

уменьшать, как  $\gamma^{-1}$  (тогда как в слабoreлятивистском случае обе эти величины пропорц. корню из величины энергии электронов). Такой закон подобия благоприятствует созданию мощных релятивистских электронных ВЧ-генераторов с высокоселективными пространственно-развитыми эл.-динамич. системами.

2. При тормозном излучении электронов с ростом их энергии максимум спектральной интенсивности смещается в область частот, существенно превосходящих частоты, представленные в неравномерном (напр., осцилляторном) движении частиц. Так, электрон, вращающийся с частотой  $\Omega$ , излучает преим. на частотах  $\omega \sim \gamma^2 \Omega$  (синхротронный эффект), а электрон, совершающий малые колебания с частотой  $\Omega$  и обладающий релятивистской поступат. скоростью  $v \approx c$ , излучает в направлении своего поступат. движения на частотах  $\omega \sim \gamma^2 \Omega$  (релятивистский Доплера эффект). Аналогично этому при рассеянии волны на электроне, движущемся навстречу ей с релятивистской скоростью, частота рассеянного излучения в  $\sim \gamma^2$  раз превышает частоту падающей волны (релятивистский Комптона эффект). Указанные эффекты открывают возможность для продвижения соответствующих ВЧ-генераторов — убитрона, мазера на циклотронном авторезонансе (МЦАР), скаттрона — в особо коротковолновые диапазоны.

3. Поскольку поперечная масса электронов в  $\gamma^2$  раз меньше продольной, то в отсутствие статич. поля, к-рое ограничивало бы их поперечное движение, группировка электронного пучка под действием ВЧ-модуляции развивается в поперечном направлении гораздо быстрее, чем в продольном. Этот эффект используется в секциониров. приборах с поперечным отклонением электронов — гироконе и оптич. клистроне.

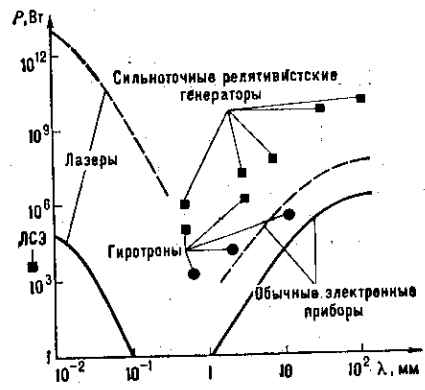
4. В потоке электронов, вращающихся в однородном магн. поле  $H_0$ , эл.-магн. волна вызывает инерционную группировку двух типов: а) продольную (относительно  $H_0$ ), обусловленную неоднородностью ВЧ-поля; б) орбитальную, обусловленную релятивистской зависимостью циклотронной частоты от энергии электронов. На этих эффектах основано действие МЦР, среди к-рых с точки зрения получения больших мощностей в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн наиб. перспективны при слабо- и умеренно-релятивистских энергиях электронов *гиротроны* (как генераторы, так и усилители), при ультрарелятивистских — МЦАР.

Согласно теории, кпд электронных ВЧ-генераторов и усилителей сохраняется в принципе на уровне  $\sim 10\%$  при любых, сколь угодно больших энергиях электронов.

Для практич. реализации мощных релятивистских электронных ВЧ-приборов необходимы прежде всего источники интенсивных РЭП с достаточно малой дисперсией параметров, а также эл.-динамич. системы с достаточными селективностью и электропрочностью. РЭП, появившиеся еще в 1930-х гг. благодаря изобретению ускорителей, из-за ограниченности тока для генерации когерентного (коллективного) излучения были непригодны. Традиционная ВЧ-электроника освоила режимы с  $U \approx 100$  кВ, при к-рых релятивистские эффекты начинают заметно влиять на динамику электронов, в 1950-х гг.; теперь импульсная мощность усилит. клистронов и гироконов в диапазоне метровых и дециметровых волн достигает десятков МВт. С кон. 1950-х гг. в ВЧ-электронике начали использоваться и принципиально релятивистские эффекты. Первыми генераторами такого рода были МЦР (гиротроны); ныне непрерывная мощность гиротронов составляет величину  $\sim 300$  кВт при  $\lambda \sim 1$  см и превышает 1 кВт при  $\lambda \sim 1$  мм, мощность в импульсах длительностью  $10^{-4}$ — $10^{-1}$  с составляет величину  $\sim 100$  кВт при  $\lambda \sim 0,7$  мм и превышает 1 МВт при  $\lambda \approx 3$  мм.

Возможность создания релятивистских электронных ВЧ-генераторов повыш. мощности с импульсом длительностью  $10^{-8}$ — $10^{-6}$  с возникла в кон. 1960-х гг. благодаря появлению сильноточных электронных ускорителей. Для генерации используются пучки электронов с энергиями 0,5—2 МэВ и токами 1—100 кА. Наиб. внимание уделяется на относительно длинных ( $\lambda \approx 3$  мм) волнах генераторам, основанным на индуциров. черенковском излучении (релятивистским магнетрону, ЛОВ, оротрону и т. п.), а на относительно коротких ( $\lambda \lesssim 3$  мм) волнах — генераторам, основанным на индуциров. тормозном излучении и рассеянии волн (релятивистскому убитрону, МЦАР и т. п.). В этих генераторах применяются как вакуумные, так и плазменные эл.-динамич. системы. Достигнутая к настоящему времени ВЧ-мощность при укорочении волн от 10 см до 0,5 мм монотонно спадает от 10 ГВт до 1 МВт.

В кон. 1970-х гг. появились ВЧ-генераторы, используемые в качестве инжекторов электронов линейных ускорителей с повыш. ср. мощностей и тактовой частотой, позволяющей реализовать синхронизм между импульсами тока и эл.-магн. импульсом, последова-



Мощность генераторов когерентного электромагнитного излучения в зависимости от длины волны; ● — непрерывный режим, ■ — импульсный режим.

тельно отражающимся от зеркал открытого резонатора. Такие генераторы, представляющие собой разновидность убитронов, работающие при  $\gamma \sim 10^2$ , благодаря релятивистскому эффекту Доплера позволяют получать когерентное излучение в оптич. (лазерном) диапазоне и поэтому получили назв. лазеров на свободных электронах (рис.).

Приборы Р. э. находят применение в физ. эксперименте (воздействие мощного излучения на вещество, в частности на плазму) и считаются перспективными для техн. (в частности, радиотехн.) приложений.

А. В. Гапонов-Греков, М. И. Петелин.

**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА** — раздел физики, посвященный изучению ядерных процессов, в к-рых частицы, составляющие ядерную материю, движутся со скоростями, близкими к скорости света с. Р. я. ф. сформировалась в 1970—72 в связи с экспериментами на пучках релятивистских ядер, полученных на синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна, СССР) и на бетатроне (Беркли, США). Как составляющая часть первичного космич. излучения релятивистские ядра наблюдались с 1948 в космич. лучах.

Введение. Традиц. модели ядра как системы нуклонов рассматриваются в рамках нерелятивистской квантовой механики и описывают эксперим. факты, относящиеся к невысоким энергиям частиц — не более десятков и сотен МэВ (см. *Оболочечная модель ядра*). Релятивистские эффекты при таком подходе являются малыми поправками. В области относит. скоростей,