

СВЕТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (УСИЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
АТОМОВ И ОХЛАЖДЕНИЕ СРЕДЫ) В ЛУЧЕ ЛАЗЕРА

Г.А.Аскарьян

Обычно полагают, что луч лазера нагревает среду и вызывает дез-  
организацию атомов. В данной статье показано, что в некоторых случа-  
166

ях возможно усиление взаимодействия атомов и импульсное или периодическое охлаждение прозрачных сред при включении луча лазера.

I. Взаимодействие атомов, помещенных в сильное световое поле, может существенно измениться. Дополнительный потенциал взаимодействия атомов, поляризующихся в электрическом поле, создается двумя типами взаимодействий - взаимодействием двух диполей, созданных внешним полем:  $U_{pp} \approx (\vec{p} \vec{E}_p) \approx (\rho^2/R^3)(1-3\cos^2\theta) \approx \beta(\vec{E}_0 \vec{E}_p)$ , где  $\vec{p} = \beta \vec{E}_0$  - дипольный момент атома, поляризующегося во внешнем поле  $\vec{E}_0$ ;  $\vec{E}_p = \nabla(\vec{p} \vec{R}/R^3)$  - электрическое поле этого диполя,  $\theta$  - угол между направлением диполей и радиус-вектора, их соединяющего (легко видеть, что атомы, расположенные вдоль  $\vec{E}_0$ , притягиваются и расположенные поперек  $\vec{E}_0$  - отталкиваются) и втягиванием атома как диэлектрика в поле другого атома - диполя  $U_{ap} \approx \beta E_p^2$ ; здесь  $\beta$  - поляризуемость атомов ( $\beta \approx a^3$ , где  $a$  - размер атома). Хотя  $U_{pa}/U_{pp} \sim E_p/E_0 \sim (a/R)^3$ , но при усреднении по разным столкновениям результаты проявления обоих видов взаимодействия могут существенно отличаться.

Рассмотрим наглядный механизм изменения кинетической энергии квазиупругих атомов при столкновениях в нарастающем однородном электромагнитном поле. Примем, что длительность столкновения во много раз превосходит период световых колебаний, что позволяет усреднить потенциал взаимодействия по высокой частоте, оставив, однако, более медленные изменения потенциала, связанные с модуляцией амплитуды электромагнитного поля.

В среднем электрическое поле увеличивает притяжение молекул. Если амплитуда электрического поля  $E_0$  изменяется во времени (например, нарастает), то работа сил взаимодействия двух сталкивающихся молекул до сближения будет по модулю меньше работы сил взаимодействия атомов после сближения и суммарное уменьшение кинетической энергии молекул при каждом пролете  $\Delta W_1 \approx -(\partial U_{cp}/\partial t) t_{ct}$ , где время столкновения  $t_{ct} \approx R/V_a$ . Поэтому уменьшение кинетической энергии молекулы при нарастании поля до  $E_0$  равно  $\Delta W \approx \Delta(KT) \approx$

$$\approx \frac{2\pi}{3} \beta^3 E_0^2 n_A / R^3 \approx \beta^2 E_0^2 n_A, \text{ где } n_A - \text{число атомов в единице объ-}$$

ема. Из полученной формулы видно, что понижение температуры тем больше, чем больше число молекул в единице объема и чем больше поляризуемость молекул. Например, при  $\rho \approx a^3 \approx 10^{-24} \text{ см}^3$ ,  $n_A \sim 3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и  $E_0 \approx 3 \cdot 10^7 \text{ в/см}$  получим  $\Delta t_1$  порядка нескольких градусов.

Рассмотренный эффект связан с внутренним взаимодействием атомов в квазиоднородном электромагнитном поле. В краевой зоне неоднородности поля на атомы действуют силы, связанные с градиентами поля. Действие этих поверхностных сил не успеет передаться внутрь объема за малое время длительности мощного лазерного импульса  $T \sim 30 \text{ нсек}$  (время передачи  $\tau \sim l_1/V_a \approx 10^{-7} \text{ сек}$  при поперечных размерах фокусного пятна  $l_1 \sim 10^{-2} \text{ см}$  и  $V_a < 10^5 \text{ см/сек}$ ).

