

01;07;09;10

Особенности механизма когерентного оптического излучения в релятивистских ондуляторных приборах

© Н.Д. Девятков¹, Е.Д. Науменко¹, А.А. Рухадзе², Е.М. Смирнов¹, В.Н. Сретенский¹Институт радиотехники и электроники РАН,
103907 Москва, Россия²Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 11 ноября 1996 г.)

1. Целью настоящего методического сообщения является обсуждение некоторых особенностей механизма когерентного оптического излучения релятивистского электронного пучка волнообразной траекторией электронов в приборах, получивших название ондуляторных приборов или лазеров на свободных электронах. Волнообразная траектория электронов формируется специальным блоком, называемом вигглером (так в английском языке называют космический прибор, придающий пряди волос волнообразность). Излучение релятивистским электроном с волнообразной траекторией было впервые теоретически исследовано В.Л. Гинзбургом в 1947 г. [1], который предложил первую конструкцию прибора излучателя и получил формулу

$$\lambda = \frac{l}{2\gamma^2}, \quad (1)$$

связывающую длину излучения λ с пространственным периодом траектории l и энергией электронов, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. В рассматриваемом случае вигглер представлял собой периодически меняющееся вдоль оси системы поперечное статическое магнитное поле с периодом l .

Из соотношения (1) следует, что при достаточно большом релятивизме ($\gamma \gtrsim 30 \gg 1$) и миллиметровом шаге вигглера легко реализовать излучение в оптическом диапазоне частот $\lambda \lesssim 5000 \text{ \AA}$.

В.Л. Гинзбургом было рассмотрено спонтанное излучение одним электроном. Вместе с тем известно (см. например, [2,3]), что спонтанное излучение большого числа электронов, вообще говоря, малоэффективно. Так, спонтанное излучение полностью однородного немодулированного пучка с волнообразной траекторией отдельных электронов строго равно нулю, т. е. в результате интерпретации полей излучений отдельных несфазированных электронов полное излучение обращается в нуль. Для получения ненулевого спонтанного излучения необходима предварительная продольная модуляция пучка на длине волны излучения. При хорошей модуляции пучка достигается высокая эффективность спонтанного излучения и его когерентность подобно тому, как это имеет место в кластерах в сверхвысокочастотном диапазоне излучения. Вместе с тем высокая эффективность

и когерентность излучения автоматически достигаются в ондуляторных генераторах, в которых пучок может быть немодулирован, но имеются зеркала, отражающие излучение от торцов и осуществляющие положительную обратную связь в системе. Это происходит вследствие того, что электроны пучка попадают в поле собственного излучения и начинают вынужденно излучать, причем излучают когерентно и высокоэффективно. Очевидно, вынужденное излучение отдельных электронов пучка имеет место в ондуляторных приборах — усилителях, в которых так называемый задающий генератор подает на вход системы усиливаемое излучение.

Начало развития релятивистской электроники относится к концу 50-х годов, когда начала развиваться и квантовая электроника, в рамках которой создавались источники когерентного оптического излучения. Сопоставление механизмов вынужденного когерентного излучения в классических релятивистских и квантовых генераторах иллюстрирует корпускулярно-волновой дуализм электрона. В первом случае дискретность спектра излучения определяется дискретностью спектра собственных частот электромагнитных волн, которые могут существовать в "холодной" системе без пучка электронов. Во втором случае электроны переходят из более высокого энергетического уровня в более низкий и соответственно излучают дискретный спектр частот. Сама же электродинамическая система (резонатор) в этой области частот обладает практически непрерывным спектром частот собственных электромагнитных волн. Таким образом, механизмы вынужденного излучения в классических и квантовых приборах существенно различаются и тем не менее в развитии теории этих приборов нашлись общие подходы, что существенно обогатило физику когерентных источников излучения как квантовых, так и классических. В частности, распространение теории квантовых приборов на классические, которое в первую очередь имело место для ондуляторных приборов привело к более глубокому пониманию механизма их работы.

Напомним, что при квантовом излучении нагретого термодинамически равновесного тела имеет место спонтанное излучение. Излучение отдельных частиц случайно распределено по фазам и направлениям распространения фотонов. Хотя в пределах каждой спектральной

линии частота излучения довольно стабильна, но из-за случайности фаз суммарное излучение некогерентно, а вследствие интерференции ее эффективность практически равна нулю. Однако если в среде реализована инверсная заселенность уровней, то в результате переизлучения фотонов, согласно закону А. Эйнштейна об увеличении вероятности излучения в поле излучения, возникает вынужденное излучение. В результате резко возрастают интенсивность излучения и ее когерентность.

