

УДК 621.384.6

ФОРМИРОВАНИЕ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОННОГО ТОКА В МАГНЕТРОННОЙ ПУШКЕ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ**Н.И. Айзацкий¹, А.Н. Довбня¹, В.В. Закутин, Т.А. Коваленко², Н.Г. Решетняк¹,
В.П. Ромасько¹, И.А. Чертищев¹**¹НИК «Ускоритель» ННЦ «ХФТИ»

1, Академическая, Харьков, 61108, Украина

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

4, пл. Свободы, 61077, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 19 февраля 2008 г.

В магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом получены три режима генерации сгустков электронного тока. Магнетронные пушки способны генерировать сгустки электронного тока в течение большой длительности импульса ≤ 20 мкс с периодом следования ~ 2 мкс с длительностью сгустка ~ 1 мкс. Увеличение количества сгустков можно достичь увеличивая длительность импульса напряжения и уменьшая неравномерность его вершины, а уменьшения длительности сгустков можно достичь уменьшая величину паразитных параметров (индуктивность и ёмкость) импульсного генератора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, сгустки электронного тока, импульс напряжения

Интерес к физике процессов в приборах со скрещенными электрическими и магнитными полями обусловлен их широким применением в вакуумной электронике больших мощностей. Представляет интерес использование в таких приборах в качестве источников электронов магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами [1-3].

При исследовании магнетронных пушек с вторичноэмиссионным катодом был обнаружен колебательный режим их работы [4], при котором формировались отдельные сгустки электронного тока. Это достигалось модуляцией вершины импульса напряжения. С другой стороны, такой режим возникал и при магнитном поле, несколько превышающем поле отсечки Хелла [1,5]. Цель работы – исследование режимов формирования сгустков электронного тока в осевом и радиальном направлениях в зависимости от величины и распределения магнитного поля в магнетронных пушках.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на установке схема, которой приведена на рис.1. Импульс напряжения [1] от импульсного модулятора 1 поступает на катод магнетронной пушки 2, которая находится в магнитном поле соленоида 5. Для питания магнетронной пушки используется импульс напряжения с выбросом на вершине (рис.2). Амплитуда выброса напряжения составляет 30...160 кВ, длительность спада выброса $\sim 0,6$ мкс, длительность плоской части импульса составляет 50...15 мкс, а частота следования импульсов – 3...5 Гц. Основные эксперименты проведены с магнетронной пушкой с диаметрами катода 40 мм и анода – 70 мм, также использовались катод диаметром 80 мм и анод диаметром 100 мм. Магнетронная пушка размещалась в вакуумной камере, в которой поддерживалось давление $\sim 10^{-6}$ Торр.

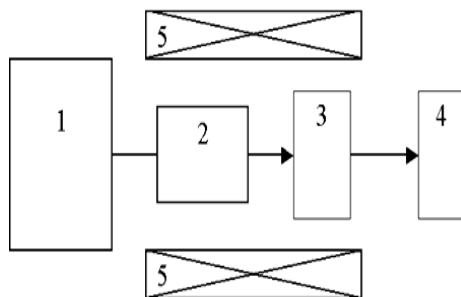


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.
1 – импульсный модулятор, 2 – магнетронная пушка, 3 – цилиндр Фарадея, 4 – компьютерная измерительная система, 5 – соленоид.

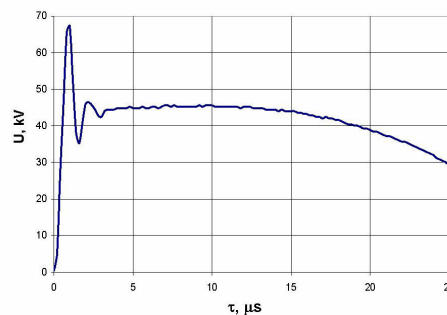


Рис. 2. Импульс напряжения на катоде.

Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создавалось соленоидом 5, амплитуду и продольное распределение магнитного поля можно было регулировать путем изменения величины тока в секциях соленоида.

