



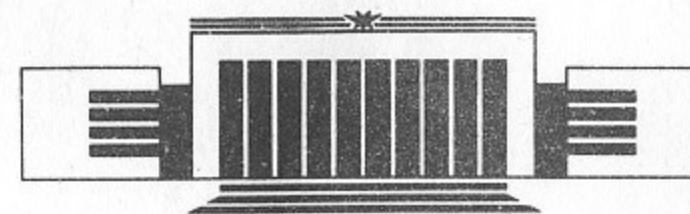
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

30

А.В. Аржанников, С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков

МИКРОСЕКУНДНЫЙ ЛЕНТОЧНЫЙ РЭП В  
ПЛОСКОМ ОНДУЛЯТОРЕ  
И ГЕНЕРАЦИЯ В ЭТОЙ СИСТЕМЕ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ПРЕПРИНТ 91-85



НОВОСИБИРСК

МИКРОСЕКУНДНЫЙ ЛЕНТОЧНЫЙ РЭП В ПЛОСКОМ ОНДУЛЯТОРЕ  
И ГЕНЕРАЦИЯ В ЭТОЙ СИСТЕМЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Аржанников, С. Л. Синуцкий, М. В. Юшков

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск, СССР

АННОТАЦИЯ

Описаны результаты экспериментов по проводке микросекундного ленточного РЭП с током в несколько килоампер в плоском ондуляторном магнитном поле при наличии дополнительного сильного продольного поля. В экспериментах изучено влияние величины этого поля на прохождение пучка через ондулятор с длиной 1 метр, а также на процесс генерации в нем электромагнитного излучения миллиметрового диапазона.

Microsecond Ribbon REB in Plane Undulator  
and Generation of Microwave Radiation

A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky and M.V. Yushkov

Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, USSR

ABSTRACT

Results of the experiments on transport of the microsecond ribbon REB with some kiloampers current in the plane magnetic undulator at the longitudinal guiding magnetic field were described. Influence of the guiding magnetic field strength on the passing of the beam in the 1 meter undulator and generation of microwave radiation was studied in the experiments.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение электромагнитного излучения с импульсными мощностями в сотни мегаватт и выше в области длин волн масштаба одного миллиметра имеет большое значение для целого ряда технических приложений. В частности, для нагрева электронов в токамаках посредством электронно-циклотронного резонанса применительно к термоядерным приложениям требуется излучение на частотах порядка нескольких сотен гигагерц. Для генерации столь высоких мощностей наиболее перспективными устройствами, с нашей точки зрения, являются генераторы, основанные на движении электронного пучка в периодическом поперечном магнитном поле. В области сравнительно низких энергий электронов ( $E_e \leq 100$  кэВ) такие устройства носят название убитрона, а в случае релятивистских

энергий ( $\gamma = \frac{E_e}{mc^2} \ll 1$ ) к ним применяют термин: лазер на свободных электронах (ЛСЭ). В последнем случае длина волны электромагнитного излучения  $\lambda_s$  из-за доплеровского преобразования частоты оказывается существенно меньше пространственного масштаба изменения магнитного поля  $\lambda_w$ :  $\lambda_s \approx \frac{\lambda_w^2}{2\gamma}$ , что открывает возможность получения излучения миллиметрового и даже субмиллиметрового диапазона при энергии электронов около одного мэва. Для экспериментов на крупномасштабном токамаке ITER требуется средняя по рабочему циклу мощность СВЧ излучения на частотах 100 + 300 ГГц около 10 МВт, что в конечном счете означает необходимость пропускания через магнитный ондулятор пучка мэвных электронов с полным энергозапасом за импульс масштаба десятка мегаджоулей. В связи с этим должны привлекать особое внимание устройства, представляющие собой плоский ондулятор с распространяющимся в нем ленточ-

ным РЭП [1, 2]. В проекте Мэрилендского университета [2] рассматривается компактный усилитель на частоты  $300 \div 600$  ГГц с использованием тонкого, с сечением  $0.1 \times 2.0$  см, мѣвного пучка с током около 10 А. В нашем случае [1] эксперименты начаты с ленточным пучком, имеющим в вакуумном канале ток в несколько килоампер при сечении  $0.6 \times 20$  см. На первом этапе этих экспериментов мы ориентировались прежде всего на выяснение возможности проводки такого пучка через ондуляторное поле на расстоянии масштаба одного метра. При этом велась регистрация ЭМ излучения в широком диапазоне длин волн без осуществления каких-либо мер, направленных на достижение однододового монохроматического режима. Результаты этих исследований и составили основное содержание данной работы.

