

УДК 681.784.88

**ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ  
КАТАРАКТАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ХРУСТАЛИКОВ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА**

А.А. Езерская, О.А. Смолянская, С.Е. Парахуда, Я.В. Грачев, А.О. Гончаренко

*Публикуется в порядке дискуссии*

Выявлена корреляция между оптической плотностью ядра хрусталика в терагерцовом диапазоне и его плотностью, определенной согласно классификации Л. Буратто. Уплотнение волокон хрусталика, вызванное старческой катарактой, увеличивает отражательную способность хрусталика в терагерцовом диапазоне. Временная структура сигнала терагерцового рефлектометрического томографа позволяет определить пространственное распределение плотности в хрусталике.

**Ключевые слова:** терагерцовая спектроскопия, терагерцовая томография, офтальмология, диагностика катаракты.

**Введение**

Влияние терагерцового (ТГц) излучения на биологические объекты в целом и на биополимеры, в частности, является очень интересной и перспективной темой для исследования, особенно в области офтальмологии. Значительный прорыв в лазерной офтальмологии произошел еще в 1954 г. с разработкой первого фотокоагулятора «Зайчик» и в 1963 г. с первой в мире успешной лазерной коагуляцией сетчатки глаза человека [1].

В настоящее время широкое применение лазеров для диагностики и хирургии в офтальмологии обусловлено способностью различного светового излучения достигать требующих коррекции структур глаза, не повреждая окружающие ткани [2, 3]. Это объясняется монохроматичностью и когерентностью лазерного излучения. Видимое световое излучение (400–750 нм), близлежащие участки ультрафиолетового и инфракрасного (ИК) спектра (325–400, 750–1400 нм) проникают до глазного дна. Остальное световое излучение поглощается поверхностными слоями роговицы и конъюнктивы [4, 5].

ТГц излучением принято называть излучение, лежащее в частотном диапазоне электромагнитных волн 0,1–10 ТГц (3 мм–30 мкм). Находясь между ИК и миллиметровым диапазонами, ТГц излучение обладает свойствами как того, так и другого диапазона [6]. Благодаря близости к СВЧ радиоволнам оно обладает большой проникающей способностью (ограниченной в основном содержанием ОН-групп), малой энергией фотона, но, с другой стороны, с ним можно работать, используя методы и технику ИК оптики. По сравнению с видимым и ИК излучением, ТГц излучение является длинноволновым, а значит, что оно менее подвержено рассеянию [7].

Преимущество ТГц излучения для медицинских применений заключается в неионизирующем характере его взаимодействия, в отличие от рентгеновского излучения. В то же время различные биологические ткани обладают существенно различным поглощением в данном диапазоне, что позволяет обеспечить контрастность снимков. Однако чрезвычайно высокое поглощение водой не позволяет ТГц излучению проникать глубоко в ткани, что ограничивает область его применения поверхностью тканей.

Спектр ТГц излучения содержит колебательные и вращательные составляющие [8]. Это позволяет проводить идентификацию молекул по их характерным спектральным линиям [9]. В сочетании с получением изображения в терагерцовом диапазоне это помогает определить не только форму, но и состав исследуемого объекта.

В настоящее время представляет большой интерес исследование возможностей диагностики офтальмопатологии с помощью ТГц излучения. Катаракта, или помутнение хрусталика, является ведущей причиной снижения зрения в мире. По оценкам Всемирной организации здравоохранения, в 1998 г. было зарегистрировано более 20 млн случаев заболевания этой патологией [10].

При наличии огромного количества аппаратуры для хирургического лечения катаракты, а также средств для интраокулярной коррекции зрения современное офтальмологическое общество испытывает явный дефицит диагностического оборудования [11]. На данный момент диагностика проводится с помощью щелевой лампы и микроскопа врачом-офтальмологом, что приводит к проблеме точного определения плотности ядра и расположения его в хрусталике.

**Подготовка образцов**

В связи с актуальностью реализации ряда задач в настоящей работе исследованы ТГц спектры пропускания и отражения катарактально измененных хрусталиков глаза человека с различной степенью плотности ядра. Объектом исследования были выбраны хрусталики третьей и четвертой степени плотности по классификации Л. Буратто [12]. Всего было исследовано 11 образцов.