Параметры электронного пучка с датчика анодного тока, импульса напряжения и цилиндра Фарадея 3 обрабатываются с помощью компьютерной измерительной системы 4. Торцевая часть цилиндра Фарадея 3, в одном случае, изготовлена из нержавеющей стали, охлаждается водой и находилась на расстоянии 90 мм от пушки. Во втором случае, торцевая часть цилиндра Фарадея состояла из 8 сегментов, расположенных равномерно по азимуту на расстоянии 50 мм. Погрешность измерений составляет 1...2%. Полученные данные выводились на экран компьютера. При проведении исследований использовался также цифровой осциллограф с запоминанием Tektronix TDS-2014.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принцип генерации электронного тока в магнетронной пушке основан на вторичноэмиссионном размножении и накоплении электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. При подаче на катод магнетронной пушки импульса напряжения первичные автоэлектроны начинают бомбардировать катод, выбивая из него вторичноэмиссионные электроны, причем количество выбитых электронов превышает количество падающих пропорционально коэффициенту вторичной эмиссии, и, таким образом образуется электронное облако. При небольших магнитных полях, радиус циклоиды большой и электроны двигаются практически во всем зазоре анод-катод, при этом некоторая часть электронов, имеющая большую энергию, может двигаться в направлении анода, и, попадая на анод создавать анодный ток I_a . При увеличении магнитного поля траектории электронов располагаются вблизи поверхности катода и плотность электронного облака увеличивается. Из этого облака краевым электрическим полем формируется электронный пучок I_b в направлении оси пушки (рис.3).

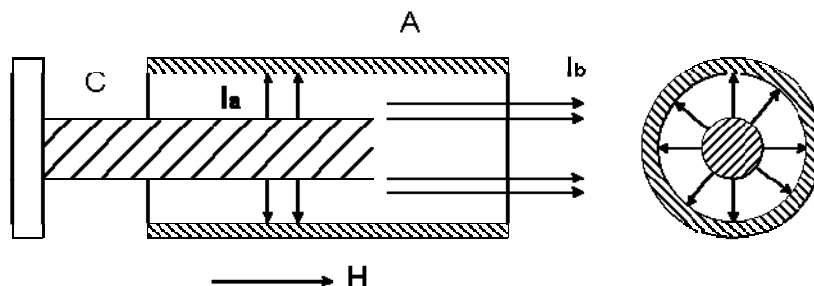


Рис.3. Магнетронная пушка и распределение электронных токов.

Из приведенного механизма формирования электронного облака следует, что во вторичноэмиссионном источнике в скрещенных полях в зависимости от магнитного поля может существовать электронный ток в осевом и радиальном направлениях.

В работе [6] были получены три режима генерации электронного тока в магнетронных пушках: открытый – когда практически весь электронный ток идет вдоль оси на цилиндр Фарадея; закрытый – когда электронный ток идет в радиальном направлении на анод; промежуточный – когда токи идущие в осевом направлении и радиальном примерно равны.

В настоящей работе в этих трёх режимах была изучена генерация сгустков электронного тока, что осуществлялось путём регулировки величины и распределения магнитного поля вдоль оси пушки.

Открытый колебательный режим

Как показали эксперименты, тщательная регулировка и настройка амплитуды и вида распределения магнитного поля (рис.4, кривая 1) вблизи нижней границы формирования электронного тока приводила к генерации сгустков электронного тока в осевом направлении. Этот режим был получен, когда величина продольного магнитного поля вдоль оси пушке в начале катода в 1,3 раза, а в конце катода в 1,6 раза превышает поле отсечки Хелла

$$H_{\text{null}} = 6,72 (U)^{1/2} [r_a(1 - r_k^2/r_a^2)]^{-1}, \quad (1)$$

где H – продольное магнитное поле (Ое), U - напряжение на катоде (В), r_k и r_a - соответственно радиусы катода и анода.

На рис.5а показаны импульсы напряжения на катоде (U) и токов с сегментов цилиндра Фарадея (I_n). Из рисунка видно, что электронный ток на цилиндр Фарадея имеет вид сгустков, при этом амплитуда и форма каждого сгустка практически совпадают, азимутальная неоднородность тока в каждом сгустке составляет $\pm 25\%$, вид азимутального распределения тока каждого сгустка сохраняется.

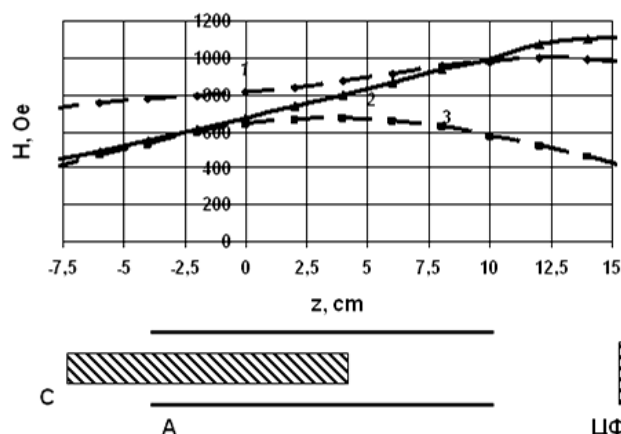


Рис.4. Распределение магнитного поля и расположение элементов.

