

4. Дозоров К.Н., Иткин Г.П., Сурков Д.А. Алгоритм управления аппаратом вспомогательного кровообращения, базирующемся на косвенном методе измерения физиологических параметров сердечно-сосудистой системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 2. Приложение. С. 9-13.
 5. Дозоров К.Н., Иткин Г.П., Романов О.В. Анализ принципов неинвазивной оценки параметров имплантируемых роторных насосов крови // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2007. № 2. С. 23-30.
 6. Itkin G.P., Matveev Y.G., Romanov O.V. Comparative hemolysis tests of rotary blood pump // Artificial Organs. 1995. № 19(7). PP. 616-619.
 7. Kawahito K., Nose Y. Hemolysis in Different Centrifugal Pumps // Artif. Organs. 1997. № 21. PP. 323-326.
 8. Steines D., Westphal D., Gobel C., Reul H., Rau G. Platelet function and hemolysis in centrifugal pumps: In vitro investigations // Int. J. Artif. Organs. 1999. № 22. PP. 559-565.
 9. Коньшьева Е.Г., Иткин Г.П., Дробышев А.А., Романов О.В. Результаты исследования на гемолиз новых имплантируемых центробежных насосов // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2007. № 4. С. 41-46.
 10. Быковский П.П., Быковская А.П., Зубовская Е.Т. Способ определения свободного гемоглобина / 5-й Республиканский съезд специалистов клинической лабораторной диагностики Беларуси. Материалы съезда. – Минск, 1997. С. 155.
 11. Göbel Ch., Eilers R., Reul H., Schwindke P., Jörger M., Rau G. A new blood pump for cardiopulmonary bypass: The HiFlow centrifugal pump // Artif. Organs. 1997. № 21. PP. 841-845.
 12. Muller M.R. et al. In vitro hematological testing of rotary blood pump: Remarks on standartization and data interpretation // Artificial Organs. 1991. № 15. PP. 83-92.
 13. Muller M.R., Schima H., Engelhardt H., Salat A., Olsen D.B., Losert U., Wolner E. In vitro hematological testings of rotary blood pumps: Remarks on standardization and data interpretation // Artif. Organs. 1993. № 17. PP. 103-110.
- Елена Геннадьевна Коньшьева,
канд. биол. наук, ст. научный сотрудник,
Владимир Леонидович Кудинов,
ведущий инженер,
Константин Николаевич Дозоров,
канд. техн. наук, ведущий инженер,
лаборатория биотехнических систем,
ФГУ «Федеральный научный центр
трансплантологии и искусственных органов
Минздравооцразвития РФ»,
г. Москва,
Сергей Анатольевич Калянин,
ведущий инженер,
Геннадий Сергеевич Кузьмин,
ведущий инженер,
кафедра биомедицинских систем,
Московский государственный институт
электронной техники,
г. Зеленоград,
e-mail: 28keg2008@mail.ru

Ю.П. Маслобоев, И.В. Пьянов, С.А. Терещенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ БИМОДАЛЬНОГО ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ОДНОРОДНОЙ СИЛЬНОРАСSEИВАЮЩЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Аннотация

В работе приведены результаты экспериментальных исследования условий, при которых наблюдается разделение баллистического и рассеянного компонентов временных распределений (эффект бимодальности) ультракороткого лазерного импульса, прошедшего через однородный слой модельной сильно рассеивающей биологической среды. Экспериментально определен диапазон существования бимодальных временных распределений для трех значений толщины слоя.

Изучение процессов взаимодействия оптического излучения с сильно рассеивающими средами (СРС), в том числе с биологическими тканями, актуально в связи с разработкой методов трансмиссионной оптической томографии [1]-[6]. Из-за сложности процессов взаимодействия оптического излучения с СРС изучение закономерностей такого взаимодействия превратилось в самостоятельное направление исследований.

Основным способом описания взаимодействия излучения с веществом является уравнение переноса излучения [7]. Это интегрально-дифференциаль-

ное уравнение в общем случае не имеет аналитического решения. Поэтому для теоретического описания временного распределения ультракороткого лазерного импульса (УКИ), прошедшего через слой СРС, используют приближения, упрощающие вид уравнения переноса [8].

