

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.378.3

**НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ МОЩНОГО КОГЕРЕНТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ \*)****Ф. Спрэнгл, Т. Коффи**

*Недостижимые ранее мощности излучения в диапазонах длин волн от миллиметрового до ультрафиолетового сулят использование лазера на свободных электронах и мазера на циклотронном резонансе.*

Успехи последних лет в разработке методов генерации мощного когерентного излучения предвещают возможность использования источников,

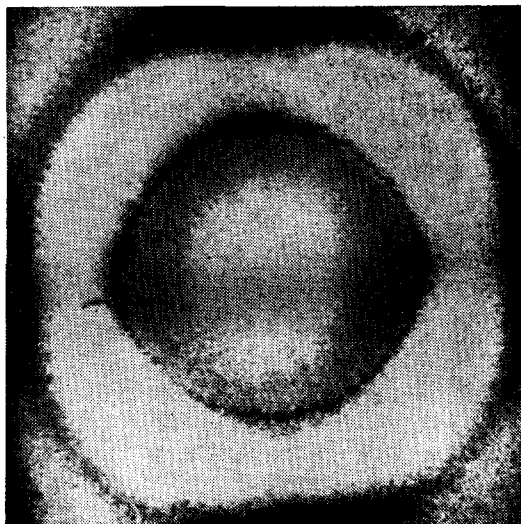


Рис. 1. Спектр спонтанного видимого излучения лазера на свободных электронах в дальней зоне.

Использовался виглер-магнит, накачка осуществлялась электронами от электрон-позитронного накопительного кольца АСО (Орса, Франция). Длина волны излучения меняется по мере смещения точки наблюдения от оси пучка

имеющих целый ряд новых впечатляющих применений. Интересно, что новые конструкции в большей степени сродни первым источникам когерентного излучения — различным микроволновым генераторам, — нежели позднейшим оптическим лазерам. В научных центрах всего мира идет ускоренная разработка источников, основанных на новой технологии, потому что такие

Sprangle Ph., Coffey T. New Sources of High-power Coherent Radiation.— Physics Today, March 1984, v. 37, No. 3, pp. 44-51.—Перевод О. А. Луговой.

Ф. Спрэнгл возглавляет отделение теории плазмы, Т. Коффи является руководителем исследований в Научно-исследовательской лаборатории ВМС в Вашингтоне, шт. Колумбия, США.

© American Institute of Physics, 1984.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1985.

источники дают большие возможности расширения доступного на сегодня диапазона длин волн и уровней мощности в сочетании с высокой эффективностью. Это благотворно скажется на таких областях применения источников как спектроскопия, ускорители усовершенствованного типа, коротковолновый радар, нагрев плазмы в термоядерных реакторах.

Классические источники когерентного излучения — магнетрон, клистрон, устройства с бегущей волной — имеют на низких частотах ограниченные выходную мощность и эффективность. Для преодоления этих ограничений предлагались как новые механизмы, так и модификации традиционных подходов. Сейчас большое внимание привлекают два типа источников, впервые увидевшие свет около 1960 года: лазер на свободных электронах и мазер на циклотронном резонансе; общим для обеих конструкций является наличие пучка релятивистских электронов.

Мы начнем статью с краткого описания физических механизмов, лежащих в основе этих и других новых источников излучения. Затем мы коснемся некоторых настоящих и будущих областей их применения и дадим обзор соответствующих экспериментальных программ. Лазер на свободных электронах обладает 20%-ной эффективностью при излучении миллиметровых длин волн и допускает расширение диапазона до ультрафиолетовой области при сохранении перестраиваемости в относительно широких пределах. На рис. 1 показан спектр излучения лазера на свободных электронах в видимой области.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Термины «лазер на свободных электронах» и «мазер на циклотронном резонансе» обусловлены механизмами действия. За каждым из них стоит целый класс когерентных источников, работающих в широком диапазоне длин волн — понятия «мазер» и «лазер» давно вышли за рамки первоначальных ограничений микроволновой и видимой областями. Хотя усиление за счет вынужденного излучения (часть аббревиатуры (L)ASER—amplification by stimulated emission of radiation) — явление сугубо квантовомеханическое, для уяснения принципов работы и лазера на свободных электронах, и мазера на циклотронном резонансе достаточно классических моделей.

Электроны излучают при ускоренном движении. Если пучок электронов подвергнуть действию электромагнитного поля с подходящими поляризацией и фазой, электроны ускорятся таким образом, что начнут излучать когерентно. Условие когерентности: излучение электронов усиливает наложенное электромагнитное поле. При этом изначально электроны должны двигаться, так как излучают они за счет потери кинетической энергии. Мы называем когерентный источник усилителем, если поле прикладывается извне, и генератором, если в роли приложенного поля выступает поле спонтанного излучения отдельных электронов.

Возможная схема устройства лазера на свободных электронах (рис. 2) включает в себя электронный пучок, внешнее поле накачки и наложенное поле излучения<sup>1-4</sup>. В качестве поля накачки, обычно статического периодического магнитного поля, может использоваться любое поле, приводящее к колебаниям электронов в поперечном направлении. Хотя релятивистские эффекты не лежат в основе механизма излучения, электроны должны быть заведомо релятивистскими для излучения в коротковолновой области.

Длина волны излучения лазера на свободных электронах, в отличие от большинства классических источников, не связана жестко с размерами системы. Более того, активная среда, являющаяся полем накачки, представляет собой неделимое целое. А следовательно, и большие конструкции могут, в принципе, излучать короткие волны при высоких мощностях.

