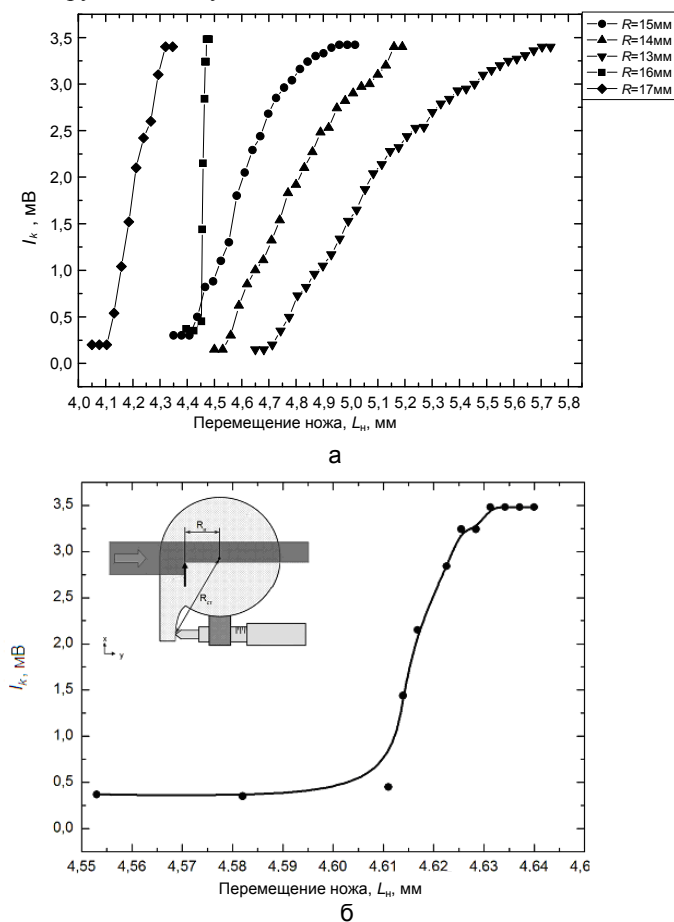


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения, прошедшего мимо ножа ( $I_k$ ), от смещения ножа ( $L_n$ ) (а) и схема устройства, перемещающего нож (на вкладке), для разных расстояний ( $R$ ) от края объектива до ножа  $R = 16$  мм (б)

#### Программное обеспечение

Блок-схема измерительной системы ИК-спектрометра приведена на рис. 4. В схеме был использован метод синхронного детектирования. Для синхронного детектирования использовался генератор опорного сигнала на частоте, равной частоте исследуемого сигнала. В данной схеме это выполняется путем фазовой привязки внутреннего генератора синхронного детектора SR 830 к сигналу от генератора внутренней модуляции лазера HP 8168F. SR 830 умножал исследуемый сигнал с фотодиода на опорный сигнал цифровым способом. Усиленный сигнал оцифровывается с помощью 16-битного аналого-

цифрового преобразователя (АЦП) с максимальной частотой дискретизации 256 кГц. Перед преобразователем стоял фильтр низких частот с максимальной частотой 102 кГц, который предотвращал искажения, вызванные конечной частотой дискретизации. Данный синхронный детектор может измерять сигналы порядка нескольких нановольт. Встроенный в него низкошумящий усилитель предназначен для усиления сигнала до уровня, оптимального при оцифровке сигнала с помощью АЦП, не увеличивая отношение сигнал/шум. Коэффициент аналогового усиления в синхронном детекторе может изменяться примерно от 7 до 1000. Суммарное усиление определяется чувствительностью, которая изменяется от 1 В до 2 нВ. Распределение усиления определяется динамическим резервом. Динамический резерв можно изменять в диапазоне 0–174 дБ. Постоянная времени, которая определяет эффективную ширину полосы фильтра низких частот, может изменяться от 10 мс до 30 с. Фильтр низких частот представляет собой обычный RC-фильтр с подавлением сигнала 6 дБ/октава. Генератор внутренней модуляции лазера HP 8168F перестраивается в диапазоне 250 Гц–300 кГц. Выходная мощность ИК-лазера регулируется в диапазоне 0,1–5,5 мВт (максимум на длине волны 1555 нм). Номинальный диапазон длин волн от 1450 нм до 1590 нм определяет ТГц диапазон излучения для фотопроводящей антенны от 0,1 до 18 ТГц. Минимальный шаг сканирования по длине волны для лазера HP 8168F равен 1 пм, соответственно шаг перестройки в ТГц диапазоне составляет 0,125 ГГц. Таким образом, управляемыми параметрами ИК-лазера являются частота модуляции, ИК-мощность, шаг сканирования, длина волны, а управляемыми параметрами синхронного детектора – постоянная времени, динамический резерв, фильтрация, чувствительность. «Мертвое время» (задержка) спектрометра составляет около 1 мс в течение каждого полупериода. Задержка необходима для исключения переходных процессов после включения или выключения мощности. Новое измерение начинается с установки новой длины волны и мощности, а также проверки выставленных значений за счет обратной связи. Обработка сигналов и общее управление работой прибора и синхронизация процессов измерения проводится с помощью микроконтроллера, который получает команды и пересылает измеренные данные в блок электроники.