## 2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ЕЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Схема эксперимента по генерации ЭМ излучения с помощью ленточного РЭП, распространяющегося в плоском ондуляторе, представлена на рис. 1. Электронный пучок 3 генерируется в ленточном магнитно-изолированном диоде, катод 1 которого изготовлен в виде вытянутого бруска из волокнистого графитового материала (карботекстима), а анод 2 представляет собой щель с сечением  $1.0 \times 18$  см, прорезанную в графитовой плите толщиной 3 см. Далее пучок распространяется вдоль щелевого вакуумного канала (Рост.  $\sim (4 \div 8) \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.) с сечением  $1.8 \times 24$  см в ведущем магнитном поле, которое можно варьировать в пределах от 3 до 12 кГс. Это ведущее поле может иметь поперечную к оси канала, ондуляторную составляющую с индукцией около 1.5 кГс. На выходе из вакуумного канала, имеющего длину 100 см, пучок электронов поглощается графитовым коллектором 5. Поверхность коллектора, принимающая на себя электроны пучка, наклонена к оси канала под углом  $45^\circ$ , как это показано на рис. 1, что позволяет обеспечить выход ЭМ излучения из канала. Это излучение, отражаясь от металлического зеркала, выходит затем из вакуума в атмосферу через окно 6, изготовленное из оргстекла толщиной 15 мм. Вышедшее в атмосферу излучение принимается рупорами 7, соединенными волноводными трактами с детекторными секциями. В эксперименте использовались одновременно детекторные секции с волно-

## СХЕМА ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

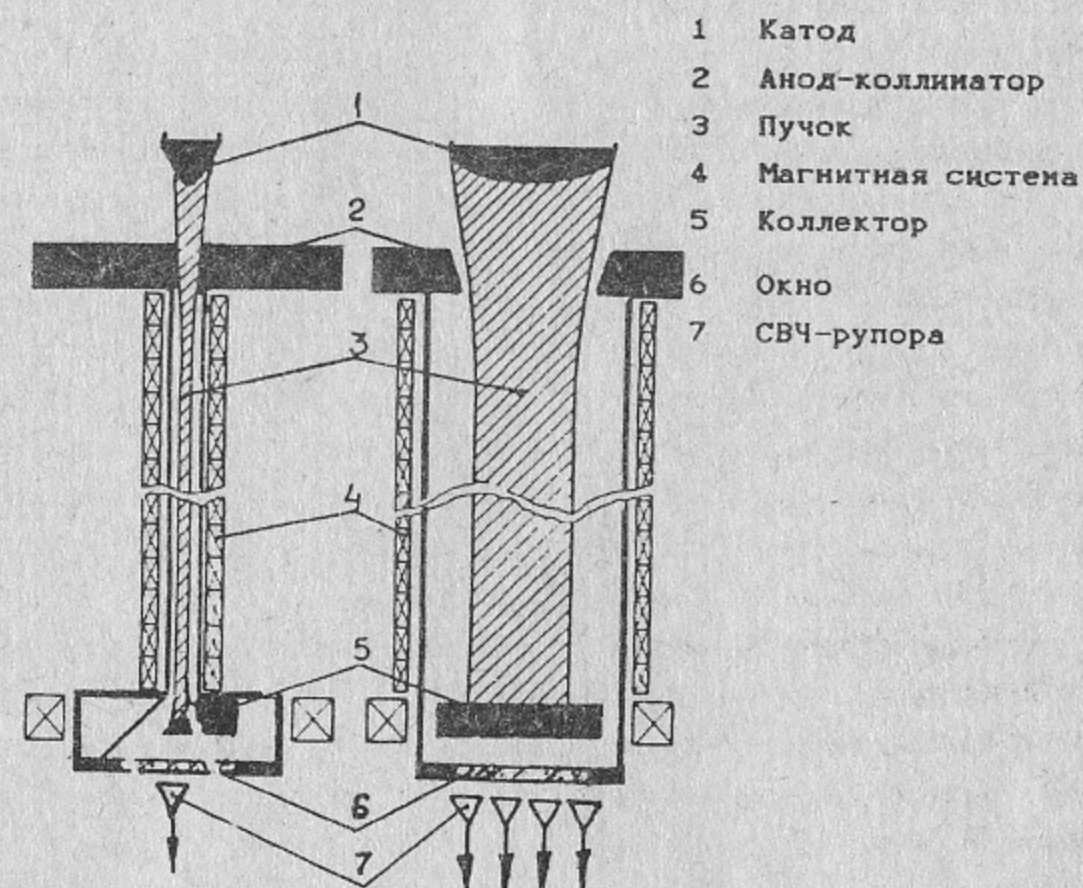


Рис. 1.

водами, имеющими сечение четырех типоразмеров: I - 0.5 x 1 мм, II - 1.5 x 3.5 мм, III - 3.5 x 7 мм, и IV - 5 x 11 мм. Как следствие, регистрация ЭМ излучения велась в окрестности длин волн: 2, 4, 8, и 16 мм. Селективность каналов по длинам волн со стороны коротковолновой области обусловлена понижением чувствительности данной детекторной секции к более коротковолновому излучению. Что касается обрезания интенсивности ЭМ излучения со стороны длинных волн, то это осуществляется в каждом канале за счет запердельности волноводов. Таким образом, в соответствии с сечением волноводов максимально возможные длины волн для каждого из 4-х каналов будут следующими: I - 2 мм, II - 7 мм, III - 14 мм и IV - 22 мм. В свою очередь, снижение на порядок величины чувствительности детекторов к более коротковолновому излучению можно ожидать для этих каналов при следующих длинах волн: I - 1.5 мм, II - 3 мм, III - 7 мм, IV - 12 мм. Понижение чувствительности со стороны коротких волн в каналах II, III и IV проверялось подачей излучения с длинами волн  $\lambda \approx 2, 4$  и 8 мм от стандартных СВЧ-генераторов с мощностью  $\sim 0.1$  Вт. Для существенного снижения мощности, поступающей в рупора, при регистрации ЭМ излучения во время прохождения ленточного РЭП в вакуумном канале, они были размещены несколько в стороне от выходного окна, а для дальнейшего понижения мощности в волноводные тракты были вставлены аттенюаторы.

