

10;12

Безнакальная магнетронная пушка как источник электронов для резонансного линейного ускорителя

© Г.М. Иванов, Л.А. Махненко, С.А. Черенцов

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
310108 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 23 февраля 1998 г.)

Описываются исследования работы магнетронной пушки с холодным катодом в составе линейного ускорителя на бегущей волне. Наблюдались два режима работы пушки, отличающиеся наличием СВЧ поля предгруппирователя вблизи пушки. В режиме без СВЧ поля получены короткие (около 2 ns) импульсы ускоренных электронов амплитудой до 0.5 А при токе пушки до 20 А. Наличие СВЧ поля вблизи пушки позволяет получать пучок большей длительности (до 1.0 μ s), но с током до 20 mA на выходе ускорителя и 1 А с пушки. Механизм работы пушки связывается со вторично-электронным нарастанием тока и установлением самоподдерживаемой вторичной эмиссии. Сравнение условий проводки пучка от термоэлектронной пушки с исследуемой при тех же энергиях инжекции указывают на то, что характеристики исследуемой пушки приемлемы для целей инжекции в ускоритель.

Введение

Развитие ускорительной техники и связанной с ней техники мощных источников СВЧ выдвигает новые требования к соответствующим источникам мощных электронных пучков. При этом все чаще приходится рассматривать альтернативы традиционным источникам на основе термоэмиссионного катода. Одной из таких альтернатив в случаях необходимости достижения одновременно высокой плотности тока и большого срока службы может быть магнетронная пушка в режиме вторичной эмиссии [1]. Большой срок службы катода создает новые возможности в ускорительной технике, например производство отпаянных промышленных ускорительных модулей вместо существующих откачных систем. Кроме того, магнетронная пушка с ненакаливаемым катодом, как будет показано ниже, способна формировать короткие (наносекундные) импульсы тока пучка в ускорителе из сравнительно длительных импульсов напряжения на пушке. Это имеет существенное практическое значение при создании сильноточных короткоимпульсных ускорителей, так как облегчает формирование необходимых для питания пушки импульсов высокого напряжения. Кроме того, предполагается, что магнетронная пушка с ненакаливаемым катодом будет устойчива к бомбардировке обратными электронами, отраженными со значительной энергией от ускоряющей структуры, которая как показывает опыт эксплуатации подобных ускорителей [2], может ограничивать частоту посылок и срок службы катода. Магнетронная пушка имеет ряд особенностей, которые могут повлиять на работу в составе резонансного ЛУЭ. Это — прежде всего не экранированный от магнитного поля катод и трубчатая форма пучка. Предварительная оценка их влияния и особенностей работы такой пушки в составе резонансного ЛУЭ являлось целью проведенного исследования.

Описание экспериментальной установки

Для проведения испытаний был использован универсальный инжекторный комплекс (УИК) ускорителя ЛУЭ-300 [3]. УИК предназначался для расширения возможностей ЛУЭ-300 в направлении повышения тока пучка при малой (наносекунды) длительности в режиме запасенной энергии. УИК состоял из двух ускоряющих и одной инжекторной секции, которые для повышения запасенной энергии снабжены системой рекуперации; группирующих резонаторов помещенных в фокусирующие соленоиды и универсальной триодной пушки с компрессией пучка на основе металлопористого термоэлектронного катода. При проведении эксперимента триодная пушка была демонтирована, а на ее изоляторе смонтирована магнетронная пушка.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Магнетронная пушка *MG* состояла из цилиндрических коаксиальных электродов, помещенных внутри соленоида предгруппирователя *SG*. Катод *C* представлял из себя тонкий металлический стержень диаметром около 3 mm, установленный на высоковольтном изоляторе *I* в пролетном канале, стенки которого служили анодом *A*. Столь малый диаметр катода был выбран с целью уменьшения влияния магнитного поля на катод на проводку пучка. Система подачи импульсного напряжения малой длительности на катод, служившая для управления временно демонтированной пирсовской триодной пушки, была использована для измерения тока с катода. Она состояла из коаксиального кабеля, служившего вторичной обмоткой высоковольтного импульсного трансформатора *PT*. Через этот кабель сигнал тока пушки передавался из высоковольтных цепей на измерительный осциллограф *IO*. Более подробно схема стенда УИК изложена в нашей предыдущей работе [3].

