

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ЦИКЛОТРОННОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ

Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, И.В.Коноплев, А.С.Сергеев, В.Г.Шпак,
С.А.Шунайлов*, М.Р.Ульмаскулов*, М.И.Яландин**

*Институт прикладной физики РАН
603000 Нижний Новгород, Россия*

**Институт электрофизики УрО РАН,
620219 Екатеринбург, Россия*

Поступила в редакцию 22 января 1996 г.

Зарегистрировано интенсивное (в несколько сот киловатт) субнаносекундное когерентное микроволновое излучение – циклотронное сверхизлучение электронного сгустка, движущегося в однородном магнитном поле. Максимальная мощность излучения наблюдалась в режиме группового синхронизма, когда поступательная скорость сгустка совпадает с групповой скоростью волн в волноводном тракте.

PACS: 52.25.Sw

В последнее время достаточно серьезное внимание привлекает исследование классического аналога известного в квантовой электронике эффекта сверхизлучения Дике. В классической области данный эффект представляет собой процесс стимулированного излучения в пространственно локализованных ансамблях электронов-осцилляторов [1–5] и может рассматриваться как перспективный метод генерации мощных ультракоротких электромагнитных импульсов. В ряде теоретических исследований [6–8] было показано, что в микроволновом диапазоне сверхизлучение может иметь место в сгустке электронов, вращающихся в однородном магнитном поле – циклотронное сверхизлучение (СИ). Процесс СИ представляет собой процесс автофазировки и последующего когерентного излучения в ансамбле первоначально несфазированных осцилляторов. Механизм автофазировки, аналогично лазерам на циклотронном резонансе, обусловлен релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии электронов. Однако отличительной особенностью СИ является то, что ансамбль осцилляторов образует электронный резонатор (движущийся или неподвижный), в котором каждая частица живет в идеальном варианте неограниченно долго, чем вызван с одной стороны беспороговый характер СИ-неустойчивости, а с другой – импульсный характер процесса. При этом, как было отмечено в [8], для первых экспериментальных наблюдений циклотронного СИ в микроволновом диапазоне наиболее благоприятен режим группового синхронизма, когда поступательная скорость электронов близка к групповой скорости излучения, распространяющегося в волноводном тракте (рис.1). В сопровождающей системе отсчета K' , где сгусток как целое покоится, частота излучения в этих условиях близка к критической частоте, что вследствие малой скорости выноса излучения из области взаимодействия обеспечивает максимальный инкремент развития СИ-неустойчивости, который при возбуждении волноводной моды TE_{mn} дается выражением

$$|\operatorname{Im}\omega'| = 2^{1/5} \omega_c \sin \frac{\pi}{5} \left(\frac{eQ}{mc^3} \frac{\lambda_{c0}}{\pi R^2} \beta_{10}^2 \frac{J_{m-1}^2(R_0 \omega_c / c)}{J_m^2(\nu_n) (1 - m^2 / \nu_n^2)} \right)^{2/5},$$

где Q – полный заряд сгустка, $V_{\perp 0} = c\beta_{\perp 0}$ – начальная поперечная скорость электронов, R – радиус волновода, R_0 – радиус электронного пучка (предполагается, что последний имеет трубчатую конфигурацию), ν_n – n -ый корень уравнения $J_m(\nu) = 0$.

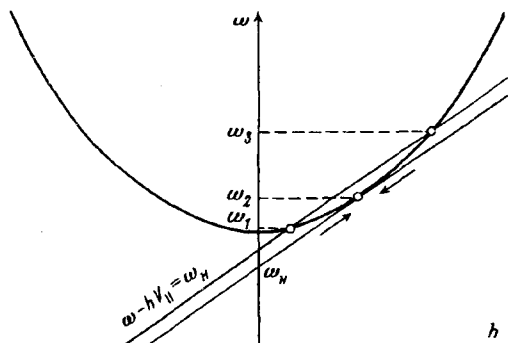


Рис.1. Дисперсионная характеристика волноводной моды и перестройка точек синхронизма с электронным пучком при вариации циклотронной частоты ω_H

Заметим также, что при излучении на квазикритической частоте продольные волновые числа h' предельно малы и, соответственно, волноводные длины волн $\lambda' = 2\pi/h'$ велики. Последнее обстоятельство снижает критичность процесса СИ к продольной динамике реального электронного сгустка (например, его расширению, вызванному кулоновскими полями).

