

**Заболотный А.Г.^{1,3}, Сахнов С.Н.^{1,3}, Парахуда С.Е.^{2,4},
Смолянская О.А.², Езерская А.А.², Гейко И.А.¹**

¹Краснодарский филиал ФГБУ «МНТК «Микрохирургия глаза»
им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России

²ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

³ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный медицинский университет»
Минздравсоцразвития России

⁴ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
E-mail: nok@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ГЛАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ – ФИБРОЗНОЙ ОБОЛОЧКОЙ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА, РОГОВИЦЕЙ И СКЛЕРОЙ, В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Авторами, в эксперименте на кадаверных глазах животных, выполнено изучение взаимодействия терагерцового излучения с глазной поверхностью – фиброзной оболочкой глазного яблока, роговицей и склерой свиньи. Исследована проникающая способность импульсов пикосекундной длительности (пс): спектры пропускания и отражения компонентами передней поверхности глаза в терагерцовом диапазоне спектра электромагнитных колебаний 0,05-2,0 ТГц. Установлены параметры мощности ТГц излучения на пропускание для склеры – 30-40 мкВт. Для роговицы, центра и периферии, лимба необходимо ТГц излучение большей мощности.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, офтальмология, глазная поверхность, роговица, склера.

Актуальность

Терагерцовый диапазон (от 300 ГГц до 10 ТГц) неионизирующего электромагнитного излучения, располагающийся на переднем крае научно-практических исследований и разработок [1], находит все более широкое применение в различных областях биологии и медицины – дерматологии, стоматологии, эндокринологии, онкологии [2], как в диагностике, так и лечении, обеспечивая детектирование и визуализацию метаболических и патологических процессов в тканях [3].

В зарубежных материалах имеются единичные сообщения: о терагерцовом зондировании в ткани роговицы (D. Bennet et al., 2011). В доступной отечественной литературе данных по применению терагерцового излучения в офтальмологии практически нет.

В этой связи, в настоящее время большой интерес представляет исследование возможностей применения терагерцового излучения при диагностике и лечении офтальмопатологии переднего отрезка глаза – роговицы, конъюнктивы, склеры, цилиарного тела и хрусталика.

Ранее нами были проведены измерения терагерцовых спектров пропускания и отражения катарактально измененных хрусталиков глаза человека с различной степенью плотности ядра.

Цель исследования

Изучить взаимодействие терагерцового излучения с глазной поверхностью – фиброзной оболочкой глазного яблока, роговицей и склерой, в эксперименте.

Материал и методы

Работа выполнена на 14 образцах трупных свиных (кадаверных) глаз. Исследования проводились на 10 кадаверных глазах, которые находились в консервированной питательной среде Борзенка-Мороз (при температуре +4 °С), что обеспечивало их анатомо-физиологическое состояние, приближенное к естественному [5], и 4 нативных образцах, т.е. без консервации. Сроки хранения консервированных образцов составляли 7 суток от момента забора материала до проведения эксперимента.

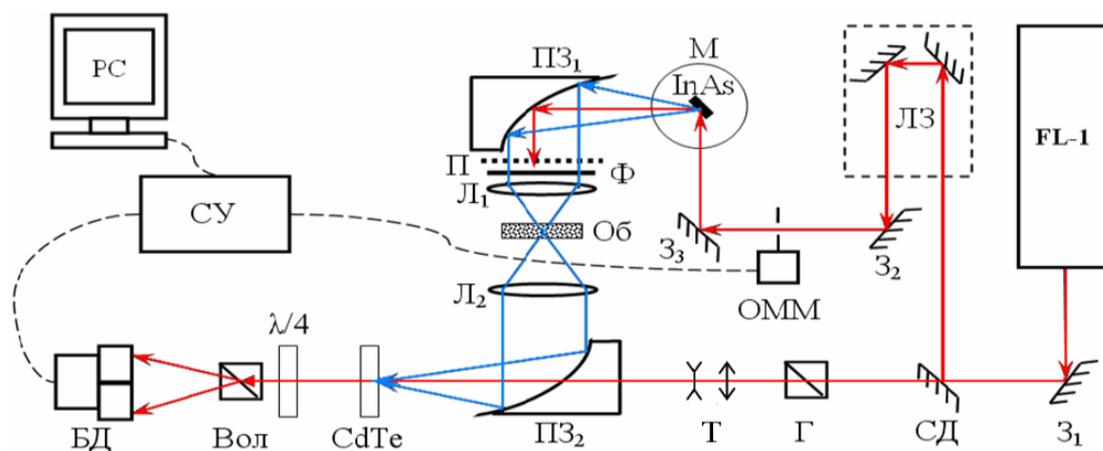
I группу составили 3 энуклеированных глаза, консервированных в жидкой питательной среде Борзенка-Мороз. Во II группу вошли 11 роговично-склеральных образцов полученных путем хирургического выкраивания. После эвисцерации кадаверных глаз проведено выкраивание корнеосклерального диска со стороны переднего эпителия с использованием механического трепана, основанное на тканещающем микрохирургическом подходе, позволяющем максимально сохранить нативность, архитектуру