Хрусталики были получены в ходе хирургического лечения катаракты методом экстракапсулярной экстракции у 11 пациентов с диагнозами «почти зрелая» и «зрелая старческая катаракта». Все операции выполнялись по медицинским показаниям и по классической технологии [13].

Хрусталик представляет собой двояковыпуклую линзу с диаметром 4–5 мм, состоящую из коллагеновых волокон и воды. Лишенный капсулы хрусталик подвержен большим изменениям биохимического состава и структуры. Помещенный в физиологический раствор хрусталик набухает за счет значительной гидрофильности с последующим полным помутнением. Метод сухой консервации с использованием силикогеля приводит к выраженной адсорбции воды, что также нарушает его качественный состав. Соответственно снижается достоверность проводимых исследований, поскольку изменяется оптическая плотность хрусталика. Исходя из этого, для сохранения хрусталиков в наиболее естественном состоянии была выбрана среда Борзенка–Мороз для консервации донорских роговиц [14]. Материал сохранялся в течение 7 суток при температуре от +5°C до +8 °С.

В рамках данного эксперимента ставилась задача исследовать терагерцовые спектры пропускания и отражения катарактально измененных хрусталиков глаза человека с различной степенью плотности ядра.

### Исследование катарактально измененных хрусталиков глаза человека посредством ТГц спектрофотометра и рефлектометра

Измерение ТГц спектров пропускания хрусталиков проводилось при помощи ТГц спектрофотометра. Проводилось пятикратное измерение пропускания хрусталиков с третьей и четвертой степенью плотности ядра. Спектральный сигнал спектрофотометра при исследовании образцов хрусталика находится на уровне шума системы.

В ходе эксперимента было установлено, что сохранение воды в составе вещества хрусталиков привело к повышению уровня поглощения импульсного ТГц излучения диапазона 0,1–1 ТГц, что не позволило исследовать спектры пропускания образцов хрусталика на ТГц спектрофотометре с имеющимся уровнем чувствительности.

Для исследования ТГц спектров отражения катарактально измененных хрусталиков глаза человека использовалась оригинальная установка ТГц рефлектометрической томографии (рис. 1) [15].

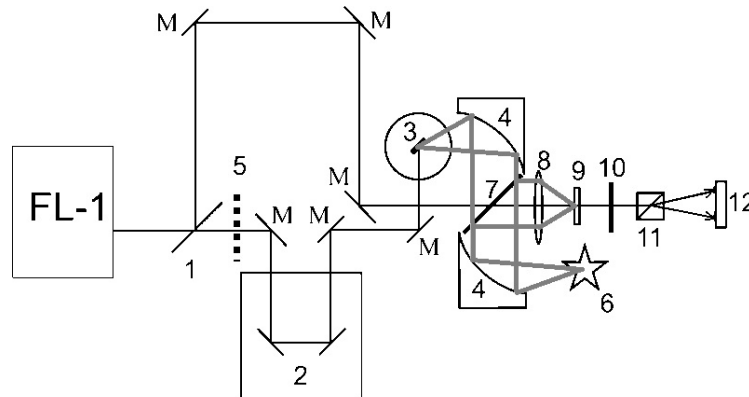


Рис. 1. Схема ТГц рефлектометрического томографа: FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов на Yb:KYW; M – зеркала ( $R \approx 100\%$ ); 1 – светоделитель; 2 – оптическая линия задержки; 3 – генератор ТГц излучения на основе кристалла InAs; 4 – 45° параболлические зеркала; 5 – оптико-механический модулятор; 6 – объект исследования; 7 – светоделитель ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния; 8 – линза из ТРХ с  $f = 5$  см; 9 – электрооптический кристалл CdTe; 10 – ахроматическая четвертьволновая пластинка; 11 – призма Волластона; 12 – балансный детектор

В ходе эксперимента было установлено, что отражение излучения диапазона частот 0,6–0,9 ТГц от катарактально измененного хрусталика с четвертой степенью плотности ядра составляет 20–30%, в то время как отражение от катарактально измененного хрусталика с третьей степенью плотности ядра составляет 5–15% (рис. 2). Таким образом, катарактальное уплотнение волокон хрусталика увеличивает отражательную способность в ТГц диапазоне, что может позволить объективно диагностировать степень помутнения хрусталика.