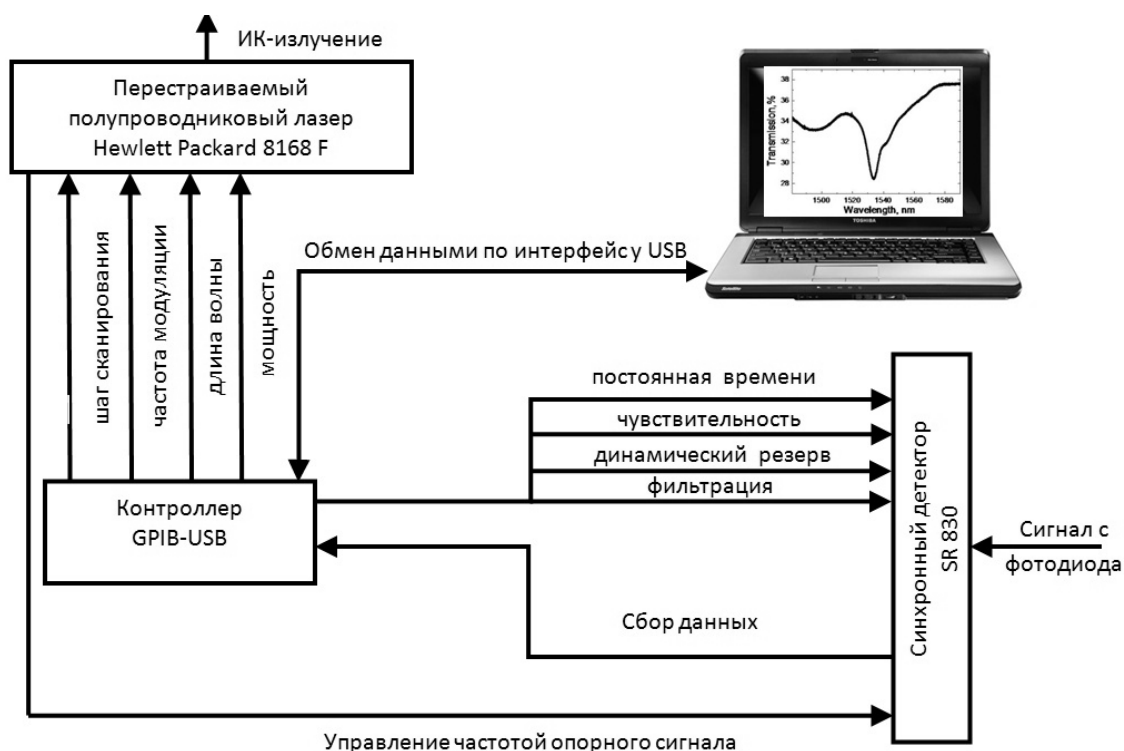


Рис. 4. Структурная схема основных узлов системы автоматизации эксперимента

При разработке программного обеспечения сопровождения спектрометра ставилась задача возложить на него следующие функции:

1. диалоговый режим работы с оператором;
2. управление плавным сканированием частоты ИК-излучения;
3. непрерывный контроль состояния изменения частоты;
4. статистическая обработка информации и ее архивация в удобной для пользователя форме;
5. оперативный контроль состояния элементов ИК-спектрометра.

Данное программное обеспечение управления системой накачки/спектрометром было реализовано на графическом языке LabView 8.5. Интерфейс программного обеспечения показан на рис. 5.

