

ростью $v_e = v_\phi$. Излучение такого электрона наз. черенковским (см. Черенкова—Вагиллова излучение), а основанные на нём приборы соответственно относят к классу черенковских. По характеру группировки их наз. приборами типа «О» («осевое» движение) или приборами с инерционной группировкой, поскольку процесс этот может продолжаться и на участках свободного дрейфа электронов (см. Кистрон).

В ЛОВ поступают движения электронов и поток энергии обратной эл.-магн. волны направлены навстречу друг другу, это приводит к образованию распределённой внутр. обратной связи. Поэтому при превышении электронным током I некого стартового значения $I > I_{ст}$ возникает автоколебат. режим даже при условии полного согласования входа и выхода замедляющей системы. Частота автоколебаний f_a определяется условием фазового синхронизма (1) и, следовательно, зависит от величины скорости электронов v_e , к-рая, в свою очередь, определяется ускоряющим напряжением U , подаваемым на электронную пушку (электронная перестройка частоты). Для иллюстрации перестройки частоты на диаграмме $f - k/2\pi$ (рис. 3; k — волновое число) приведены возможные дисперсионные характеристики

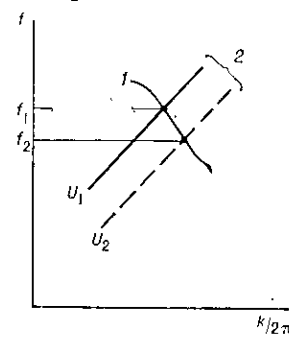


Рис. 3. Дисперсионные характеристики обратной электромагнитной волны 1 и высокочастотных электронных волн в пучке 2.

обратной эл.-магн. волны (кривая 1) и волн электронного ВЧ-тока в пучке (линии 2); сплошные и пунктирные линии соответствуют разным U . Так как частота генерации f_a определяется пересечением линий 1 и 2, то при изменении U изменяется и частота. Кривая 1 в области пересечения её с линиями 2 наклонена вниз ($df/dk < 0$), поскольку $v_p < 0$. Каждой линии 2 соответствуют две волны электронного ВЧ-тока, одна из к-рых переносит «отрицат.» энергию (этим понятием пользуются, когда в целом положит. энергия пучка при возбуждении волны уменьшается). Взаимодействие волн с положит. и отрицат. энергиями, если одна из них обратная, приводит к возникновению абсолютной неустойчивости, что и является причиной существования автоколебат. режима в ЛОВ.

ЛОВ — один из самых широкодиапазонных СВЧ-автогенераторов с электронной перестройкой частоты. Этим объясняется многообразное применение их в радиотехнич. и измерит. аппаратуре в качестве свип-генераторов, гетеродинов, быстроперестраиваемых задающих СВЧ-генераторов и т. д. При токе электронного пучка, меньшем стартового ($I < I_{ст}$), ЛОВ работает как узкополосный регенеративный усилитель, перестраиваемый напряжением U , что широко используется на практике. Если $I > (3 \div 4) I_{ст}$, то в ЛОВ возникает автомодуляц. режим — генерируется периодич. последовательность радиомпульсов. Дальнейшее увеличение тока I может привести к генерации последовательности уже не повторяющихся по форме импульсов.

Кроме ЛОВ типа «О» известны ЛОВ типа «М», ЛОВ МЦР, ЛОВ-убитрон, ЛОВ на аномальном эффекте Доплера, ЛОВ с плазменными электродинамич. системами и др. Их объединяет явление образования распределённой внутренней обратной связи, тогда как механизм индивидуального излучения электронов, а также их группировка могут различаться. Напр., в ЛОВ типа «М», как и в магнетроне (отсюда и назв. ЛОВ типа «М»), электроны движутся в скрещенных электрич. и магн. полях. Под действием синхронного ВЧ-поля электроны отдают ему свою потенц. энергию, перемещаясь в область с более высоким потенциалом. Работа ЛОВ МЦР (мазер на циклотронном резонансе в вари-

анте ЛОВ) и ЛОВ-убитрон основана на тормозном излучении электронов, фазовое условие (1) при этом замещается на

$$v_\phi \left(1 - \frac{\Omega}{f}\right) \approx v_e, \quad (2)$$

где Ω — частота колебаний электронов в статич. полях. В (2) v_ϕ может принимать и отрицат. значения, если $\Omega > f$, в этом случае обратной становится волна ВЧ-тока в пучке, а эл.-магн. волна — прямая $[(f/k)df/dk \equiv v_{гр}v_\phi/4\pi^2 > 0]$, но распространяется навстречу пучку ($v_\phi > 0, v_{гр} > 0$).