В ходе экспериментов осуществлялась регистрация параметров пучка. Напряжение на катоде измерялось с помощью резистивного делителя, ток электронов - с помощью поясов Роговского. Форма сечения пучка контролировалась по его отпечаткам на тонкой лавсановой пленке.

Остановимся теперь более подробно на конструкции ондулятора. Он представляет собой две медные плиты размером 22 x 100 см и толщиной 1 см, которые на длине 100 см соединены по торцам полуцилиндрами из нержавеющей стали так, что зазор между их внутренними плоскостями составляет 1.8 см (см. рис. 2). На внешней стороне медных плит на всю ширину канала прорезаны пазы с шириной 2.0 см, глубиной 0.8 см и расстоянием друг от друга 2.0 см. Нарезка пазов на противоположных стенках канала сдвинута на величину равную половине периода нарезки, т.е. на 2 см. В полученные таким образом поперечные пазы были вклеены наборы полосок из электротехнической листовой стали толщиной 0.3 мм.

Схема ондулятора

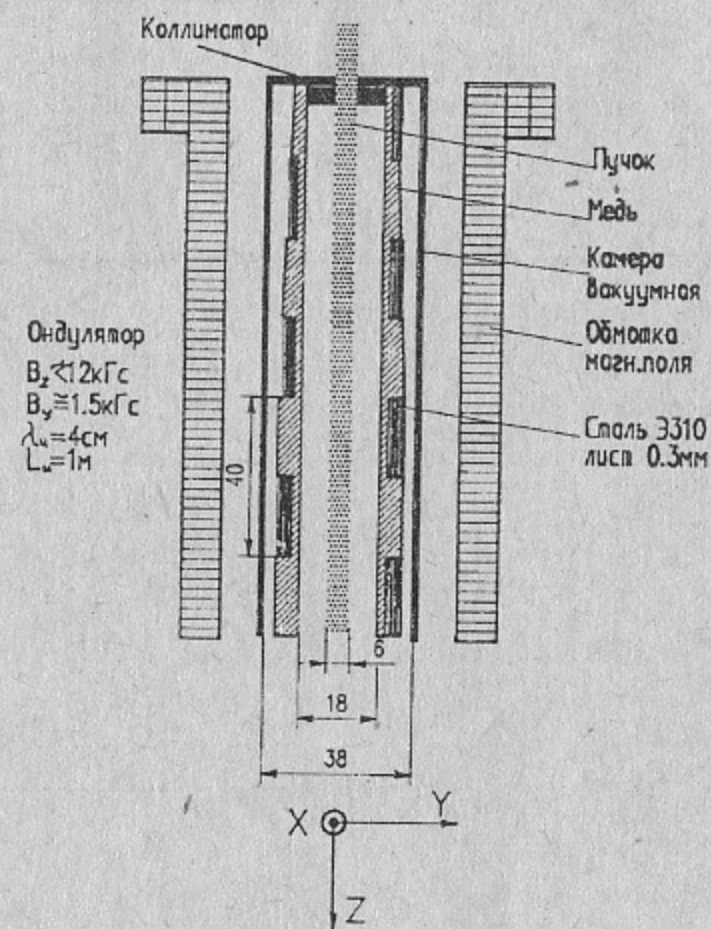


Рис. 2.

Внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси канала, создавалось катушками, намотанными поверх вакуумной камеры. Время нарастания поля до максимального значения составляет 15 мс. Ондулятор, помещенный внутри вакуумной камеры, за счет магнитной проницаемости стали создает во внешнем магнитном поле поперечную к оси камеры, ондуляторную составляющую поля. Распределения по координате  $z$  продольной и поперечной составляющих результирующего магнитного поля, рассчитанные с помощью ЭВМ, представлены на рис. 3. Видно, что при величине продольной составляющей