Целью настоящей работы явилось экспериментальное обнаружение эффекта циклотронного сверхизлучения.

В качестве источника электронов использовался субнаносекундный ускоритель, выполненный на базе модулятора РАДАН-300 [9, 10]. Энергия электронов составляла 200 кэВ, длительность импульса тока – 300–500 пс, максимальный ток пучка, получаемый с помощью взрывоэмиссионного катода в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией, достигал 1 кА. Использовались коллиматоры, позволяющие редуцировать ток пучка до 100–400 А. Непосредственно за коллиматором располагался участок с неоднородным магнитным полем – кикер, представляющий собой систему из трех дополнительных катушек, где электроны приобретали вращательную скорость с расчетным питч-фактором $q = V_{\perp}/V_{\parallel}$ порядка единицы. Область высвечивания представляла собой гладкий цилиндрический волновод диаметром 10 мм, помещенный в однородное продольное магнитное поле импульсного соленоида с напряженностью до 15 кЭ. Максимальная длина области высвечивания достигала 30 см при характерной продольной длине электронного сгустка 5 см. Для регистрации излучения использовался полупроводниковый детектор с временной переходной характеристикой порядка 200 пс.

На рис.2 характерные осциллограммы ускоряющего напряжения, электронного тока и СВЧ импульсов. При вариации напряженности ведущего магнитного поля микроволновые импульсы были последовательно зарегистрированы в области касания электронной дисперсионной характеристики с дисперсионными кривыми TE_{21} и TE_{01} волн. При значительном удалении от режима касания мощность излучения либо падала до нуля, либо значительно снижалась. Осциллограммы СВЧ импульсов, представленные на рис.2, соответствуют возбуждению моды TE_{21} . При этом осциллограмма $2c$ снята при напряженности магнитного поля $H = 12$ кЭ, которое несколько превышает значение, отвечаю-

щее режиму касания, в то время как для осциллограммы 2d магнитное поле 11.5кЭ несколько ниже указанного значения.

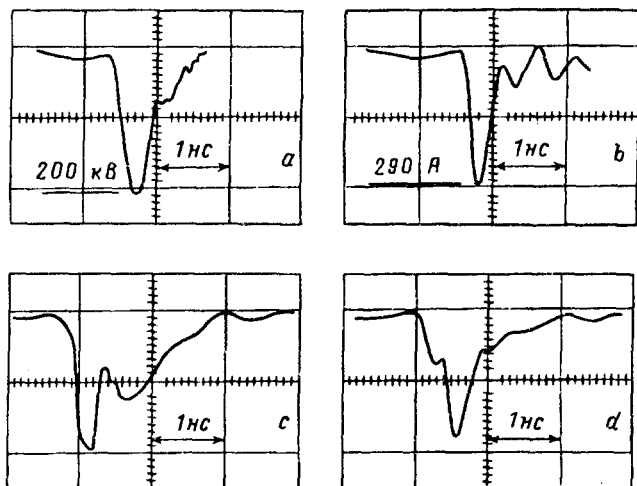


Рис.2. Осциллограммы: а – ускоряющего импульса на катоде, б – импульса тока на входе дрейфовой камеры; с, d – СВЧ-сигналы с детектора при ведущем магнитном поле 12кЭ и 11.5кЭ, соответственно

Двугорбый характер СВЧ импульса на рис.2с в соответствии с теоретическими представлениями обусловлен тем, что в сопровождающей системе отсчета K' ансамбль вращающихся в магнитном поле электронов излучает изотропно в положительном, $+z'$, и отрицательном, $-z'$, направлениях вдоль оси волновода. В лабораторной же системе в точку наблюдения, расположенную на оси по направлению движения электронного сгустка, вначале придет излучение испущенное в $+z'$, а затем (при условии, что скорость источника превышает групповую скорость) в $-z'$ направлениях. При этом, вследствие эффекта Доплера, частота излучения передней части импульса, воспринимаемого детектором, должна превышать частоту хвостовой части. По этой же причине мощность излучения в передней части импульса должна превосходить мощность в хвосте, а длительность коротковолновой компоненты излучения на приемном детекторе должна быть существенно короче длительности низкочастотной компоненты. Действительно, как видно из осциллограммы 2с, высокочастотная часть излучения представляет собой предельно короткий импульс с длительностью на полувысоте менее 400 пс и высокой пиковой мощностью. После нее регистрируется низкочастотная компонента, имеющая примерно в два раза более низкую мощность, а длительность – до полутора наносекунд.

