

GENERAL METHOD
FOR ELECTROMAGNETIC-
RADIATION GENERATION
FROM MICROWAVES
UP TO GAMMA RANGE

V. L. BRATMAN

Due to the Doppler Effect, an oscillating charged particle moving with relativistic translational velocity can radiate at frequencies which are significantly higher than its oscillation frequency. This simple and universal mechanism is widely used for the generation of sources of powerful (spontaneous and stimulated) radiation at various ranges of the electromagnetic spectrum.

Благодаря эффекту Доплера колеблющаяся заряженная частица, перемещающаяся с релятивистской поступательной скоростью, способна излучать на частотах, во много раз превышающих частоту ее колебаний. Этот простой и универсальный механизм широко используется для создания источников мощного (спонтанного и стимулированного) излучения в труднодоступных областях электромагнитного спектра.

© Братман В.Л., 1999

ОБЩИЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ СВЧ ДО ГАММА-ДИАПАЗОНА

В. Л. БРАТМАН

Нижегородский государственный университет

Традиционный раздел учебника физики “Шкала электромагнитных волн” дает для каждого частотного диапазона свой рецепт получения излучения. Специфичность этих рецептов часто используется для иллюстрации перехода количества (частоты излучения) в качество (меняются не только свойства волн, но и их источники). В то же время давно известен и широко используется единый прием, позволяющий в принципе получать излучение произвольных, в том числе и очень высоких, частот. Этот прием очень прост и имеет общефизический характер: нужно взять элементарный излучатель, например колеблющийся заряд, и заставить его двигаться с большой скоростью. Тогда благодаря эффекту Доплера в направлении перемещения заряд будет излучать на частоте, во много раз превышающей частоту его колебаний. Эта идея доплертрона была высказана более 50 лет назад будущим академиком В.Л. Гинзбургом применительно к труднодоступному диапазону миллиметровых-субмиллиметровых волн [1]. Несколько лет спустя английский физик Х. Моц выступил независимо с аналогичной идеей, предложив запускать быстрые электроны в пространственно-периодическую магнитную систему, создающую поперечное к направлению движения частицы поле – статическую магнитную волну [1]. Такая система накачки, названная ондулятором (от фр. l'onde – волна), получила впоследствии наиболее широкое распространение, хотя в относительно длинноволновых диапазонах используются и обладают определенными преимуществами перед ондуляторами также и другие методы накачки осцилляторной скорости. Доплеровское преобразование частоты излучения быстро движущихся частиц играет важную роль в ряде природных процессов, но в рамках данной статьи обсуждаются главным образом только основанные на этом эффекте методы создания мощных источников коротковолнового электромагнитного излучения.

ЭФФЕКТ ДОПЛера

Простейшим источником электромагнитных волн является колеблющийся в вакууме электрический заряд (рис. 1, а). При гармоническом характере колебаний и небольших скоростях осциллирующей такой заряд излучает в различных направлениях на частоте своих колебаний Ω . Если колеблющийся

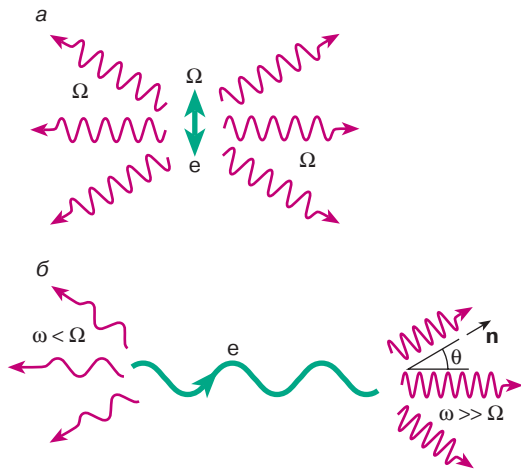


Рис. 1. Излучение заряда, гармонически колеблющегося с частотой Ω : в собственной системе отсчета излучение в разных направлениях происходит на частоте Ω (а), а в лабораторной системе, где заряд колеблется и перемещается с релятивистской поступательной скоростью \vec{V} , частота излучения вперед много больше, чем назад (б)