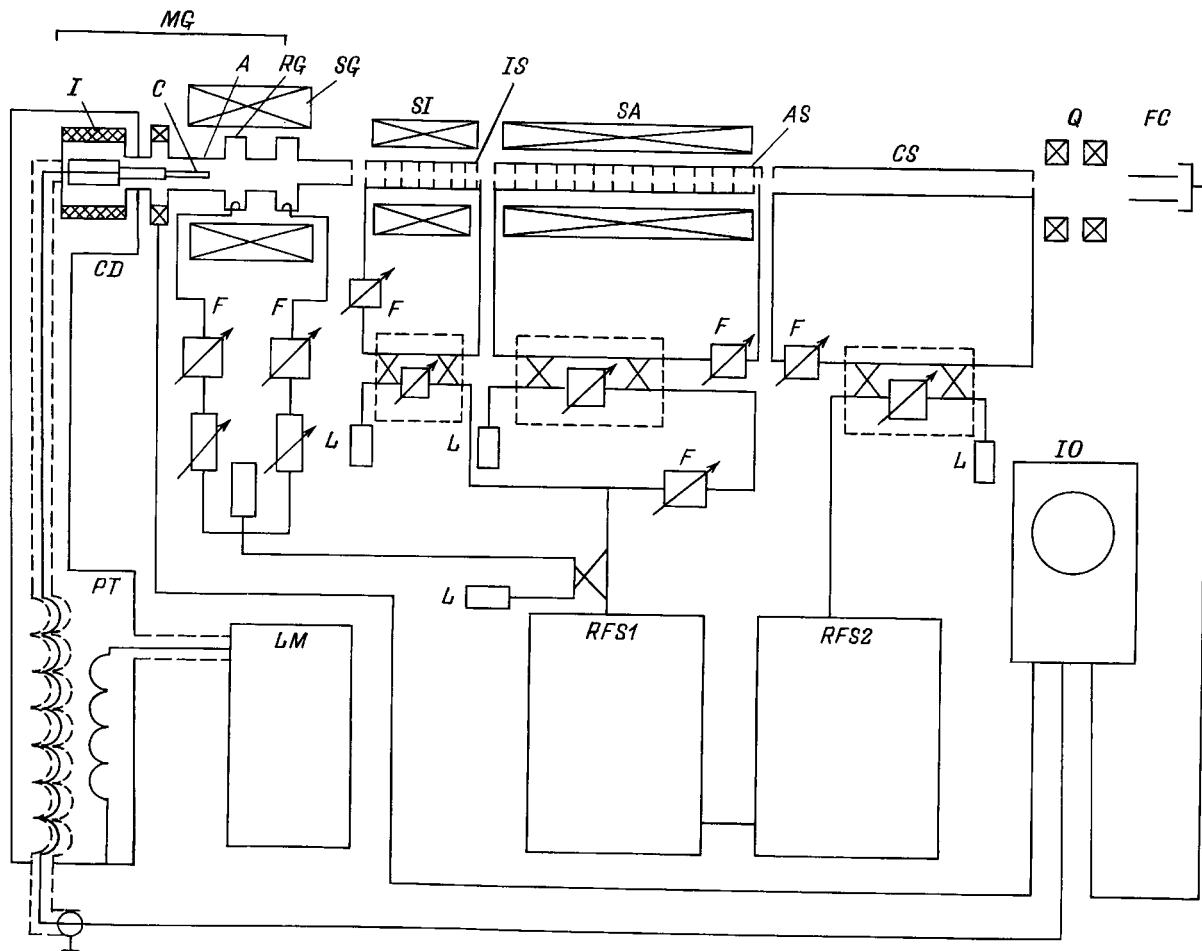


Рис. 1. Схема эксперимента. *MG* — магнетронная пушка с ненакаливаемым катодом: *C* — катод, *I* — высоковольтный изолятор, *A* — анод (пролетная трубка); *PT* — импульсный высоковольтный трансформатор; *LM* — линейный модулятор; *CD* — индукционный датчик тока; *RG* — резонатор предгруппирователя; *SG, SI, SA* — соответственно фокусирующие соленоиды предгруппирователя инжекционной и ускоряющей секции; *IS* — инжекционная секция; *AS* — ускоряющая секция; *CS* — ”коллимирующая” секция, ее система питания при проведении этих экспериментов не включалась, эта секция была использована в качестве коллиматора при оценке эмиттанса; *L* — нагрузки; *F* — фазовращатели; *RFS 1, RFS 2* — источники СВЧ мощности (клистронные усилители); *Q* — квадрупольные линзы; *FC* — цилиндр Фарадея; *IO* — осциллограф.

Испытание работы пушки

При подаче импульсов высокого напряжения на катод при помощи импульсного трансформатора после включения тока соленоида *SG*, создававшего магнитное поле в области пушки, были получены импульсы тока с катода с амплитудой до 20 А. Их длительность в зависимости от режима менялась от 20 ns до 0.5 μ s. Вольт-амперная характеристика пушки, представленная на рис. 2, близка к квадратичной. Применение одинакового материала катода с ранее исследованной пушкой [4] позволяет сравнивать их параметры на основе теории подобия согласно соотношению из [1]

