

Возбуждение О. р. осуществляют обычно с помощью штырей, петель, щелей, отверстий, к к-рым подводят извне эл.-магн. энергию, примерно так же, как в случае волноводов (см. *Антенна*). В теории такие возбуждающие устройства часто можно заменить на эквивалентные им сторонние электрич. и магн. токи с плотностями $j^{(e)} \exp(i\omega t)$ и $j^{(m)} \exp(i\omega t)$. Для эфф. возбуждения О. р. требуется, чтобы ток $j^{(e)}$ был ориентирован вдоль поля E , а ток $j^{(m)}$ — вдоль поля H нужной моды, т. к. соответствующие коэф. возбуждения пропорц. интегралам $\int (j^{(e)} E) dV$ и $\int (j^{(m)} H) dV$. С чисто матем. позиций задача о вынужденных колебаниях О. р. сводится к решению ур-ния (1), в правой части к-рого стоит возбуждающая сила $4\pi e^{-1}(\text{rot} j^{(m)} + i\omega e^{-1} \mu j^{(e)})$.

О. р. с металлич. стенками применяют в технике СВЧ ($10^9 - 10^{11}$ Гц) как частотные фильтры и резонансные колебат. системы генераторов, усилителей, приёмных устройств, анализаторов спектра и др. Начиная с частот $\sim 10^{11}$ Гц О. р. при работе на первой моде становятся излишне миниатюрными ($l \sim \lambda \sim 1$ мм), к тому же их добротность ухудшается по закону $Q \sim \lambda^{1/2}$, поскольку толщина скин-слоя уменьшается пропорц. $\lambda^{1/2}$, а размеры О. р. — пропорц. λ . В миллиметровом, субмиллиметровом и оптич. диапазонах О. р. вытеснены большими (в масштабе λ) открытыми резонаторами квазиоптич. типа, в к-рых осуществляется разрежение спектра собств. частот за счёт «высвечивания» части мод через открытые участки боковых поверхностей.

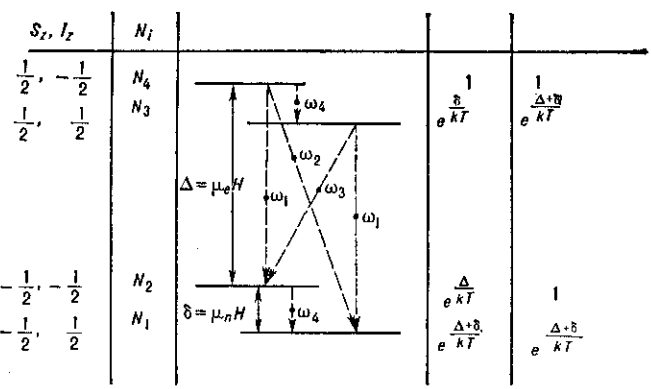
О. р. встречаются и в природных условиях, причём экранирующие поверхности у них не обязательно хорошо проводящие. Напр., существует бисферич. О. р. Земля — ионосфера. Земля является электропроводящим экраном, а ионосфера — рефракционным (из-за полного внутр. отражения волн). Аналогичные О. р., обычно представляющие собой отрезки *волноводов диэлектрических* (плоско-параллельных или цилиндрических), встречаются и в технике.

Лит.: Вайнштейн Л. А., *Электромагнитные волны*, 2 изд., М., 1988; Лебедев И. В., *Техника и приборы СВЧ*, 2 изд., т. 1, М., 1970; Джексон Д. Дж., *Классическая электродинамика*, пер. с англ., М., 1965; Каценеленбаум Б. Э., *Высокочастотная электродинамика*, М., 1966; Никольский В. В., *Никольская Т. И., Электродинамика и распространение радиоволн*, 3 изд., М., 1989.

М. А. Миллер, А. И. Смирнов.

ОБЫКНОВЕННЫЙ ЛУЧ — см. *Кристаллооптика*.
ОВЕРХАУЗЕРА ЭФФЕКТ — увеличение интенсивности ядерного магнитного резонанса и поляризации ядерной магн. системы при насыщении электронного парамагнитного резонанса. О. э. наблюдается в условиях, когда в электронной парамагн. системе существует релаксац. процесс, содержащий в каждом акте связанное однонаправленное изменение ядерных спиновых переменных и определяющий стационарное состояние ядерной магн. системы (см. *Ориентированные ядра, Парамагнетизм*). О. э. предсказан А. Оверхаузером (A. W. Overhauser) в 1953 для взаимодействующих спиновых систем электронов проводимости и ядер в металлах. В том же году О. э. был экспериментально подтверждён Т. Карвером (Th. R. Carver) и Ч. Сликтером (Ch. P. Slichter), впоследствии наблюдался в полупроводниках, жидкостях с парамагн. примесями и твёрдых телах с высокой концентрацией свободных радикалов или парамагн. примесей. О. э. является одним из методов динамич. поляризации ядер. Для его объяснения существенны два явления: *зеэмановского расщепления* магн. уровней (см. *Зеэманов эффект*) и *релаксация* — процесс возвращения возбуждённой системы в состояние термодинамич. равновесия.