Долгое время закон А. Эйнштейна и сам механизм вынужденного излучения считались чисто квантовыми явлениями. Перенесение квантовой теории излучения на случай классических релятивистских приборов впервые было дано П. Дираком и П. Капицей, рассмотревшим процесс вынужденного излучения релятивистским электронным пучком в поле волнового вигглера, т.е. процесс вынужденного комптоновского рассеяния. Наиболее полно квантовая теория вынужденного ондуляторного излучения, т.е. квантовая теория лазера на свободных электронах изложена в обзоре М. Федорова [4]. Л. Вайнштейн, однако, показал, что при реализуемых параметрах пучка и поля вигглера квантовые эффекты ничтожны и теорию лазеров на свободных электронах можно строить чисто классически, вводя классические вероятности спонтанного и вынужденного излучений и устанавливая классический аналог соотношений А. Эйнштейна. Важно только отметить, что в классической теории вынужденное излучение — нелинейный эффект, возникающий при учете воздействия поля излучения на движение электрона. Подробно роль квантовых эффектов в лазерах на свободных электронах обсуждается в обзоре [5] (см. также цитированную там литературу).

В литературе, особенно американской, термин "лазер на свободных электронах" для вынужденного ондуляторного излучения очень распространен. С нашей точки зрения, этот термин нельзя считать удачным. Он включает в себя аббревиатуру "вынужденная эмиссия излучения" — лазер и механизм вынужденного излучения воспринимается как чисто квантовое явление. Мы предлагаем использовать термин "ондуляторное излучение", подчеркивая приоритет России в этой области [1]. Для приборов оптического ондуляторного излучения следует пользоваться сокращением ОП, в то время как для приборов радиодиапазона следует сохранить термин "убитрон", широко распространенный в классической нерелятивистской электронике.

Классичность ондуляторных приборов легко усмотреть и в условии излучения [2]

$$\omega = \omega_0 + k_{\parallel}u, \quad (2)$$

где $\omega_0 = 2\pi/l$ — частота поперечных осциллирующих электрона и поле вигглера.

В процессе излучения вследствие потерь энергии электрона условие (2) нарушается и, как говорят, излучение насыщается. Для сохранения условия (2) необходимо постепенно вдоль длины ОП уменьшать шаг вигглера l [5] (см. также другие работы в этом сборнике). В

этом проявляется аналогия ОП с такими классическими приборами СВЧ диапазона частот, как лампа обратной волны, лампа бегущей волны, гиратрон, клистрон и т.п., в которых для увеличения эффективности излучения медленно меняют какой-либо параметр прибора. Вместе с тем следует отметить, что ондуляторный прибор — сугубо релятивистский прибор и значительного увеличения эффективности излучения таким путем получить невозможно.

В связи с этим для увеличения эффективности излучения предлагается использовать метод рекуперации энергии электронов пучка. При этом надо учитывать, что обработанный в ондуляторном приборе пучок промодулирован на длине волны излучения λ , которая не намного меньше вигглера L . Энергию же пучка следует модулировать на частоте ω_0 или на длине шага вигглера l . Очевидно, что коротковолновая модуляция пучка на длинноволновую никакого влияния не оказывает и это существенно облегчает проблему рекуперации энергии. Достаточно между вигглером и коллектором пучка расположить цепочку резонаторов, осуществляющей длинноволновую модуляцию пучка, отбирая у электронов избыточную энергию. Эту энергию следует передать на входной ускоритель пучка с надлежащим подбором фазы для соблюдения условия резонанса (2). Таким путем, как нам представляется, можно достичь значительного увеличения эффективности излучения в ондуляторных приборах.

Важной проблемой является также вопрос о предельной частоте излучения в ондуляторных приборах. Здесь проявляется трудность коротковолновой модуляции пучка на высокой частоте. Упомянутый выше обычный клистронный механизм модуляции скорости электронов при релятивистских энергиях малоэффективен. Альтернативным в этой области энергий эффективным механизмом представляется использование оптического клистрона [6] либо в качестве задающего генератора-модулятора в виде другого маломощного генератора ондуляторного прибора, который как будто бы не имеет ограничений на частоту излучения либо они легко преодолимы.

Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. // Изв. АН СССР. Сер. физика. 1947. Т. 11. С. 1932. ДАН СССР. 1947. Т. 56. С. 145.
- [2] Кузелев М.В., Рухадзе А.А. // УФН. 1987. Т. 152. С. 285. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
- [3] Dirak P., Kapitza P. // Proc. Camb. Phys. Soc. 1933. N 2. P. 297.
- [4] Федоров М.В. // УФН. 1981. Т. 135. С. 213.
- [5] Карбушев Н.И., Попонин В.Л., Рухадзе А.А. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах. М.: Мир, 1983.
- [6] Винокуров Н.А., Скринский А.Н. // Тр. VI Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. 1979. Т. 2. С. 233. Релятивистская СВЧ электроника / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФАН, 1981. С. 204.