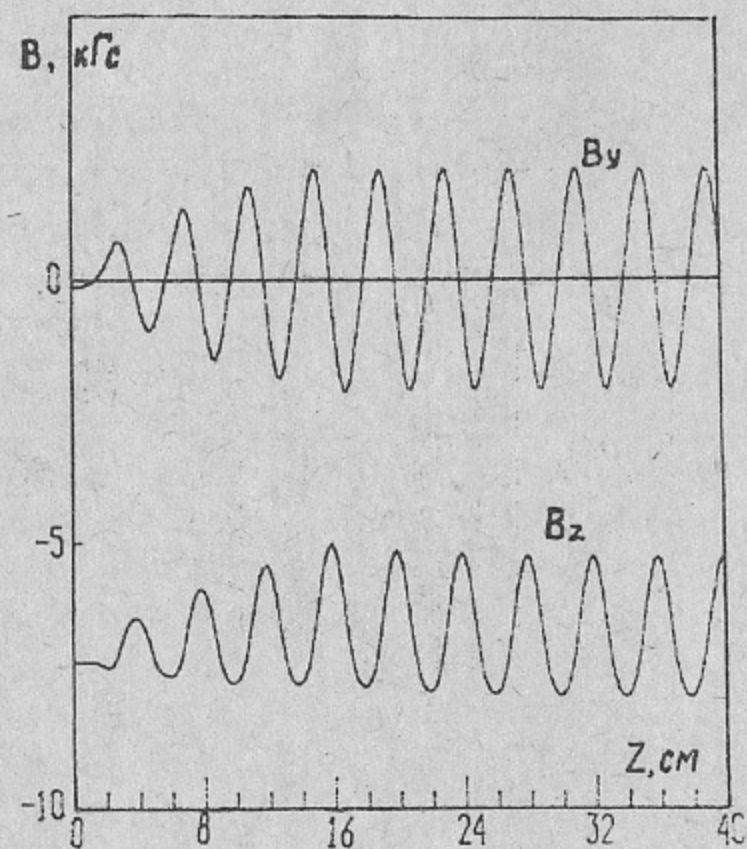


Рис. 3.

магнитного поля около 7 кГс его поперечная составляющая имеет амплитуду около 1.5 кГс. Причем, плавным нарастанием на четырех периодах толщины наборов из полосок от 0.2 см во входной части ондулятора до 0.8 см в однородной его части удается добиться плавного нарастания амплитуды осцилляций поперечной составляющей магнитного поля, и тем самым обеспечить плавный ввод электронов в ондуляторное поле. Приведенное на рисунке 3 поведение силовой линии магнитного поля относится к плоскости симметрии ондулятора, т. е. к точкам с координатой  $y = 0$ . Для электронов пучка,

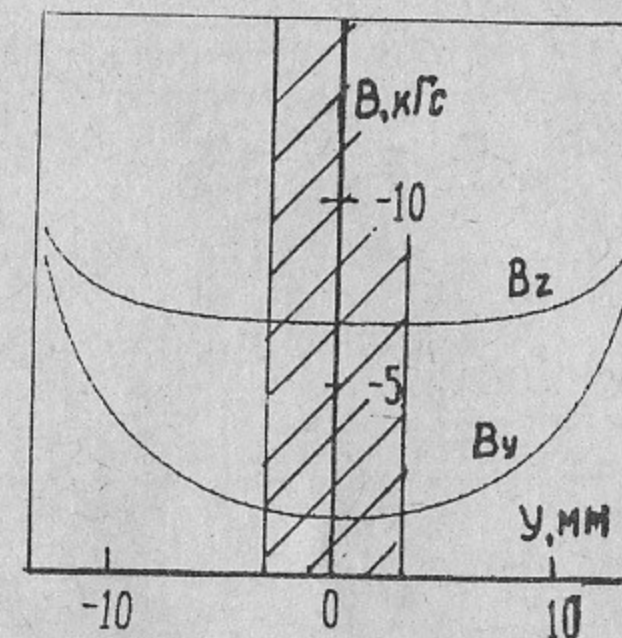


Рис. 4.

движущихся на некотором расстоянии от этой плоскости, значения составляющих магнитного поля будут несколько иными. На рис. 4 представлено распределение магнитного поля в поперечном сечении канала, рассчитанное на ЭВМ для одного из значений координаты  $z$  с максимальным значением поперечной составляющей магнитного поля  $B_y$ . Рисунок демонстрирует, что в пределах толщины пучка (эта область отмечена штриховкой), ведущее магнитное поле практически однородно.

Укажем, что из-за характера зависимости индукции магнитного поля  $B$  от его напряженности  $H$  для сердечников из стали, поперечная составляющая  $B_y$  остается практически на одном уровне 1.5 кГс при изменении  $B_z$  в пределах от 4 до 12 кГс.

Поскольку характер движения электронов пучка в ондуляторе и, следовательно, излучение ими ЭМ волны существенно зависят от соотношения между гирочастотой  $\omega_B = \frac{eB}{mc\gamma}$  и баунс частотой  $\Omega = \frac{2\pi\beta_{\perp}c}{d}$ , связанной с пространственной периодичностью  $d$  поперечного магнитного поля  $B_y$  по координате  $z$ , то нами на ЭВМ были проделаны расчеты движения электронов пучка при различных значениях ведущего магнитного поля  $B_z$ . Полученные в результате зависимости амплитуды колебаний электронов по поперечным координатам  $x$  и  $y$  от величины магнитного поля  $B_z$  представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что амплитуда колебаний электронов по поперечным координатам  $x$  и  $y$  становится соизмерима с за-

