

09;10

©1995 г.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РЕЛЯТИВИСТКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В СВЕРХРАЗМЕРНОМ ПОГЛОЩАЮЩЕМ ВОЛНОВОДЕ

В.И.Кошелев, Н.С.Сочугов

Институт сильноточной электроники СО РАН,

634055, Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 13 октября 1994 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований генерации электромагнитного излучения трубчатым потоком релятивистских циклотронных осцилляторов в сверхразмерном поглощающем волноводе. На длине волны ~ 7 мм реализован режим одночастотной генерации с шириной спектра излучения $\lesssim 10\%$ при выходной мощности до 100 МВт и эффективности $\sim 1\%$. Исследованы характеристики электронного пучка и показано, что возникновение генерации сопровождается существенным увеличением разброса электронов по поперечным скоростям.

Как было показано в теоретических работах [1,2] и экспериментах авторов [3], излучение интенсивных потоков электронов, осциллирующих в магнитном поле, существенно зависит от излучательных свойств среды, в том числе от направленного излучения электронных сгустков. Вид спектра излучения потока релятивистских осцилляторов определяется многоволновым механизмом взаимодействия и обратной связи. Экспериментально показано [3,4], что транспортировка релятивистского электронного пучка в металлических и поглощающих волноводах сопровождается паразитной генерацией в длинноволновой и коротковолновой частях сантиметрового диапазона длин волн, возникающей вследствие ЛОВ и гиротронного механизма взаимодействия электронов с модами волновода. Основное излучение такого рода потоков, приходящееся обычно на миллиметровый диапазон длин волн, направлено вперед под малыми углами к оси генератора и определяется главным образом конусом синхротронного излучения циклотронных осцилляторов.

В работе [3] экспериментально, а в работе [5] теоретически была показана возможность подавления паразитных видов генерации при использовании поглощающей волноведущей структуры. Используемый в работе [3] способ излучения электронного пучка с увеличенной поперечной составляющей скорости в адиабатически нарастающем продольном магнитном поле не позволил сформировать электронный пучок с достаточно малым разбросом электронов по поперечным и продольным скоростям. Это обстоятельство, по мнению авторов, явилось одной из причин уширения спектра генерации и низкого уровня мощности излучения. Целью данной работы является исследование возможности сужения спектра излучения миллиметрового диапазона и увеличения эффективности генерации при использовании электронного потока с малым разбросом электронов по поперечным скоростям и волноведущей структуры с улучшенными характеристиками поглощения.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования формирования и излучения сильноточного электронного пучка проводились на ускорителе "Синус-7М". Установка содержала коаксиальный диод с магнитной изоляцией, секцию накачки осцилляторной скорости (ондуляторную секцию), область взаимодействия, перемещаемый коллектор и окно вывода СВЧ энергии в атмосферу. Схема установки приведена на рис. 1.

Диод состоял из трубчатого тонкостенного металлического катода 1 диаметром 126 мм и конического анода 2. Электронный пучок 3, формируемый в диоде, транспортируется в продольном магнитном поле соленооида 4 внутри лайнера 5. Лайнер стыкуется с конусом 6, имеющим полиэтиленовое окно 7 для вывода СВЧ излучения в атмосферу. Напряжение на диоде измерялось емкостным делителем 8 и составляло обычно $U_0 \approx 1$ МВ. Ток пучка, измеряемый поясом Роговского 9, при этом достигал 8–10 кА. Продольное магнитное поле B_{\parallel} могло изменяться в пределах от 0 до 20 кГс с шагом 100 Гс. Однородность магнитного поля в пространстве взаимодействия была не хуже