Магн. моменты микрочастиц могут иметь только определ. ориентации в магн. поле, к-рым соответствуют определ. значения энергии (энергетич. уровни). На рис. изображена структура этих уровней для электронно-ядерной системы с электронным спином $S = 1/2$ и ядерным спином $I = 1/2$. Зеэмановское расщепление для электронного спина равно $\Delta = \mu_e H$, для ядерного



Структура зеэмановских энергетических уровней электронно-ядерной системы с $S = 1/2$ и $I = 1/2$. Штриховые линии соответствуют различным видам релаксации. Справа в первом столбце — относительные равновесные населённости уровней, N_i/N_4 , во втором столбце — те же величины в условиях эффекта Оверхаузера при $\omega_3 = \omega_4 = 0$.

спина $\delta = \mu_n H$, где H — напряжённость внеш. магн. поля, μ_e и μ_n — магн. моменты электрона и ядра. Поскольку $\mu_e \gg \mu_n$, имеем $\Delta \gg \delta$. Термодинамически равновесная поляризация электронной и ядерной магн. систем определяется населённостью электронных уровней $S_z = \pm 1/2$ и ядерных уровней $I_z = \pm 1/2$. Отношение населённостей соответствует распределению Больцмана:

$$N_3/N_1 = N_4/N_2 = e^{-\Delta/kT}, \quad N_4/N_3 = N_2/N_1 = e^{-\delta/kT},$$

где N_i — населённость уровней, соответствующих рис. Возбуждение переходов $\Delta S_z = 1, \Delta I_z = 0$ отвечает ЭПР, а переходов $\Delta S_z = 0, \Delta I_z = 1 - \text{ЯМР}$. Если приложить к образцу достаточно сильное перем. магн. поле с частотой ЭПР $\Omega = \Delta/h$, то электронные переходы можно насытить, т. е. выровнять населённости уровней, между к-рыми происходят соответствующие переходы ($\Delta S_z = 1, \Delta I_z = 0$), при этом $N_1 \approx N_3$ и $N_2 \approx N_4$. Магн. ВЧ-поле переводит электроны в верх. состояния, а релаксац. процессы стремятся восстановить состояние термодинамич. равновесия. Конкуренция этих процессов определяет амплитуду ВЧ-поля, необходимую для насыщения ЭПР. Ответственный за это релаксац. процесс (со скоростью релаксации w_1) не приводит к переориентации ядерных спинов.

Существование флуктуирующего сверхтонкого взаимодействия, связанного либо с движением носителя электронного спина, либо с быстрой переориентацией этого спина в обменном поле, приведёт к появлению др. релаксац. процессов. Контактное фермиевское взаимодействие приводит к релаксац. процессу типа $\Delta S_z = -1$ при $\Delta I_z = 1$, и наоборот (со скоростью релаксации w_2). Флуктуирующее дипольное взаимодействие приведёт к процессу типа $\Delta S_z = -1, \Delta I_z = -1$ (со скоростью релаксации w_3). В ядерной магн. системе существуют релаксац. процессы $\Delta S_z = 0, \Delta I_z = 1$ (со скоростью релаксации w_4).

Для О. э. характерно соотношение $w_2 \gg w_3, w_4$. Осн. процесс, ведущий к изменению населённости, отвечает переходам между уровнями 4 и 1. При этом происходят однонаправленные перевороты ядерных спинов, приводящие к след. отношению населённости: $N_1/N_2 = N_3/N_4 = \exp(\Delta + \delta)/kT$. Т. о., поляризация ядер в состоянии термодинамич. равновесия определяется величиной зеэмановского расщепления в ядерной магн. системе, а в условиях О. э. — зеэмановским расщеплением в электронной системе. При высоких темп-рах, когда $\Delta, \delta \ll kT$, поляризация возрастает в $\mu_e/\mu_n \sim 10^3$ раз. Неполное насыщение ЭПР и конечные значения величин w_3 и w_4 приводят к ослаблению поляризации ядер при О. э. При $w_3 \gg w_2, w_4$ поляризация ядерной магн. системы будет противоположной.