Одноробый характер микроволнового импульса на рис.2d объясняется тем, что при уменьшении циклотронной частоты происходит сближение частот и групповых скоростей высокочастотной и низкочастотной компонент. В результате при заданной длине области распространения обе компоненты поступают на детектор в неразрешенном по времени виде.

Измерения спектра излучения посредством установки в тракте приемного детектора волноводных фильтров с различными частотами отсечки показали, что в соответствии с расчетами импульсы являются широкополосными, со спектром частот, лежащим в интервале 30–38 ГГц. Таким образом, относительная ширина спектра достигает 30%.

Важным подтверждением индуцированной природы исследованного излучения является характер зависимости пиковой мощности излучения от длины

дрейфа электронного сгустка в однородном магнитном поле, то есть фактически от времени взаимодействия (см. рис.3). Указанная мощность на начальном этапе растет по экспоненциальному закону. Если же предположить, что наблюдаемое излучение обусловлено не процессом автофазировки, а наличием достаточно сильной начальной модуляции электронов по фазам циклотронного вращения – спонтанное излучение, то на квазикритической частоте мощность излучения должна расти с длиной взаимодействия не быстрее, чем корень из длины.

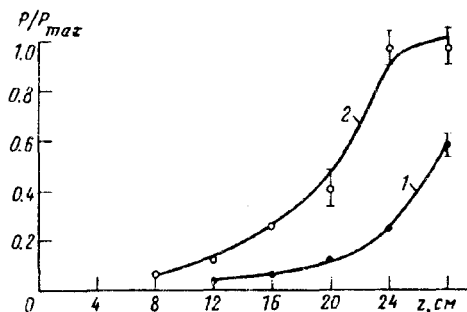


Рис.3. Пиковая мощность субнаносекундного импульса циклотронного сверхизлучения в зависимости от длины транспортировки электронного сгустка в продольном магнитном поле 12кЭ: 1 – ток пучка 180 А, 2 – ток пучка 290 А

При токе пучка 290 А наблюдался режим насыщения максимальной пиковой выходной мощности; при меньшем токе (180 А) режим насыщения при заданной длине области высвечивания достигнут не был. Инкремент роста пиковой СВЧ мощности был примерно вдвое меньше инкремента, даваемого теорией в предположении идеального характера распределения электронов по питч-углам. Уменьшение инкремента может быть объяснено наличием разброса электронов по питч-углам. Пиковая мощность излучения определялась детектором путем интегрирования показаний по диаграмме направленности. Нижняя оценка пиковой мощности для моды TE_{21} составила приблизительно 200 кВт, что соответствовало эффективности трансформации энергии более процента.

Таким образом, в настоящей работе было зарегистрировано циклотронное сверхизлучение в ансамбле электронов, движущихся в однородном магнитном поле. В соответствии с теоретическими предсказаниями получены микроволновые импульсы рекордно короткой длительности до 400 пс.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 95-02-04791.

1. R.Bonifacio, C.Maroli, and N.Piovella, *Opt. Comm.* **68**, 364 (1988).
2. Н.С.Гинзбург, Письма в ЖТФ **14**, 440 (1988).
3. Ю.А.Ильинский, Н.С.Маслова, ЖЭТФ **94**, 171 (1988).
4. Л.А.Вайнштейн, А.И.Клеев, ДАН СССР **311**, 862 (1990).
5. В.В.Железняков, В.В.Кочаровский, Вл.В.Кочаровский, УФН **159**, 193 (1989).
6. Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, Письма в ЖТФ **15**, 83 (1989).
7. Н.С.Гинзбург, А.С.Сергеев, ЖЭТФ **99**, 438 (1991).
8. Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, А.С.Сергеев, Письма в ЖЭТФ **60**, 501 (1994).
9. G.A.Mesyats, V.G.Shpak, S.A.Shunailov et al., *Proc of SPIE Int. Symp: Intense Microwave Pulses* **282**, 2154 (1994), CA.
10. В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин и др., ПТЭ **1**, 149 (1993).