Рассмотрим обычное поле накачки — периодическое в пространстве магнитное поле, созданное виглер-магнитом — устройством для раскачки

электронного пучка; составляющие такого поля расположены перпендикулярно направлениям излучения и движения электронов (рис. 3). Запущенные в систему моноэнергетические электроны, проходя сквозь периодическое магнитное поле, совершают поперечные колебания. А поскольку направление колебаний совпадает с направлением электрического поля излучения,

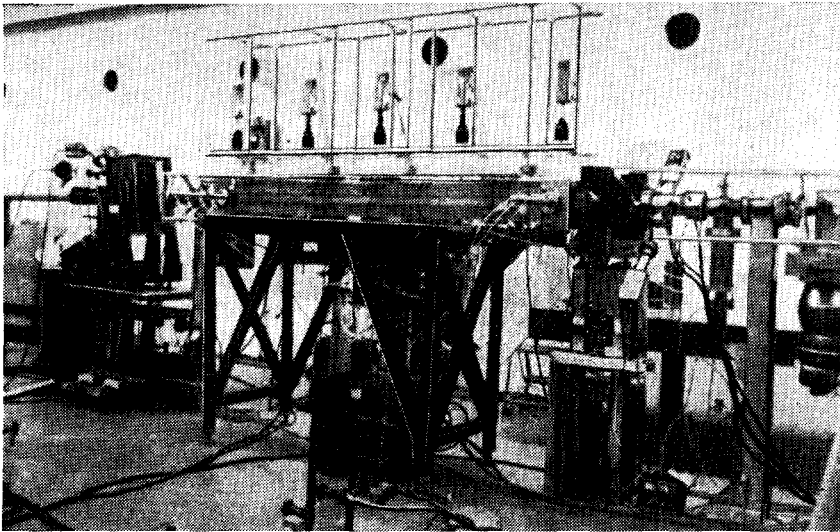


Рис. 2. Установка для экспериментов с лазером на свободных электронах, использующая радиочастотный линейный ускоритель и клиновидный виглер-магнит. На фотографии видны оборудование для измерения разброса энергии в электронном пучке (справа), клиновидный виглер-магнит (в центре) и электронный спектрометр с временным разрешением (слева). (Установка компаний «Mathematical Sciences Northwest Inc» и «Boeing Aerospace Company»)

электроны могут обмениваться энергией с полем излучения. На входе в систему электроны расфазированы и излучают некогерентно; это спонтанное тормозное излучение. В дальнейшем так называемая пондермоторная волна — следствие биений поля излучения и поля виглер-магнита — группирует электроны в зоне взаимодействия, что создает, как мы позже увидим,

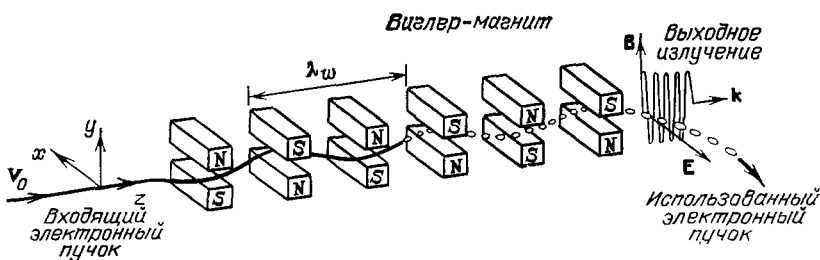


Рис. 3. Основные элементы конструкции лазера на свободных электронах.

Поле накачки создается периодически расположенными магнитами — «виглер-магнитом», — расфазивающими электроны в поперечном направлении. Небольшая поперечная составляющая скорости, называемая скоростью раскачки, совпадает по направлению с электрическим полем излучения E, что может стать причиной потери электронами энергии, идущей на усиление поля излучения

условия когерентного излучения. Происхождение пондермоторной, или захватывающей, волны, вызывающей группировку электронов по осевому направлению, связано с действующей на электроны силой Лоренца, пропорциональной произведению векторов скорости и магнитного поля  $[vB]$ . Продольная пондермоторная волна, возбуждающая волну плотности, похожа на медленную бегущую электромагнитную волну в классических генера-

торах бегущей волны. Пондермоторная волна группирует электроны, замедляя одни и ускоряя другие. Если осевая скорость электронов  $v_0$  несколько превышает скорость пондермоторной волны, средняя энергия электронов падает, усиленная поле излучения. Слишком большой разброс в скоростях может ухудшить сгруппированность электронов, а тем самым, и условия отдачи энергии, особенно на коротких длинах волн.

В выражение [vV] для силы, обуславливающей пондермоторную волну, входят скорость колебаний электронов  $v_w$ , обычно много меньшая осевой скорости  $v_0$ , и магнитное поле излучения  $B_R$ . Частота и волновое число излучения в вакууме связаны соотношением  $\omega = ck$ . Фазовая скорость пондермоторной волны  $U_{ph}$  рассчитывается как  $\omega/(k + k_w)$ , где  $k_w$  — волновое число колебаний электронов; она примерно равна осевой скорости электронов  $v_0$ . Условие синхронизма для потока сгруппированных электронов задает частоту излучения

$$\omega = \frac{v_0 k_w}{1 - (v_0/c)}$$

Длина волны излучения  $\lambda$  для релятивистских электронов составляет примерно  $\lambda_w/2\gamma_0^2$ , где  $\gamma_0$  — релятивистский гамма-фактор, равный  $(1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$ , а  $\lambda_w$  — длина волны колебаний электронов, указанная на рис. 3. Длина волны излучения значительно меньше длины волны колебаний и может варьироваться путем изменения энергии электронного пучка.

Возможен вариант конструкции, включающий еще продольно ориентированное магнитное поле<sup>5</sup>. Такая конфигурация со скрещенными полями является, как мы увидим позже, основной чертой мазера на циклотронном резонансе.

В зависимости от природы источника электронного пучка и способа взаимодействия электронов лазеры на свободных электронах подразделяются на типы<sup>1-4</sup>. Лазеры на свободных электронах, основанные на слабых источниках электронного пучка, таких как высокочастотные линейные ускорители, микротроны или накопительные кольца, обычно работают в комптоновском режиме: коллективные эффекты и влияние пространственного заряда несущественны, так как взаимодействуют преимущественно отдельные частицы. В этом режиме усиление излучения — скорость нарастания по длине взаимодействия — обычно мало. На практике источники такого рода являются генераторами с низким приростом излучения: без дополнительного усиления их эффективность не превышает 1%. При высококачественных (т. е. с малым разбросом по энергиям) электронных пучках больших энергий лазеры на свободных электронах могут работать в комптоновском режиме в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах.

