

лекулярным. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) может быть: на колебат. уровнях молекул газов, жидкостей, твёрдых тел ( $\Delta\nu_c \approx 2 \cdot 10^2 \div 4 \cdot 10^3$  см<sup>-1</sup>; коэф. усиления  $g \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$  см/МВт; спектральный диапазон лазеров — источников накачки  $\Delta f_n$  — от УФ до средних ИК); на вращат. уровнях молекул газов ( $\Delta\nu_c = (1 \div 6) \cdot 10^2$  см<sup>-1</sup>;  $g \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — ближний и средний ИК); на электронных уровнях атомов атомарных газов (пары металлов) ( $\Delta\nu_c \approx 10^4$  см<sup>-1</sup>,  $g \sim 10^{-2}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — от УФ до видимого); на спиновых подуровнях уровней Ландау полупроводников, связанное с переворачиванием спина электрона в магн. поле ( $\Delta\nu_c \approx 10 \div 200$  см<sup>-1</sup>, регулируется магн. полем,  $g \approx 10^3 \div 10^{-2}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — средний ИК: 5, 10, 12 мкм); ВКР на поляритонах в ионных кристаллах [ $\Delta\nu_c \approx (1 \div 5) \cdot 10^2$  см<sup>-1</sup>, регулируется поворотом кристалла,  $g = 10^{-2}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — видимый]. К молекулярному вынужденному рассеянию относятся: вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ), происходящее на гиперзвуковых волнах в газах, жидкостях, твёрдых телах, плазме [ $\Delta\nu_c \approx (1 \div 10) \cdot 10^{-2}$  см<sup>-1</sup>,  $g \approx 10^{-1} \div 10^{-2}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — от видимого до ближнего ИК]; вынужденное рассеяние крыла линии Рэлея (ВРКР), связанное с анизотропией молекул жидкостей и газов ( $\Delta\nu_c \approx 1 \div 10^2$  см<sup>-1</sup>;  $g \approx 10^{-3}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — видимый); вынужденное температурное рассеяние (ВТР) на температурных волнах, обусловленное поглощением света (ВТР-1) или электрокалорическим эффектом (ВТР-2) в жидкостях и газах ( $g \approx 10^{-3}$  см/МВт,  $\Delta f_n$  — видимый); вынужденное концентрационное рассеяние на волнах концентрации в смесях разл. жидкостей или газов ( $\Delta\nu_c \approx 1 \div 10$  см<sup>-1</sup>;  $g \approx 10^{-3}$  см/МВт;  $\Delta f_n$  — видимый).

Выражение коэф. усиления  $g$  через измеряемые величины зависит от вида В. р. с. Так, напр., для ВКР

$$g_{\text{ВКР}} = \lambda_c^2 N \sigma / 8 \pi m^2 \Delta\nu_c h \nu_n,$$

где  $\lambda_c$  — длина волны стоксовой компоненты,  $N$  (см<sup>-3</sup>) — разность населённостей осн. и возбуждённого уровней.

Для ВРМБ

$$g_{\text{ВРМБ}} = [2 \nu_{\text{зв}}^2 (\partial \epsilon / \partial \rho)^2 \sin^2(\theta/2)] / v_{\text{зв}} c^3 n \Delta\nu_c,$$

где  $v_{\text{зв}}$  — скорость звука,  $n$  — показатель преломления среды,  $\theta$  — угол рассеяния (рассеяние назад соответствует  $\theta = \pi$ ),  $\rho$  — плотность среды,  $\epsilon$  — её диэлектрич. проницаемость.

Усиление рассеянного света происходит до тех пор, пока можно пренебречь эффектами насыщения. Преобразование излучения накачки в стоксовы и антистоксовы компоненты уменьшает мощность (и энергию) накачки, а следовательно, и её интенсивность, что приводит к уменьшению усиления (т. е. к насыщению по накачке).

К уменьшению коэф. усиления приводит также выравнивание населённости верх. и ниж. рабочих уровней (рис. 2), к-рое происходит, если объёмная скорость преобразования фотонов накачки велика по сравнению со скоростью релаксации в среде (т. е. к насыщению среды).

