

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

01;09;10

Журнал технической физики, т. 66, в. 3, 1996

О ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО УЛЬТРАКОРОТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© Л.Н.Казанский, А.А.Рухадзе, П.В.Рыбак

Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 7 декабря 1994 г.)

1. В работе [1] был предложен новый метод генерации мощного ультракороткого ЭМИ с помощью сканирующего РЭП. Обсуждалась возможность генерации тераватного импульса излучения пикосекундной длительности путем сканирования мегаватного РЭП с плотностью тока в несколько кА на см² и толщиной 1 мм вдоль внутренней поверхности цилиндрического коаксиала сантиметровых размеров. При этом в коаксиале возбуждается пикосекундный импульс ТЕМ-волны, мощность которого ограничена торможением электронов пучка полем самого импульса (что соответствует предельному току пучка в коаксиале). В случае инжекции пучка с толщиной a и энергией электронов $W = eV_0 = mc^2\gamma$ с внутренней поверхности коаксиала с радиусом R и r_0 максимальная мощность импульса ЭМИ с длительностью $\tau = a/c$ при этом порядка

$$P_{\max} \simeq I_{\text{пр}} U_0 \simeq \frac{mc^3\gamma}{2e} U_0 \frac{a}{R - r_0} \frac{\ln R/r_0}{\ln \frac{R-r_0}{r_0 \ln R/r_0} + \frac{r_0}{R-r_0} \ln \frac{R}{r_0} - 1},$$

а радиальная компонента поля ЭМИ $E_r \approx \frac{U_0}{r_0}$. При $W = 10^7$ эВ, $a = 0.1$ см, $r_0 = 1$ см и $r_0/R = 1/3$, отсюда находим $P_{\max} \approx 6 \cdot 10^{11}$ Вт, $E_r \approx 10^7$ В/см, $\tau \approx 3 \cdot 10^{-12}$ с. Эта оценка согласуется с приведенными в работе [1], в которой, однако, отмечалось, что она может оказаться оптимистической, поскольку нелинейные явления могут привести к более жесткому ограничению мощности, в частности, из-за расплывания импульса и увеличения его длительности по сравнению с $\tau = a/c$.

2. Для проверки приведенной выше оценки и исследования нелинейной стадии генерации ЭМИ с помощью сканирующего РЭП нами

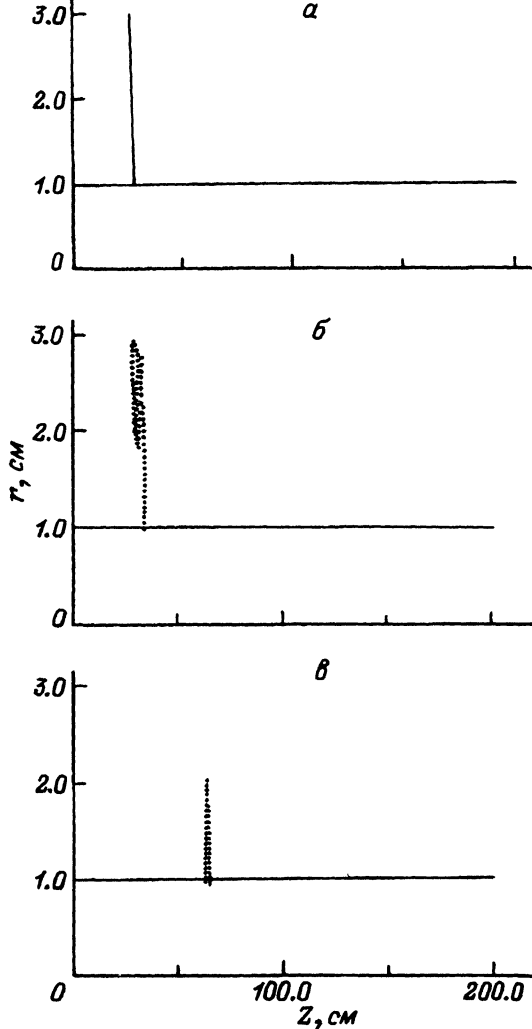


Рис. 1. Местоположение электронов пучка в плоскости RZ в различные моменты времени.

a — 0.8, $б$ — 1.0, $в$ — 2.0 нс.

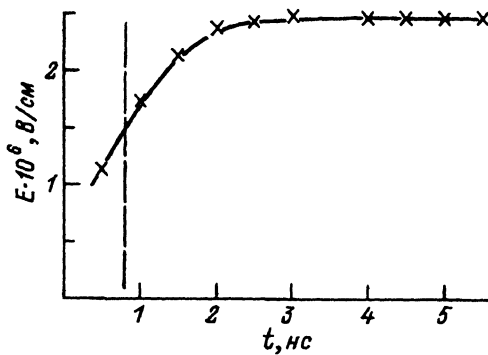


Рис. 2. Зависимость $E_r(t)$ для пучка с током 5 кА и энергией 1 МэВ.