Другие лазеры на свободных электронах основаны на интенсивных пучках релятивистских электронов, испущенных такими источниками как индукционные линейные ускорители или сильноточные импульсные ускорители с формирователями на передающей линии, описанные Г. Флейшманом<sup>6</sup>. Эти лазеры работают в рамановском режиме, при котором на скорость нарастания излучения и эффективность взаимодействия влияют коллективные эффекты. Тем не менее рабочая длина волны сохраняет примерно то же, что и в комптоновском режиме, значение  $\lambda_w/2\gamma_0^2$ . Пучки импульсных сильноточных ускорителей с использованием возбуждаемых плазмой автоэмиссионных диодов характеризуются относительно пологими импульсами тока и напряжения продолжительностью несколько десятков наносекунд. Вследствие низкого качества и невысоких энергий — обычно в диапазоне мегавольт — электрон-вольт — электронных пучков, область действия лазера на свободных электронах ограничена миллиметровыми длинами волн. Но если токи в пучке достигают килоампер, лазер может работать как усилитель.

Третьему рабочему режиму, известному как комптоновский режим с высоким коэффициентом усиления, присущи черты как комптоновского,

так и рамановского режимов. В этом случае виглер-магнит создает столь сильное поле, что действие на электроны пондермоторной силы преобладает над действием пространственного заряда, что и обеспечивает существенное усиление излучения.

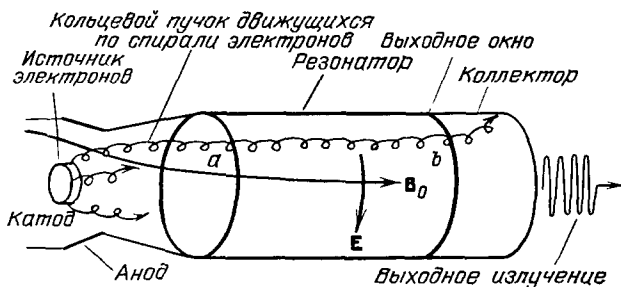
### Мазеры на циклотронном резонансе

Мазеры на циклотронном резонансе разработаны гораздо более детально, чем лазеры на свободных электронах. Это одно из наиболее эффективных устройств для генерации когерентного излучения высокой мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах <sup>7</sup>. Механизм действия был независимо друг от друга предложен в конце 50-х годов Р. К. Твиссом, Ю. Шнайдером, А. Гапановым и Р. Пэнтеллом. Их ранние теоретические выкладки показали, что совокупное действие релятивистских эффектов и эффектов гирации моноэнергетических электронов в магнитном поле могли скорее привести к вынужденному циклотронному излучению, чем поглощению. О первом вполне четком экспериментальном подтверждении этого механизма сообщили в 1964 г. Дж. Гиршфилд и Дж. Уочтел. Основанные на указанном механизме приборы — будь то генераторы или усилители — называются гиротронами.

Дальнейшая разработка концепции гиротрона вплоть до практического использования его в качестве источника излучения была проведена в 60—70-х годах советскими учеными, преимущественно в Горьковском государственном университете <sup>8</sup>. В 70-е годы существенные успехи были также достигнуты в США — в Научно-исследовательской лаборатории ВМС в Вашингтоне, в Массачусетском технологическом институте, в Йельском университете, на фирмах «Varian» и «Hughes». Поразительны полученные в миллиметровом диапазоне эффективности и мощности. Так, уже в 1975 г. группа

Рис. 4. Схематический вид мазера на циклотронном резонансе в качестве генератора.

Источником электронов служит магнетронная инжекционная пушка. Катод излучает кольцевой пучок, закручивающийся по мере прохождения через резонатор вокруг приложенного магнитного поля  $B_0$ . Резонатор работает в поперечной электрической моде вблизи критической частоты. Используемый электронный пучок собирается, а излучение высвечивается через выходное окно.



На рис. 5 сравнивается равномерное распределение электронов по фазам (в сечении *a*) со случаем фазировки (в сечении *b*)

Горьковского университета разработала 22-киловаттный генератор непрерывного режима, излучавший на длине волны 2 мм с эффективностью 22%.

Ядром мазера на циклотронном резонансе является пучок почти моноэнергетических электронов, движущихся поступательно и вращающихся вокруг внешнего магнитного поля  $B_0 e_z$ , как показано на рис. 4 и 5. Наложенное электромагнитное поле вида  $E = E_0 \cos(\omega t) e_y$  хорошо аппроксимирует поле типа ТЕМ резонатора или волновода при условии, что  $\omega$  приблизительно равна одной из критических частот системы. Это приводит к когерентному излучению электронов. Электроны ведут себя подобно единичным осцилляторам в резонаторе; они вращаются вокруг магнитного поля  $B_0$  с циклической частотой  $\Omega_R = \Omega_0/\gamma$ , где  $\Omega_0$  — нерелятивистская циклотронная частота, равная  $eB_0/m_0c$ , а  $\gamma$  — обычный релятивистский множитель, вычисляемый по поперечной скорости вращения электронов  $v_{\perp}$ .

Чтобы понять процесс усиления, рассмотрим для простоты только 8 электронов, первоначально распределенные равномерно и вращающиеся

по часовой стрелке по круговым орбитам (см. рис. 5, *a*). Если поле излучения первоначально поляризовано, как показано на рисунке, а частота вращения электронов  $\Omega_R$  несколько меньше частоты излучения  $\omega$ , частицы в верхней полушлоскости рисунка ( $x > 0$ ) приблизятся к резонансу с полем излучения, и, следовательно, часть их энергии передается полю, а частота вращения повысится. В нижней же полушлоскости частицы удалятся от резонанса, выиграв таким образом в энергии и понизив частоту вращения. Общий результат процесса известен под названием «фазировка»; через целое число периодов  $2\pi/\omega$  большинство электронов окажется в верхней полушлоскости, т. е., теряя энергию, будет усиливать поле. Для выполнения этого

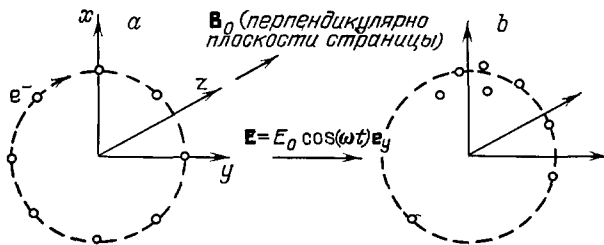


Рис. 5. Фазовое распределение движущихся по спирали электронов.