заряд движется с некоторой поступательной скоростью \vec{V} , то в зависимости от направления, в котором наблюдается излучение, частота излучаемой волны ω будет больше или меньше частоты колебаний заряда (рис. 1, б). Дело в том, что для острых углов θ между направлением излучения \vec{n} и скоростью \vec{V} из-за приближения источника гребни волн следуют друг за другом чаще и частота волны, очевидно, выше, чем для тупых углов. Число гребней, испускаемых электроном за время t , совпадает с числом его колебаний за то же время: $\omega t - \vec{k}\vec{r} = \Omega t$. В этом соотношении слева стоит фаза волны, равная с точностью до коэффициента 2π числу гребней, $\vec{k} = (\omega/c)\vec{n}$ – волновой вектор, c – скорость света, $\vec{r} = \vec{V}t$ – радиус-вектор электрона. Соответственно $\omega - \vec{k}\vec{V} = \Omega$ и частота излучения связана с частотой колебаний заряда формулой

$$\omega = \frac{\Omega}{1 - \beta \cos\theta}, \quad \beta = \frac{V}{c}. \quad (1)$$

Изменение частоты излучения при движении излучателя относительно наблюдателя было предсказано К. Доплером в 1842 году для звуковых и световых волн. Вскоре стало понятно, что этот эффект присущ волнам любой природы и проявляется в огромном количестве явлений (один из наиболее ярких примеров – обнаруженное в нашем веке смещение спектральных линий излучения космических

объектов, в частности космологическое красное смещение, обусловленное расширением Вселенной).

Для нерелятивистских поступательных скоростей заряда, когда $\beta \ll 1$, из формулы (1) следует, что возрастание частоты для излучения вперед ($\theta = 0$) и ее убывание для излучения назад ($\theta = \pi$) одинаковы и сравнительно невелики: $\Delta\omega = \pm\beta\Omega$. Эффект намного существеннее и указанная симметрия отсутствует для релятивистских скоростей частицы. Частота излучения, испускаемого назад, не может быть меньше половины частоты колебаний Ω . В то же время вперед могут излучаться частоты, во много раз превышающие Ω . При стремлении скорости частицы к скорости света, когда $\beta \rightarrow 1$, соответствующий доплеровский частотный выигрыш $\Gamma = \omega/\Omega$ стремится к бесконечности. Для ультрарелятивистских скоростей, используя релятивистскую связь $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ между нормированной энергией $\gamma = E/mc^2$ частицы массы m и ее скоростью, формулу для максимально возможного частотного выигрыша удобно представить в виде

$$\Gamma \approx 2\gamma^2. \quad (2)$$

Таким образом, для ультрарелятивистской частицы доплеровский выигрыш пропорционален квадрату ее энергии. Формула (2) работает уже при сравнительно небольшой энергии, когда $\gamma = 2$ и энергия частицы вдвое превышает ее энергию покоя mc^2 . При этом доплеровский выигрыш равен 7,7, а формула (2) дает 8,0. Для электрона это соответствует кинетической энергии 0,5 МэВ. При энергиях электрона 10 МэВ и 10 ГэВ доплеровский выигрыш близок к 10^3 и 10^9 соответственно. Современные ускорители позволяют получать и большие энергии частиц. Планируется даже строительство гигантских ускорителей электронов и позитронов на энергию 1 ТэВ. Если заставить колебаться частицу, обладающую такой огромной энергией, можно было бы преобразовать частоту в 10^{13} раз.

РАСКАЧКА КОЛЕБАНИЙ ЧАСТИЦ

Существует много способов сообщения быстро движущемуся заряду осцилляторной скорости. Одним из наиболее простых является встрел заряда под углом в однородное магнитное поле B_z^0 (рис. 2, а). В этом случае без учета излучения заряд движется по винтовой траектории с постоянными значениями поступательной \vec{V} и вращательной \vec{U} компонент скорости. Частота колебаний (в данном случае вращения) заряда легко находится из второго закона Ньютона

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

с учетом выражения для релятивистского импульса частицы $\vec{p} = m\gamma\vec{v}$ и силы Лоренца $\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}]$,