и плотность эндотелиальных клеток донорских роговиц на этапе их гипотермической консервации в культурной среде. Отечественная среда Борзенка-Мороз для гипотермической консервации жизнеспособных трупных роговиц обладает высокими защитными свойствами, обеспечивает стабилизацию клеточных мембран, сохранность макроэргических соединений и стабильность плотности эндотелиальных клеток в процессе холодного хранения.

Для измерения спектров пропускания частот в диапазоне 0,05 ТГц – 2 ТГц компонент глаза использовался терагерцовый спектрограф TS-5 (рис. 1). В основе работы терагерцового спектрографа TS-5 заложен принцип записи распределения электрической компоненты поля до и после прохождения образцов компонент глаза. Спектр терагерцового излучения восстанавливается с помощью вычисления интеграла Фурье по записанным данным.

Луч (фемтосекундные лазерные импульсы на длине волны $\lambda=1560$ нм с частотой повторений 75 МГц) с выхода фемтосекундного Yb:KYW лазера Solar FL-1 (FL-1 на рис.1), отражаясь от зеркала (Z_1), поступает на делитель пучка (СД). Тем самым, он разделяется на два луча. Затем луч 1, последовательно проходит: призму Глана-Тейлора (Г), телескоп (Т), электрооптический кристалл (CdTe), фазосдвигающую пластину ($\lambda/4$), призму Волластона (Вол), и поступает на вход

балансного детектора (БД). Луч 2 с выхода делителя пучка последовательно проходит: оптическую линию задержки (ЛЗ), зеркало (Z_2), оптико-механический модулятор (ОММ), зеркало (Z_3), полупроводниковый кристалл InAs (М), параболическое зеркало (PZ_1), и поступает на вход фильтра (Ф). В полупроводниковом кристалле (InAs) под действием оптических фемтосекундных импульсов возникает терагерцовое излучение. Оно представляет собой цуг импульсов следующих с частотой 75 МГц, при этом спектр излучения сосредоточен в полосе частот 50 ГГц – 2 ТГц. Излучение с выхода полупроводникового кристалла (М) последовательно проходит: параболическое зеркало (PZ_1), фильтр (Ф), линзу (L_1), объект исследования (Об), линзу (L_2), параболическое зеркало (PZ_2) и поступает на вход электрооптического кристалла (CdTe). Под действием электрической компоненты терагерцового излучения изменяется плоскость поляризации электрооптического кристалла. Таким образом, электрическая компонента терагерцового излучения с помощью фазосдвигающей пластинки ($\lambda/4$) и призмы Волластона (Вол) детектируется балансным приемником с синхронным усилением (СУ). Изменение времени задержки луча 2 приводит к сдвигу времени открытия электрооптического кристалла, что позволяет сканировать распределение электрической



FL-1 – фемтосекундный Yb:KYW лазер Solar FL-1, 31, 32, 33 – зеркала, СД – делитель пучка, Г – призма Глана, К – телескоп-рефрактор, ЛЗ – оптическая линия задержки, ОММ – оптико-механический модулятор, InAs – полупроводниковый кристалл, М – магнит, ПЗ1, ПЗ2 – параболические зеркала, Ф – фильтр, П – поляризатор, Л1, Л2 – линзы, Об – объект исследования, CdTe – электрооптический кристалл, $\lambda/4$ – фазосдвигающая пластинка, Вол – призма Волластона, БД – балансный детектор, СУ – синхронный усилитель, РС – персональный компьютер