Это упрощенное представление отражает начальное распределение по фазам (соответствует сечению 'а' на рис. 4) и распределение после целого числа волновых периодов (сечение 'b' на рис. 4)

механизма необходимы лишь некоторое превышение частоты излучения над частотой вращения, зависимость частоты вращения от энергии и примерно одинаковая у всех электронов поперечная скорость вращения  $v_1$ . Длина резонатора подбирается таким образом, чтобы на входе в него средняя энергия электронов была минимальна.

Условием высокой эффективности является большая величина отношения поперечной скорости электронов к продольной  $v_1/v_2$ . Обычно она имеет значение от 1 до 3, что обеспечивает эффективность до 60%.

#### ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В конечном счете значимость новых источников когерентного излучения будет в большей степени определяться применимостью, чем собственно новизной. Лазеры на свободных электронах и мазеры на циклотронном резонансе в качестве источников предоставляют блестящие возможности для задач спектроскопии, техники ускорителей, радаров и нагрева плазмы.

#### С п е к т р о с к о п и я

На основе исследований Национальной академии наук США<sup>9</sup> можно сделать заключение о перспективности использования лазера на свободных электронах в качестве источника в спектроскопии дальней инфракрасной области (длина волны больше 25 мкм) и ультрафиолетовой области (длина волны не превышает 200 нм). Характерные для этого лазера когерентность, узость линии излучения, перестраиваемость и стабильно высокая мощность были бы особенно важны в физике твердого тела, в химии поверхности, а также в спектроскопии атомов, молекул и ионов. Короткая длительность импульсов, а следовательно, высокая пиковая мощность, обеспечиваемая некоторыми лазерами на свободных электронах, открыла бы дорогу новым применениям излучения в диапазоне от 25 до 1000 мкм. С помощью импульсов длительностью десятки пикосекунд можно было бы следить за динамикой носителей заряда в полупроводниках и за динамикой фононов, плазмонов и щелей в энергетическом спектре сверхпроводников. Мощные перестраиваемые пикосекундные импульсы с длинами волн до 200 нм позволили бы существенно расширить исследования в области быстротекающих химических процессов, фотохимии и многофотонных процессов колебательной релаксации.

### У с к о р и т е л и

Как отмечалось на конференции по лазерному ускорению частиц<sup>10</sup>, доступные мощные источники сантиметровых волн могли бы привести к сокращению размеров ускорителей высокой энергии. В классических высокочастотных ускорителях применяются клистроны с пиковой мощностью около 25 МВт. Недавние исследования показывают, что с помощью лазера на свободных электронах и мазера на циклотронном резонансе можно достичь гигавайт в пике. Такое увеличение мощности могло бы означать сокращение количества мощных электронных ламп и, возможно, общее удешевление. Однако, прежде чем столь высокая мощность этих источников в сочетании с приемлемыми эффективностью и стабильностью будет достигнута, исследователям еще предстоит решить ряд практических и научных проблем.

Осуществлять ускорение частиц, возможно, позволит обращение динамики лазера на свободных электронах<sup>10</sup>. Электрическое поле интенсивного лазерного пучка, испускаемого, например, CO<sub>2</sub>-лазером, может вместе с виглер-магнитом создать пондермоторную волну большой амплитуды, захватывающую и ускоряющую электроны. Увеличение периода или амплитуды поля виглер-магнита — или того и другого вместе — позволило бы повысить энергию захваченных электронов. Градиент ускоряющего поля может превосходить 100 МэВ/м, однако, вследствие дифракции лазерного луча, ограничивающей длину ускорения, электроны набрали бы в лучшем случае несколько гигаэлектрон-вольт за один проход. Основная проблема состоит в том, чтобы снова фокусировать лазерный луч для многокаскадного ускорения.

### Р а д а р

Область действия большинства радаров — в силу доступности мощных электронных ламп и других деталей для излучения волн сантиметрового диапазона, а также малости в этом диапазоне атмосферных потерь — сводится к микроволнам. Применение лазера на свободных электронах и мазера на циклотронном резонансе сулит создание радара на миллиметровых длинах волн. Поглощение же в атмосфере, в целом более высокое в миллиметровой области, имеет минимумы на 35; 94; 220 и 325 ГГц. По сравнению с классическими микроволновыми радарными, радары в миллиметровом диапазоне обладали бы более узкими лучами, более широкими полосами и маленькими антеннами. Узкие пучки делают возможным слежение при подъеме объекта на малые углы. Широкие полосы повышают сопротивление побочным сигналам или — в случае военного использования — устойчивость против электронных контрмер, а также обеспечивают высокое разрешение. Миллиметровые волны в меньшей степени подвержены влиянию тумана, облаков, дождя и дыма, чем волны оптического и инфракрасного диапазонов.

При создании радара на миллиметровых волнах предстоит преодолеть целый ряд сложностей. Для обычного мазера на циклотронном резонансе, использующего большие магнитные поля, необходимы сверхпроводящие магниты. Лазеры на свободных электронах, даже в миллиметровом диапазоне, на сегодняшний день слишком велики для большинства случаев применения радара; проблему составляют и необходимые для их работы высокие напряжения. До сих пор еще одна практическая трудность состояла в нехватке деталей для миллиметрового диапазона, но сейчас их производство быстро развивается.

### Т е р м о я д е р н а я э н е р г и я

Проблемы нагрева плазмы все еще стоят на пути практического создания термоядерных реакторов с магнитным удержанием. Некоторые из этих проблем можно решить с помощью применения мощных источников миллиметровых волн.

