

03:09

Особенности накопления электромагнитной энергии в области регулярной неровности диэлектрической сферы

© В.И. Тригуб

E-mail: Trigub.V.I@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 февраля 2016 г.

Показано, что испарение капли воды диаметром ~ 1 мм под воздействием лазерного излучения с длиной волны $10.6 \mu\text{m}$ и потоком мощности $(4-12) \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ обусловлено оптическими свойствами регулярных неровностей, имеющих место на поверхности капли.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44397.16207

В эксперименте [1] было показано, что капля воды диаметром $2r \sim 1$ мм начинает испаряться под воздействием лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ и потоком мощности $W = (4-12) \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ через $\tau = 0.5$ с с момента начала ее облучения, а не через 2.5 с, как это должно быть при ее нагреве до температуры 100°C . Кроме того, в работе [1] отмечается, что временные зависимости радиуса капли в исследованном интервале величин плотности потока излучения практически не зависят от температуры поверхности капли и определяются в основном количеством поглощаемой ею электромагнитной энергией. В связи со сказанным, в работе [2] было сделано предположение, что причиной испарения капли является полевое разрушение водородных связей. Кроме того,

известно, что тепловые флуктуации на поверхности жидкости постоянно генерируют капиллярные волны различных длин, которые, накладываясь друг на друга, формируют шероховатость поверхности. Известно также, что оптические неоднородности, имеющиеся на поверхности прозрачной диэлектрической сферы, малого диаметра способствуют захвату оптического излучения этой сферой [3]. Поэтому представляет интерес исследование оптических свойств неоднородностей (неровностей), имеющихся на поверхности капли воды, применительно к ее испарению под воздействием лазерного ИК-излучения [1]. Теоретическое изучение этого вопроса является целью настоящей работы.

В нашей работе будем рассматривать капиллярные волны с длиной $\Lambda = \lambda$. Ниже объясним причину такого выбора. Частоту интересующих нас капиллярных волн можно оценить по формуле $\omega = (2\pi\sigma/\rho\Lambda^3) \sim 2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность жидкости). Для длин волн Λ в воде вязкостью ν можно пренебречь, так как $\omega\Lambda^2/\nu \gg 1$ [4]. Поскольку скорость капиллярных волн $v = (2\pi\sigma/\rho\Lambda)^{1/2} \sim 2 \text{ m/s}$, поэтому при изучении воздействия лазерного излучения на каплю воды [1] необходимо учитывать, что форма ее поверхности меняется медленно (адиабатически). Следовательно, капиллярные волны на поверхности капли можно рассматривать как регулярные неровности. Цепи регулярных неровностей разной длины, а также одиночные неровности являются оптическими микрорезонаторами, если внутри таких образований укладывается целое число полуволн $\lambda/2$. Добротность оптических резонаторов для длин волн λ электромагнитного излучения можно оценить по формуле $Q = 2\pi n/\kappa\lambda$ (n — показатель преломления воды; κ — коэффициент поглощения воды) [3]. Так как коэффициент поглощения воды $\kappa \sim 1/\lambda$ [5] для излучения с длиной волны $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, тогда $Q = 2\pi n$, т.е. запасенная энергия будет переходить во внутреннюю энергию воды за один период колебаний t_{ph} [6]. Следовательно, время жизни фотона в таком резонаторе $t_{ph} \sim f^{-1} \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}$, поскольку $Q = 2\pi n f t_{ph}$ ($f \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ — частота электромагнитной волны) [6]. Этого времени достаточно, чтобы магнитное поле H воздействовало на протон, формирующий водородную связь, поскольку время миграции протона, участвующего в формировании водородной связи, составляет величину $\sim 10^{-12} \text{ s}$ [2]. Ниже мы покажем, что разрыв водородных связей, приводящий

к высвобождению молекулы H_2O из гексагональной структуры жидкой воды, происходит в поле электромагнитной волны за время $t_0 \sim 1.5 \cdot 10^{-14}$ s (полупериод волны). То есть для испарения капли воды в поле лазерного ИК-излучения не нужна высокая добротность микрорезонаторов (неоднородностей) на ее поверхности. Если размер оптического резонатора $\sim \lambda/2$, то его добротность $Q \sim 4\pi n$. Необходимо отметить, что лазерное излучение поддерживает капиллярные волны, если в поверхностных неоднородностях, которые они формируют, укладывается целое число полувольт излучения. Это обусловлено тем, что поле E электромагнитной волны способно изменить среднюю кинетическую энергию молекул H_2O [7]. В результате такой лазерной селекции неоднородностей поверхность капли к моменту ~ 0.5 s в значительной мере покрывается регулярными неоднородностями (модифицируется), т.е. селекция приводит к повышению степени регуляризации неоднородностей на поверхности капли. Необходимо также отметить, что лазерное излучение не только запасается в неоднородностях, но и поглощается в объеме капли. Поэтому число флуктуаций, генерирующих капиллярные волны, растёт. Этот процесс способствует интенсификации лазерной селекции неоднородностей. С ростом числа одинаковых по величине и форме неоднородностей растёт интенсивность испарения капли. Оценим величину тонкого приповерхностного слоя ξ в капле воды, в котором происходит полевое разрушение водородных связей, за время $\tau \sim 0.5$ s. Примем следующие обозначения физических величин: $\Phi = W/4$, $W = P/\pi r^2$ (P — мощность лазерного излучения). Для освобождения молекул H_2O из гексагональной структуры жидкой воды требуется разорвать четыре водородные связи [2]. Иначе говоря, на одну молекулу H_2O приходится две полные водородные связи, поскольку водородная связь осуществляется между двумя молекулами H_2O . Энергия водородной связи [8]: $U_0 = -V_0/\epsilon_{eff} = -V$; $V_0 = e^2/4\pi\epsilon_0\chi$, $\chi = 10^{-10}$ m, $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$ F/m; $\epsilon_{eff} = 3\epsilon/[1 - (15/4)\exp(-\delta)] \sim 81$ при $\delta = 4\pi p\chi/h \sim 1.4$ (p — импульс протона, h — постоянная Планка); ϵ — диэлектрическая проницаемость, учитывающая электронную поляризацию, так как частота обмена протоном молекул H_2O : $\Delta \sim 10^{12}$ s $^{-1}$ [2], $\epsilon = n^2$, $n \sim 1.3$, $\epsilon \sim 1.69$, $U_0 \sim 3 \cdot 10^{-20}$ J (~ 5 kcal/mol) [2]. Тогда внутренняя энергия запишется как $U = -2.5\langle V \rangle = 2.5U_0$ (учли теорему вириала $\langle T \rangle = -0.5\langle V \rangle$, $\langle T \rangle$ — средняя кинетическая энергия [9]). Следовательно, $m_0L = 2.5U_0$ (m_0 —