Рисунок 1. Схема терагерцового спектрографа TS-5

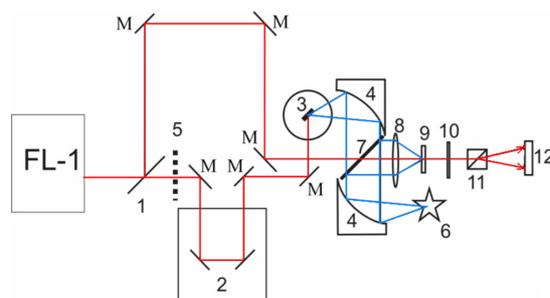
компоненты поля по времени. Данные измерений с синхронного усилителя заносятся в персональный компьютер (PC) с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя.

Исследование спектров отражения образцов компонент глаза в диапазоне 0,05 ТГц – 2 ТГц проводилось с помощью рефлектометрического терагерцового спектрографа (рис. 2).

Луч с выхода FL-1 поступает на светоделитель пучка (1), где он разделяется на два луча. Луч 1 распространяется по оптической схеме: система зеркал (M), электрооптический кристалл (9), ахроматическая четвертьволновая пластина (10), призма Волластона (11), и поступает на вход балансного детектора (12). Луч 2 последовательно проходит: оптико-механический модулятор (5), оптическую линию задержки (2) и поступает на вход полупроводникового кристалла InAs (3). Излучение с выхода (3) через систему двух параболических зеркал и делитель терагерцового излучения (7) падает на исследуемый образец компонент глаза (6). Отраженное образцом излучение через параболическое зеркало (4) и делитель (7) падает на электрооптический кристалл CdTe (9). Схема детектирования сигнала устроена аналогично схеме терагерцового спектрографа.

В таблице представлены основные характеристики терагерцового спектрографа и рефлектометрического спектрографа.

Для получения терагерцовых спектров компонентов глаза в фокус зеркала устанавливалось кварцевое окно (рис. За, цветная вкладка). Отметим, что кварц прозрачен в ТГц диапазоне. На кварцевое окно крепился обра-



FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов на Yb:KYW-лазерSolar FL-1; M – зеркала с R» 100% при падении светового пучка под 45°; 1 – светоделитель; 2 – оптическая линия задержки; 3 – полупроводниковый кристалл InAs; 4 – 45° параболические зеркала; 5 – оптико-механический модулятор; 6 – объект исследования; 7 – светоделитель ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния; 8 – линза из TPXcf = 5 см; 9 – электрооптический кристалл CdTe; 10 – ахроматическая четвертьволновая пластина; 11 – призма Волластона; 12 – балансный детектор

Рисунок 2. Схема рефлектометрический терагерцовый спектрограф

Таблица 1. Характеристики терагерцового спектрографа TS-5 и рефлектометрического спектрографа

	Спектрограф TS-5		Рефлекто-метрический спектрограф
Средняя мощность ТГц излучения, мкВт	48±4		30±3
Мощность импульса, мВт	213±17		120±10
Длительность импульса, пс	3		3
Энергия импульса, фДж	639±51		360±30
Спектральный диапазон, ТГц	0,05 ÷ 2,0		0,05 ÷ 2,0
Отношение сигнал/шум в спектре	100		100
Погрешность определения пропускания, %	2,5		
Спектральное разрешение, ГГц; на частоте, ТГц	4,5	0,116	
	5,0	0,189	
	5,5	0,411	
	5,0	0,554	
	3,5	0,559	
	4,5	0,75	
	2,5	0,989	
3,0	1,101		
Частота повторения, МГц	75		75
Частота модуляции, Гц	433		433

зец – кадаверный глаз свиньи (рис. 3б, цветная вкладка).

Результаты

Для спектров пропускания и спектров отражения роговицы производилось усреднение по 8 образцам по 3 измерения каждого. Для спектров пропускания склер глаз свиньи производилось усреднение по 5-ти измерениям. В отличие от роговицы и других компонентов глаза, склера пропускает ТГц излучение, однако на уровне процентов – долей процентов, в зависимости от толщины. Отметим, что роговица глаз свиньи в норме составляет порядка 1000 мкм в толщину, что примерно в 2 раза больше, чем у человека.