$$I = C \frac{U^2}{BD_c \ln \frac{D_a}{D_c}}, \quad (1)$$

где *I* — ток пучка магнетронной пушки; *D_a*, *D_c* — соответственно диаметры катода и анода пушки; *C* —

параметр, зависящий от эмиссионных свойств катода; *U* — напряжение на пушке; *B* — магнитная индукция.

Сравнение показывает увеличение тока в нашем случае. Это связано, по-видимому, с большей величиной магнитного поля. Такое отклонение от указанного соотношения качественно согласуется с измеренной позже зависимостью тока от магнитного поля [5], где ток уменьшается с ростом магнитного поля слабее, чем обратно пропорциональная зависимость.

Сильноточный режим ускорения

После подачи высокочастотной мощности в ускоряющей секции и соответствующей настройки системы проводки пучка на выходе УИК был получен ток ускоренных электронов до 0.5 А при токе пушки около 12 А и напряжении на ней около 45 кВ. Малый коэффициент захвата

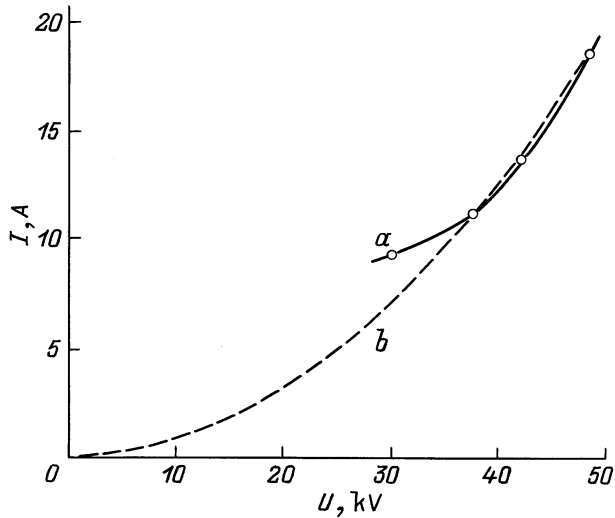


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика магнетронной пушки (при магнитном поле 220 мТ): *a* — экспериментальные данные, *b* — аппроксимация квадратичной параболой.

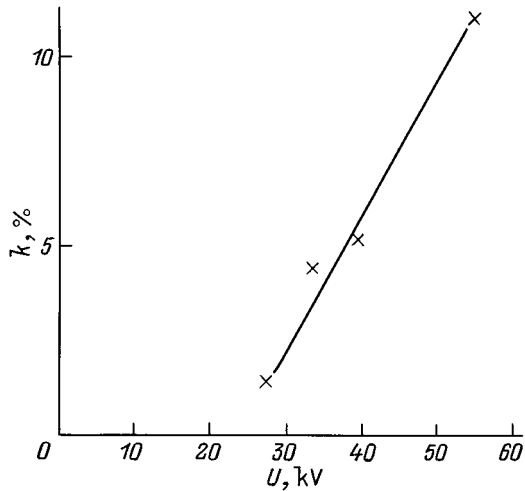


Рис. 3. Зависимость коэффициента захвата от напряжения для традиционной пушки с термокатодом.