Одним из интересных, но малоисследованных физических явлений в этой области является эффект бимодальности, т. е. раздельное существование баллистического и рассеянного компонентов во временном распределении (ВР) лазерного излучения, прошедшего через СРС. В данной работе при-

ведены результаты экспериментальных исследований бимодального временного распределения УКИ, прошедшего через однородный слой модельной СРС (раствора молока в воде), для различных значений толщины слоя и концентрации рассеивателя.

Для того чтобы регистрируемое временное распределение (распределение по времени интенсивности излучения, попавшего на детектор) имело бимодальную форму, необходимо достичь разделения баллистического и рассеянного компонентов импульса, прошедшего через СРС (рис. 1).

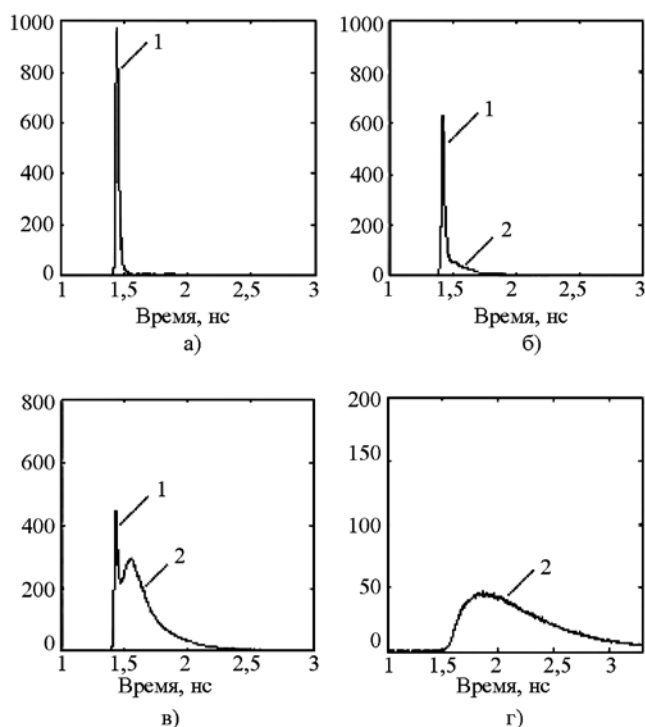


Рис. 1. Типичные экспериментальные временные распределения ультракороткого лазерного импульса после прохождения однородного рассеивающего слоя толщиной $l = 400$ мм: при концентрации рассеивателя $n = 0,05 \cdot 10^{-3}$ (а); $n = 1,7 \cdot 10^{-3}$ (б); $n = 2 \cdot 10^{-3}$ (в); $n = 5,5 \cdot 10^{-3}$ (г); 1 – баллистические фотоны; 2 – рассеянные фотоны

Под баллистическим компонентом ультракороткого лазерного импульса следует понимать ту часть излучения, которая при прохождении через слой СРС не испытала ни поглощения, ни рассеяния. Поэтому форма баллистического компонента повторяет форму исходного импульса с учетом временного разрешения регистрирующей аппаратуры. Форма рассеянного компонента прошедшего через СРС лазерного импульса зависит от параметров среды: коэффициента рассеяния, коэффициента поглощения и толщины слоя СРС. При этом наблюдение бимодальной формы временного распределения (рис. 1в) оказалось достаточно сложной экспериментальной задачей [7], [9], [10]. Это связано с тем, что в большинстве экспериментальных ситуаций можно наблюдать либо один баллистический пик, либо один рассеянный пик. Первый случай характерен для

очень тонких рассеивающих слоев и СРС с малым коэффициентом рассеяния, когда рассеянных фотонов мало (рис. 1а). Второй случай наблюдается в толстых рассеивающих слоях и средах с большим коэффициентом рассеяния, когда баллистических фотонов мало (рис. 1г). Временное распределение рассеянных фотонов меняется с увеличением толщины рассеивающего слоя (рис. 1б-г). Более того, даже при бимодальной форме временного распределения можно наблюдать только один пик, так как возникает эффект слияния двух пиков в один, если длительность исходного импульса большая, а временное разрешение регистрирующей аппаратуры недостаточно хорошее. Поэтому одновременное наблюдение раздельных пиков баллистических и рассеянных фотонов возможно лишь в узком диапазоне изменения оптических характеристик СРС.