было проведено численное моделирование задачи с использованием кода "KARAT" [2]. В данных вычислительных экспериментах РЭП с различными значениями энергии электронов и током пучка инжектировался с внутреннего цилиндра коаксиала с $r_0 = 1$ см на внешний с $R = 3$ см; толщина пучка во всех расчетах составляла $a = 0.4$ см (т.е. начальная длительность ЭМИ порядка 10^{-11} с), причем поверхность инжекции перемещалась вдоль оси коаксиала со скоростью света. Ниже приводятся результаты для пучка с $I_b = 5$ кА и $W = 1$ МэВ; $I_b = 20$ кА и $W = 10$ МэВ. Эти токи намного меньше предельного тока инжекции в коаксиальное дрейфовое пространство для рассматриваемой геометрии, и поэтому провисанием потенциала пучка можно пренебречь, хотя само поле пучка учитывалось для правильного определения поля ЭМИ и его мощности.

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования временной динамики местоположения пучка $r(z, t)$ для различных моментов времени при инжекции пучка с током $I_b = 5$ кА и энергией электронов $W = 1$ МэВ. Видно, что для такого пучка первые отраженные электроны появляются при $t > 0.8$ нс. С этого момента времени пучок начинает расплываться по Z , и при $t \geq 1$ нс появляется большее число частиц с $\dot{P}_r < 0$, а при $t \geq 2$ нс пучок становится запертым, отраженные ранее электроны значительно отрываются от пучка.

На рис. 2 представлена зависимость $E_r(t)$ для пучка с током 5 кА и энергией 1 МэВ. Штриховой линией отмечен момент времени, когда в системе появились первые отраженные частицы ($t = 0.8$ нс). Напряжение поля в этот момент достигает значения порядка $1.4 \cdot 10^6$ В/см, что за вычетом собственного поля пучка, равного $3 \cdot 10^5$ В/см, соответствует радиальному полю пространственного заряда пучка с предельным током. Следует обратить внимание, что рост радиальной компоненты поля ЭМИ продолжается и после появления отраженных электронов, т.е. даже плохой по качеству пучок продолжает накачку ЭМИ без существенного его расплывания. Правда в этом случае происходит замедление роста поля и в конечном итоге амплитуда электромагнитного поля становится равной $2.5 \cdot 10^6$ В/см в момент времени 2.5 нс, после чего величина амплитуды накачки остается практически неизменной. Ширина ЭМИ, как показали результаты численного моделирования, в данных вычислительных экспериментах зависела от расстояния между внутренним и внешним радиусами коаксиала. В частности, так как инжектируемые с внутренней линии коаксиала электроны не имели продольной скорости, то они проходили расстояние в 2 см за 0.07 нс. Таким образом, в данной серии ширина ЭМИ в начальные моменты времени до появления отраженных частиц была равной 2.3 см. Следовательно, толщина пучка в данном случае не играла существенной роли в определении длительности импульса ЭМИ. Начиная с момента времени $t = 2.5$ нс, т.е. когда пучок запирается возбуждаемой волной, ширина импульса равна приблизительно 4.2 см; это, по всей видимости, связано с тем, что электроны пучка в середине коаксиала полностью тормозятся (рис. 3), затем начинают двигаться от середины коаксиала к его внутренней линии, набирая радиальную скорость. На основании этого предположения ширина ЭМИ должна быть порядка 4 см, что достаточно хорошо согласуется с результатами численного моделирования.

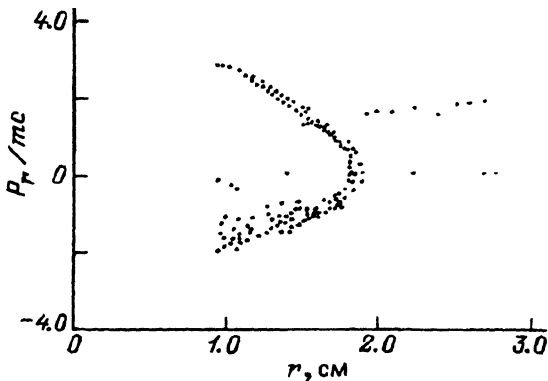


Рис. 3. Зависимость радиального импульса электронов пучка от координаты R в момент времени $t = 3$ нс.

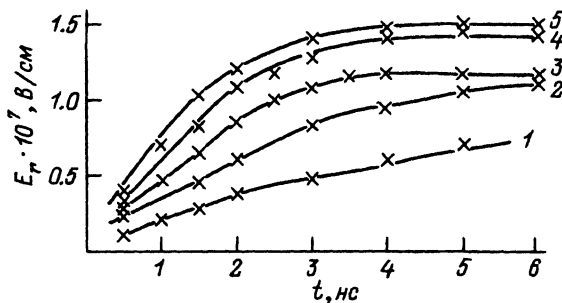


Рис. 4. Зависимость $E_r(t)$ для пучка с энергией 10 МэВ и различными значениями тока пучка.