Недавно проведенные эксперименты на ISXВ-токамаке в Ок-Ридже, где использовался разработанный в Научно-исследовательской лаборатории ВМС (Вашингтон, США) 35-гигагерцевый мазер на циклотронном резонансе, продемонстрировали существование значительного поглощения, обусловленного электронным диамагнитным резонансом<sup>7</sup>. В результате поглощения электроны сильно разогревались, а ионы, как и следовало ожидать при низкой плотности плазмы, сколько-нибудь заметному нагреву не подвергались. Из этих результатов следует, что мощные мазеры на циклотронном резонансе могут разогревать плазму в термоядерных реакторах при требуемых высоких плотностях и больших временах удержания. По сравнению с мазерами на циклотронном резонансе, лазеры на свободных электронах, предположительно, менее эффективны для генерации миллиметровых волн, а следовательно, и менее пригодны для нагрева плазмы.

Успех в применении источников когерентного излучения в любой из обсуждаемых выше областей оказался бы важным шагом вперед. Впрочем, как и в других случаях технических новшеств, можно ожидать и непредвиденного; нам же надлежит охарактеризовать наиболее важные применения.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛЕНИЯ

При работе в комптоновском режиме лазеру на свободных электронах присущи низкие значения усиления за проход — 0,1 и характерной эффективности — 1%. В этом режиме характерная эффективность определяется величиной, обратной удвоенному числу колебаний на длине взаимодействия. В рамановском режиме возможны высокие значения усиления, обеспечивающие эффективности до 15%.

Эффективности работы можно заметно повысить либо путем увеличения эффективности превращения кинетической энергии электронов в энергию излучения, либо с помощью восстановления части кинетической энергии электронов после взаимодействия с захватывающей волной. В принципе, можно достичь огромного скачка в эффективности передачи энергии электронами волне — с 1% до 20% для комптоновского режима. Один из путей состоит в постепенном понижении фазовой скорости захватывающей волны, равной  $\omega/(k + k_w)$  или приблизительно с  $[1 - (\lambda/\lambda_w)]$ . Сближением составляющих виглер-магнита можно уменьшить длину волны  $\lambda_w$ , а тем самым и фазовую скорость  $U_{ph}$ . Электроны при этом по-прежнему захватываются волной и передают значительную часть кинетической энергии полю излучения.

Существует и другой способ увеличения эффективности: вместо понижения фазовой скорости  $U_{ph}$  — или параллельно с этим — к захваченным электронам прикладывают продольную ускоряющую силу, например, силу внешнего однородного аксиального электрического поля. С практической точки зрения более целесообразно уменьшить пространственную амплитуду виглер-магнита. Так или иначе, в результате достигается как раз такой фазовый сдвиг захваченных электронов, при котором они совершают над захватывающей волной работу, усиливая поле излучения. Н. Кролл в Калифорнийском университете в Сан-Диего и М. Розенблат из Техасского университета в Остине обнаружили, что в режиме работы с захватом частиц могут возникнуть нестабильности, приводящие к излучению в боковой полосе<sup>4</sup>.

Одним из методов повышения эффективности действия мазера на циклотронном резонансе является воздействие на величину поля излучения в резонаторе путем изменения радиуса стенок резонатора, как показано на рис. 6, а. Фазировка входящих в резонатор электронов начинается при малой амплитуде поля. К моменту попадания в область большого поля электроны успевают потерять сравнительно мало энергии. А поскольку степень сфазированности велика и условия резонанса ближе, излучение происходит там более эффективно.



При другом подходе, отображенном на рис. 6, б, накладывается изменяющееся по длине резонатора внешнее продольное магнитное поле. Около входа величина этого поля занижена по сравнению с требуемой величиной, так что фазировка не приводит к значительным потерям или приобретениям

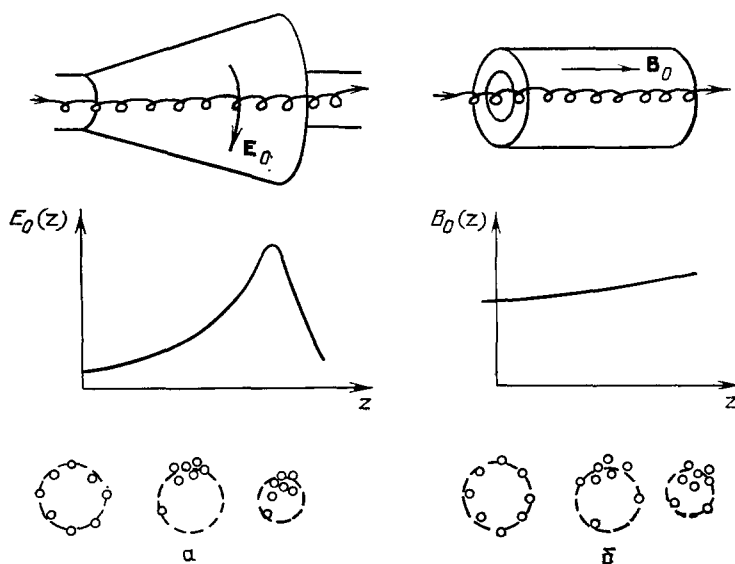


Рис. 6. Методы повышения эффективности генерации лазера на циклотронном резонансе. Представлены два наиболее часто употребляемых способа. В случае *a* радиус стенок нарастает вдоль длины резонатора. Ниже показано соответствующее изменение поля в резонаторе. В случае *б* при постоянном радиусе стенок резонатора меняется внешнее продольное магнитное поле. В нижней части изображены диаграммы фазового распределения электронов в различных точках резонатора

электронами энергии. По мере нарастания степени сфазированности, электроны, как и в первом случае, попадают в область действия большего поля и приближаются к резонансу. Заметим, что до 90% энергии продольного движения электронов может быть восстановлено.

#### ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первенство проведения эксперимента с лазером на свободных электронах в комptonовском режиме принадлежит группе Стэнфордского университета, использовавшей сверхпроводящий линейный ускоритель<sup>11,12</sup>. Схема одного из таких экспериментов, возглавленных Дж. Мэди, изображена на рис. 7, а в табл. I приведены результаты. Использовались 43-мегаваттные электронные макроимпульсы продолжительностью 1,5 мс, состоявшие из разнесенных на 25,4 м микроимпульсов длиной 1 мм. Спонтанное некогерентное излучение электронов перерастало в интенсивное когерентное излучение на длине волны 3,3 мкм, соответствующей максимуму усиления лазера на свободных электронах. Расстояние между зеркалами оптического резонатора в эксперименте группы Мэди было тщательно подобрано таким образом, чтобы время двукратного прохождения через резонатор импульса излучения соответствовало времени между электронными микроимпульсами. В присутствии электронного импульса скорость импульса излучения оказывается несколько ниже скорости света в вакууме; явление это получило название «лазерная летаргия»<sup>4</sup>. В описанном эксперименте измеренная на выходе после прохождения зеркала с коэффициентом пропускания 1,5% пиковая мощность составляла 6 кВт; таким образом, внутри резонатора эта величина достигала 400 кВт. Измеренная ширина линии  $\Delta\lambda/\lambda$  излучения при насыщении равнялась примерно 0,006. Наблюдалось хорошее совпадение измеренного значения усиления за период 6% с теоретической величиной 10%.