пучка в режим ускорения, вероятно, был связан с низкой энергией инжекции, соответствующей низкому напряжению на пушке. Из последующих измерений коэффициента захвата с традиционной пирсовской пушкой с термокатодом в зависимости от ускоряющего напряжения, график которой приведен на рис. 3, видно, что коэффициенты захвата при соответствующих напряжениях близки. Длительность импульса релятивистских электронов на выходе ускорителя при этом составляла около 20 нс. Длительность тока пушки и напряжения на ней были существенно больше и составляли соответственно 50 нс и 1 мкс. Сокращение длительности импульса на выходном цилиндре Фарадея связано главным образом с двумя факторами: малым (вплоть до 1 нс) временем возбуждения вторичной эмиссии в пушке вблизи амплитудного

напряжения на ней и режимом накопленной энергии при питании пушки и ускоряющих секций. Фронт импульса при этом формируется за счет быстрого возбуждения вторичной эмиссии, а длительность будет зависеть от величины накопленной энергии и тока пучка, увеличиваясь с увеличением накопленной энергии и уменьшаясь с увеличением тока.

При проведении испытаний были включены только группирующая и инжекционная ускоряющие секции. Ускоренный пучок проходил "пустую", т.е. без подачи СВЧ питания и фокусирующего соленоида, секцию. Кроме того, эта секция отличалась малым последовательным сопротивлением связи [3] и при достигнутом в нашем случае токе влиянием наведенного поля на движение пучка можно пренебречь. Таким образом, секция играла лишь роль коллиматора в форме длинной трубы с известной апертурой. В этом случае по длине L и диаметру d можно оценить эмиттанс пучка [6] сверху как произведение углового разброса d/L на апертуру d , поделенное на π , согласно соотношению

$$\varepsilon \leq \frac{d^2}{\pi L}.$$

Подставляя численные значения апертуры 3.0 см и длины пролетной трубы 200 см, получаем оценку $14 \text{ cm} \cdot \text{m rad}$.

О возбуждении тока магнетронной пушки с холодным катодом вблизи частоты электронного циклотронного резонанса

В процессе испытаний магнетронной пушки с холодным катодом в составе УИК нами было обнаружено влияние подачи высокочастотной мощности в резонатор на возбуждение тока в пушке. Пушка была расположена вблизи резонатора предгруппирователя в магнитном поле, как на рис. 1. При этом, СВЧ поле через короткий участок пролетного канала, представлявшего собой запределный волновод, могло проникать на катод пушки. Первоначально был обнаружен ток с катода, который не захватывался в режим ускорения. Ток протекал в течение почти всей длительности импульса напряжения на катоде (около 1 мкс, 60 кВ). Ток с катода достигал 1 А и возникал в узком интервале магнитных полей вблизи 136–140 мТ. Путем подстройки фазы группирователя удалось получить ток ускоренных до энергии свыше нескольких MeV электронов на выходе УИК величиной до 20 мА с длительностью импульса, соответствующей длительности импульса напряжения. Примерные осциллограммы импульсов приведены на рис. 4. Длительность СВЧ импульса превышала длительность импульса напряжения на пушке (около 2 мкс), а система синхронизации настраивалась таким образом, чтобы в течение импульса напряжение СВЧ мощность можно было считать постоянной. Таким образом, для получения пучка на выходе

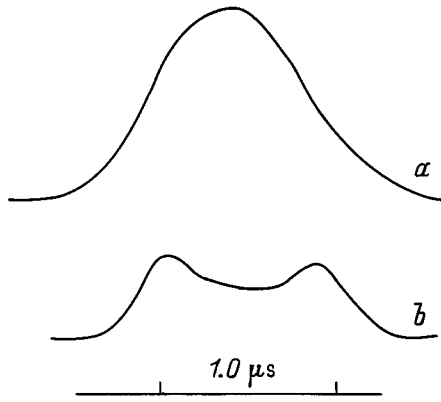


Рис. 4. Осциллограммы импульсов в режиме электронного циклотронного резонанса: *a* — напряжение на пушке, *b* — ток ускоренных электронов на выходе ускорителя.