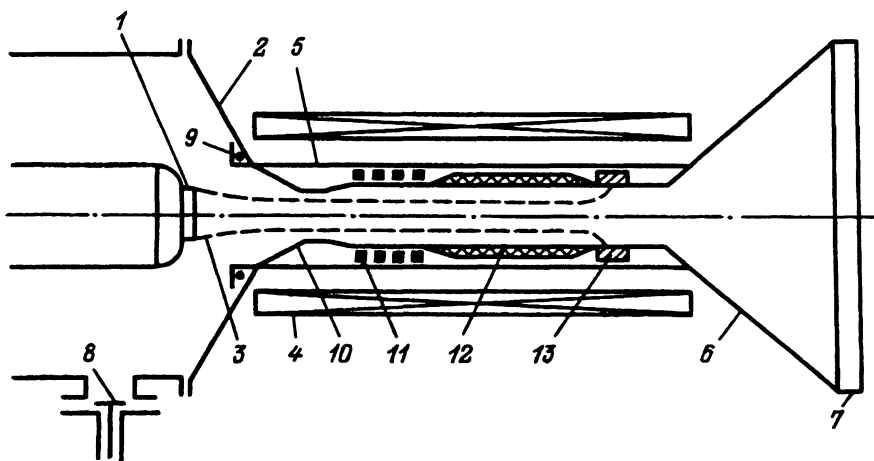


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1%. Схема зарядки и управления магнитным полем позволяла производить запуск ускорителя при заданной величине магнитного поля в пространстве взаимодействия с точностью не хуже 0.3%. Помещаемая в лайнер 5 электродинамическая структура состояла из коллимирующей диафрагмы 10, ондуляторной секции 11, поглощающего волновода 12 и коллектора 13. Диаметр электронного пучка в пространстве взаимодействия составлял 105 мм. Ондуляторная секция состояла из 14 встречно включенных магнитных катушек, питающихся от отдельного импульсного источника тока. Пространственный период магнитной системы составлял 30 мм. Нарастание и уменьшение амплитуды поперечного магнитного поля на входе и выходе секции достигались уменьшением токов в катушках первых двух и последних двух периодов. Амплитуда поперечного магнитного поля B_{\perp} могла изменяться от 0 до 2 кГс с шагом 10 Гс. Длина пространства взаимодействия от выхода из ондуляторной секции до места высадки электронного пучка регулировалась перемещением подвижного коллектора 13.

Волноведущая поглощающая структура состояла из набора дюралюминиевых колец с внутренним диаметром 130 мм. В каждое кольцо помещалась цилиндрическая поглощающая вставка с внешним и внутренним диаметрами соответственно 130 и 120 мм. Поглощающие вставки имели многослойную структуру с изменяющейся по глубине диэлектрической проницаемостью. Основной поглощающий элемент, выполненный в виде заполненной водой полихлорвиниловой трубки, располагался на поверхности дюралюминиевого кольца. Трубка имела диаметр 3 мм и была уложена по спирали виток к витку на внешней поверхности поглощающего цилиндра. Для улучшения согласования водяного поглотителя, имеющего высокую диэлектрическую проницаемость, и защиты от действия рассеянных электронов использовались два слоя поглотителя со связующим из эпоксидного компаунда. Эти слои наносились последовательно на внутреннюю поверхность поглощающей вставки. Коэффициент отражения от поверхности волноведущей структуры не превышал 15–25% в диапазоне длин волн от 0.4 до 12 см.

Измерения поперечной составляющей скорости электронов

Измерение поперечной составляющей (осцилляторной) скорости электронов пучка проводилось с помощью метода регистрации свечения тонких пленок, описанного в [6]. В соответствии с указанным методом в эксперименте использовались плоский металлический коллектор толщиной 0.8 мм с несколькими радиальными щелями шириной 0.7 мм и лавсановая пленка толщиной 50 мкм, расположенная на некотором расстоянии за коллектором. Электроны, проходящие через радиальные щели в коллекторе, попадают на лавсановую пленку и вызывают ее свечение. В зависимости от параметров пучка свечение имеет форму эллипса или его части. Из анализа зарегистрированных на фотопленку картин свечения можно получить информацию о величинах нормированных на скорость света продольной и поперечной β_{\perp} составляющих скорости электронов, длине шага ларморовской спирали, разбросе электронов по скоростям $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp}$ и $\delta\beta_{\parallel}/\beta_{\parallel}$, толщине и качестве юстировки электронного пучка. Свечение регистрировалось на фотопленку через прозрачное окно, установленное на торце лайнера. Система измерения устанавливалась на различных расстояниях от