Ч. Брау с сотрудниками в Лос-Аламосе разрабатывают высокоэффективный лазер на свободных электронах в качестве источника генерации на длине волны  $40,6$  мкм с использованием радиочастотного линейного ускорителя <sup>4,12,13</sup> (см. *Physics Today*, August 1983, p. 17). Исследователи

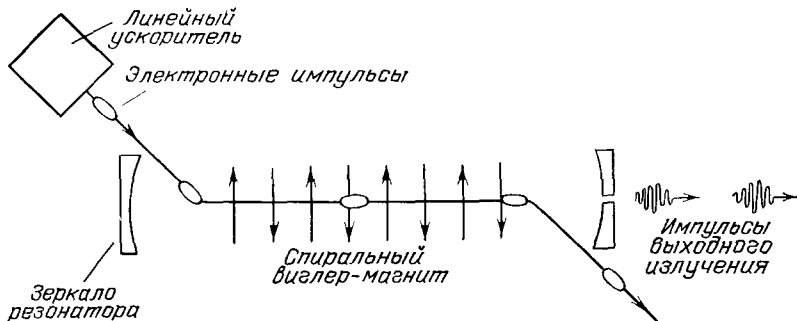


Рис. 7. Генератор с использованием импульсного электронного пучка.

Это схема типичного лазера на свободных электронах в качестве генератора. Источником служит радиочастотный линейный ускоритель. Расстояние между электронными импульсами и длина резонатора подобраны так, чтобы отраженные импульсы излучения были синхронизированы с входящими электронными импульсами. Правое зеркало обладает небольшой пропускной способностью, так что большая часть импульсов излучения остается в резонаторе. Компоненты виглер-магнита отстоят друг от друга на расстояние  $3,3$  см, общая его длина  $5,3$  м. Величина магнитного поля составляет  $2,3$  кГс

намерены пространственно варьировать длину волны и амплитуду поля виглер-магнита и восстанавливать часть энергии использованного электронного пучка. Они рассчитывают добиться эффективности  $20\%$  и средней выходной мощности  $100$  кВт.

В фирмах «Mathematical Sciences Northwest» и «Boeing Aircraft» группа, возглавляемая Дж. Слейтером, разрабатывает лазер на свободных электронах с генерацией в оптической области на длине волны  $0,5$  мкм <sup>12,13</sup>. Здесь применяется пучок от радиочастотного линейного ускорителя с пиковым током  $100$  А.

В недавно проведенных в Научно-исследовательской лаборатории ВМС экспериментах с лазером на свободных электронах использовался интенсивный пучок релятивистских электронов от импульсного ускорителя; получено излучение на длине волны  $4$  мкм при мощности  $35$  МВт и эффективности  $2,5\%$  <sup>13</sup> (см. табл. I). Энергетический разброс во входном электронном пучке был ничтожно мал. Как явствует из табл. I, экспериментальные программы Колумбийского университета, Массачусетского технологического института и Политехнической школы (Париж) также рассчитаны на использование сильноточных импульсных пучков.

В Калифорнийском университете в Санта-Барбаре Л. Элиасом и Дж. Рэммианом проводятся эксперименты с 6-мегаваттным ускорителем Ван-де-Граафа с целью оценить схему восстановления энергии с непосредственной связью <sup>4,12</sup> (см. табл. I). Конструкция их лазера на свободных электронах предусматривает достижение выходной мощности  $12$  кВт при излучении на  $200$  мкм.

Как видно из табл. I, в двух лабораториях США ведутся также эксперименты с лазером на свободных электронах с применением индукционных линейных ускорителей, причем в обоих случаях в режиме высокого усиления. Эксперименты такого рода, осуществляемые под руководством К. Капетанакоса и Дж. Пэсауера в Научно-исследовательской лаборатории ВМС, отличает уникальная — примерно  $2$  мкс — продолжительность импульса, позволяющая лазеру на свободных электронах работать в режиме генератора. Сейчас этот лазер на свободных электронах работает как сверхизлучающий усилитель на длине волны  $8$  мкм с мощностью  $4,2$  МВт и эффективностью  $3\%$ . В экспериментах Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса (США), возглавляемых Д. Просницем и Э. Сесслером, используется ускоритель ETA (Experimental Test Accelerator), рассчитанный на  $5$  МэВ.

Таблица I

Эксперименты с лазерами на свободных электронах  
(в табл. I—II приведены типичные значения величин)

а) С использованием ВЧ линейных ускорителей и микротронов

Лаборатория	Класс	Длина волны, мкм	Энергия пучка, МэВ	Пиковый ток, А
Стэнфордский университет	Усилитель	10,6	24	0,1
»	Генератор	3,3	43	1,3
Лос-Аламос	Усилитель	10,6	20	10
»	Генератор	10,6	20	30—0
«Mathematical Sciences North-west»/«Boeing»	Усилитель	10,6	20	5
TRW	»	10,6	25	10
TRW/Стэнфордский университет	Генератор	1,6	66	0,5—2,5
Научно-исследовательская лаборатория ВМС (Вашингтон, США)	»	16,0	35	5
Лаборатории «Bell» (микротронный источник пучка)	Усилитель	100—400	10—20	5
Фраскати	»	16	20	0,6

б) С использованием пучков от сильноточных импульсных ускорителей

(типичная длительность импульса — десятки наносекунд)

