

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И РЕЗОНАТОРА МИКРОТРОНА НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ

А.В. Кольцов, А.В. Серов

Численными методами исследован процесс установления ускоренного тока в микротроне, в резонаторе которого третьей гармоникой тока пучка возбуждается мода E_{011} . Показано, что наведенное напряжение может приводить к ограничению величины ускоренного тока.

Как показано в работах /1—3/, возбуждение в резонаторе микротрона моды E_{011} , в дополнение к основной моде E_{010} , приводит к улучшению некоторых характеристик пучка, в частности, уменьшается фазовая протяженность сгустков; из-за возрастания коэффициента захвата электронов увеличивается ускоренный ток. Эксперименты /4/ показали, что при соответствующих размерах резонатора эта мода возбуждается самими ускоряемыми сгустками, т.е. мода E_{011} может возникать как паразитная мода и возбуждаться третьей гармоникой тока пучка. Однако до настоящего времени не были рассмотрены переходные процессы, связанные с установлением моды E_{011} . На практике эти процессы определяют режим работы микротрона и особенно существенны при достаточно больших ускоренных токах. В настоящей работе рассмотрено установление режима ускорения в микротроне, в резонаторе которого ускоряемыми сгустками возбуждается паразитная мода E_{011} .

Исследованию влияния полей, возбуждаемых ускоряемым пучком, на работу микротрона посвящены работы /5—7/. В них учитывалось взаимодействие пучка и резонатора только на основной частоте, поскольку на этой частоте добротность резонатора и наведенное током напряжение максимальны. На высших гармониках тока пучка добротность резонатора ниже, чем на основной частоте, поэтому наводимые этими гармониками напряжения меньше. Однако влияние паразитной моды E_{011} , возбужденной третьей гармоникой тока пучка, оказывается существенным в основном из-за возникающих поперечных сил /3/.

В настоящей работе взаимодействие пучка и резонатора исследовалось путем численного решения уравнений возбуждения полей основной и паразитной мод с использованием зависимости коэффициента захвата от амплитуд первой и третьей гармоник. Уравнения возбуждения имеют вид:

$$\dot{W}_1 = P_0 - P_{r1} - P_a - P_n - P_i, \quad (1)$$

$$\dot{W}_3 = P_i - P_{r3}, \quad (2)$$

где $W_{1,3} \propto E_{1,3}^2$ — энергия; $E_{1,3}$ — напряженность поля; P_0 — мощность, поступающая от генератора; $P_{r1} = \omega W_1/Q_1$; $P_{r3} = 3\omega W_3/Q_3$ — мощности потерь в резонаторе на 1-й и 3-ей гармониках; $Q_{1,3}$ — добротность резонатора; $P_a \propto I_0 k$ — мощность ускоренных электронов; $P_n \propto I_0(1-k)E_1$ — мощность нерезонансных электронов; $P_i \propto I_0 k$ — мощность возбуждения третьей гармоники; $I_0 \sim T^2 \exp(d\sqrt{E_1}/T)$ — ток эмиссии; T — температура катода; k — коэффициент захвата. Индексы 1 и 3 соответствуют величинам, относящимся к первой и третьей гармоникам.

Из принципа работы микротрона следует, что напряженность ускоряющего поля в данный момент (a , следовательно, и коэффициент захвата, и интенсивность пучка) зависит от нагрузки резонатора частицами, инжектированными ранее. Поэтому в уравнениях (1) и (2) необходимо учитывать запаздывание изменения интенсивности ускоренного тока относительно изменения амплитуды поля. При расчетах использовалась модель запаздывания релейного типа /6/, при которой коэффициент захвата $k(t)$ и ток эмиссии $I_0(t)$ определялись значением поля в момент времени $t - t_d$. Время запаздывания t_d приблизительно равно времени пролета сгустка от первой до последней орбиты. Коэффициент захвата описывался соотношением

$$k = -18[E_1 - (0,05E_3 + 2E_3^2 + 1,01)]^2 - 3,6(E_3 - 0,06)^2 + 0,037, \quad (3)$$

которое хорошо аппроксимирует зависимости, полученные в /3/.