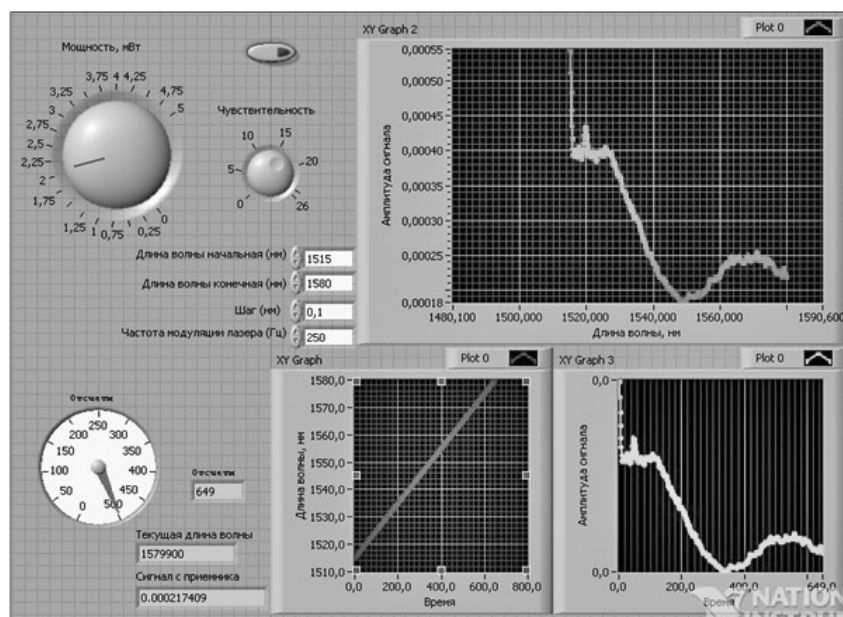


Рис. 5. Интерфейс программы управления системой накачки

Связь между элементами спектрометра и персональным компьютером осуществляется через GPIB-USB протокол обмена. При включении спектрометра производится начальная установка частоты ИК-лазера, значения мощности излучения, настройка частоты модуляции ИК-излучения, параметров синхродетектора, а также осуществляется контроль параметров излучения. Для измерения спектров пропускания достаточно ввести диапазон перестройки частоты, шаг сканирования и число импульсов накопления (усреднения). По мере накопления данных полученный спектр отображается на мониторе.

Работа поддержана грантом ФЦП Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК №16.740.11.0459).

### Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. создана система накачки ИК-излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного ТГц излучения, на основе смешения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полумикронного диапазона, позволяющая осуществлять перестройку в частотном диапазоне 0,1–18 ТГц с шагом 0,125 ТГц;
2. разработано программное обеспечение для управления системой накачки, обеспечивающее возможность использовать данную систему в качестве прецизионного ИК-спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм;
3. обеспечена фокусировка ИК-излучения в пятно диаметром 20 мкм в плоскости фотопроводящей антенны при использовании стандартных оптических элементов.

### Литература

1. Yun-Shik L. Principles of Terahertz Science and Technology. – Springer, 2009. – 341 p.
2. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В., Козлов С.А., Новоселов Е.В. Импульсный терагерцовый рефлектометр // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 1 (71). – С. 19–23.
3. Sartorius B., Stanze D., Gobel T. et al. Continuous Wave Terahertz System, based on 1.5  $\mu\text{m}$  Telecom Technologies // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2012. – V. 33. – P. 405–417.
4. Preu S., Dohler G.H., Malzer S. et al. Tunable, continuous – wave Terahertz photomixer sources and applications // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 109. – P. 061301–57.
5. Ngatsuma T., Kaino A., Hisatake S. et al. Continuous Wave Terahertz Spectroscopy System Based on Photodiodes // PIERS Online. – 2010. – V. 6. – P. 390–394.
6. Wilk R. Continuous wave Terahertz spectrometer with coherent detection // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. – 2010. – V. 58. – P. 713–716.
7. Wilk R. Continuous wave Terahertz spectrometer based on two DFB laser diodes // Optica Applicata. – 2010. – V. XL. – P. 119–127.
8. Suzaki Y., Tachibana A. Measurement of the mkm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge // Applied Optics. – 1975. – V. 14. – P. 2809–2810.

- Веденеев Алексей Владимирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [avedeneev.91@mail.ru](mailto:avedeneev.91@mail.ru)
- Ионина Наталия Владимировна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий инженер, [shurch@yandex.ru](mailto:shurch@yandex.ru)
- Орлов Вячеслав Васильевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, [orlov4v8v@yandex.ru](mailto:orlov4v8v@yandex.ru)
- Рохмин Алексей Сергеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, [rokhmin@oi.ifmo.ru](mailto:rokhmin@oi.ifmo.ru)
- Седых Егор Александрович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [manroom.harshrealm@gmail.com](mailto:manroom.harshrealm@gmail.com)
- Ходзицкий Михаил Константинович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, [khodzitskiy@yandex.ru](mailto:khodzitskiy@yandex.ru)
- Козлов Сергей Аркадьевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, [kozlov@mail.ifmo.ru](mailto:kozlov@mail.ifmo.ru)