УИК необходима одновременная подача напряжения на пушку и СВЧ мощности при вполне определенной величине магнитного поля в пушке и соотношении фаз СВЧ в предгруппирователе и в группирующей и ускоряющей секциях.

С учетом рабочей частоты комплекса, на которую настроен предгруппирователь 2797 МГц, и ее близости к частоте электронных циклотронных колебаний можно сделать следующие предположения о характере происходящих процессов. Электроны, испущенные с боковой цилиндрической поверхности катода за счет полевой автоэлектронной эмиссии при подаче на него импульса напряжения движутся по траекториям, близким к циклоидальным и возвращаются к катоду. Под действием относительно слабого СВЧ поля, период колебаний которого совпадает с периодом их движения, часть этих электронов испущенных в соответствующие моменты времени получают от СВЧ поля дополнительную энергию и бомбардируют катод. Под действием электронной бомбардировки катод начинает испускать вторичные электроны, которые за счет совпадения периода их движения с периодом поля также получают дополнительную энергию. По-видимому, подаваемая в группирователь мощность, а она составляла несколько киловатт в импульсе, оказывалась достаточной для обеспечения коэффициента вторичной эмиссии больше единицы. Это должно приводить к быстрому нарастанию тока вторичной эмиссии с боковой поверхности катода вплоть до ее ограничения полем пространственного заряда. При этом неоднородность поля вблизи края катода будет приводить к выталкиванию образовавшихся электронных сгустков в сторону группирователя и ускоряющей системы. Ускорение сгустков будет возможно только в случае совпадения ускоряющей фазы поля в секции с моментами выталкивания сгустков. Известно, что в мультиакторной электронной пушке, работающей благодаря аналогичному эффекту, фазовый размер сгустков весьма мал [7]. Исходя из этого и из наблюдений о настройке фазы для обеспечения режима ускорения, можно предположить малый фазовый размер

сгустка и в нашем случае. Еще одним аргументом в пользу гипотезы о малом фазовом размере сгустка может быть относительно малая величина тока пушки в режиме циклотронного резонатора. В связи с переводом УИК на другую программу работ прямого измерения фазовых размеров сгустков не проводилось.

Следует остановиться на некотором несоответствии рабочей частоты колебаний и циклотронной частоты. Традиционно [8] циклотронный резонанс в магнетронах характеризуется произведением магнитной индукции B на длину волны λ . Для свободных электронов в отсутствии внешних электрических полей имеет место численное соотношение для резонанса

$$B\lambda = 1.065 \text{ T} \cdot \text{cm}. \quad (2)$$

Известно также о провале электронного КПД магнетронов и генерации магнетрона с гладким анодом вблизи 1.2 Тсм [8]. Увеличение произведения $B\lambda$ связано с неоднородностью электрического поля, создаваемого тонким катодом. При этом резонансная частота должна зависеть, хотя и слабо, от напряжения на магнетронной пушке. Результатом такой зависимости может быть двугорбая форма импульса на выходе ускорителя, показанная на рис. 4, если резонанс имеет место при напряжении меньше амплитудного. Это же соотношение (2) справедливо для колебаний электронов между электродами плоского магнетрона при отсутствии пространственного заряда. Поскольку в нашем случае отношение диаметров анода и катода велико, то это произведение для цилиндрического магнетрона может быть больше. Без учета влияния пространственного заряда оно поддается точному расчету. Пренебречь его влиянием можно, поскольку в начале процесса нарастания вторичной эмиссии пространственный заряд не будет существенно влиять на движение электронов. Время пролета электронов для цилиндрического магнетрона от катода и обратно будем определять в соответствии с формулами, приведенными в Приложении к лекциям [9]. Уравнение движения электрона в радиальном направлении, начавшего движение с катода

$$r = -\frac{d\Pi}{dr},$$

$$\Pi(r) = \frac{e}{m} C \ln \frac{r}{a} + \frac{\Omega^2}{8} \left(r - \frac{a^2}{r} \right)^2, \quad (3)$$