Также производилось измерение спектров пропускания и спектров отражения роговицы в центре и на периферии склеры кадаверного (не препарированного) глаза свиньи. Произ-

водилось по 5 измерений для каждого из образцов. Полученные результаты представлены на рис. 4-8 (рис. 4, 5, цветная вкладка).

В результате работы установлено, что из компонент глаз свиньи терагерцовое излучение мощностью порядка 30-40 мкВт пропускает только склера на уровне процентов – долей процентов, в зависимости от толщины. Толщина исследуемых образцов при этом составляла порядка 1000 мкм. Прочие компоненты переднего отрезка глаза: роговица (центр, периферия, лимб) не пропускают терагерцовое излучение данной мощности. Предполагается, что увеличение мощности терагерцового излучения свыше 60 мкВт позволит получить спектры пропускания для роговицы.

Заключение

Измерение спектров пропускания и отражения терагерцового излучения кадаверным

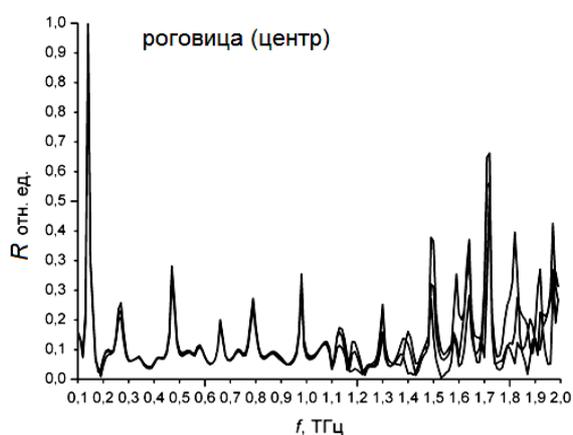


Рисунок 6. Спектр отражения центра роговицы глаза свиньи

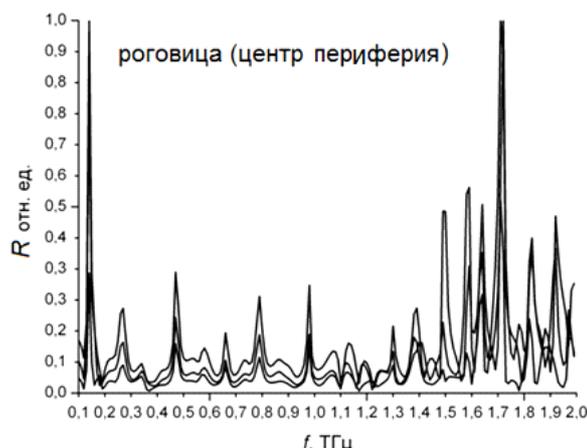


Рисунок 7. Спектр отражения периферии роговицы глаза свиньи

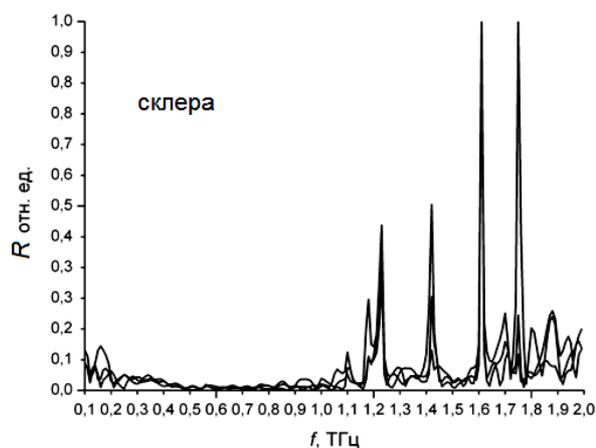


Рисунок 8. Спектр отражения склеры глаза свиньи

глазом и его компонентами позволило установить: оптимальную мощность излучения, пропускаемую склерой; выявить параметры требуемой мощности для прохождения излучения через роговицу с целью определения

возможностей применения терагерцового излучения в изучении этиопатогенеза и диагностике офтальмопатологии переднего отрезка глаза – роговицы, склеры, цилиарного тела и хрусталика.