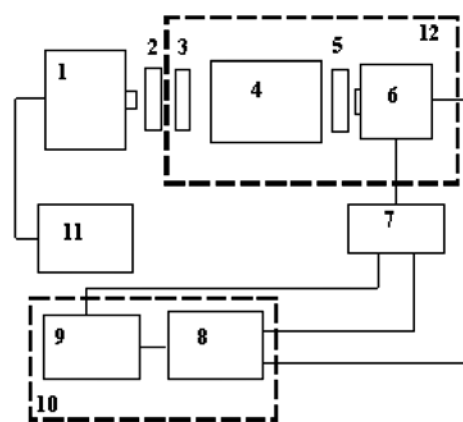


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения – фемтосекундный импульсный лазер; 2 – входной светофильтр; 3 – переменный аттенюатор; 4 – модельная сильнорассеивающая биологическая среда; 5 – выходной светофильтр; 6 – микроканальный ФЭУ; 7 – предусилитель сигнала с выхода микроканального ФЭУ; 8 – устройство управления предусилителем и микроканальным ФЭУ; 9 – устройство обработки данных; 10 – персональный компьютер; 11 – источник питания лазера; 12 – светозащитный модуль

Для наблюдения разделения баллистического и рассеянного компонентов ВР после прохождения УКИ через слой сильнорассеивающей биологической среды была использована экспериментальная установка (рис. 2) в составе: источника излучения – фемтосекундного импульсного Ti:Sa-лазера «Chameleon Ultra» ($\lambda = 750$ нм, $\tau \sim 140$ фс, $P \sim 1$ Вт, $\nu = 80$ МГц) фирмы «Coherent» (США); переменного аттенюатора 10MWA-168 «Standa»; приемника оптического излучения – микроканального фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) «Hamamatsu HAM-R3809U-51» фирмы «Hamamatsu» (Япония), платы ввода и обработки данных «Becker&Hickl SPC-830» фирмы «Becker&Hickl GmbH» (Германия), реализующей режим регистрации одиночных фотонов с временной корреляцией [11], в котором временное разрешение экспериментальной системы составило 25 пс.

В качестве модельной СРС был использован раствор рассеивателя (молока) в дистиллированной воде в прямоугольной стеклянной кювете. В серии экспериментов исследовались слои СРС толщиной 120, 240 и 400 мм, соответствующие по размерам реальным биообъектам (предплечье, мозг новорожденного, женские молочные железы). Вариация рассеивающих свойств СРС осуществлялась путем плавного увеличения концентрации рассеивателя в воде.

На основании экспериментальных данных была получена зависимость концентрации рассеивателя n от толщины биологического слоя l и таким образом установлен диапазон существования бимодальных временных распределений ультракоротких лазерных импульсов, прошедших через слой сильно-рассеивающей биологической среды (рис. 3).

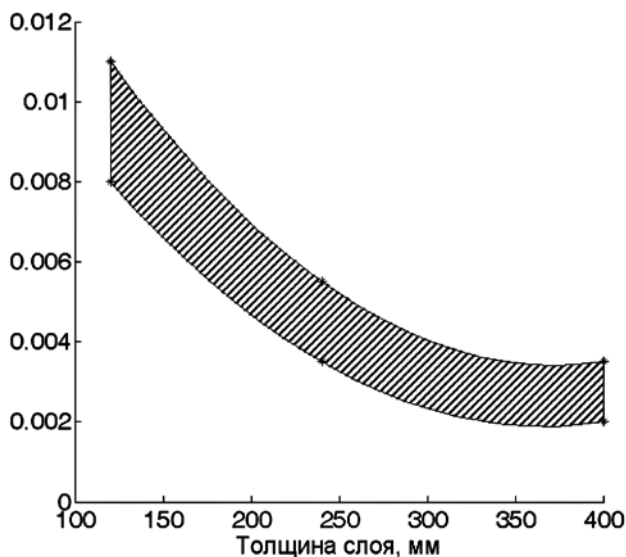


Рис. 3. Область существования бимодальных временных распределений (заштрихована)

Проведенные исследования показывают, что практическое наблюдение бимодального временного распределения лазерного импульса после прохождения через слой однородной сильно-рассеивающей биологической среды может быть осуществлено только при определенных экспериментальных условиях.

