

E-mail: physics@egf.tsure.ru.
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)371663.
Кафедра физики, профессор, д.т.н.

Zaharov Anatoly Grogorievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: physics@egf.tsure.ru.
44, Nekrasovskiyy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371663.
Department of Physics, professor, Doct. Eng. Sc.

Лытjuk Александр Анатольевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: realspolock@gmail.com.
347928 г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, (8634)371663.
Кафедра физики, аспирант.

Lytjuk Alexander Anatolevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University».

E-mail: realspolock@gmail.com.
44, Nekrasovskiyy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371663.
Department of Physics, post-graduate student.

УДК 534:535

Г.Ю. Джуплина, И.Б. Старченко

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
В СРЕДЕ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ РАССЕИВАТЕЛЯМИ**

Описана модель импульсного лазерного возбуждения звука. Описана теоретически временная зависимость давления в бегущей акустической волне, излучаемой в поглощающую среду.

Оптикоакустический эффект; лазерный импульс; акустическое давление.

G.Yu. Dzhuplina, I.B. Starchenko

**THEORETICAL MODEL OF OPTIKOAKUSTICHESKY EFFECT IN THE
ENVIRONMENT WITH NANORAZMERNYMI DIFFUSERS**

The model of pulse laser excitation of a sound is described. Theoretical time dependence of pressure in the running acoustic wave radiated in absorbing environment is presented.

Optoacoustical effect; laser impulse; acoustic pressure.

Оптикоакустический эффект заключается в возникновении акустического сигнала вследствие теплового расширения среды при поглощении светового импульса лазера. Исследование распространения звука и света в среде с наноразмерными рассеивателями является важной научной проблемой, так как это явление может быть использовано для медицинской диагностики. Нанотрубки имеют сильную адгезию к бактериальным клеткам и сильно поглощают лазерное излучение.

ние. С углеродными нанотрубками целесообразно использовать возбуждение ближней ИК-области на 850 нм, что сравнимо с их размером – 10нм.

Чем сильнее лазерный импульс, тем сильнее акустические сигналы, но эффективность нанотрубок при преобразовании света в звук позволяет использовать лазерный импульс небольшой силы – 20 мДж/см², большие энергии могут приводить к повреждению биоткани. Рассеянный нанотрубками звук обнаруживается ультразвуковым преобразователем. Наличие сигнала на приемном ультразвуковом преобразователе говорит о присутствии бактерий в кровотоке [1].

Форма акустического импульса при термооптическом возбуждении зависит от характеристик среды – коэффициента поглощения света, скорости звука и параметров лазерного излучения – длительности импульса и диаметра пятна. Параметры оптикоакустических сигналов определяются как характеристиками поглощенного излучения, так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами поглощающей среды. Это позволяет определять указанные свойства исследуемой среды по временному профилю давления оптикоакустического сигнала.

Решение задачи об импульсном лазерном возбуждении звука разбивается на 3 этапа:

- 1) расчет плотности тепловыделения в рассеивающей среде;
- 2) расчет теплового поля в среде, создаваемого найденными на первом этапе источниками тепла;
- 3) нахождение акустического поля в среде, излучаемого рассчитанными выше тепловыми полями [2].

Каждая из этих задач в общем случае не имеет аналитического решения. Поэтому анализ термооптического возбуждения звука в рассеивающей среде возможен только при дополнительных упрощающих предположениях.

Пусть среда является сильно рассеивающей:

$$\mu_a \ll \mu_s',$$

где μ_a – коэффициент поглощения света, μ_s' – приведенный коэффициент рассеяния.

Ее толщина и характерный радиус лазерного пучка, используемого для возбуждения звука, много больше глубины проникновения света в среду:

$$Z_L \approx \mu_{eff}^{-1},$$

где μ_{eff} – коэффициент экстинкции света, L – толщина среды, Z_L – характерный радиус лазерного пучка.

Тогда можно использовать приближение полубесконечной среды и считать лазерный пучок коллимированным. Это позволяет ограничиться одномерными акустической и тепловой задачами.

Будем считать, что исследуемая среда является акустически и термически однородной. Тогда ее можно описывать некоторыми «эффективными» параметрами – удельной теплоемкостью, скоростью звука, коэффициентом теплового расширения, температуропроводностью. Если время релаксации теплового поля в области нагрева много больше длительности лазерного импульса:

$$t_{th} \approx 1/(\mu_{eff}^2 \cdot \chi),$$

где t_{th} – время релаксации теплового поля в области нагрева, χ – температуропроводность, то диффузией тепла в процессе лазерного нагрева среды можно пренебречь.