где r — радиальная координата электрона; e , m — соответственно заряд и масса электрона,

$$C = \frac{U}{\ln \frac{b}{a}},$$

постоянная C характеризует величину электрического поля через величину приложенного напряжения U и радиусы анода b и катода a , $\Omega = eB/m$ — циклотронная частота.

Это уравнение имеет решение в виде квадратуры

$$\tau = \int_a^r \frac{dr}{\sqrt{-2\Pi(r)}}. \quad (4)$$

Период движения вычислялся как удвоенное время движения $2\tau_{\max}$ до максимального радиуса r_{\max} , при котором $\Pi(r_{\max}) = 0$. Подставляя численные значения по геометрическим размерам пушки $a = 0.15$ см, $b = 1.5$ см и данные эксперимента (среднюю индукцию магнитного поля из интервала, в котором происходит возбуждение эмиссии $B = 138$ мТ, и напряжение на пушке $U = 30$ кВ), получаем в результате компьютерного счета частоту $F = 2.967$ GHz. При рабочей частоте 2.797 GHz соответствие следует признать удовлетворительным.

Выводы

1. Подтверждены основные характеристики и стабильность работы магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом в частотном режиме до 50 Hz включительно.

2. Получен ток релятивистских электронов на выходе резонансного ускорителя, имеющего магнетронную пушку в качестве источника электронов, при захвате не хуже, чем для традиционных пушек.

3. Показано, что ускорительный комплекс с безнакальной магнетронной пушкой способен естественным образом формировать сильноточные наносекундные импульсы релятивистских электронов при микросекундной длительности импульсов высокого напряжения на пушке. Это возможно благодаря быстрому возбуждению в ней большого тока вторичной эмиссии высоким напряжением в режиме работы на запасенной в ускоряющей структуре энергии.

4. Установлено, что при возбуждении резонатора вблизи магнетронной пушки и магнитных полях, соответствующих электронному циклотронному резонансу, наблюдаются инжекция в ускоритель и релятивистские электроны на его выходе в течение всего времени приложения напряжения к пушке. При этом наблюдается удовлетворительное соответствие между рассчитанной частотой колебаний электронов в пушке и рабочей частотой СВЧ поля в ускорителе.

5. Отличительной особенностью режима электронного циклотронного резонанса являются меньшая на порядок величина тока и сильная зависимость тока на выходе ускорителя (вплоть до полного исчезновения) от фазы высокочастотного поля, возбуждающего ток.

6. Оцененная величина эмиттанса пучка (14 см · м рад) позволяет решать вопрос о практическом применении ускорителей с подобным источником электронов.

В заключение авторы выражают признательность А.Н. Опанасенко за помощь в проведении расчетов и стимулирующие обсуждения.

Список литературы

- [1] *Cherenshchikov S.A. et al. // AIP Conf. Proc. 1994. Vol. 337. P. 350–359.*
- [2] *Антропов Г.П., Архангелов Н.А., Бехтев Б.В. и др. // ВАНТ. Сер. Техника физического эксперимента. 1985. Вып. 2(23). С. 3–5.*
- [3] *Иванов Г.М., Курилко В.И., Махненко Л.А. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 4. С. 115–123.*
- [4] *Черенщиков С.А. // Тр. XIII совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1993. Т. 2. С. 142–144.*
- [5] *Cherenshchikov S.A. et al. // Bulletin of the American Physical Society. 1995. Vol. 40. N 3. P. 1166–1167.*
- [6] *Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. // Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980. 160 с.*
- [7] *Gallagher W.J. // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57. N 1. P. 94–95.*
- [8] *Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. II. Электроракумные приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1972. 376 с.*
- [9] *Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. 400 с.*