Сигнал, формируемый ТГц импульсами, отраженными от образца хрусталика, отличается для образцов с разной степенью помутнения. На рис. 3 приведены временные формы сигнала от образцов катарактально измененных хрусталиков глаза человека с третьей и четвертой степенью плотности ядра. Импульс с временной координатой 8 пс соответствует отражению ТГц импульса от поверхности хрусталика. Амплитуда ТГц импульса, отраженного от поверхности хрусталика с четвертой степенью плотности ядра, превышает практически в два раза амплитуду импульса, отраженного от поверхности хрусталика третьей степени плотности.

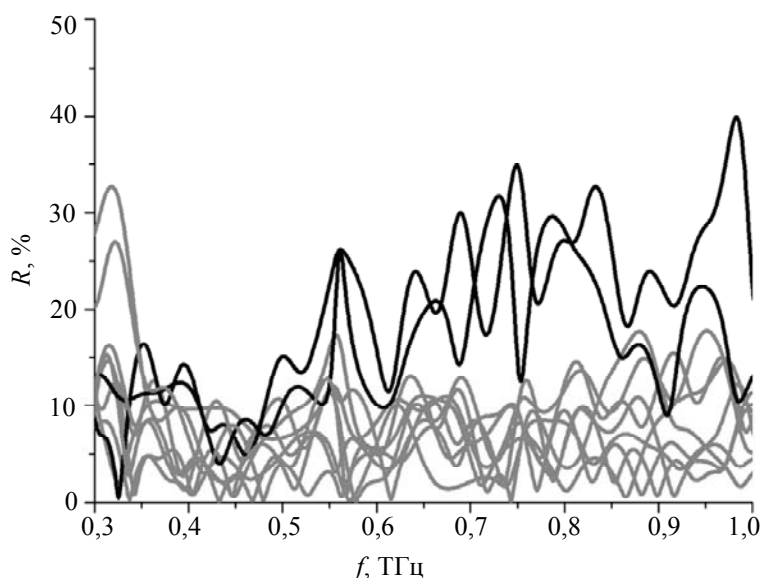


Рис. 2. Спектры отражения катарактально измененного хрусталика с третьей (серые линии) и четвертой (черные линии) степенью плотности ядра

Для хрусталиков с третьей степенью плотности ядра на временной координате 14 пс наблюдается второй отраженный импульс, соответствующий участку ядра хрусталика с более плотным расположением волокон. Временная задержка между импульсами в 6 пс соответствует оптической длине в 1,8 мм.

При четвертой степени плотности ядро занимает весь объем хрусталика, следовательно, не наблюдается изменения оптической плотности, а происходит только одно отражение от поверхности хрусталика.

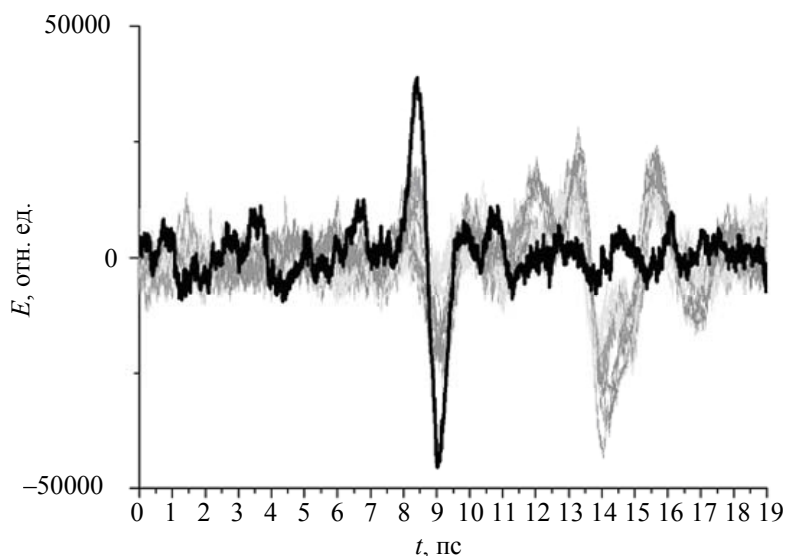


Рис. 3. Временная зависимость величины напряженности электрического поля ТГц импульса, отраженного от катарактально измененных хрусталиков третьей (серые линии) и четвертой (черные линии) степени плотности ядра от времени. Усреднение – для четырех измерений одного образца.

