

**ОБРАЗОВАНИЕ БИМОДАЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ  
ОДНОРОДНЫЙ СЛОЙ СИЛЬНОРАССЕИВАЮЩЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Пьянов И.В.

*Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет), 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.5.*

*Телефон: 8(499) 720-87-63*

*E-mail: ivan-pyanov@yandex.ru*

Резюме. В работе приведены результаты экспериментальных исследования условий, при которых наблюдается разделение баллистического и рассеянного компонентов временных распределений ультракороткого лазерного импульса, прошедшего через однородный слой модельной сильнорассеивающей биологической среды. Экспериментально определён диапазон существования бимодальных временных распределений. Подбранное сочетание параметров исходного импульса и характеристик сильнорассеивающей среды позволили обеспечить условия образования бимодальной формы временного распределения прошедшего через среду излучения.

Ключевые слова: ультракороткий лазерный импульс, сильнорассеивающая биологическая среда, бимодальное временное распределение, прохождение излучения через вещество, уравнение переноса излучения

**GENERATION OF BIMODAL TEMPORAL DISTRIBUTIONS OF  
ULTRASHORT LASER PULSES AFTER PROPAGATION THROUGH THE  
HOMOGENEOUS LAYER OF HIGH SCATTERING BIOLOGICAL MEDIUM**

*Pyanov I.V.*

*Moscow Institute of Electronic Technology (Technical University), 124498, Moscow,  
Zelenograd, Pas. 4806, Bld. 5*

Summary. There are presented results of experimental investigations of conditions for an observation of a partitioning of ballistic and scattered components in temporal distributions of ultrashort laser pulses passed through homogeneous layers of the model high scattering

biological medium. The range of the existence of bimodal temporal distribution has been experimentally determined.

The combination found for parameters of an initial pulse and characteristics of a high-scattering medium made it possible to provide conditions for generation the bimodal form of the temporal distribution of transmitted radiation.

Key words: ultrashort laser pulses, high-scattering biological medium, bimodal temporal distribution, radiation propagation through the substance, radiation transport equation

### **Введение**

Изучение процессов взаимодействия оптического излучения с сильнорассеивающими средами (СРС), в том числе с биологическими тканями, актуально в связи с разработкой методов трансмиссионной оптической томографии (ТОТ) [1-3]. В отличие от рентгеновской томографии в оптической томографии применяется неионизирующее оптическое излучение, что делает возможным её применение для диагностики головного мозга новорождённых младенцев [4], а также женской молочной железы [5], изучения гемодинамики мышц конечностей [6] и др. Тем не менее, проблема разработки ТОТ до сих пор не может считаться решённой ввиду 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-дифференциальное 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 уравнение переноса.

### **Цель**

Одним из интересных, но малоисследованных физических явлений в области взаимодействия оптического излучения с биологическими СРС является эффект бимодальности, т.е. раздельное существование баллистического и рассеянного компонентов во временном распределении лазерного излучения, прошедшего через СРС. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований бимодальных временных распределений УКИ, прошедших через однородный слой модельной

биологической 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. Типичные теоретические временные распределения УКИ, прошедшего через однородный рассеивающий слой, показаны на рис. 1, где они сравниваются с экспериментально полученными временными распределениями для биологического слоя толщиной  $l=400$  мм.