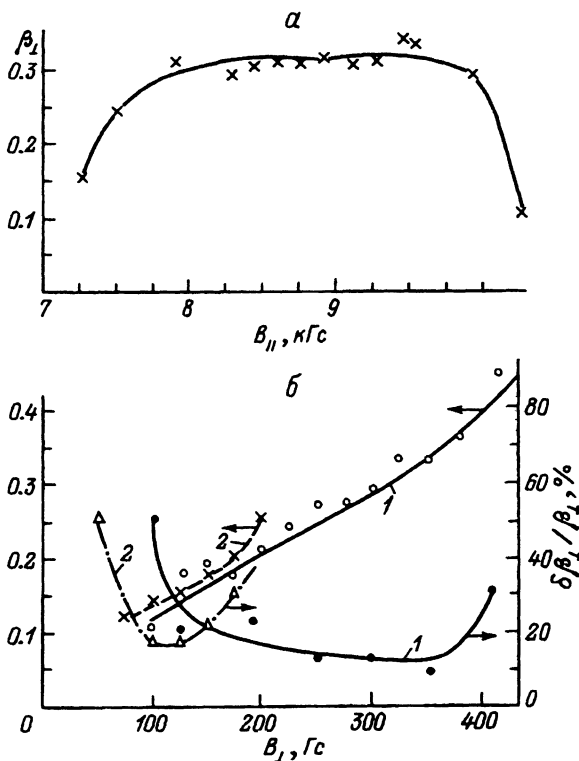


Рис. 2. Зависимости поперечной составляющей скорости электронов от величины продольного магнитного поля при $B_{\perp} = 310$ Гс (а) и поперечной составляющей скорости электронов, разброса электронов по поперечным скоростям от поперечного магнитного поля при $B_{\parallel} = 9.6$ кГс и расстояниях от ондуляторной секции до системы регистрации (б).

ондуляторной секции. Снимались зависимости поперечной составляющей скорости электронов β_{\perp} и разброса по поперечным скоростям $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp}$ от величины продольного B_{\parallel} и поперечного магнитных полей B_{\perp} в ондуляторной секции. Зависимость β_{\perp} от B_{\parallel} представлена на рис. 2,а. Система регистрации располагалась на расстоянии 30 см от ондуляторной секции, $B_{\perp} = 310$ Гс. На рис. 2,б приведены зависимости β_{\perp} и $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp}$ от B_{\perp} для двух расстояний от ондуляторной секции до системы регистрации: 5 (кривые 1) и 50 см (кривые 2). Из полученных результатов следует, что для любой длины волноведущей структуры существует критическое значение величины поперечного магнитного поля $B_{\perp\text{кр}}$, при котором резко возрастает разброс электронов пучка по поперечным скоростям. Об этом свидетельствует практически полное размытие эллипса свечения, отчетливо видимого при более низких значениях B_{\perp} . Критическое значение поля $B_{\perp\text{кр}}$ уменьшается от 420 до 200 Гс при увеличении расстояния от ондуляторной секции до системы регистрации с 5 до 50 см.

Характеристики СВЧ излучения

В исследованиях СВЧ генерации регистрация мощности излучения проводилась в диапазоне от 14.4 см до 4 мм. Параметры излучения с длиной волны 4.6–14.4 см измерялись с помощью лампового детектора на основе прямоугольного волновода сечением 72–34 мм. Излучение с длинами волн менее 4.6 см и 14.4 мм регистрировалось датчиками на горячих носителях на основе волноводов сечением 23–10 и 7.4–3.4 мм соответственно. Спектральный состав излучения определялся с помощью набора запредельных фильтров.

Как и в работе [3], в измерениях было зарегистрировано излучение в трех диапазонах: в длинноволновой (6–8 см) и в коротковолновой частях сантиметрового диапазона (2–4 см) и в миллиметровом диапазоне (5–10 мм). Мощность излучения в первых двух диапазонах составляла лишь несколько процентов от мощности миллиметрового излучения, тогда как в экспериментах [3] мощность излучения в сантиметровом диапазоне составляла 15–30% от мощности миллиметрового излучения. Это свидетельствует о высоком качестве поглотителей. Существенное подавление паразитных видов генерации позволило уделить основное внимание изучению характеристик миллиметрового излучения. Основные измерения проводились при длине поглощающего волновода 30 см.

На рис. 3 представлены осциллограммы импульса напряжения на диоде (кривая 1) и типичная осциллограмма импульса миллиметрового излучения (кривая 2). Наличие колебаний напряжения на “полочке” импульса напряжения связано с несогласованностью импеданса диода и волнового сопротивления формирующей линии ускорителя. Видно, что максимумы мощности СВЧ излучения связаны во времени с экстремумами напряжения на диоде. Наличие колебаний энергии электронов в течение импульса приводит к изменению характеристик СВЧ импульса: мощности, диаграммы направленности, спектра излучения. При построении зависимостей этих характеристик от внешних параметров на осциллограммах СВЧ импульсов выбирались моменты времени, соответствующие экстремумам импульса напряжения.