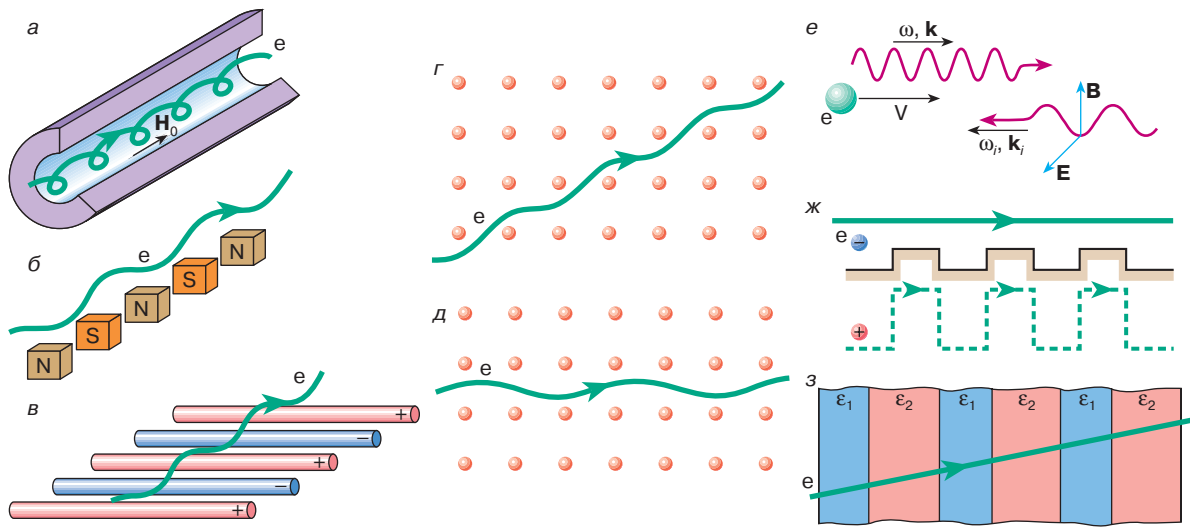


Рис. 2. Методы раскачки колебаний быстрых частиц: *а* – в однородном магнитном поле, *б* – в магнитостатическом ондуляторе, *в* – в искусственном и *г* – естественном электростатических ондуляторах (красные кружки изображают атомы), *д* – при каналировании в кристаллах, *е* – в поле волны накачки, *ж* – возбуждение и раскачка зарядов-изображений в периодических поверхностных и *з* – плоскостойких структурах

действующей на нее, где $\vec{v} = \vec{V} + \vec{U}$ – полная скорость частицы. Проецируя уравнение (3) на направление вращательной скорости и учитывая постоянство энергии частицы, получаем соотношение для так называемой циклотронной частоты $\Omega_B = \Omega'_B / \gamma$, где $\Omega'_B = eB/m$ – нерелятивистская циклотронная частота. В сильном магнитном поле циклотронная частота может быть очень большой. Например, в довольно часто получаемом сейчас поле 5–10 Тл для электрона $|\Omega'_B| = (1-2) \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Следует отметить, что циклотронная частота уменьшается с ростом релятивистского фактора γ , что снижает эффективность этого метода при очень больших энергиях частиц.

Другой, наиболее часто используемый в доплертонах метод раскачки частиц основан на использовании ондуляторов, создающих пространственно-периодическое поперечное магнитное поле. Простейший плоский ондулятор может быть образован периодической последовательностью полосовых магнитов (рис. 2, б). При пролете над чередующимися северными и южными полюсами частица отклоняется вбок то в одну, то в другую сторону, описывая траекторию, близкую к синусоидальной с пространственным периодом, равным периоду ондулятора d , и временным периодом d/V . Соответственно угловая частота ее колебаний определяется формулой $\Omega_u = 2\pi V/d$. В отличие от циклотронной частоты для ультрарелятивистских скоростей электронов ондуляторная частота Ω_u почти не зависит от их энергии.

В простейшем ондуляторе поле быстро падает при удалении от магнитов. Чтобы уменьшить этот

эффект, используют две параллельные системы магнитов, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга, либо спиральные токовые ондуляторы с бифилярной намоткой, либо более сложные системы. Удастся изготавливать ондуляторы с периодами до долей миллиметра. Но осцилляторная скорость электронов в таких ондуляторах сравнительно невелика, и, кроме того, в них можно использовать только очень тонкие и хорошо съюстированные пучки частиц. Поэтому обычно применяют ондуляторы с периодом в несколько сантиметров, в которых достигается частота колебаний $\Omega_u \sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

Возможна раскачка частиц и в электростатическом ондуляторе (рис. 2, в), но его реализация обычно более сложна, а амплитуда колебаний в нем ниже, чем в магнитном ондуляторе, вследствие возможности возникновения пробоя в сильном электрическом поле. Интересное исключение представляет естественный ондулятор с очень малым периодом и большой напряженностью, образованный полями атомов в кристаллической решетке. Период соответствующего ондулятора может равняться периоду решетки, а может и превышать его, если частица движется под углом к атомным плоскостям или рядам (рис. 2, г). В кристаллах возможен и другой, очень интересный тип движения и сравнительно низкочастотных колебаний быстрых легких частиц (электронов и позитронов). Здесь имеется в виду эффект каналирования частиц в кристаллической решетке, когда они двигаются между атомными плоскостями или вдоль цепочек атомов, проникая на очень большие расстояния и испытывая поперечные осцилляции в усредненном поле ядер и атомных электронов (рис. 2, д).

