

САМОФОКУСИРОВКА ЛУЧА СВЕТА ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ СРЕДЫ В ЛУЧЕ

Г.А. Аскарьян

Увеличение показателя преломления среды в мощном луче света вызывает самофокусировку луча [1-3]. Это увеличение может быть связано с различными процессами, такими как стрикция [1,2], нагрев [1,4], оптический Керр-эффект [3], гидродинамический разлет [7] и т.п.

В данной статье отмечается, что колебательное, вращательное и электронное возбуждение молекул и атомов среды и разрушение их ассоциаций под действием луча света или сопутствующих ему процессов может способствовать самофокусировке луча.

Действительно, любое возбуждение атома или молекулы делает более рыхлой их электронную структуру и увеличивает их поляризуемость. Так, например, электронное возбуждение простейшего атома до n -ого уровня приводит к увеличению его размеров в n^2 раз ($a_n \approx n^2 a_1$) и его поляризуемости в n^6 раз, ($\alpha_n \sim e^2/m\omega_n^2 \sim a_n^3 \sim n^6 \alpha_1$), что дает изменение электрической проницаемости $\Delta \epsilon = \sum N_n (n^6 - 1) \alpha_1$, где N_n - число частиц в состоянии n . Уже при $n \approx 2+3$ поляризуемость может возрасти в $\sim 10^2 + 10^3$ раз, а для резонансных уровней в еще большее число раз (резонансная поляризуемость $\alpha \approx e^2/m[\omega^2 - \omega_2^2]^2 + \gamma^2 \omega^2]^{1/2} \rightarrow \frac{e^2}{m\gamma\omega}$ при $\omega \rightarrow \omega_2$).

Увеличение оптической поляризуемости молекулы при возбуждении в ней вращательных и колебательных движений по величине меньше (оно связано с уменьшением сдавливания электронных оболочек атомов при уменьшении их взаимного притяжения), но это может дать заметное изменение электрической проницаемости ввиду большей доли молекул, получивших такое возбуждение. Разрушение ассоциаций молекул также может увеличить поляризуемость вещества.

Следует отметить, что эти процессы могут быть связаны не только с нагревом сред, но и в случаях, когда вероятность температурного возбуждения, связанного с повышением температуры ($\Delta N_n^T \approx N_n \xi_n \Delta T / kT^2$), гораздо меньше вероятности прямого светового возбуждения и, наверняка, в случае, когда время релаксации возбуждения гораздо больше длительности светового импульса, что часто встречается в газах. Самофокусировка при нагреве для сред с $d\epsilon/dT > 0$ была рассмотрена недавно [4]. Возможность влияния нагрева на самофокусировку отмечалась еще в [1]. Об изменении $\epsilon(T)_{\rho = const}$ указано, например в работе [5], там же приведены данные $(\partial \epsilon / \partial T)_{\rho} > 0$.

Динамику изменения оптической проницаемости можно оценить из уравнения для числа возбужденных частиц $\dot{N}_n + N_n / \tau_n = \alpha_n(\omega, E) N_{10}$ если $N_n + N_1 = N_{10}$. Отсюда для простейшего случая мгновенного включения поля получим

$$N_n(t) = \alpha_n \tau_n N_{10} (1 - e^{-t/\tau_n}),$$

где $\tau_n(E, \omega)$ - время жизни n -ого возбужденного состояния с учетом обратных переходов, N_{10} - начальная концентрация невозбужденных частиц, E и ω - напряженность и частота поля луча. При этом $\Delta \epsilon \approx 4\pi (\chi_n - \chi_1) \Delta N_n$.

При $t \geq \tau_n$ устанавливается величина $\Delta N_n \approx \alpha_n \tau_n N_{10} \sim \Delta \epsilon$. Для $t < \tau_n$ получается $\Delta N_n \approx \alpha_n N_{10} t$ и $\Delta \epsilon \sim t$. Величина сечения возбуждения может быть значительно увеличена подбором резонансной частоты луча, смещением частот для усиления возбуждающего действия разностной частотой [6].

Можно оценить условие пренебрежимости влиянием нагрева среды на возбуждение по сравнению с прямым возбуждением. Для равновесных условий

$$(\partial \epsilon / \partial T)_p \Delta T < N_n^E (\chi_n - \chi_1) 4\pi ; \text{ или из}$$

$$N_n \approx N_1 e^{\epsilon_n / kT}; \Delta N_n^T \sim N_n \epsilon_n \Delta T / kT^2;$$

тогда $\Delta N_n^T < \Delta N_n^E$ при $\Delta T / T < \alpha_n \tau_n (\frac{kT}{\epsilon_n}) e^{\epsilon_n / kT}$, что выполняется в широком диапазоне условий.

Отметим, что возбуждение молекул и атомов и диссоциация молекул может происходить не только под действием света, но и под действием вызванных им процессов - электронов многофотонной или лавинной ионизации, ультрафиолета и т.п. Повышение показателя преломления вследствие этих эффектов может ослабить, а в некоторых случаях даже превысить его уменьшение из-за появления плазмы ($\Delta \epsilon_p \approx -\omega_p^2 / \omega^2$), так как число возбужденных молекул может во много раз превосходить число ионизованных или электронновозбужденных молекул при небольшой степени ионизации ($\Delta N_n \chi_n \gg N_e |\chi_e|$, где поляризуемость свободного электрона $\chi_e \approx -e^2 / m\omega^2$ и $\chi_n \approx \alpha_n^3$).

Малые возникающие перепады $\Delta \epsilon$ достаточны для компенсации углов расходимости $\Delta \theta \sim \sqrt{\Delta \epsilon}$ и могут вызвать устранение расходимости или "схлопывания" луча света на расстояниях $L_f \sim d / \Delta \theta$, где d - радиус луча. В рассмотренном случае перепад $\Delta \epsilon$ из-за возбуждения среды на пути луча осуществляется с малой инерционно-

ствъ, в отличие от таких фокусирующих процессов, как стрижция, тепловое расширение и т.п.

Выражаю благодарность Д.П.Райзеру за обсуждение статьи.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
16 августа 1966 г.

Литература

- [1] Г.А. Аскаръян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1962.
- [2] В.И. Таланов, Изв. Вузов. Радиофизика, 7, 564, 1964.
- [3] R.Y. Chiao, E.Garmire, C.H.Townes. Phys. Rev. Lett., 13, 479, 1964.
- [4] А.Г.Литвак, Письма ЖЭТФ, 4, 341, 1966.
- [5] Л.М.Левин. Изв. АН СССР, сер. физ. 4, III, 1940.
- [6] Г.А.Аскаръян. ЖЭТФ, 48, 666, 1965.
- [7] Д.П.Райзер. Письма ЖЭТФ. 4, 124, 1966.