Корректно подобранное сочетание параметров начального лазерного импульса, регистрирующей аппаратуры и оптических характеристик сильно-рассеивающей биологической среды позволяет установить условия существования бимодальных ВР и получить качественное разделение баллистического и рассеянного компонентов временного распределения. Тем не менее бимодальная форма временного распределения наблюдается в достаточно узком диапазоне параметров СРС.

Экспериментально было установлено, что условием существования бимодальных временных распределений являются значения концентрации рассеивателя $n = 8,0 \cdot 10^{-3} \dots 11,0 \cdot 10^{-3}$ (для слоя толщиной $l = 120$ мм), $n = 3,5 \cdot 10^{-3} \dots 5,5 \cdot 10^{-3}$ (для слоя толщиной $l = 240$ мм), $n = 2,0 \cdot 10^{-3} \dots 3,3 \cdot 10^{-3}$ (для слоя толщиной $l = 400$ мм). Полученные результаты мо-

гут быть использованы при разработке новых методов определения оптических характеристик сильно-рассеивающих биологических объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № П392 от 30.07.2009 г.).

Список литературы:

1. Medical optical tomography: Functional imaging and monitoring // Proc. SPIE. 1993. IS11.
2. Optical Tomography, Photon Migration, and Spectroscopy of Tissue and Model Media: Theory, Human Studies, and Instrumentation // Proc. SPIE. 1995. P. 2389.
3. Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue: Theory, Instrumentation, Model, and Human Studies II // Proc. SPIE. 1997. P. 2979.
4. Hillman E.M.C., Hebden J.C., Schweiger M. et al. Time resolved optical tomography of the human forearm // Physics in Medicine and Biology. 2001. Vol. 46. № 4. PP. 1117-1130.
5. Hebden J.C., Gibson A.P., Yusof R.M. et al. Three-dimensional optical tomography of the premature infant brain // Physics in Medicine and Biology. 2002. Vol. 47. PP. 4155-4166.
6. Yates T.D., Hebden J.C., Gibson A.P. et al. Optical tomography of the breast using a multi-channel time-resolved imager // Physics in Medicine and Biology. 2005. Vol. 50. № 11. PP. 2503-2517.
7. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: Физматлит, 2004. 320 с.
8. Терещенко С.А., Данилов А.А., Маслобоев Ю.П., Пьянов И.В. Исследование бимодальных временных распределений ультракоротких лазерных импульсов после прохождения через слой рассеивающей биологической среды // Медицинская физика. 2010. № 4.
9. Воробьев Н.С., Подгаецкий В.М., Смирнов А.В., Терещенко С.А. Наблюдение временного разделения фотонов в лазерном УКИ, прошедшем через рассеивающую среду // Квантовая электроника. 1999. Вып. 28. № 2. С. 181-182.
10. Podgaetsky V.M., Tereshchenko S.A., Smirnov A.V., Vorob'ev N.S. Bimodal temporal distribution of photons in ultrashort laser pulse passed through a turbid medium // Optics Communications. 2000. № 180. PP. 217-223.
11. Becker W. Advanced time-correlated single-photon counting techniques. – Berlin: Springer. Springer Series in Chemical Physics, 2005. № 81. P. 401.

Юрий Петрович Маслобоев,

канд. физ.-мат. наук, доцент,

Иван Владимирович Пьянов,

аспирант,

Сергей Андреевич Терещенко,

д-р физ.-мат. наук, профессор,

кафедра биомедицинских систем,

Московский государственный институт

электронной техники

(технический университет),

г. Зеленоград, e-mail: tsa@miee.ru