Вместо статической ондуляторной волны можно использовать обычную электромагнитную волну сравнительно низкой частоты, распространяющуюся навстречу частице (рис. 2, е). В соответствии с формулой Доплера (1) в лабораторной системе частота такой волны, воспринимаемая движущимся зарядом, определяется выражением $\Omega = \omega_i + k_i v$, где ω_i и $k_i = \omega_i/c$ – частота и волновой вектор накачки. При ультррелятивистской поступательной скорости колеблющегося заряда частота волны, излучаемой им вперед, равна $\omega \approx 4\gamma^2 \omega_i$. Процесс, в котором заряд раскачивается одной волной, а затем излучает волну другой частоты, представляет собой пример рассеяния волны на частице (фотона на электроны в квантовой интерпретации). Встречное рассеяние на ультррелятивистском заряде, происходящее с большим возрастанием частоты, представляет собой также важную иллюстрацию рассмотренного А. Эйнштейном эффекта отражения волны от быстро движущегося ей навстречу зеркала. В таком процессе (как и при отскакивании шарика от движущейся навстречу ракетки) отраженный фотон имеет намного большую энергию, чем падающий. Рассеяние волн на движущихся зарядах с изменением частоты играет важную роль во многих процессах, происходящих в космической и лабораторной плазме.

Наряду с рассмотренными выше методами сообщения движущимся зарядам осцилляторной скорости возможны аналогичные процессы, в которых электрон, пролетая без осцилляций вблизи или внутри какой-либо периодической структуры, возбуждает в ней колебания собственных зарядов (изображений). Например, электрон, летящий над отражательной дифракционной решеткой (рис. 2, ж), наводит в этой структуре заряд – изображение противоположного знака, – движущийся по периодической траектории и колеблющийся, как и заряд в ондуляторе, с частотой Ω_u . Диполь, образованный электроном и колеблющимся зарядом противоположного знака, способен излучать на частотах, определяемых той же формулой Доплера (1). Аналогичная ситуация возникает, когда заряд пронизывает периодическую последовательность пластин с чередующимися значениями диэлектрической проницаемости (рис. 2, з).

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ И КОЛЛЕКТИВНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Каждому из описанных выше методов раскачки частиц соответствует свой, отличающийся определенными особенностями механизм излучения частиц. Для всех механизмов напряженность поля излучения пропорциональна величине заряда, а мощность – квадрату заряда. Поэтому для получения значительной мощности электроны собирают в плотные сгустки, колеблющиеся и излучающие примерно в одной и той же фазе. Тем самым удается создать излучающие макрочастицы с большим заря-

дом. На первых этапах исследования доплертронов электронные сгустки формировались только заранее, до раскачки и излучения частиц. Но возможен и другой, часто более предпочтительный метод, когда сгустки образуются из первоначально однородного пучка в самосогласованном процессе, происходящем в пространстве взаимодействия электронов с волной. Этот процесс начинается с модуляции энергий частиц полем слабой волны. Затем частицы с измененными энергиями по инерции собираются в сгустки, расстояние между которыми равно длине волны. Наконец, на последней стадии образовавшиеся сгустки отдают свою энергию волне, значительно увеличивая ее мощность. Такой индуцированный процесс давно используется во многих электронных сверхвысокочастотных приборах, одним из наиболее типичных представителей которых является изобретенная в 40-е годы лампа бегущей волны. В доплертронах самосогласованное формирование сгустков и их индуцированное излучение были впервые реализованы в 1976 году (рис. 3). Соответствующие доплертроны, в которых на вход поступают несгруппированный электронный пучок и усилимый сигнал, а на выходе получается усиленное когерентное электромагнитное излучение, получили названия лазеров (ЛСЭ) и мазеров (МСЭ) на свободных электронах [2–6]. Эти не очень точные, но прочно укоренившиеся названия должны были подчеркнуть отличие указанных систем, основанных на классических принципах излучения, от обычных квантовых лазеров, в которых используется излучение связанных атомных электронов. На самом деле, действительно свободный, то есть движущийся равномерно и прямолинейно в неограниченном вакууме, заряд не излучает, а лишь переносит за собой свое квазистатическое поле. А в ЛСЭ электроны, движущиеся в классическом поле накачки, отнюдь не так уж и свободны.