масса молекулы H_2O , L — удельная теплота парообразования). Подставляя это выражение в $\mu U_0 = W\tau/l_0$ [2], получим $\rho L = \Phi\tau/2\xi$, $\xi \sim 10^{-5} \text{ m}$ ($\rho = m_0\mu$, $l_0/2.5 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 8\xi$, μ — концентрация молекул, l_0 — толщина области накопления электромагнитной энергии в капле). Поскольку электромагнитная энергия, поступающая от лазера, аккумулируется в регулярных неровностях (неоднородностях) различного типа, как отмечалось выше, следует искать среднее значение $\langle\Phi\rangle$. Среднее значение $\langle\Phi\rangle$ запишется как $\langle\Phi\rangle = w^*\Phi$ [10]. Учитывая, что рассматриваемые нами одиночные неровности симметрично суживаются кверху, поэтому w^* (полная вероятность захвата электромагнитного излучения цепью таких неровностей всех возможных длин за время модификации поверхности капли $\tau \sim 0.5 \text{ s}$) может быть записана как $w^* = w + w^2 + w^3 + \dots + w^N + \dots = e^{-1}[1 + e^{-1} + \dots + e^{-(N-1)} + \dots] = 1/(e-1) \sim 1/2$ (вероятность туннелирования электромагнитной волны сквозь неоднородность: $w = (E/E_0)^2 \sim \exp(-2d/\lambda) < 1$; $d \sim \lambda/2$; E , E_0 — напряженности электрического поля волны до и после неоднородности). Следовательно, имеем $\langle\Phi\rangle \sim \Phi/2$. Энергия, запасенная в микрорезонаторе за полупериод $t_0 \sim 1.5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$: $\mathcal{E} = \varepsilon_0 E^2 \Omega = \mu_0 H^2 \Omega = \Phi t_0 \Omega / 2\xi \sim 8 \cdot 10^{-20} \text{ J}$ ($\Omega \sim \lambda^3$ — объем неоднородности), что соответствует энергии, необходимой для отрыва молекулы H_2O из гексагональной структуры жидкой воды: $2.5U_0 \sim 8 \cdot 10^{-20} \text{ J}$. Отрыв молекулы H_2O от гексагональной структуры происходит за полупериод электромагнитной волны $t_0 \sim 1.5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$, поскольку поле полуволны неизменно по направлению. Магнитное поле не производит работы над движущимся в нем протоном [7]. Разорванная водородная связь между молекулами H_2O может восстановиться только через $\sim 10^{-12} \text{ s}$ [2], но за это время разорвется действием поля еще около 10^2 связей ($10^{-12} \text{ s} / 10^{-14} \text{ s}$). Число молекул, из которых состоит неоднородность $\mathcal{N} = \mu\Omega \sim \mu\lambda^3 \sim 3 \cdot 10^{13}$. Таким образом, время разрушения поверхностных неоднородностей объемом $\sim \lambda^3 \sim 10^{-15} \text{ m}^3$ равно $\tau = \mathcal{N}t_0 \sim 0.5 \text{ s}$. Полученная цифра хорошо согласуется с экспериментом [2].

Таким образом, при облучении капли воды диаметром $\sim 1 \text{ mm}$ лазерным излучением с потоком мощности $(4-12) \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ и длиной волны $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ имеет место полевое разрушение водородных связей.

Список литературы

- [1] Рудаш В.К., Бисярин В.П., Ильин Н.М. и др. // Квант. электрон. 1973. № 5 (17). С. 21.
- [2] Тригуб В.И. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 4. С. 120.
- [3] Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011. 416 с.
- [4] Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.
- [5] Wieliczka D.M., Weng S., Querry M.R. // Appl. Opt. 1989. V. 28. P. 1714.
- [6] Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. М.: Мир, 1989. 664 с.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1973. 504 с.
- [8] Тригуб В.И. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 3. С. 93.
- [9] Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. М.: Наука, 1966. 334 с.
- [10] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.