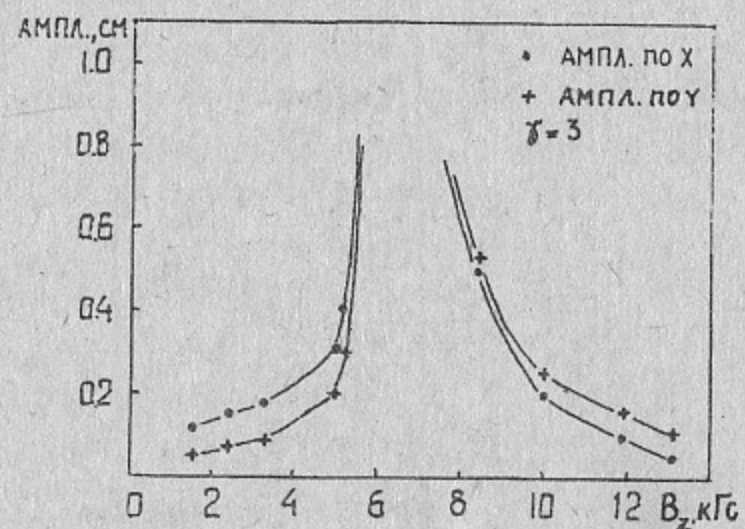


Рис. 5.

зором в канале при приближении значений ведущего магнитного поля к области  $6 \div 8$  кГс как со стороны малых, так и со стороны больших его значений. Это означает, что для наших экспериментальных условий резонанс между волной накачки в периодическом магнитном поле и циклотронным вращением электронов должен достигаться при значениях индукции в районе  $6 \div 8$  кГс. Следовательно, именно при этих значениях магнитного поля можно ожидать максимальной скорости нарастания ЭМ волны в ЛСЭ и, как результат, можно пытаться получить спонтанную генерацию ЭМ излучения в ЛСЭ при ведущем магнитном поле с близким значением индукции. Безусловно, резонансное значение ведущего магнитного поля определяется энергией электронов, как это и следует из выражений для гиро и баунс частот. Для случая  $\gamma = 3$ , который представлен на рис. 5, это значение, соответствующее условию  $\omega_B = \Omega$ , будет следующим:  $B_p = \frac{2\pi\gamma\beta_{||}mc^2}{d} \approx 8$  кГс.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии со сделанными выше замечаниями была проведена серия экспериментов по регистрации ЭМ излучения при различных значениях ведущего магнитного поля. При этом регистрация излучения проводилась поочередно то в присутствии ондулятора в вакуумной камере, то в случае, когда он был замещен на тонкий металлический лайнер с теми же внутренними размерами, что и сам ондулятор. В последнем случае ведущее магнитное поле, создавае-

мое катушкой, намотанной поверх вакуумной камеры, оставалось невозмущенным и поэтому имело лишь одну составляющую  $B_z$ . На рис. 6, 7, 8 представлены подборки осциллограмм сигналов, по-

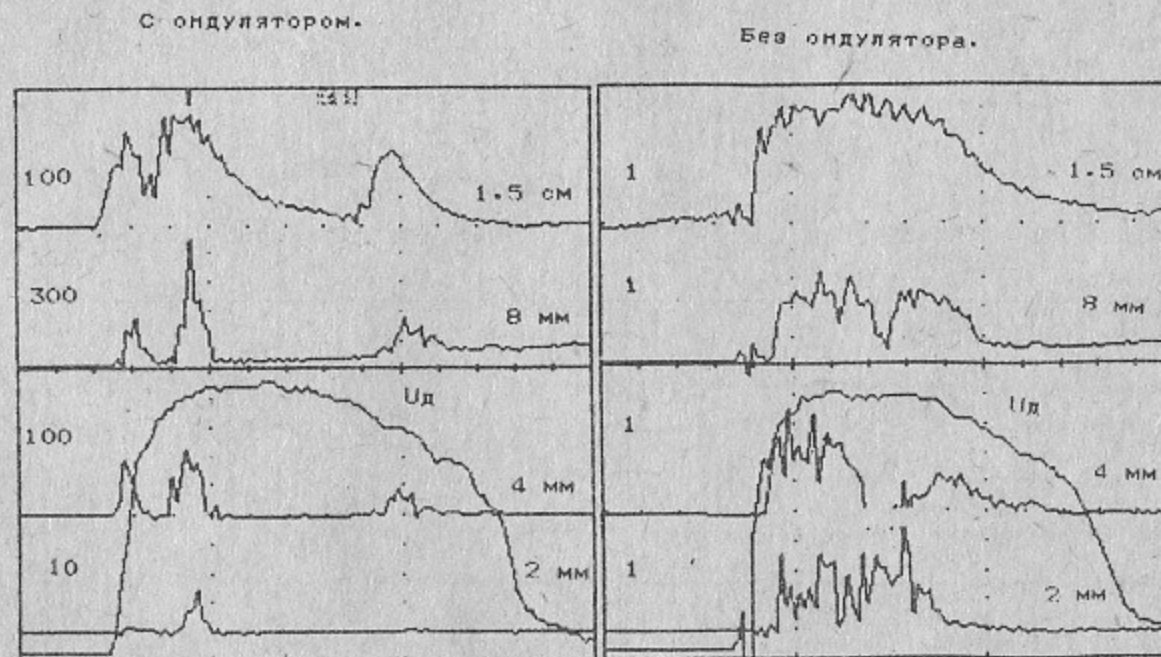


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на диоде ускорителя и ЭМ излучения на различных длинах волн при магнитном поле в канале  $B = 4$  кГс. Чувствительность каналов регистрации СВЧ излучения принята за "единицу" для случая измерения мощности излучения при отсутствии ондуляторной составляющей магнитного поля. Развертка по времени—2 мкс на большое деление.