Доплеровски смещенное по частоте индивидуальное излучение отдельных зарядов и заранее сформированных сгустков было обнаружено в 40–50-е годы в большом количестве наблюдений и целенаправленных экспериментов для совершенно различных физических условий. Так, циклотронное излучение наблюдалось в циклических ускорителях

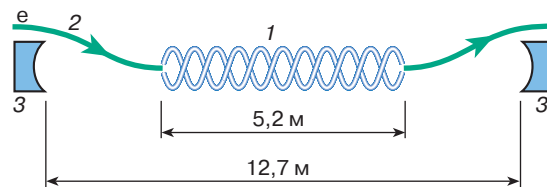


Рис. 3. Схема первого лазера на свободных электронах: 1 – сверхпроводящий ондулятор в виде бифилярной спирали, 2 – электронный пучок с энергией 43 МэВ, 3 – зеркала оптического открытого резонатора

заряженных частиц и установках управляемого термоядерного синтеза, оно играет очень важную роль в разнообразных космических объектах. В опытах Моца было получено коротковолновое излучение релятивистских электронов, движущихся в магнитных ондуляторах. В те же годы для частиц, движущихся в определенных направлениях через кристалл, было обнаружено так называемое когерентное тормозное излучение, которое легко может быть интерпретировано как излучение в естественном электростатическом ондуляторе (рис. 2, *з*). В данном случае термин “когерентное” означает лишь сложение в фазе полей излучения, испущенного одной частицей при прохождении ею отдельных периодов. Позднее было предсказано и обнаружено в эксперименте рентгеновское и гамма-излучение электронов и позитронов, каналируемых в кристаллах (рис. 2, *д*). Интересный пример доплеровского преобразования частоты колебаний дает также обнаруженное в начале 50-х годов индивидуальное излучение электронов, летящих над дифракционной решеткой (рис. 2, *ж*). Рентгеновское излучение частиц, пролетающих через стопки пластин, используется, в частности, для измерения энергий быстрых космических частиц (рис. 2, *з*).

Первые ЛСЭ, основанные на стимулированном ондуляторном излучении с большим доплеровским преобразованием частоты, были реализованы сначала

в усилительном, а затем и в генераторном (рис. 3) вариантах, на Стэнфордском (США) линейном ускорителе электронов. Этот ускоритель обеспечивал очень высокое качество электронного пучка с энергией в десятки мегаэлектронвольт. В качестве ондулятора в этих экспериментах использовалась сверхпроводящая бифилярная спираль с периодом 3 см и длиной более 5 м. Доплеровское преобразование частоты достигало для генератора 10^4 , что обеспечивало частоту генерации около 3 мкм. (Интересно отметить, что еще в 1960 году также в Стэнфорде была успешно продемонстрирована возможность получения стимулированного ондуляторного излучения в миллиметровом диапазоне в слаборелятивистском предшественнике ЛСЭ, где доплеровское преобразование частоты было относительно малым.) В большом количестве последующих экспериментов, проведенных в разных странах, были реализованы мощные МСЭ и ЛСЭ, в которых были использованы различные методы раскачки частиц. Эти источники работали в различных диапазонах волн от сантиметрового до ультрафиолетового. В конце 80-х годов работы в этой области достигли своего пика. ЛСЭ, в которых используются магнитные ондуляторы, рассматривались как один из ключевых элементов для противоракетного оружия в рамках американской стратегической инициативы (СОИ). На их разработку были потрачены огромные

