

ных электрическом и магнитном полях). При движении электронов в магн. поле H_0 по винтовым траекториям взаимодействие электронов с эл.-магн. волной, распространяющейся вдоль магнитного поля $E = E_0 e^{i(\omega t - k_{||} z)}$, происходит при выполнении условия **циклотронного резонанса** (синхронизма), к-рое с учётом доплеровской поправки (см. *Доплера эффект*) имеет вид

$$\omega - k_{||} v_{||} \approx s \omega_c; \quad s = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Здесь $v_{||}$ — поступат. скорость электрона вдоль магн. поля H_0 , ω — частота волны, $k_{||}$ — компонента волнового вектора k вдоль H_0 , $\omega_c = eH_0/c$ — циклотронная частота, \mathcal{E} — полная энергия, e — заряд электрона. Из (1) ясно, что при $s \geq 1$ в МЦР отсутствует необходимость замедлять волну. Именно это обстоятельство, сближающее МЦР с *квантовыми генераторами*, и определяет его преимущества на миллиметровых и субмиллиметровых волнах перед традиц. СВЧ-генераторами — *магнетроном, лампой бегущей волны* (ЛБВ) и др., где для осуществления синхронизма необходимо движение электронов вблизи *замедляющей системы*.

Как и в др. классич. СВЧ генераторах, в МЦР преобразование энергии стационарного электронного пучка в излучение оказывается возможным благодаря группировке частиц полем «затравочной» волны. Образующиеся электронные сгустки усиливают первичную волну (циклотронная неустойчивость). Такой индуциров. процесс происходит в МЦР вследствие: 1) зависимости ω_c от энергии электрона \mathcal{E} (неизохронность вращения), к-рая приводит к азимутальной группировке частиц, меняющих свою энергию в процессе взаимодействия с волной; 2) различия поступат. смещений, к-рые приобретают электроны, попавшие в разные фазы пространственно неоднородной волны; этот механизм приводит к продольной (вдоль H_0) группировке частиц.

При квантовой интерпретации этим механизмам отвечают: неэквидистантность энергетич. уровней электрона в магн. поле (см. *Ландау уровни*) и «отдача» при излучении фотона, также ведущая к различию частот волн, испускаемых и поглощаемых электроном. Первый из этих механизмов специфичен и имеет принципиально релятивистскую природу, а второй более универсален и кроме МЦР действует во многих СВЧ-генераторах, в частности в ЛБВ.

Классическая интерпретация. Рассмотрим взаимодействие электронов, первоначально равномерно распределённых на циклотронной окружности, с электрич. полем E волны, имеющим компоненту, вращающуюся с частотой, равной циклотронной частоте электронов (рис. 1, а). В результате взаимодействия циклотронная частота электрона Б, отбирающего энергию у волны, уменьшается и он начинает вращаться медленнее, а циклотронная частота электрона В, отдающего энергию волне, возрастает и он вращается быстрее. Поэтому вблизи электрона А, вращающегося с невозможной частотой, образуется сгусток электронов. Для того чтобы электроны в среднем отдавали свою энергию волне, сгусток должен перемещаться синхронно с тормозящей фазой волны. Для этого частота вращения волны (с учётом доплеровской поправки $\omega - k_{||} v_{||}$) должна немного превышать исходную циклотронную частоту электронов.

Квантовая интерпретация. Пусть в исходном состоянии все электроны находятся на p -м уровне Ландау (рис. 1, б). Поскольку неэквидистантность уровней невелика, волна может вызывать переходы с p -го как на более низкие (вынужденное излучение), так и на более высокие (резонансное поглощение) уровни. Для преобладания излучения над поглощением интенсивность спектра волны на частоте $\omega_{p,p-1}$ должна быть выше, чем на частоте $\omega_{p,p+1}$, что и реализуется при $\omega \gtrsim \omega_c$.

Вследствие малой неэквидистантности электрон способен последовательно переходить на всё более низкие уровни, испуская много квантов.

Как и для приборов, основанных на вынужденном излучении электронов, движущихся по прямолиней-



Рис. 1. Классическая (а) и квантовая (б) интерпретации механизма вынужденного излучения электронов в МЦР, обусловленного релятивистской зависимостью циклотронной частоты ω_c электронов от их энергии \mathcal{E} .

ным траекториям, для МЦР существует много вариантов построения как генераторов (МЦР-монотрон, где обратная связь обеспечивается отражением волн от концов резонатора; МЦР со встречной волной — аналог *лампы обратной волны* и др.), так и усилителей внеш. сигнала (МЦР-ЛБВ и МЦР-клистрон).

Гиротрон. Из многочисл. вариантов МЦР при слабо-релятивистских энергиях электронов наиб. распространение получили генераторные и усилительные разновидности гиротрона (рис. 2). В гиротроне электроны

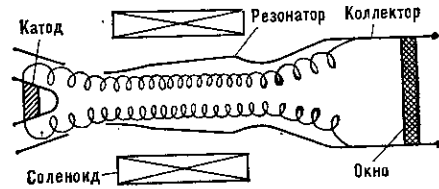


Рис. 2. Схема гиротрона — автогенератора.

слабо взаимодействуют с полем нерегулярного волновода на частоте, близкой к критической, когда фазовая скорость волны $\omega/k_{||} \gg c$. В таких условиях доплеровская поправка к частоте, равная $k_{||} v_{||}$, мала, благодаря чему снижается до минимума уширение спектральной линии (вызванное разбросом поступат. скоростей электронов) и тем самым повышается электронный кпд. Отсутствие замедляющей системы и возможность использования открытых резонаторов делают гиротроны мощными генераторами и усилителями диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Согласно условию (1), длина волны слабо-релятивистского гиротрона, работающего на осн. циклотронном резонансе ($s = 1$), связана с величиной магн. поля соотношением:

$$\lambda(\text{мм}) \approx 107/H(\text{кЭ}). \quad (2)$$

Отсюда ясно, что для реализации гиротронов КВ-части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов требуются интенсивные магн. поля $H_0 \sim 100$ кЭ, к-рые обеспечиваются криомагн. системами или импульсными соленоидами.

Гиротроны позволили освоить весь диапазон миллиметровых волн на высоких уровнях мощности (~ 1 МВт в импульсном и сотни кВт в непрерывном режимах) с кпд $\sim 30-40\%$. Это делает их перспективными для ряда энергетич. приложений, в частности для нагрева плазмы в установках *управляемого термоядерного синтеза*.

При переходе к релятивистским энергиям электронов эффективность гиротрона уменьшается вследствие слиш-