Система уравнений с запаздывающим аргументом (1) — (3) решалась численно методом Рунге — Кутты. Постоянная мощность от внешнего генератора P_0 начинала поступать в резонатор в момент $t = 0$. Рассматривался процесс установления ускоренного тока в микротроне. Результаты расчетов приведены на рис. 1, 2, где P_0 дано в относительных единицах. Рис. 1а соответствует ускорению только в поле основной моды ($P_i = 0, W_3 = 0$), рис. 1б — ускорению в поле основной и паразитной мод. На рис. 1а кривой 2 показан случай, хорошо известный из экспериментов /8/, когда при некоторых значениях подводимой к резонатору мощности ускоренный ток возникает только в начале и в конце импульса. Это объясняется тем, что ускоряющее поле в резонаторе соответствует условиям ускорения только на фронтах импульса, а на плоской части импульса поле слишком велико. Возбуждение в резонаторе микротрона моды E_{011} понижает амплитуду

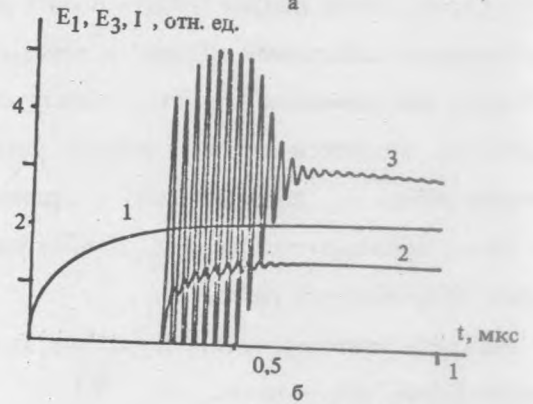
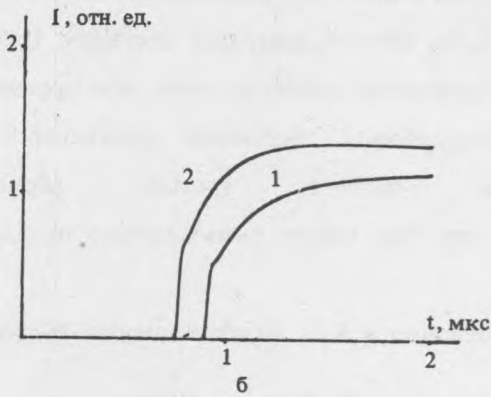
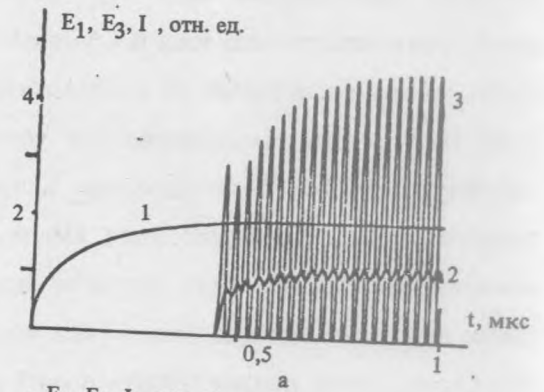
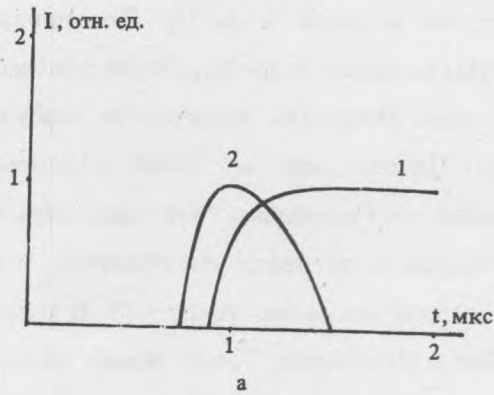


Рис. 1. Установление тока пучка при ускорении в поле основной моды (а) и в поле основной и паразитной мод (б); время запаздывания $t_d = 7$ нс, $Q_1 = 10^4$, $Q_3 = 1.5 \cdot 10^3$, $T = 1700$ К, $P_0 = 1.0$ (1), $P_0 = 1.05$ (2).