В. р. с., в отличие от спонтанного, даёт возможность достичь высокой степени когерентности рассеянного света, т. к. состояние рассеянного фотона уже задаётся фотоном, содержащимся в определ. моде. Это означает, что излучение любого центра рассеяния находится в фазе с уже имеющимся рассеянным светом. В этом смысле В. р. с. аналогично вынужденному излучению при резонансном взаимодействии излучения с атомами и молекулами. Точно так же степень когерентности при В. р. с. во много раз выше степени когерентности спонтанно рассеянного света.

Большой диапазон ширины линий, разнообразие возможности концентрации световой энергии в разл. средах приводят к тому, что В. р. с. наблюдается не

только в поле мощных импульсов одномодовых лазеров, но и в поле лазеров непрерывного действия, возбуждающем В. р. с. в волоконных световодах. ВКР в волоконных световодах может наблюдаться при мощности накачки  $\approx 0.1$  Вт; спектр ВКР в кварцевых стёклах широк, и с помощью дисперсионного элемента можно осуществлять перестройку частоты  $\sim 300$  см<sup>-1</sup>. Поэтому на основе ВКР в волоконных световодах созданы перестраиваемые в ближней ИК-области спектра волоконные генераторы лазерного излучения.

Интересные физ. и прикладные возможности связаны с В. р. с. пикосекундных лазерных импульсов — нестационарным ВКР, возникающим в условиях, когда длительность импульса сравнима с временем релаксации фазы элементарного возбуждения, ответственного за рассеяние [5]. В этих случаях часто возникают эффекты инерц. запаздывания, сужения стоксова импульса и др.

В. р. с. наблюдается и при «шумовой» накачке — оптич. излучении, обладающем низкой пространственной и временной когерентностью [6]. В этом случае В. р. с. может быть использовано для повышения степени когерентности.

В. р. с. нашло широкое практич. применение в комбинационных лазерах для эффективного преобразования частоты лазерного излучения; в активной лазерной спектроскопии, позволяющей проводить количеств. и качеств. газовый анализ, локальную диагностику параметров плазмы и т. п.; в задачах по обращению волнового фронта.

Лит.: 1) Бломберг Н., Вынужденное комбинационное рассеяние света, пер. с англ., «УФН», 1969, т. 97, в. 2; 2) Старунов В. С., Фабелинский И. Л., Вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна и вынужденное антропийное (температурное) рассеяние света, «УФН», 1969, т. 98, в. 3; 3) Грасюк А. З., Генерация и усиление света на основе вынужденного рассеяния, «Тр. ФИАН», 1974, т. 75, с. 75; 4) Ахмапов С. А., Коротеев Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981; 5) Остон Д., Пикосекундная нелинейная оптика, в кн.: Сверхкороткие световые импульсы, под ред. С. Шапиро, пер. с англ., М., 1981; 6) Ахмапов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С., Введение в статистическую радиофизику и оптику, М., 1981.

**ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ** — колебания, существующие в системе под действием перем. внеш. силы. Наличие внеш. силы — необходимое условие возбуждения и существования В. к. Атм. и океанич. приливы под действием Луны, тряска автомобиля, движущегося по неровной дороге, вибрация кормовой части судна под действием гидродинамич. сил, связанных с работой гребного винта, — всё это В. к.

Наиб. просты В. к. в линейных системах. Так, при действ. периодич. внеш. силы на линейную систему возбуждаются колебания, к-рые являются суперпозицией собственных (нормальных) колебаний и В. к. По истечении нек-рого времени в результате диссипации собственные колебания затухают и в системе устанавливаются В. к., имеющие ту же частоту, что и внеш. сила. Пример В. к. в линейной системе с одной степенью свободы — электрич. колебания в контуре, состоящем из индуктивности  $L$ , ёмкости  $C$  и сопротивления  $R$ , на к-рый действует створонная ЭДС  $\sim E \sin \omega t$ . Эта система описывается ур-нием

$$L\ddot{x} + R\dot{x} + x/C = E \sin \omega t,$$

где  $x$  — заряд конденсатора. Установившиеся В. к. определяются частым решением приведённого ур-ния

$$x = X_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где

$$X_0 = \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\delta^2}}, \quad \varphi = \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2},$$

$$A = E/L, \quad \omega_0^2 = 1/LC, \quad \delta = R/2L.$$

Т. о., эти В. к. представляют собой гармонические колебания с частотой внеш. силы, амплитуда к-рых  $X_0$  определяется амплитудой и частотой внеш. силы и параметрами системы, а фаза  $\varphi$  — только частотой внеш.