Были исследованы зависимости мощности миллиметрового излучения от величины продольного магнитного поля $P(B_{\parallel})$ (рис. 4,а) и амплитуды поперечного магнитного поля в ондуляторной секции $P(B_{\perp})$ (рис. 4,б). Некоторое отличие зависимостей $P(B_{\parallel})$ и $P(B_{\perp})$ в различные моменты времени определяется изменением средней энергии электронов пучка в течение импульса. Зависимость $P(B_{\parallel})$ имеет резонанс-

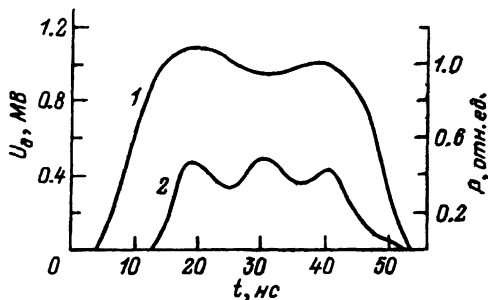


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на диоде (1) и миллиметрового излучения (2).

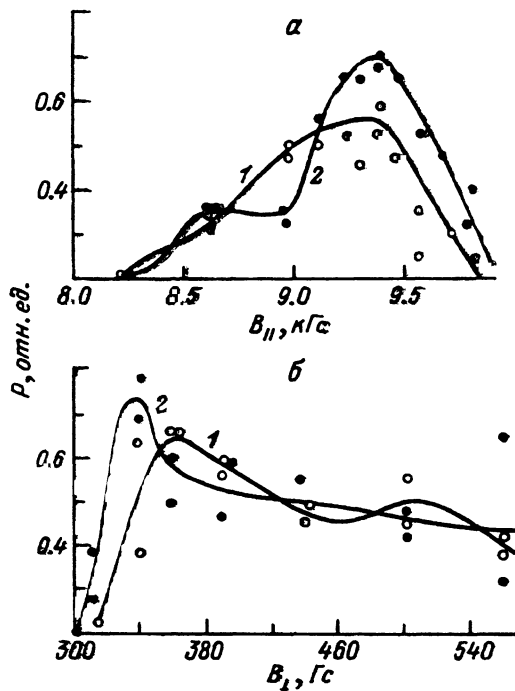


Рис. 4. Зависимости мощности излучения от величины продольного магнитного поля при $B_{\perp} = 340$ Гс (а) и амплитуды поперечного магнитного поля при $B_{\parallel} = 9.57$ кГс (б) для моментов времени 20 (1), 30 нс (2).

ный характер, как и зависимость $\beta_{\perp}(B_{\parallel})$ (рис. 2,а), что обусловлено эффектом резонансной раскрутки электронного потока вблизи совпадения шага ларморовской спирали с пространственным периодом изменения поперечного магнитного поля в ондуляторной секции. Зависимость $P(B_{\perp})$ имеет менее выраженный резонансный характер. Необходимо отметить наличие стартового значения поля $B_{\perp ст}$, при превышении которого мощность излучения быстро нарастает. При этом $B_{\perp ст}$ практически совпадает с критическим значением поля $B_{\perp кр}$, обнаруженным при измерении поперечной составляющей скорости электронов пучка (рис. 2,б). Это свидетельствует о том, что характеристики электронного пучка резко меняются при возникновении СВЧ генерации, происходит увеличение разброса по поперечным скоростям $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp}$, что, видимо, является одной из причин ограничения КПД и основной причиной расширения спектра излучения. При существенном превышении поля B_{\perp} над оптимальным значением мощность СВЧ излучения снижается незначительно, но заметно расширяется спектр генерации и размывается диаграмма направленности.

Результаты спектральных измерений, проведенных при B_{\perp} , близких к оптимальным, представлены на рис. 5. Излучение имело широкий спектр, изменяющийся как во времени, так и по диаграмме. Вблизи момента времени, соответствующего минимуму на "полочке" импульса напряжения, где минимальна скорость изменения напряжения $dU_0/U_0 \lesssim 0.5\%/нс$, достигается режим генерации с частотой около 42 ГГц и шириной спектра излучения на полувысоте не более 10%. При этом наблюдается также постоянство длины волны излучения в разных точках диаграммы.