#### Заключение

Исследованы терагерцовые спектры пропускания и отражения катарактально измененных хрусталиков глаза человека с различной степенью плотности ядра. Использование для сохранения образцов хрусталика среды Борзенка–Мороз позволило исследовать их в состоянии, приближенном к исходному.

Применение терагерцового рефлектометрического томографа дало возможность установить корреляцию между оптической плотностью ядра хрусталика в терагерцовом диапазоне и его плотностью, согласно классификации Л. Буратто.

Уплотнение волокон хрусталика, вызванное старческой катарактой, увеличивает отражательную способность хрусталика в ТГц диапазоне, что может позволить диагностировать стадию развития заболевания. Временная структура сигнала ТГц о рефлектометрического томографа позволяет определить пространственное распределение плотности в хрусталике.

Учитывая анатомическое строение глаза человека, исследования ТГц спектров пропускания катарактально измененных хрусталиков различной степени плотности дают серьезные основания полагать, что применение этого излучения в офтальмологии для диагностики *in vivo* возможно.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК №14.740.12.0841, ГК №16.513.11.3070).

### Литература

1. Линник Л.А., Король А.Р., Задорожный О.С. Этапы становления и развития отечественной лазерной офтальмологии // Газета «Новости медицины и фармации». Офтальмология. – 2011. – № 17 (363).
2. Волков В.В., Гончаров С.Е., Даль Г.А. и др. Новое в лазерной медицине. – М., 1991. – 86 с.
3. Федоров С.Н., Копаева В.Г., Андреев Ю.В., Беликов А.В., Парахуда С.Е., Скрипник А.В. Лазерная хирургия катаракты // Лазеры для медицины, биологии и экологии. Труды Шестой петербургской школы-семинара-выставки. – СПб: Российский центр лазерной физики, 1998. – С. 19.
4. Балашевич Л.И. Лазеры в офтальмологии. – Л., 1983. – 34 с.
5. Бойко Э.В. Лазеры в офтальмологии: теоретические и практические основы. – СПб: Военно-медицинская академия, 2003. – 39 с.
6. Zhang X.-C., Xu Jingzhou. Introduction to THz wave photonics. – N.Y.: Springer Science+Business Media, 2009. – 249 p.
7. Назаров М.М., Шкуринов А.П., Кулешов Е.А., Тучин В.В.. Терагерцовая импульсная спектроскопия биологических тканей // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38 (7). – С. 647–654.
8. Wang S., Zhang X.-C. Pulsed terahertz tomography // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – V. 37. – P. 1.
9. Fisher В.М., Helm Н. and Jepsen P.U. Chemical recognition with broadband THz Spectroscopy // Proc. IEEE. – 2007. – V. 95. – P. 1592–1604.
10. Доклад Всемирной организации здравоохранения «Жизнь в 21 веке»: Зрение для всех. – Женева: ВОЗ, 1998. – 47 с.
11. Конов В.И., Осико В.В., Щербаков И.А. Фундаментальные достижения оптики и лазерной физики для медицины // Вестник Российской Академии наук. – 2004. – Т. 74. – № 2. – С. 99–114.
12. Федоров С.Н. Лазерные методы лечения заболеваний глаз. – М., 1990. – 115 с.
13. Buratto Lucio. Хирургия катаракты. Переход от экстракапсулярной экстракции катаракты к фако-эмульсификации. – Fabiano Editore, 1999. – 472 с.
14. Федоров С.Н., Мороз З.И., Борзенко С.А., Комах Ю.А. Среда для консервации роговицы глаза. Патент РФ № 2069951, приоритет от 21.02.1993.
15. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В. и др. Импульсный терагерцовый рефлектометр // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – Т. 71. – № 1. – С. 19–23.

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <i>Езерская Анна Александровна</i>    | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, a.a.ezerskaya@gmail.com                        |
| <i>Смолянская Ольга Алексеевна</i>    | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, o_smolyanskaya@mail.ru |
| <i>Парахуда Сергей Евгеньевич</i>     | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, pars144@mail.ru        |
| <i>Грачев Ярослав Владимирович</i>    | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grachev_y@mail.ru                             |
| <i>Гончаренко Александра Олеговна</i> | – Краснодарский филиал ФГУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н.Федорова», аспирант, beesanny@gmail.com   |