ступивших с детекторных секций при наличии ондуляторной составляющей магнитного поля (случай а) и без нее (случай б) для трех значений ведущего магнитного поля  $B_1 = 4$  кГс,  $B_2 = 9$  кГс и  $B_3 = 13$  кГс. Прежде всего укажем на то, что чувствительность к электромагнитному излучению детекторных секций вместе с подключенными к ним АПП в случае б), когда магнитное поле не имело поперечной составляющей, была приблизительно на два порядка величины выше, чем в случае а), и тем не менее для случая б) сигналы в области длин волн  $2 \div 8$  мм оказались очень малы. В связи с этим можно утверждать, что наблюдаемый в экспериментах высокий уровень мощности миллиметрового ЭМ излучения связан с

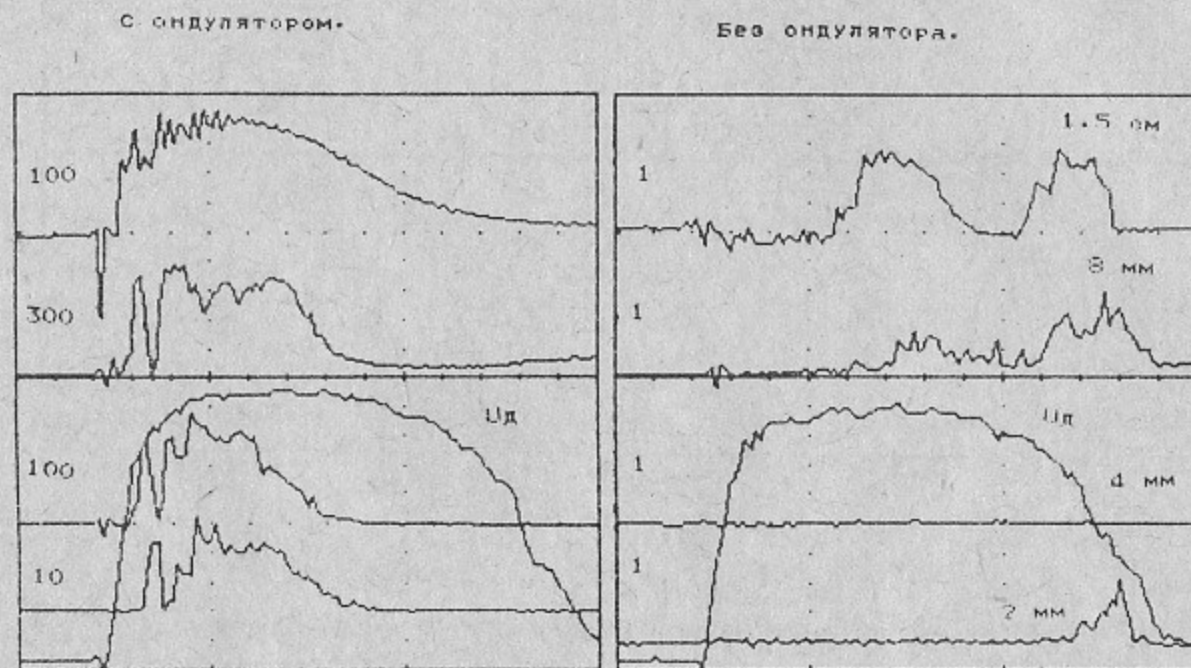


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на диоде ускорителя и ЭМ излучения на различных длинах волн при магнитном поле в канале  $B=9$  кГс. Чувствительность каналов регистрации СВЧ излучения принята за "единицу" для случая измерения мощности излучения при отсутствии ондуляторной составляющей магнитного поля. Развертка по времени — 2 мкс на