Импульсное понижение температуры в среде в луче лазера и увеличение энергии взаимодействия молекул могут проявиться в появлении импульсных квазикристаллических структур с преимущественным расположением плоскостей упорядочивания по полю, комплексов сцепленных молекул, уменьшении скорости звука и т.п., что можно зафиксировать импульсной рентгенографией и интерферометрией.

Многokратное медленное включение светового поля и быстрое выключение за время, меньшее времени между столкновениями, позволит многократно усилить эффект охлаждения ( $\Delta T_n \approx n \Delta T_1$ ; где  $n$  - число циклов). Особенно интересен этот скачок понижения температуры в области низких температур и его использование для криогеники.

Возможно, что в случае резонансной поляризуемости эффект охлаждения может быть резко увеличен, так как  $\rho_{\text{рез}} \approx \rho_0 \omega_{\text{рез}}^2 / \{(\omega_{\text{рез}}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2\}^{1/2} \gg \rho_0$  при  $\omega \rightarrow \omega_{\text{рез}}$ .

Представляет интерес также обратный эффект - скачок нагрева при плавном выключении луча лазера, когда уменьшение силы взаимодействия молекул увеличивает их кинетическую энергию.

2. При некоторых условиях [1-3] в луче лазера образуется интенсивная гиперзвуковая волна в среде. Так как время релаксации когерентных фононов в тепловые может быть достаточно велико, то гиперзвуковая волна будет приводить к периодическому охлаждению и нагреву среды с периодом чередования  $\sim 10^{-9} \text{ сек}$  I).

Амплитуда давления в гиперзвуковой волне

$$\Delta p \approx \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \frac{E_{\text{ст}}^2}{4\pi},$$

где  $E_{\text{ст}}$  - амплитуда стоячей световой волны, создающей стрикционными силами гиперзвуковое распределение давления. Предполагая среду газоподобной, положим  $P \approx \rho RT/M$  и

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{1-\gamma}{\gamma} \frac{\Delta P}{P} \approx \pm \frac{1-\gamma}{\gamma} \frac{E_{\text{ст}}^2 \beta}{kT},$$

где  $\beta$  - поляризуемость молекул среды,  $k$  - постоянная Больцмана и  $\gamma$  - отношение теплоемкостей. Например, при  $(1-\gamma)/\gamma \approx 0,2$ ;  $\beta \approx 10^{-24}$  см<sup>3</sup> и  $E_{\text{ст}}^{\text{max}} \approx 2E_0$  получим для  $E_0 \approx 3 \cdot 10^7$  в/см величину  $\Delta T_{\text{max}} \approx \pm E_0^2 \beta/k \approx 10^2$  град. В момент охлаждения среды также могут периодически образовываться виртуальные комплексы и кристаллические структуры, которые могут быть обнаружены по рассеянию рентгеновских лучей, нелинейным оптическим эффектам и т.п. Такие изменения температуры могут проявиться также в изменении эффективных скоростей звуковых волн в среде.

При низких температурах заметные светокалорические эффекты могут возникать и при меньших напряженностях полей в нефокусированных лазерных лучах, прохождение которых будет сопровождаться импульсной или периодической индуцированной замороженностью сред.

В заключение выражаю благодарность И.Л.Фабелинскому за ценные советы и обсуждение статьи.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию

3 января 1966 г.

#### Литература

- [1] R.I.Chiao, C.H.Townes, B.P.Stoicheff. Phys. Rev. Lett., 12, 552, 1964.  
[2] R.G.Brewer, K.E.Rieckhof. Phys. Rev. Lett., 13, 334, 1964.

[3] Д.И.Маш, В.В.Морозов, В.С.Старунов, И.Л.Фабелинский. Письма  
ЖЭТФ, 12, 562, 1965.

---

1) Отметим попутно, что импульс диссипирующего гиперзвука может  
создавать большие разрушающие давления по направлению светово-  
го давления.