Лаборатория	Пиковая мощность, МВт	Длина волны, мм	Энергия пучка, МэВ	Ток в пучке, кА
Научно-исследовательская лаборатория ВМС (Вашингтон, США)	1	0,4	2	30
То же	35	4	1,35	1,5
То же/Колумбийский университет	1	0,4	1,2	25
Колумбийский университет	8	1,5	0,86	5
»	1	0,6	0,9	10
Массачусетский технол. ин-т	1,5	3	1	5
Политехническая школа (Париж)	2	2	1	2

в) С использованием электростатических и индукционных линейных ускорителей

Лаборатория	Ускоритель	Длина волны, мм	Энергия пучка, МэВ	Пиковый ток, А
Калифорнийский университет в Санта-Барбаре	Электростатический ускоритель	0,1—1	6	2
То же	То же	0,36	3	2
Научно-исследовательская лаборатория ВМС (Вашингтон, США)	Индукционный линейный ускоритель	8	0,7	200
Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США)	То же	3—8	4	400

г) С использованием накопительных колец

Лаборатория	Накопительное кольцо	Длина волны, мкм	Энергия пучка, МэВ	Ток в пучке, А	Усиление за проход, %
Орсэ	ACO	0,5	240	2 (пиковый) 0,03 (средний)	0,07 (измерено)
Фраскати	ADONE	0,5	600	10 (пиковый) 0,1 (средний)	0,02 (измерено)
Новосибирск	ВЭПП-3	6	340	20 (пиковый)	0,4 (измерено)
Брукхейвен	VUV	0,35	500	108 (пиковый) 1,0 (средний)	2 (рассчитано)
Стэнфордский университет	ARRL (планируется)	0,5	1000	200 (пиковый) 1,0 (средний)	—

Благодаря короткому (30 нс) импульсу ускорителя, лазер может работать как усилитель.

В ряде экспериментов с лазерами на свободных электронах используются электронные накопительные кольца с размещенным в одном из прямолинейных участков виглер-магнитом (см. табл. I). В одной из таких работ, возглавляемых К. Пеллигрини в Брукхейвенской Национальной лаборатории, будут достигнуты значения энергии 500 МэВ и пикового тока — 108 А, усиление должно составить несколько процентов на длине волны 0,35 мкм.

#### Направления дальнейших исследований

Ч. Робертсон с сотрудниками из Управления военно-морских исследований (США) предлагают для накачки лазеров на свободных электронах использовать циклические электронные пучки, испускаемые кольцевыми индукционными ускорителями с прямолинейными промежутками или модифицированными бетатронами<sup>4</sup>. Однако развитие таких источников пока находится в стадии проверки основополагающих принципов.

Поскольку длины волн виглер-магнитов обычно составляют, по крайней мере, несколько сантиметров, для оптических лазеров на свободных электронах нужны электронные пучки с энергиями не менее 50 МэВ. Эти значения можно было бы понизить, если использовать высокочастотную электромагнитную накачку, например интенсивный лазерный луч или выходное излучение другого лазера на свободных электронах. При накачке от CO<sub>2</sub>-лазера в электронном пучке с энергией 1 МэВ лазер на свободных электронах может, в принципе, излучать на оптических частотах.

Другую интересную возможность избежать высоких энергий пучка предоставляет двухкаскадный лазер на свободных электронах с единственным электронным пучком. Излучение, получаемое на первом этапе, когда используется виглер-магнит, могло бы послужить полем накачки для второго этапа. Правда, в этой схеме, как и в модели с применением лазера для генерации электромагнитного поля накачки, мало усиление за период; а поскольку необходимы пучки с необычайно низким энергетическим разбросом, малой оказывается и эффективность захватывания электронов.

По ожиданиям, мощности электронных импульсов ускорителя АТА (Advanced Test Accelerator) будут достигать 500 ГВт, что, в принципе, позволило бы получить перестраиваемые мультитигаваттные импульсы излучения на частотах, близких к оптическим.

#### Эксперименты с мазерами

При работе с мазерами на циклотронном резонансе для формирования электронных пучков обычно применяют магнетронные инжекционные пушки (см. рис. 4). В пучках, генерируемых термоэлектронными источниками, токи составляют несколько ампер, а энергии электронов — 100 кэВ.

Чтобы мазер на циклотронном резонансе генерировал в миллиметровом диапазоне, экспериментаторы обычно используют поля от сверхпроводящих источников. Так, для генерации излучения с частотой 94 ГГц, или длиной волны 3 мм, при работе на основной циклотронной частоте необходимо магнитное поле 34 кГс. Применения сверхпроводящих магнитов можно избежать, если перейти к работе на высших циклотронных гармониках, поскольку приблизительно величина требуемого магнитного поля обратно пропорциональна номеру гармоники. На второй гармонике сохраняется высокая эффективность, которая при определенных конструкциях может даже превышать эффективность на основной частоте. Однако, в общем случае, при дальнейшем повышении номера гармоники эффективность резко падает.

Уровень развития установок высокой мощности можно проиллюстрировать на примере работ советских ученых в Горьковском университете<sup>14</sup>.

Ими получено излучение мощности 1,25 МВт на 45 ГГц (6,7 мм) с длительностью импульса от 1 до 5 мс, а также излучение мощности 1,1 МВт на 100 ГГц (3,0 мм) с длительностью импульса 100 мкс. Оба генератора используют основную циклотронную частоту с эффективностью 34%. Другое впечатляющее достижение горьковских ученых представлено 120-киловаттным мазером на циклотронном резонансе, излучающим на 375 ГГц (0,8 мм) при длительности импульса 0,1 мс<sup>15</sup>. Существенный результат достигнут недавно и американской группой Р. Темкина с сотрудниками в Массачусетском технологическом институте: излучение мощности 180 кВт на частоте 140 ГГц.

Увеличение объема резонатора, имеющее целью избежать дополнительных термических нагрузок и межмодовой конкуренции, приведет к тому, что мазеры на циклотронном резонансе должны будут работать с перегруженным модами резонатором, т. е. с резонатором, настроенным одновременно на много частотных мод. Недавно полученные результаты свидетельствуют о том, что такие перегруженные модами мазеры на циклотронном резонансе можно стабилизировать путем установки перед основным резонатором, осуществляющим перекачку энергии, маленького резонатора для предварительной группировки электронов<sup>16</sup>.