В 80-х гг. были разработаны ЛОВ типа «О», работающие в диапазоне частот 1—700 ГГц с мощностью до 10 Вт (в ДВ-части диапазона и монотонно уменьшающейся с увеличением частоты) и перестройкой частоты, превышающей октаву: $(f_{макс} - f_{мин})/f_{ср} > 0,67$. Освоен выпуск ЛОВ типа «М», работающих в диапазоне частот 0,5—20 ГГц, с выходной мощностью до 1 кВт и перестройкой до 1/3 октавы. Клд ЛОВ типа «О» обычно не превосходит неск. процентов, а ЛОВ типа «М» может превышать 50%. На лаб. макетах импульсных ЛОВ типа «О» с пучками релятивистских электронов была достигнута пиковая мощность выходного излучения ~1 ГВт при клд 15%.

Первое достаточно полное и подробное описание явления генерации электронными пучками обратных волн дал С. Мильман (S. Millman) в 1950; общепринятое назв. для этого класса СВЧ-приборов предложили Р. Компфнер (R. Kompfner) и Н. Уильямс (N. Williams) в 1953. ЛОВ типа «М» и типа «О» с релятивистскими электронными пучками вследствие их конструктивных особенностей наз. иногда карцилотронами (от греч. sarcinotron — рак, пятящийся назад).

Лит.: Лебедев И. В., Техника и приборы СВЧ, 2 изд., т. 2, М., 1972; Кукарин С. В., Электронные СВЧ приборы, 2 изд., М., 1981; Релятивистская высокочастотная электроника, в. 11, Горький, 1979.

Н. Ф. Ковалёв.

ЛАНДАУ ДИАМАГНЕТИЗМ — диамagnetизм системы подвижных носителей зарядов (напр., электронов проводимости в металлах). Предсказан Л. Д. Ландау в 1930. Л. д. представляет собой чисто квантовый эффект, обусловленный квантованием орбитального движения заряд. частиц в магн. поле (квантуется энергия движения в плоскости, перпендикулярной полю, см. Ландау уровни). Л. д. связан с тем, что при помещении заряд. частиц в магн. поле траектории свободного движения частиц искривляются и возникает добавочное магн. поле, противоположное внеш. полю, т. е. у системы заряд. частиц появляется добавочный диамagn. момент. Л. д. заметно проявляется при низких темп-рах (ниже темп-ры вырождения) и может наблюдаться в вырожденном газе свободных электронов и у электронов проводимости в металлах, полуметаллах и полупроводниках. В простейшей модели вырожденного газа электронов проводимости в твёрдом теле с квадратичным законом дисперсии $\epsilon = p^2/2m^*$ (ϵ, p и m^* — энергия, импульс и эфф. масса электронов проводимости) диамagn. восприимчивость Ландау

$$\chi_L = -(24\pi^2)^{-2/3} e^2 N^{1/3} / m^{*2}$$

(N — число электронов проводимости в единице объёма). В рамках такой модели

$$\chi_L = -(1/3) (m_e/m^*)^2 \chi_{П},$$

где $\chi_{П}$ — восприимчивость, соответствующая Паули парамагнетизму, m_e — масса электрона. В вырожденном газе свободных электронов, где $m^* = m_e, \chi_L = -\chi_{П}/3$.

Соответственно, в твёрдых телах, в к-рых $m^* \ll m_e$ (напр., в нек-рых полупроводниках), Л. д. превосходит парамагнетизм Паули и электронная магн. восприимчивость тела обусловлена в осн. Л. д. Точное вычисление Л. д. в реальных твёрдых телах затруднено сложным характером зонного движения квазичастиц, необходимостью учёта глубоких электронных состояний и т. д.