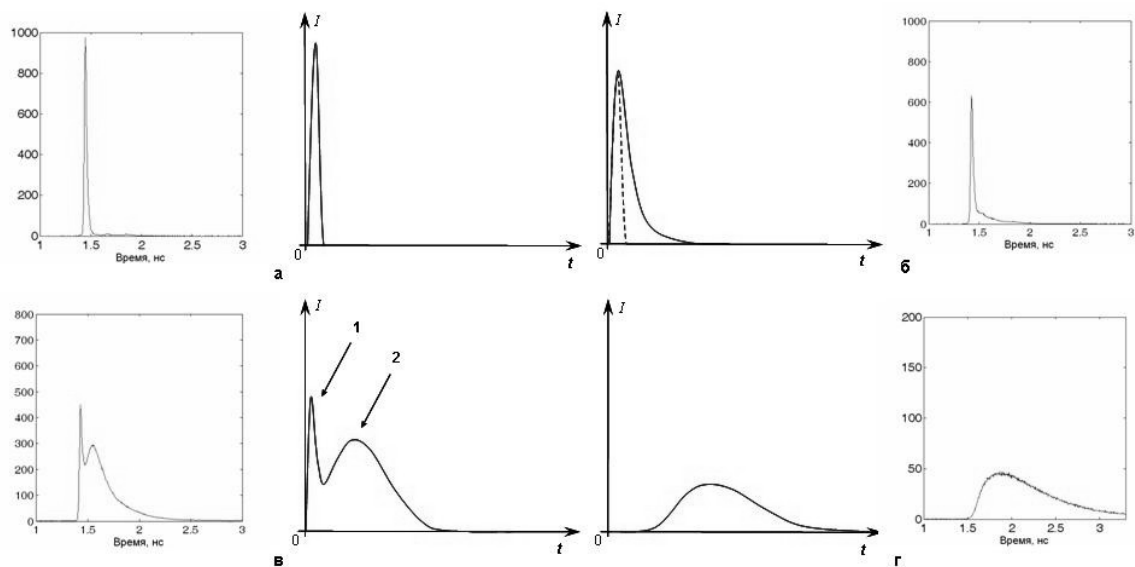


Рис. 1. Сравнение экспериментально полученных и типичных теоретических временных распределений ультракороткого лазерного импульса после прохождения однородного рассеивающего слоя на примере биологической слоя толщиной  $l=400$  мм:

а – баллистический пик при концентрации рассеивателя  $n = 0,05 \times 10^{-3}$ , б – наложение баллистического пика и рассеянного пика для малых концентраций рассеивателя ( $n = 1,7 \times 10^{-3}$ ), в – бимодальная форма, содержащая как баллистический (1), так и рассеянный пик (2), для промежуточных концентраций рассеивателя ( $n = 2,5 \times 10^{-3}$ ), г – рассеянный пик для больших концентраций рассеивателя ( $n = 5,5 \times 10^{-3}$ )

Под баллистическим компонентом ультракороткого лазерного импульса понимают ту часть излучения, которая при прохождении через слой СРС не испытала ни

поглощения, ни рассеяния. Поэтому форма баллистического компонента повторяет форму исходного импульса с учётом 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.1,в) оказалось достаточно сложной экспериментальной задачей [8-9]. 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 слоёв и СРС с малым коэффициентом рассеяния, когда рассеянных фотонов мало (рис.1,а). Второй случай наблюдается в толстых рассеивающих слоях и средах с большим коэффициентом рассеяния, когда баллистических фотонов мало (рис.1,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 (рис.1,б). Поэтому одновременное наблюдение отдельных пиков баллистических и рассеянных фотонов возможно лишь в узком диапазоне изменения оптических характеристик СРС.

Для наблюдения разделения баллистического и рассеянного компонентов временного распределения после прохождения УКИ через слой сильнорассеивающей биологической среды была использована экспериментальная установка в составе: источника излучения – фемтосекундного импульсного титан-сапфирового 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»; детектора оптического излучения – микроканального ФЭУ Hamamatsu HAM-R3809U-51 фирмы «Hamamatsu» (Япония), платы обработки данных Becker&Hickl SPC-830 фирмы «Becker&Hickl GmbH» (Германия), реализующей режим регистрации одиночных фотонов с временной корреляцией [10], в котором временное разрешение экспериментальной системы составило 25 пс.

В качестве модельной биологической СРС был использован раствор рассеивателя (молока) в дистиллированной воде в прямоугольной стеклянной кювете. В серии экспериментов исследовались слои биологической среды толщиной 120, 240 и 400 мм. Вариация рассеивающих свойств среды осуществлялась путём плавного изменения концентрации рассеивателя в воде.

Методы описаны в [11-13].

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны экспериментально зарегистрированные временные распределения прошедших через слой СРС лазерных импульсов при различных значениях концентрации  $n$  и толщины слоя  $l$ . Здесь  $n$  – объёмная концентрация рассеивателя (т.е. отношение объёма молока к общему объёму раствора молока в воде).