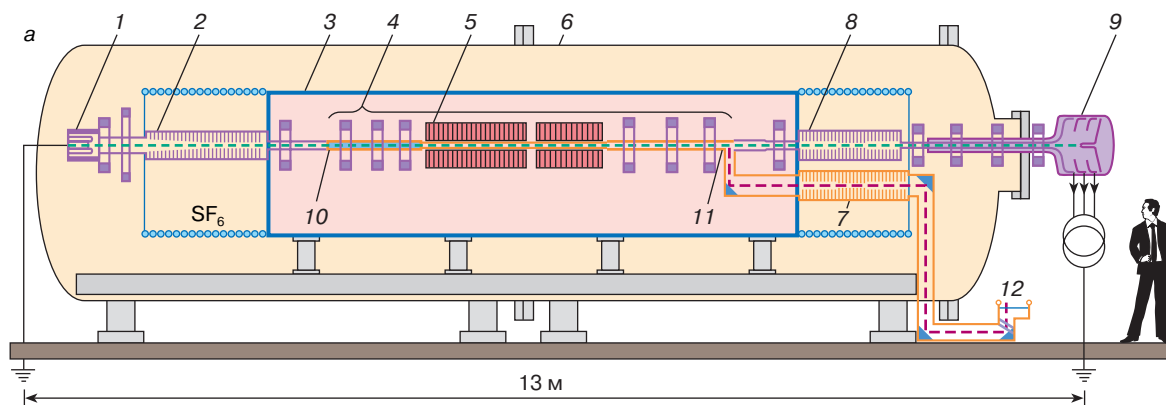


Рис. 4. Схема (а) и фотография (б) мазера на свободных электронах, предназначенного для нагрева плазмы и управления ее неустойчивостями в установках управляемого термоядерного синтеза (Институт физики плазмы, Невенхайн, Голландия; фото Robert de Klijne): 1 – электронная пушка (80 кВ, 12 А), 2 – электростатический ускоритель частиц до энергии 2 МэВ, 3 – высоковольтный терминал, 4 – открытый резонатор для излучения, 5 – двухсекционный ондулятор на постоянных магнитах, 6 – танк высокого давления, 7 – выходной волновод для излучения, 8, 9 – электростатический замедлитель и коллектор частиц при пониженном потенциале для возвращения в питающие цепи неиспользованной их энергии, 10, 11 – входной и выходной рефлекторы для излучения в резонаторе, 12 – выходное окно для излучения

средства, что позволило создать довольно совершенные устройства. Учитывая значительную сложность ЛСЭ, в настоящее время их создают, как правило, лишь для работы в тех диапазонах, где другие источники отсутствуют либо малоэффективны. В настоящее время в различных лабораториях работают несколько десятков МСЭ и ЛСЭ. На многих из этих устройств проводятся уникальные исследования в ряде областей физики полупроводников, биофизики и медицины.

В Голландии предпринимаются попытки создания мощного МСЭ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн для нагрева плазмы и контроля ее неустойчивостей в установках управляемого термоядерного синтеза (в этих работах в рамках международной кооперации принимают участие также специалисты из других стран, включая автора данной статьи и его коллег). Этот источник (рис. 4) с мощностью в 1 МВт при длительности импульса излучения 0,1 с должен превосходить существующие генераторы диапазоном возможной (в том числе и быстрой) перестройки частоты излучения (100–200 ГГц), которая осуществляется простым изменением энергии частиц и соответствующей подстройкой параметров резонатора. Принципиальные моменты работы этого генератора (уровень выходной мощности, возможность получения когерентного излучения и перестройки его частоты) уже продемонстрированы в режиме генерации коротких импульсов.

Наиболее дерзкие современные проекты направлены на создание ЛСЭ в рентгеновском диапазоне. Так, на Стэнфордском (США) и Гамбургском (ФРГ) линейных ускорителях, используя электрон-

ные пучки с энергией в десятки гигаэлектронвольт и током в несколько килоампер, которые раскачиваются в ондуляторах с периодом в несколько сантиметров и длиной в десятки метров, рассчитывают получить стимулированное излучение на волнах порядка или даже меньше 0,1 нм [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Миллиметровые и субмиллиметровые волны: Сб. ст.: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 607 с.
2. Physics of Quantum Electronics. Mass., USA: Addison-Wesley, 1980. Vol. 7: Free-Electron Generators of Coherent Radiation / Ed. by S.J. Jacobs et al. 812 p.
3. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И. Лазеры на свободных электронах: Перспективы продвижения классических электронных генераторов в коротковолновые диапазоны // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44, № 8. С 1593–1602.
4. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 240 с.
5. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах: Сб. ст.: Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 282 с.
6. Free Electron Lasers 1997: Proc. XIX Intern. Free Electron Laser Conference and 4th FEL Users' Workshop / Ed. by J. Xie, X. Du. Amsterdam: Elsevier, 1998. 527 p.

* * *

Владимир Львович Братман, доктор физико-математических наук, профессор Нижегородского государственного университета, зав. лабораторией коротковолновых релятивистских электронных приборов Института прикладной физики РАН. Автор более 120 научных работ в области релятивистской высокочастотной электроники и физики плазмы.