При поглощении в среде короткого лазерного импульса ($\mu_{eff} V_L \tau_L \ll 1$) интенсивность излучения в среде будет равна

$$I_0 f(t) H(z) = I_0 \tau_L \delta(t) H(z) = E_0 \delta(t) H(z),$$

где V_L – фазовая скорость продольных звуковых волн в поглощающей среде,

τ_L – длительность лазерного импульса,

E_0 – плотность энергии лазерного излучения на поверхности среды $z = 0$,

I_0 – огибающая интенсивность лазерного импульса,

$f(t)$ – временная форма импульса,

$H(z)$ – пространственное распределение интенсивности света в среде.

В этом случае при указанных выше предположениях временная зависимость давления в бегущей акустической волне, излучаемой в поглощающую среду [2], равна

$$p(\tau = t - z/V_L) = \frac{\beta V_L^2}{2C_p} \mu_a E_0 \begin{cases} H(-V_L \tau), \tau < 0 \\ [(1 - N)/(1 + N)] H(V_L \tau), \tau > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

здесь $\tau = t - z/V_L$ – время в сопровождающей системе координат; β – коэффициент теплового расширения; C_p – удельная теплоемкость; N – отношение акустических импедансов поглощающей и прозрачной сред (для акустически жесткой границы поглощающей среды $N=1$, для свободной границы – $N \gg 1$);

$R_{ac} = (1 - N)/(1 + N)$ – коэффициент отражения ультразвуковой волны от границы раздела.

Таким образом, оптикоакустический сигнал (1) представляет собой волну сжатия и следующую за ней волну разрежения (при $N > 1$) или сжатия (при $N < 1$). При малых, но конечных значениях $\mu_{eff} V_L \tau_L (\leq 0,1)$ переходная зона между фазами имеет длительность порядка τ_L . Общая длительность оптикоакустического сигнала определяется временем пробега звука по области тепловыделения и составляет $(4 \div 6)(\mu_{eff} V_L)^{-1}$.

Необходимо отметить, что выражение (1) получено без учета дифракции оптикоакустического сигнала при распространении в исследуемой среде. Если регистрация ОА-сигнала $p_d(\tau)$, прошедшего исследуемую среду толщиной L , происходит на оси акустического пучка (апертура приемника много меньше радиуса акустического пучка a_0 на поверхности среды), то $p(\tau)$ можно восстановить.

Как видно из (1), передний фронт ОА-сигнала $p(\tau < 0)$ повторяет пространственное распределение интенсивности света в среде, причем временной масштаб изменения p и пространственный масштаб изменения H связаны через скорость звука в среде: $z = -V_L \tau$. При прямой регистрации ОА-сигналов (в поглощающей среде) момент $\tau = 0$ соответствует приходу на акустический приемник сигнала, возбуждаемого на поверхности исследуемой среды $z = 0$. При свободной границе поглощающей среды $p(\tau = 0) = 0$ (за счет отражения от границы сигнала в противофазе), а при жесткой границе $p(\tau = 0)$ имеет локальный минимум, соответ-

ствующий локальному минимуму в распределении $H(z)$ интенсивности света в среде при $z = 0$ (см. выше). Определение момента $\tau = 0$ на экспериментально полученном и скорректированном во временном профиле давления ОА-сигнала позволяет преобразовать временную зависимость переднего фронта ОА-импульса $p(\tau \langle 0)$ в пространственную зависимость $p(z = -V_L \tau \langle 0)$. Эта зависимость, нормированная на $(\frac{\beta V_L^2}{2C_p}) \mu_a E_0$, есть распределение интенсивности света в среде $H(z)$.

Таким образом, оптико-акустический метод дает возможность проводить прямое измерение пространственного распределения интенсивности света в рассеивающей среде, если коэффициент поглощения света, скорость звука и теплофизические параметры среды, а также плотность энергии лазерного излучения на поверхности среды известны. Использование этой модели, по существу, дает прямое измерение акустического давления. Зная его величину, возможен неинвазивный подсчет количества бактерий в кровотоке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Can the Miracles Promised by Carbon Nanotubes Be Realized?» by David L. Shenkenberg, Associate News Editor; Biophotonics International, May 2008.
2. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991. – 304 с.

Джуплина Галина Юрьевна

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ega@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирантка.

Dzhuplina Galina Yurievna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ega@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371795.

Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, post-graduate student.

Старченко Ирина Борисовна

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: star@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, профессор, д.т.н.

Starchenko Irina Borisovna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University».

E-mail: star@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371795.

Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, Professor, Doctor of Engineering Science.