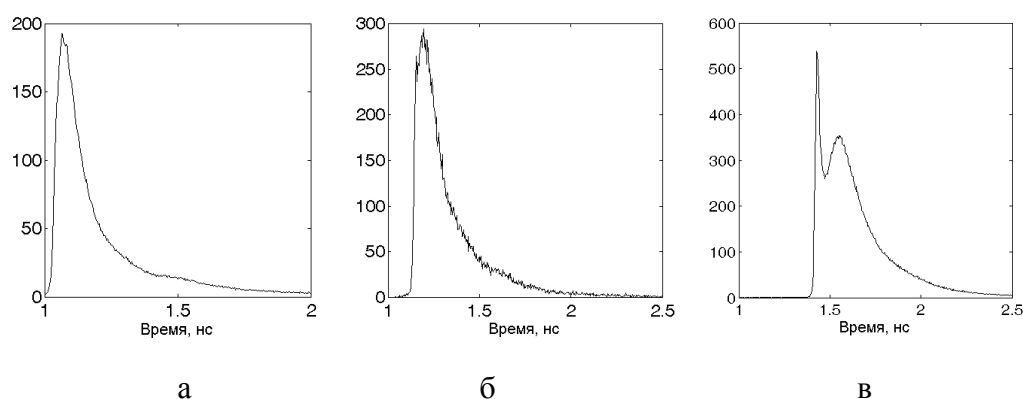


Рис. 2. Бимодальные временные распределения прошедших через СРС ультракоротких лазерных импульсов: для слоя толщиной  $l=120$  мм и концентрации рассеивателя  $n = 8,0 \times 10^{-3}$  (а), для слоя толщиной  $l=240$  мм и концентрации рассеивателя  $n = 3,7 \times 10^{-3}$  (б), для слоя толщиной  $l=400$  мм и концентрации рассеивателя  $n = 2,7 \times 10^{-3}$  (в)

Отметим, что форма зарегистрированных временных распределений для других значений концентрации рассеивателя при толщине слоя  $l=120$  мм и  $l=240$  мм совпадает с теоретическими представлениями о форме временных распределений, показанных на рис. 1 на примере распределений для слоя толщиной  $l=400$  мм.

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).

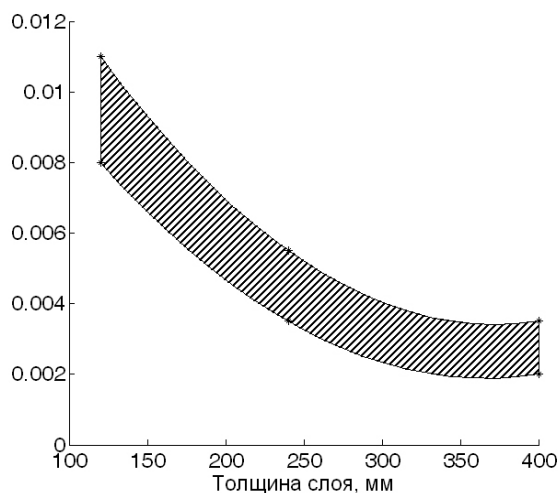


Рис. 3. Область существования бимодальных временных распределений (заштрихована).

Проведённые исследования показывают, что образование и наблюдение бимодальных временных распределений ультракоротких лазерных импульсов, прошедших через слой сильнорассеивающей биологической среды, может быть осуществлено только при определённых условиях эксперимента.

### Выводы

Корректно подобранное сочетание параметров исходного лазерного импульса, детектирующей аппаратуры и оптических характеристик модельной среды позволяет получить чёткое разделение баллистического и рассеянного компонентов временного распределения (эффект бимодальности). Тем не менее, бимодальная форма временного распределения образуется в достаточно узком диапазоне параметров СРС.

Экспериментальным путём было установлено, что наиболее явное разделение двух пиков происходит при концентрации рассеивателя  $n = 8,0 \times 10^{-3} \div 11,0 \times 10^{-3}$  (для биологического слоя толщиной  $l=120$  мм),  $n = 3,5 \times 10^{-3} \div 5,5 \times 10^{-3}$  (для биологического слоя толщиной  $l=240$  мм),  $n = 2,0 \times 10^{-3} \div 3,3 \times 10^{-3}$  (для биологического слоя толщиной  $l=400$  мм).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых методов определения оптических характеристик сильнорассеивающих биологических объектов (фотометрии биологических сред), а также в трансмиссионной оптической томографии.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт №П1911 от 29.10.09 г., шифр НК-387П/3).

### Литература

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. 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. – P. 4155–4166.
5. 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. – P. 2503–2517.
6. 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. – P. 1117–1130.
7. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
8. 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. – Т. 28. – № 2. – С. 181-182.
9. 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. – Vol. 180. – P. 217-223.
10. Becker W. Advanced time-correlated single-photon counting techniques. – Berlin: Springer, Springer Series in Chemical Physics, 2005. – Vol. 81. – P. 401.
11. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М., Воробьев Н.С., Смирнов А.В. Условия прохождения коротких оптических импульсов через сильнорассеивающую среду // Квантовая электроника, 1996. – Т. 23. – №3. – С. 265-268.

12. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М., Воробьев Н.С., Смирнов А.В. Раздельное наблюдение баллистических и рассеянных фотонов при распространении коротких лазерных импульсов в сильнорассеивающей среде // Квантовая электроника, 1998. – Т. 25. – №9. – С. 853-856.

13. Подгаецкий В.М., Терещенко С.А. Количественное определение условий разделения баллистических и рассеянных фотонов в лазерном ультракоротком импульсе, прошедшем через сильнорассеивающую среду // Доклады Академии наук, 1999. – Т. 366. – №1. – С. 39-42.