1 – открытый режим, 2 – закрытый режим, 3 – промежуточный режим, С - катод, А - анод, ЦФ-цилиндр Фарадея.

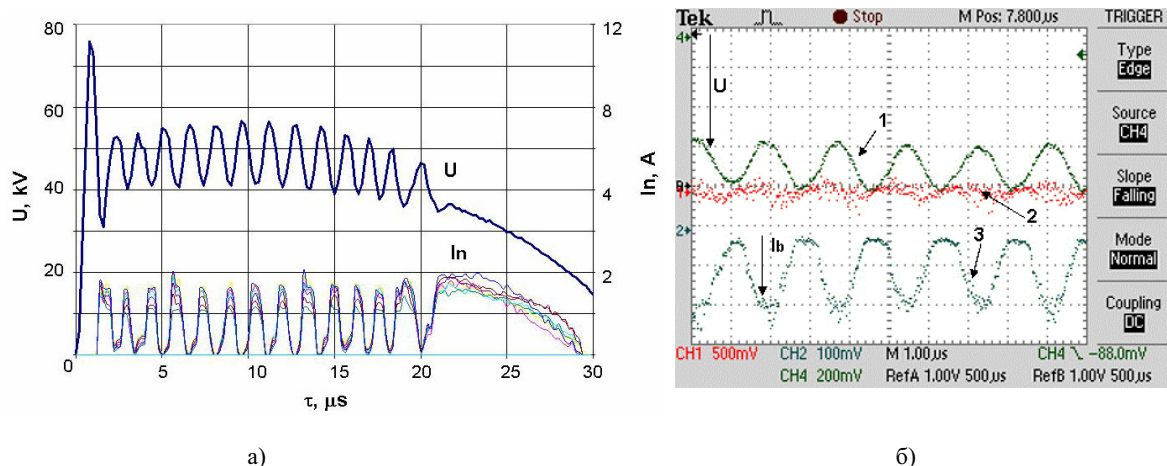


Рис.5. Осциллограммы напряжения на катоде и токов на анод и цилиндр Фарадея (а) и фрагмент центральной части осциллограммы (б).

1- напряжение на катоде, 2- электронный ток на анод, 3- электронный ток на цилиндр Фарадея.

Как видно из осциллограммы, вершина импульса напряжения имеет модуляцию близкую к синусоидальной и начало генерации тока каждого сгустка происходит на соответствующем спаде синусоидальной вершины импульса, а когда напряжение на катоде увеличивается до напряжения отсечки U^* (определяемого из (1) с учётом поправки для магнитного поля) нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения, что приводит к срыву генерации пучка. Наблюдалось до 12 сгустков электронного тока, промодулированных по плотности на 100%, в течение ~ 20 мкс (ток пучка ~ 12 А, ток на анод составляет $\sim 0,3$ А.) до тех пор, пока напряжение на катоде U было больше напряжения отсечки U^* . Когда амплитуда напряжения на вершине импульса становится 36 кВ (меньше чем U^*), то пушка работает в обычном режиме генерации тока, что видно на осциллограмме после окончания колебательного процесса.

На рис.5б приведены фрагменты осциллограммы напряжения (верхняя), электронного тока на анод (средняя) и полного электронного тока на цилиндр Фарадея (нижняя), полученные с помощью осциллографа Tektronix TDS-2014. Длительность сгустков на полувысоте составляет $\sim 0,7$ μ s, период следования сгустков $\sim 1,8$ μ s. Как видно из осциллограмм, форма и амплитуда микроимпульсов напряжения, сгустков электронного тока и период следования сгустков достаточно стабильны в течение этого фрагмента. Следует отметить, что вид азимутальной однородности сгустков в течение их времени следования не изменяется. Измерения показали, что колебания напряжения на катоде магнетронной пушки происходят с частотой, которая зависит от паразитных параметров (индуктивности и емкости импульсного трансформатора) импульсного генератора.

