

СУЖЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЛИНИИ В СТОЯЧЕЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЕ

В.С. Лемохов

1. Линии поглощения или излучения газа низкого давления при небольшой радиационной ширине перехода имеют доплеровский контур, определяемый распределением частиц по скоростям. Цель настоящей работы — показать, что интенсивная стоячая световая волна способна так изменить распределение атомов по скоростям, что в центре доплеровской линии при наблюдении поглощения или излучения строго в направлении оси световой волны возникает чрезвычайно узкий пик. Физически это явление объясняется "пленением" между пучностями или нулями стоячей волны тех атомов, которые движутся почти параллельно волновому фронту. Этот новый эффект представляет интерес для спектроскопии внутри доплеровского контура с чрезвычайно высокой разрешающей силой и высокоточной стабилизации частоты лазера.

2. На электроны (свободные или связанные) в высокочастотном электромагнитном поле действует сила от усредненного квадрата электрического поля [1,2]. Она определяется стрикционной силой [3], действующей на атом (молекулу):

$$f = \frac{1}{2} \kappa_{\omega} \text{grad}(E^2)_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где κ_{ω} – поляризуемость атома на частоте внешнего поля ω , определяемая показателем преломления газа n_{ω} ($\kappa_{\omega} = (n_{\omega}^2 - 1)/2\pi N$, N – плотность частиц газа).

В случае плоской стоячей световой волны $E_0 \sin kz \sin \omega t$ стрикционная сила является периодической функцией z :

$$f = \frac{1}{4} \kappa_{\omega} E_0^2 k \sin 2kz. \quad (2)$$

Движущиеся атомы либо втягиваются в пучности стоячей волны (при $\kappa_{\omega} < 0$), либо выталкиваются из них (при $\kappa_{\omega} > 0$). Изменение z – координаты атома описывается уравнением:

$$\ddot{z} = \frac{1}{4M} \kappa_{\omega} E_0^2 k \sin 2kz, \quad (3)$$

аналогичным уравнению колебаний маятника (M – масса атома).

Нетрудно показать, что атомы, имеющие начальную скорость в направлении z меньше некоторой критической, определяемой соотношением:

$$v_{\text{кр}} = E_0 \sqrt{\frac{|\kappa_{\omega}|}{2M}}, \quad (4)$$

вместо свободного движения испытывают колебания в направлении z с амплитудой, не превышающей $\lambda/4$ (λ – длина световой волны). Величина $v_{\text{кр}}$ при интенсивностях в несколько киловатт на квадратный сантиметр на несколько порядков меньше средней тепловой скорости атомов $v_0 = \sqrt{2kT/M}$. Поэтому такое "пленение" между пучностями (или минимумами) волны будет иметь место лишь для атомов, движущихся под малыми углами ϕ к волновой поверхности (рис.1):

$$|\phi| < \phi_{\text{кр}} = \frac{v_{\text{кр}}}{v_0} = E_0 \sqrt{\frac{|\kappa_{\omega}|}{4kT}}. \quad (5)$$

Атомы, движущиеся под углом $\phi > \phi_{\text{кр}}$, свободно пересекают стоячую световую волну, но z – составляющая их скорости промодулирована осцилляциями с амплитудой $v_{\text{кр}}$.

3. При наблюдении излучения (поглощения) атомов в направлении z на длинах волн $\lambda' \gg \lambda$ "плененные" атомы, которые в обычных условиях имеют доплеровскую ширину $\Delta \omega'_0 = 2(v_{\text{кр}}/c)\omega'$, не испытывают доплеровского уширения. При осцилляциях положения атома происхо-

дит частотная модуляция частоты излучения (поглощения). Относительная интенсивность центральной несмещенной компоненты пропорциональна $J_0(\lambda/\lambda')$, а интенсивность n -ой боковой компоненты — $J_n(\lambda/\lambda')$, где J_n — функция Бесселя n -го порядка. При $\lambda' \gg \lambda$ интенсивность боковых компонент пренебрежимо мала. В результате в центре доплера