5.10.2012

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (ГК № 16.513.11.3070)

Список литературы:

1. Чекрыгина И. М., Чекрыгин А. Э., Чекрыгин В. Э. Радиоэлектроника на службе здоровья. – «БАННЭРплюс», Таганрог, 2009. – 255 с.
2. Бецкий О.В., Креницкий А.П. и др. Биофизические эффекты волн терагерцового диапазона и перспективы развития новых направлений в биомедицинской технологии: терагерцовая терапия и терагерцовая диагностика // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – №12. – С.3-6.
3. Назаров М.М., Шкуринов А.П., Кулешов Е.А., Тучин В.В. Терагерцовая импульсная спектроскопия биологических тканей // Квантовая электроника. – 2008. – №38 (7). – С. 647-654.
4. Benett D.B. et al. Terahertz sensing in corneal tissues // Journal of Biomedical Optics. – 2011. – Vol. 16(05), 057003.
5. Борзенко С.А. Медико-технологические и методологические основы эффективной деятельности глазных тканевых банков России в обеспечении операций по сквозной трансплантации роговицы: автореф. дис. ... д-ра. мед. наук. – М., МНТК. 2008. – 266 с.

Сведения об авторах:

Заболотный Александр Григорьевич, зав. научным отделом Краснодарского филиала ФГБУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, кандидат медицинских наук; асс. кафедры глазных болезней ГБОУ ВПО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздравсоцразвития России

г. Краснодар, ул. Красных партизан 6, каб. 205, e-mail: nok@mail.ru

Сахнов Сергей Николаевич, директор Краснодарского филиала ФГБУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, к.м.н., к.э.н.; зав. кафедрой глазных болезней ГБОУ ВПО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздравсоцразвития России

Парахуда Сергей Евгеньевич, доцент кафедры приборостроения ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, кандидат технических наук, доцент

Смолянская Ольга Алексеевна, доцент, Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных Технологий Механики и Оптики, кандидат физико-математических наук, e-mail: o_smolyanskaya@mail.ru

Езерская Анна Александровна, студентка Санкт-Петербургского Государственного Университета Информационных Технологий Механики и Оптики, e-mail: a.a.ezerskaya@gmail.com

Гейко Ирина Александровна, врач-офтальмолог Краснодарского филиала ФГБУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России

UDC [617.7– 073.756.8-08:615.849.11]-092.4

Zabolotny A.G., Sakhnov S.N., Parakhuda S.E., Smolyanskaya O.A., Yezerkaya A.A., Geyko I.A. STUDY OF TERAHERTZ BEAM INTERACTION WITH EYE SURFACE – FIBROUS TUNIC OF EYEBALL, CORNEA AND SCLERA IN EXPERIMENT

In experiment on cadaver animals' eyes the authors carried out the study of terahertz beam interaction with eye surface – fibrous tunic of eyeball, cornea and sclera of pig. It was researched the penetrating possibility of picoseconds length impulses (ps): transmission spectrum and gleam with anterior eye surface components in terahertz diapason of electromagnetic oscillations spectrum 0,05-2,0 THz. Power parameters of THz beam for sclera transmission 30-40 mW was determined. THz beam of high power is necessary for cornea, center and peripheral and libal.

Key words: terahertz spectroscopy, ophthalmology, eye surface, cornea, sclera.

Bibliography:

1. Chekrygina I. M., Chekrygin A. E., Chekrygin V. E. Radiotronics on the service of health. – «Bannerplus», Taganrog, 2009. – 255 p.
2. Betskiy O.V., Krenitskiy A.P. et al. Biophysical effects of terahertz diapason waves and perspectives of new trends development in biomedical technologies: terahertz therapy and terahertz diagnostics // Biomedical technologies and radiotronics. – 2003. – №12. – P.3-6.
3. Nazarov M.M., Shkurinov A.P., Kuleshov Ye.A., Tuchin V.V. Terahertz impulse spectroscopy of biological tissues // Quantum electronics. – 2008. – №38 (7). – P. 647-654.
4. Benett D.B. et al. Terahertz sensing in corneal tissues // Journal of Biomedical Optics. – 2011. – Vol. 16(05), 057003.
5. Borzenok S.A. Medical – technological and methodological foundations of effective activity of Russia eye tissue banks in supporting of operations at penetrating corneal transplantation: Dissert. ... doct. of med. sciences. – М., 2008. – 266 p.