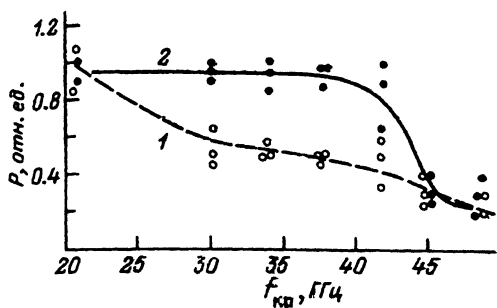


Рис. 5. Зависимость регистрируемой мощности излучения от критической частоты запредельных фильтров при $B_{\parallel} = 9.7$ кГс, $B_{\perp} = 350$ Гс для моментов времени 20 нс (1), 30 нс (2).

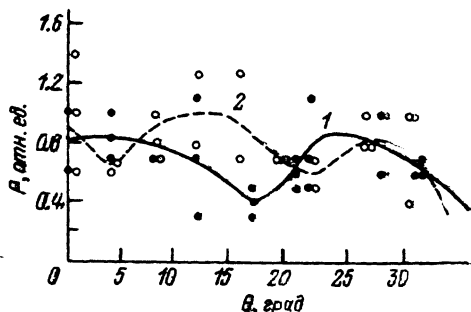


Рис. 6. Диаграммы направленности излучения для азимутальной (1) и радиальной (2) поляризации.

Результаты измерения диаграммы направленности излучения в радиальной и азимутальной поляризациях представлены на рис. 6. Основная мощность излучается под углами 20–30 град к оси генератора. Мощности излучения в радиальной и азимутальной поляризациях примерно совпадают и составляют в сумме 80–100 МВт при КПД по выведенному в атмосферу излучению около 1%.

Длина волны СВЧ излучения и форма диаграммы направленности находятся в хорошем соответствии с теоретическими представлениями [3], в частности отличие измеренной длины волны от вычисленной по формуле (3) [3] составляет 15–20%. Отметим, что использование в данной работе адиабатического ондулятора для накачки поперечной скорости электронов и поглотителя с улучшенными характеристиками позволило увеличить эффективность генерации по сравнению с [3] практически на порядок.

Выводы

1. Исследовано формирование трубчатого релятивистского электронного пучка при использовании адиабатического ондулятора для накачки поперечной скорости электронов. Осцилляторная скорость электронов линейно растет с увеличением амплитуды поперечного магнитного поля, а разброс электронов по скоростям имеет минимум. Получены электронные пучки с $\beta_{\perp} = 0.1-0.4$ и минимальной величиной $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp} \approx 0.1$.

2. Показано, что в поглощающем волноводе уровень мощности паразитного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн может быть снижен до единиц процентов от мощности основного излучения. Реализован режим одночастотной генерации миллиметрового излучения с шириной спектра на полувысоте $\lesssim 10\%$ при эффективности генерации $\sim 1\%$. Частота излучения равна доплеровски сдвинутой частоте циклотронных колебаний электронов, а основная мощность сосредоточена в пределах конуса синхротронного излучения потока релятивистских осцилляторов.

3. Обнаружено, что возбуждение СВЧ генерации в сверхразмерном поглощающем волноводе сопровождается существенным увеличением разброса электронов пучка по поперечным скоростям.

Авторы благодарят С.П. Бугаева за поддержку работы, В.И. Канавца, В.А. Черепенина, М.В. Ермолаева, А.В. Корженевского за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Афонин А.М., Канавец В.И., Черепенин В.А. // РиЭ. 1980. Т. 25. № 9. С. 1945-1954.
 - [2] Канавец В.И., Корженевский А.В., Черепенин В.А. // РиЭ. 1985. Т. 30. № 11. С. 2202-2208.
 - [3] Бугаев С.П., Дейчули М.П., Канавец В.И. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 73-80.
 - [4] Бугаев С.П., Дейчули М.П., Канавец В.И. и др. // РиЭ. 1984. Т. 29. № 3. С. 557-560.
 - [5] Братман В.Л., Денисов Г.Т., Самсонов С.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 158-163.
 - [6] Кременцов В.И., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2469-2472.
-