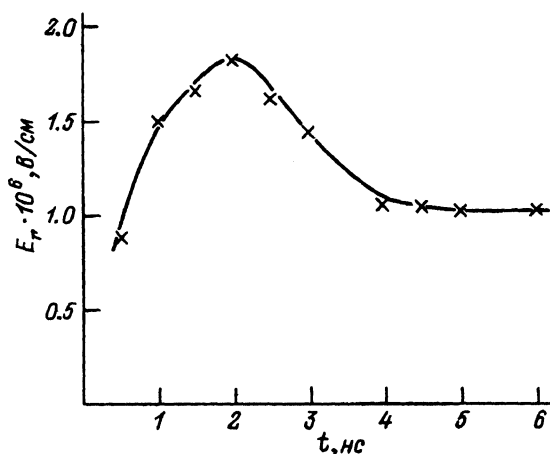


Рис. 5. Зависимость радиального поля ЭМИ от времени для пучка с энергией 1 МэВ и током 5 кА без учета собственного поля пучка, который был выключен в момент времени $t = 2$ нс.

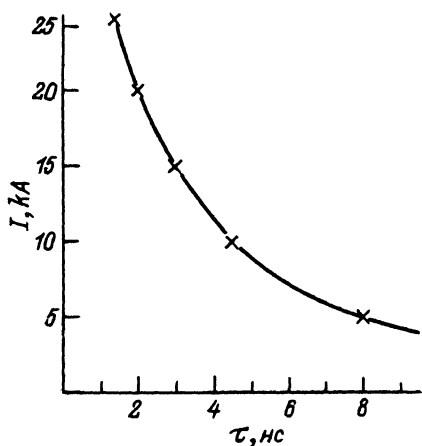


Рис. 6. Зависимость момента появления отраженных электронов от тока пучка.

На рис. 4 представлены результаты численных экспериментов по накачке ЭМИ релятивистским электронным пучком с энергией 10 МэВ и различными значениями тока пучка: 1 — 6, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 25 кА. Величина E_r на рисунке представлена без учета собственного поля пучка, вносимого им в систему в начальный момент времени, эти величины E_r для пучка равны соответственно $4 \cdot 10^5$ (1), $6.2 \cdot 10^5$ (2), 10^6 (3), $1.3 \cdot 10^6$ (4), $1.7 \cdot 10^6$ В/см (5). Но это правильно только до момента времени, когда в системе появляются отраженные частицы, так как с их появлением заметную долю в величину собственного поля пучка вносят не только частицы, движущиеся от внутренней линии коаксиала, но также и отраженные электроны, движущиеся к внутренней линии коаксиала. Таким образом, если вышеприведенные значения для E_r увеличить вдвое, то во всех случаях (рис. 4), за исключением кривой 1, величина радиальной составляющей электромагнитных волн выходит на значение порядка 10^7 В/см, что соответствует начальной энергии электронов пучка, которым производится накачка ЭМИ.

На рис. 5 представлена зависимость радиального поля ЭМИ от времени для пучка с энергией 1 МэВ и током 5 кА без учета собственного поля пучка, который был выключен в момент времени $t = 2$ нс. Как видно из представленной зависимости, после выключения пучка за 2 нс амплитуда волны накачки уменьшается с $1.7 \cdot 10^6$ до $1.2 \cdot 10^6$ В/см, далее в течение следующих 2 нс величина поля волны остается практически неизменной и равной $1.1 \cdot 10^6$ В/см, а расплывание ЭМИ практически прекращается, что и указывает на перспективность использования РЭП для генерации мощного ЭМИ. Толщина ЭМИ увеличилась за 4 нс с 4.2 до 6 см.

На рис. 6 приведена зависимость момента появления отраженных электронов от тока пучка при одном значении энергии электронов $W = 10$ МэВ. Эта зависимость чисто гиперболическая, т.е. $t_{кр} \approx \frac{1}{I_b}$, причем отношение $t_{кр}$ к длительности импульса ЭМИ τ с хорошей степенью точности совпадает с отношением предельного тока к току пучка.

Таким образом, проведенное численное моделирование процесса генерации мощного ультракороткого ЭМИ с помощью сканирующего РЭП показало, что этот метод является эффективным и способным генерировать в цилиндрическом коаксиале ЭМИ с мощностью, превосходящей мощность РЭП с предельным током для данной геометрии. Открывается возможность генерации таким методом пикосекундных ЭМИ с тераваттной мощностью. При этом уменьшение длительности импульса ЭМИ возможно с увеличением продольной составляющей скорости инжектируемых электронов. Но при этом уменьшается нормальная составляющая скорости инжекции, что в свою очередь увеличивает длительность импульса. Процесс инжекции должен быть оптимизирован, что представляется предметом специального исследования.

Список литературы

- [1] Казанский Л.Н., Рухадзе А.А. // Письма ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 3.
- [2] Tarakanov V.P. User's Manual for Kode "KARAT". BRA, Inc. V.A. USA, 1992.