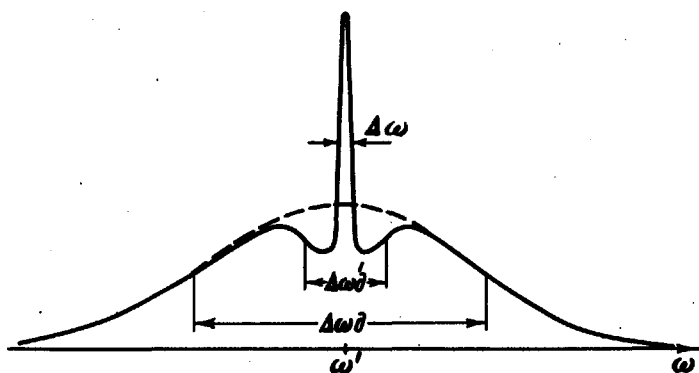


Рис.1. Траектория движения "пленного" атома в стоячей световой волне

ровской линии возникает узкая линия (рис.2), ширина которой определяется временем движения "пленных" атомов в стоячей волне τ . При достаточно низком давлении газа и малой радиационной ширине перехода время τ определяется временем пролета атомов через луч диаметра a . Для получения узкой компоненты необходимо выполнение условия:

$$a \gg d_{кр} = \frac{\lambda}{2\phi_{кр}}. \quad (6)$$

Тогда ширина узкой компоненты определяется соотношением:

$$\Delta\omega = \frac{2}{\tau} = \frac{2v_0}{a}. \quad (7)$$

4. Пусть частота световой волны лежит вне резонансов и полос поглощения атомов и поляризуемость составляет $\kappa_\omega \approx 10^{-23} \text{ см}^3$, что соответствует показателю преломления $n = 1 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ аяж}^{-1}$. При мощности стоячей световой волны $P = c(F_0^2/16\pi) = 10^5 \text{ эв/см}^2$, $\lambda = 1 \text{ мк}$ и $T = 300^\circ\text{К}$ критический угол $\phi_{кр} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ и $d_{кр} \approx 1,7 \text{ мм}$. В этом случае условие (6) выполнить вполне возможно. Например, при диаметре луча $a = 1 \text{ см}$ и давлении $\leq 10^{-4} \text{ мор}$ (для устранения столкновений) можно получить узкую компоненту с шириной $\Delta\omega \approx 3 \cdot 10^4 \text{ гц}$ на линиях с $\lambda' \gg 1 \text{ мк}$. В области резонансов $|\kappa_\omega|$ резко возрастает, но можно показать, что условие "пленения" атомов совпадает с ус-

ловием сильного насыщения κ_{ω} полем. Сильное насыщение приводит к уширению однородной линии [4], что затрудняет возникновение эффекта в области резонанса.

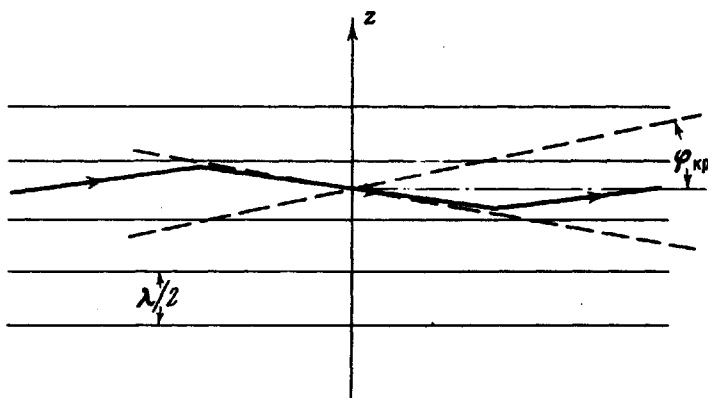


Рис.2. Форма линии поглощения (излучения) атома в направлении оси z в присутствии стоячей световой волны (пунктирная кривая – доплеровская форма линии в отсутствии волны)

5. Узкую компоненту можно наблюдать как в поглощении, так и в излучении. Сканируя частоту ω' монохроматической волны, направленной строго вдоль интенсивной стоячей волны, можно получить форму линии поглощения. Если линия поглощения состоит из ряда линий, то узкая компонента появится в центре каждой линии. Разрешающая способность такого метода $R = (\omega' / \Delta\omega) \approx 10^9 \div 10^{11}$. В спонтанном или индуцированном излучении атомов в направлении стоячей волны также должны возникнуть одна или несколько узких компонент, соответствующих структуре линии.

В заключении автор выражает глубокую благодарность академику Н.Г.Басову и доктору физ.мат.наук О.Н.Крохину за поддержку и ценные обсуждения.

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

Поступило в редакцию
20 февраля 1968 г.

Литература

- [1] А.В.Гапонов, М.А.Мидлер. ЖЭТФ, 34, 242, 1958.
- [2] Г.А.Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1962.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.Н.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, Гостехиздат, 1957.
- [4] R.Karplus, J.Schwinger. Phys. Rev., 73, 1020, 1948.