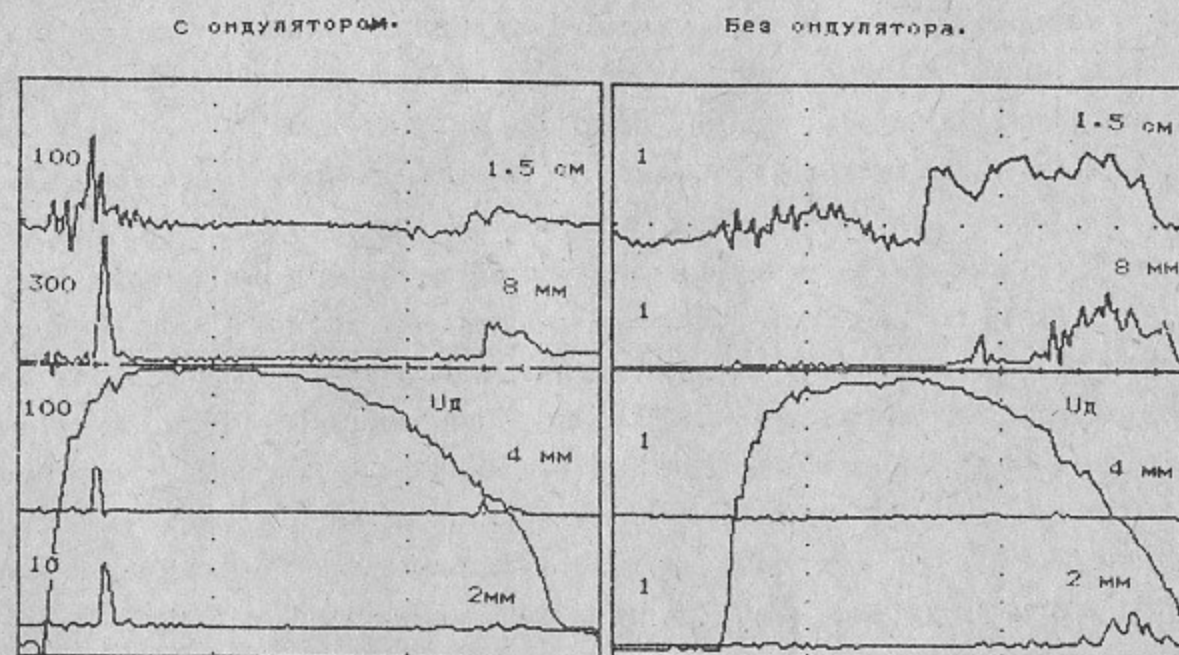


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на диоде ускорителя и ЭМ излучения на различных длинах волн при магнитном поле в канале  $B=13$  кГс. Чувствительность каналов регистрации СВЧ излучения принята за "единицу" для случая измерения мощности излучения при отсутствии ондуляторной составляющей магнитного поля. Развертка по времени — 2 мкс на большое деление.

наличием в вакуумном канале ондуляторной составляющей магнитного поля. Причем, как видно из соотношения осциллограмм, полученных при различных значениях ведущего магнитного поля (4, 9 и 13 кГс), максимальная длительность генерации излучения (в течение нескольких микросекунд) при большой его амплитуде достигается в магнитном поле 9 кГс, т.е. вблизи тех значений магнитного поля, при которых должен возникать резонанс между волнами на циклотронной и баунс частотах. При бАльшем значении ведущего магнитного поля, а также при значениях меньше, чем 6 кГс генерация излучения происходит на фронте меняющегося напряжения на вакуумном диоде в виде всплесков (см. рис. 6 и 8). Что касается значений индукции магнитного поля в интервале от 6 до 9 кГс, то в этой области магнитных полей миллиметровое излучение генерируется в виде серии довольно коротких, длительностью ~200 нсек, импульсов. Такое поведение генерации излучения во времени объясняется тем, что большая амплитуда колебаний электронов в ондуляторном поле может приводить к касанию пучком стенок канала и, как результат, возникновению в нем плазмы, которая в свою очередь срывает процесс генерации, либо перекрывает выход излучения из канала. Сильное уширение пучка на выходе из ондулятора, а также следы касания пучком его стенок в этом режиме указывают на такую возможность. С другой стороны, нельзя исключать возможность биений амплитуды выходящих из ондулятора волн из-за нелинейных процессов взаимодействия пучка с излучением.

То, что пропадание ЭМ излучения во время генерации пучка в диоде не связано с потерей пучка в канале, демонстрируют осциллограммы его тока на выходе из канала, которые представлены на рис. 9 вместе с осциллограммами напряжения на диоде. Осциллограммы приведены для двух случаев: слабого ( $B = 4$  кГс) и сильного ( $B = 9$  кГс) магнитных полей. Видно, что в обоих случаях ток пучка на выходе из канала держится на уровне не ниже трех килоампер в течение всего времени его генерации. В случае слабого магнитного поля ток пучка нарастает даже при снижающемся напряжении на диоде, что указывает на присутствие плазмы вблизи центральной плоскости канала, которая обеспечивает нейтрализацию пучка по заряду. В сильных же магнитных полях плазма, если даже и возникает у стенок канала, то все равно не может проникнуть в

область занятую пучком. Вследствие этого ток пучка остается ограниченным на уровне четырех килоампер в течение всего импульса. Таким образом можно утверждать, что генерация ЭМ излучения в виде всплесков не связана с периодической гибелью пучка в