Надежды на практическое применение усилителей на циклотронном резонансе велики. Например, ученые в Научно-исследовательской лаборатории ВМС добились поразительных значений усиления — от 18 до 56 дБ

Таблица II

Эксперименты с мазером на циклотронном резонансе в США

## а) Генераторы

Лаборатория	Частота, ГГц	Мощность, кВт	Эффективность, %	Длительность импульса
«Varian»	28	340	45	Непрерывный режим работы
»	60	120	38	То же
Научно-исследовательская лаборатория ВМС (Вашингтон)	35	340	54	1 мкс
Массачусетский технологический институт	140	180	30	1 мкс
«Hughes»	60	240	30	100 мс

## б) Усилители

Лаборатория	Частота, ГГц	Мощность, кВт	Эффективность, %	Длительность импульса, мкс	Ширина линии, %
Научно-исследовательская лаборатория ВМС (Вашингтон)	35	10	8	1,5	2—13
«Varian»	28	65	9	1000	1
»	5	120	26	50	6
Йельский университет	6	20	10	1	11

в широкой используемой полосе, и это на частоте 35 ГГц (8,5 мм), при мощности 10 кВт<sup>7,17</sup>. В табл. II отражены результаты экспериментов, проведенных в США с усилителями и генераторами на циклотронном резонансе.

Замена обычного резонатора открытым позволяет работать в субмиллиметровом диапазоне, осуществлять селекцию мод и достигать исключительно высоких мощностей<sup>18</sup>. Многообещающие предварительные эксперименты в этом направлении, проводимые в Йельском университете<sup>19</sup>.

## Д р у г и е н о в ы е и с т о ч н и к и

Многие группы ведут активную разработку новых способов генерации мощного излучения. Один из них — неизохронная отражающая электронная система: сильноточный пучок образует виртуальный катод; испущенные электроны колеблются между реальным и виртуальным катодами, группируются по фазам и генерируют мощное излучение. В экспериментах авторов с этим компактным, простым и легко перестраиваемым источником было получено излучение с длиной волны 3 см мощности 100 МВт<sup>20</sup>.

Не столь нов, но интересен источник миллиметровых волн, основанный на когерентном излучении Вавилова — Черенкова — Черенкова. В некоторых экспериментах такое излучение осуществляется пучком релятивистских электронов, движущихся вдоль диэлектрической поверхности. В работах Дж. Уолша, К. Фелча и др. в Дартмутском колледже достигнута эффективность 10% и мощность 100 кВт на длине волны 4 мм<sup>4</sup>.

Невиданно высокими характеристиками обладает когерентное излучение в сантиметровом диапазоне, создаваемое новым релятивистским магнетроном. В экспериментах группы под руководством Дж. Бекефи в Массачусетском технологическом институте при использовании релятивистского магнетрона с импульсным пучком электронов получено микроволновое излучение мощности 10 ГВт<sup>21</sup>.

Как явствует из истории науки, теоретические концепции и технические приложения обычно развиваются рука об руку. Что касается мощных источников когерентного излучения, мы являемся сейчас свидетелями быстрого прогресса в обеих этих областях. Полное же понимание процессов и, возможно, наиболее важные применения этой техники — дело будущего.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kroll N. M., McMullin W. A.— Phys. Rev. Ser. A, 1978, v. 17, p. 300.
2. Коломенский А. А., Лебедев А. Н.— Квант. электрон., 1978, т. 5, с. 1543.
3. Sprangle P., Smith R. A., Granatstein V. L.— In: Infrared and Millimeter Waves. V.1/Ed. K. J. Button.— N.Y.: Academic Press, 1979.
4. Free Electron Generators of Coherent Radiation/Ed. S. F. Jacobs, H. S. Piloff, M. Sargent III, M. O. Scully, R. Spitzer.— Reading, Mass: Addison-Wesley, 1980.— (Physics of Quantum Electronics Series. V. 7—9).
5. Davidson R., McMullin W.— Phys. Fluids, 1983, v. 26, p. 840.
6. Fleischmann H.— Phys. Today, May 1975, p. 35.
7. Granatstein V. L., Read M. E., Barhett L. R.— Цит. в <sup>3</sup> сб., 1982, v. 5.
8. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1977, v. MTT-25, No. 6 (spec. issue).
9. The Free Electron Laser: The Report of the Free Electron Laser Subcommittee of the Solid State Sciences Committee, National Academy of Sciences.— Washington, D.C.: Nat. Academy Press, 1982.
10. Laser Acceleration of Particles/Ed. P. J. Channel.— AIP Conf. Proc., 1982, No. 91.
11. Elias L. R., Fairbanks W. M., Madey J. M. J., Schwettman H. A., Smith T. I.— Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, p. 717.
12. Bendor Free Electron Laser Conference.— J. de Phys., 1983, t. 44, Cl.
13. IEEE J. Quantum Electron, 1983, v. QE-19 (a spec. issue on free-electron lasers).
14. Andronov A. A., Flyagin V. A., Гапонov A. V., Goldenberg A. L., Petelin M. I., Usov V. G., Yulpatov V. K.— Infrared Phys., 1978, v. 18, p. 385.
15. Flyagin V. A., Luchinin A. G., Nusinovich G. S.— Intern. J. Infrared and Millimeter Wave, 1982, v. 3, p. 765.
16. Carmel Y., Chu K. R., Read M., Ganguly A. K., Dialetis D., Seeley R., Levine J. S., Granatstein V. L.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 112.
17. Barnett L. R., Lau Y. Y., Chu K. R., Granatstein V. L.— IEEE Trans. Electron Devices, 1981, v. ED-28, p. 872.
18. Sprangle P., Vomvovridis J., Manheimer W.— Phys. Rev. Ser. A, 1981, v. 23, p. 3127.
19. Ebrahim N. A., Liang Z., Hirschfield J. L.— Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, p. 1556.
20. Mahaffey R. A., Sprangle P. et al.— Ibidem, 1977, v. 39, p. 843.
21. Beketi G., Orzechowski T. J.— Ibidem, 1976, v. 37, p. 379.