Закрытый колебательный режим

В экспериментах, тщательная регулировка и настройка амплитуды и вида распределения магнитного поля (рис.4, кривая 2), приводила к генерации сгустков электронного тока в радиальном направлении. Этот режим

был получен, когда величина продольного магнитного поля вдоль оси пушки в начале катода в 1,05 раза, а в конце катода в 1,6 раза превышает поле отсечки Хэлла, при этом сохранялось вторичноэмиссионное размножение на катоде. В этом случае импульс напряжения на катоде (U) и электронного тока на анод (I_a) можно разделить на две части (рис.6а). Как видно из осциллограмм, первая часть импульса показывает колебательный режим генерации электронного тока на анод. Возникновение сгустков анодного тока продолжалось в течение ~ 20 мкс до тех пор пока амплитуда напряжения на катоде U больше напряжения отсечки U^* . Когда напряжение на катоде U становится меньше 14 кВ (меньше U^*), то наблюдается типичная форма генерации электронного тока на анод (вторая часть импульса).

Колебания напряжения и период следования сгустков анодного тока происходят с такой же частотой, как и в случае открытого колебательного режима. Механизм генерации колебательного режима анодного тока аналогичен открытому режиму. Электронный ток в осевом направлении на цилиндр Фарадея отсутствовал.

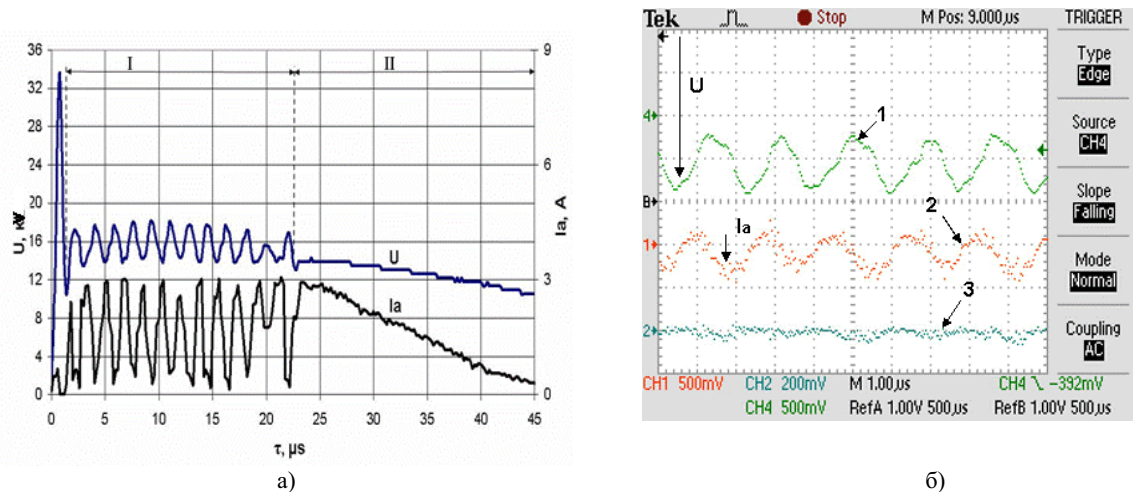


Рис.6. Осциллограммы напряжения на катоде и токов на анод и цилиндр Фарадея (а) и фрагмент центральной части осциллограммы (б).

1- напряжение на катоде, 2- электронный ток на анод, 3- электронный ток на цилиндр Фарадея.

На рис.6б приведены фрагменты осциллограммы напряжения (верхняя), электронного тока на анод (средняя) и электронного тока на цилиндр Фарадея (нижняя). Длительность сгустков на полувысоте составляет $\sim 0,7$ мкс, период следования сгустков $\sim 1,8$ мкс. Как видно из осциллограмм, форма и амплитуда микроимпульсов напряжения, сгустков электронного тока и период следования сгустков достаточно стабильны в течение этого фрагмента.

Промежуточный колебательный режим

Этот режим был получен, когда величина продольного магнитного поля вдоль оси катода в 1,05...1,35 раза превышает поле отсечки Хэлла. Он был получен при распределении магнитного поля показанного на рис.4 (кривая 3). Как видно из полученных осциллограмм, на импульсах напряжения (U) и токов на цилиндр Фарадея (I_n) и на анод (I_a) (рис.7а), можно выделить две характерные области. Первая область характеризует колебательный режим генерации электронного токов на цилиндр Фарадея и на анод.

Повторяющиеся импульсы токов и напряжения продолжают в течение ~ 20 мкс, до тех пор пока напряжение на катоде было больше напряжения отсечки U^* (первая часть импульса). Через время ~ 20 мкс, когда амплитуда напряжения на катоде уменьшилась до 24 кВ (меньше U^*), колебательный режим генерации анодного тока и тока на цилиндр Фарадея перешел в типичный режим генерации токов (вторая часть импульса). Изменяя распределение магнитного поля вдоль оси пушки можно было регулировать амплитуду токов, идущих в осевом и радиальном направлениях.