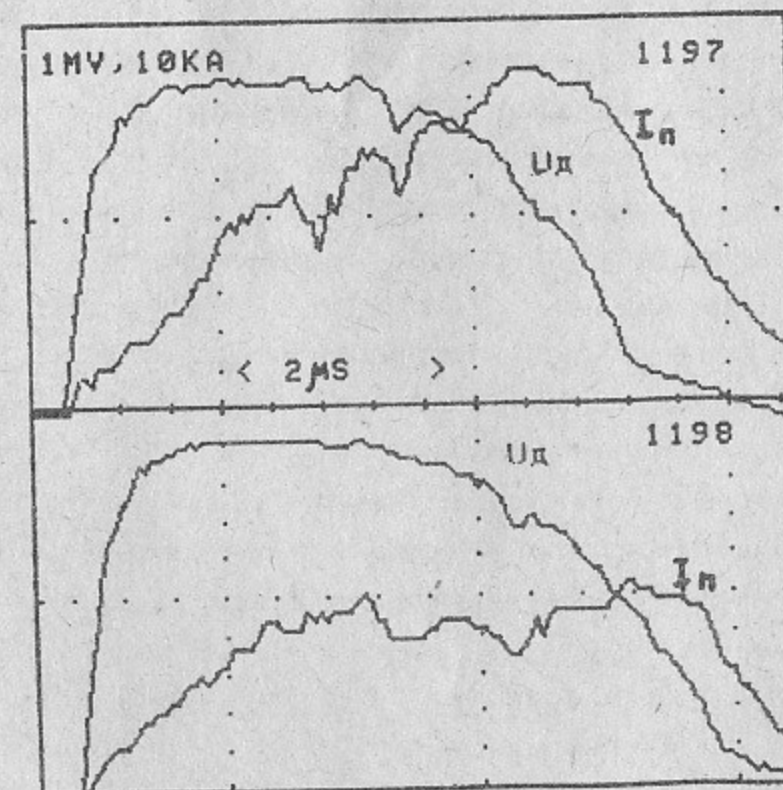


Рис. 9. Осциллограммы напряжения на диоде ускорителя  $U_d$  и тока пучка на выходе из канала  $I_p$  при различной величине магнитного поля в нем. Выстрел 1197— $B = 4$  кГс, 1198— $B = 9$  кГс.

канале, а обусловлена поведением во времени процессов возбуждения ЭМ колебаний и выхода их из канала.

Трудности с калибровкой регистрирующей системы на больших, в сотни мегаватт, мощностях излучения, а также неопределенности в угловом и пространственном его распределении не позволяют дать с приемлемой точностью оценку полной энергии СВЧ-излучения, генерируемого пучком. Имеющиеся калибровки чувствительности детекторных секций с учетом измеренных значений степени подавления излучения в волноводных трактах аттенюаторами позволяют указать на уровень мощности в несколько сотен мегаватт на длинах волн в районе от 2 до 8 мм. Такой уровень мощности соответствует значениям КПД передачи энергии от пучка к ЭМ волнам в несколько процентов и, по-видимому, может быть повышен путем подбора экспериментальных условий.



#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВОЗМОЖНОЕ РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В проведенных исследованиях реализована проводка через ондуляторное поле ленточного микросекундного РЭП с погонным током  $I \approx 1$  кА/см без разрушения формы его сечения и значительных макроскопических смещений, а также осуществлен вывод из вакуумного канала в атмосферу миллиметрового излучения с длительностью в несколько микросекунд. Прямым путем повышения мощности и полной энергии генерируемого СВЧ-излучения является увеличение ширины пучка при сохранении неизменными его погонного тока и других параметров. Так, уже к настоящему времени на установке У-2 осуществлена генерация и устойчивая транспортировка в щелевом вакуумном канале с однородным магнитным полем 0.6 Т ленточного пучка с сечением 3 x 130 см и амплитудой тока около 35 кА. Кроме того, существенную роль должна играть возможность подбора величины поперечной составляющей магнитного поля в ондуляторе, что может осуществляться варьированием тока в специальной обмотке. Проект такого ондулятора для пучка с большим сечением уже разработан. В вакуумную камеру с сечением 10 x 145 см и магнитным полем до 10 кГс, в которой осуществлялась транспортировка указанного выше пучка, должна помещаться обмотка, запитываемая от отдельной конденсаторной батареи создающая ондуляторное поле с периодом 4 см и амплитудой до 2 кГс. Для того, чтобы обеспечить генерацию излучения с достаточно узким спектром, на концах канала с ондуляторным полем предусматриваются брэгговские решетки.

В заключение выражаем признательность Д.Д. Рютову за поддержку работы, и В.С. Койдану за содействие ее выполнению. Мы благодарны Р.П. Зоткину, В.А. Капитонову, К.И. Меклеру и В.С. Николаеву за помощь при подготовке экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky and M.V. Yushkov. Propagation of Microsecond Ribbon REB in the Plane Wiggler with Guiding Magnetic Field. Twelfth International Free Electron Laser Conference, Program and Abstracts, p.105. Paris, 1990.
2. V.L. Granatstein, T.M. Antonsen, Jr., S. Bidwell, et al. A Program of High Power Microwave Source Research and Development from 8 GHz to 600 GHz. Proceedings of the Eighth International Conference on High-Power Particle Beams, Vol.1, pp.295-306. Novosibirsk, 1990.

А. В. Аржанников, С. Л. Сеницкий, М. В. Юшков

Микросекундный ленточный РЭП  
в плоском ондуляторе и генерация  
в этой системе миллиметрового излучения

Ответственный за выпуск: С. Г. Попов

---

Работа поступила - 23 августа 1991 г.  
Подписано к печати 23. 08. 1991 г.  
Формат бумаги 60×90 1/16  
Объем 1,4 п. л., 1,1 уч. - изд. л.  
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ N 85.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.