Рис. 2. Зависимость от времени амплитуд основной E_1 (1) и паразитной E_3 (2) мод и тока пучка I (3), $t_d = 7$ нс, $Q_1 = 10^4$, $Q_3 = 1.5 \cdot 10^3$, $T = 1890$ К, $P_0 = 2.2$ (а), $P_0 = 2.4$ (б).

ускоряющего поля, поскольку часть мощности генератора идет на возбуждение паразитного поля. Поэтому работа резонатора с паразитной модой позволяет получить устойчивый режим ускорения при тех значениях подводимой к резонатору мощности, при которых ускорение только на основной моде E_{010} невозможно (ср. кривые 2 на рис. 1а и 1б). Паразитная мода расширяет диапазон значений ускоряющего поля, при которых возможно ускорение, и увеличивает коэффициент захвата электронов, а следовательно, ускоренный ток.

При увеличении уровня мощности генератора и тока эмиссии картина установления ускоренного тока существенно меняется. На рис. 2 приведены зависимости ускоренного тока, амплитуды первой и третьей гармоник от времени. Полученные зависимости можно объяснить

следующим образом. До появления ускоренного тока амплитуда ускоряющего поля в резонаторе экспоненциально нарастает с постоянной времени $\approx \omega/Q_1$. При возникновении ускоренного тока начинает возбуждаться мода E_{011} , постоянная нарастания которой $\approx 3\omega/Q_3$. Это приводит к увеличению ускоренного тока и к уменьшению амплитуды основной моды E_{010} из-за расходования части энергии генератора на возбуждение паразитной моды. Мощность, теряемая на возбуждение паразитной моды, пропорциональна ускоренному току. Поэтому при некоторой величине тока амплитуда основного ускоряющего напряжения уменьшается настолько, что происходит срыв процесса ускорения. После этого амплитуда наведенной моды начинает уменьшаться, и растет основное ускоряющее поле, достигая величины, при которой возможно ускорение. В результате таких процессов импульс тока пучка представляет собой серию пиков. Такой режим возникает в том случае, когда напряженность поля в резонаторе близка к нижнему пороговому значению. При повышении подводимой мощности переходные процессы на фронте импульса затухают (рис. 2б). Однако, как показали расчеты, существует некоторое предельное значение тока, при превышении которого возможен только режим устойчивых автоколебаний. Величина предельного тока определяется добротностью резонатора на частоте третьей гармоники, а также временем задержки t_d . В некоторых случаях этот ток может быть меньше предельного тока, полученного в работе /6/.

Авторы благодарны В.Г. Куракину за полезные замечания и К.А. Беловинцеву за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беловинцев К.А., Серов А.В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 12 (1979).
2. Беловинцев К.А., Левонян С.В., Серов А.В. Препринт ФИАН № 4, М., 1979.
3. Беловинцев К.А., Левонян С.В., Серов А.В. ЖТФ, 51, 752 (1981).
4. Беловинцев К.А., Серов А.В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 18 (1983).
5. Косарев Е.Л. Сб. Электроника больших мощностей, № 5, М., Наука, 1968, с. 283.
6. Косарев Е.Л. ЖТФ, 42, 2239 (1972).
7. Карев А.И., Куракин В.Г. Препринт ФИАН № 174, М., 1978.
8. Капица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон. М., Наука, 1969.

Поступила в редакцию 12 декабря 1990 г.