На рис. 7б приведены фрагменты осциллограмм импульсов напряжения на катоде (верхняя), анодного тока (средняя) и тока на цилиндр Фарадея (нижняя) для колебательного режима генерации. Как видно из осциллограмм, микроимпульсы напряжения и амплитуды электронных токов, идущих на цилиндр Фарадея и на анод, а также период следования сгустков изменяется незначительно в течение этого промежутка времени. Параметры сгустков соответствуют значениям приведенным выше для других режимов.

Следует отметить, что настройка магнитного поля для получения колебательных режимов состоит в следующем. Сначала производится подбор величины и распределения магнитного поля для получения открытого, закрытого или промежуточного режима генерации электронного тока без колебательного режима. После этого производится тонкая регулировка и подбор магнитного поля в сторону его уменьшения с целью получения колебательного режима, при этом ширина зоны генерации электронных сгустков при изменении магнитного поля не превышает 50 Э.

При исследовании выше описанных режимов генерации электронного тока с другими диаметрами катодов

и анодов были получены аналогичные результаты. Отметим, что колебательный режим более устойчив при

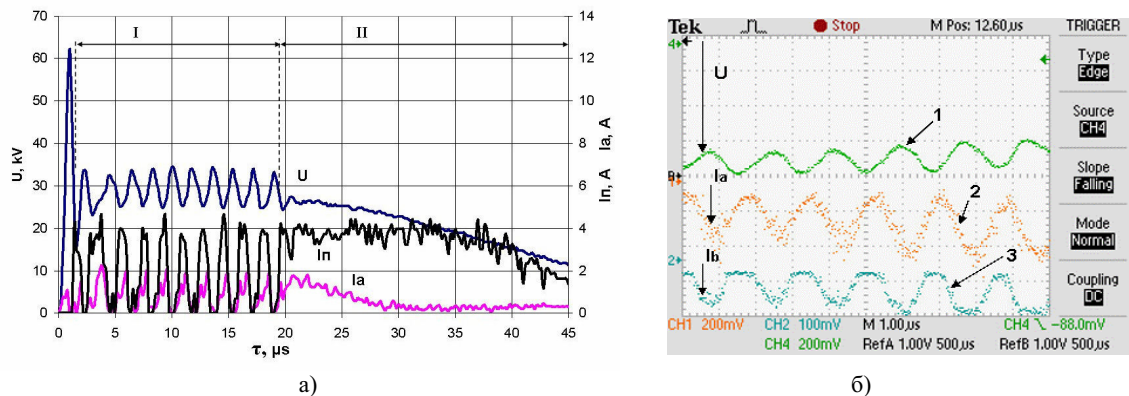


Рис.7. Осциллограммы напряжения на катоде и токов на анод и цилиндр Фарадея (а) и фрагмент центральной части осциллограммы (б).

1- напряжение на катоде, 2- электронный ток на анод, 3- электронный ток на цилиндр Фарадея.

большем зазоре анод-катод. Это связано с общими закономерностями механизма вторичноэмиссионного размножения и генерации электронного тока, который не зависит от геометрии вторичноэмиссионной системы.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом получены три режима генерации сгустков электронного тока. Реализация приведенных режимов требует специальных условий по величине и распределению продольного магнитного поля вблизи его нижней границы вдоль оси магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом. Магнетронные пушки способны генерировать сгустки электронного тока в течение большой длительности импульса ≤ 20 мкс с периодом следования ~ 2 мкс с длительностью сгустка ~ 1 мкс. Увеличение количества сгустков можно достичь увеличивая длительность импульса напряжения и уменьшая неравномерность его вершины, а уменьшения длительности сгустков можно достичь уменьшая величину паразитных параметров (индуктивность и ёмкость) импульсного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.Я. Волколупов, А.Н. Довбня, В.В. Закутин и др. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом //ЖТФ.-2001.-Т.71.-В.7.-С.88-91.
2. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником // Вестник Харьковского Университета, № 732, сер. Физическая «Ядра, частицы, поля», - 2006, вып.2(30). - С.96-100.
3. Yu.M. Saveliev, W. Sibbett, D.M. Parkes Characterisation of electron produced by cross-field secondary emission diodes //J.Appl. Phys.-2001.-V.40.-Part.1, №2B. - P.940-943.
4. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк О формировании электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом //Вестник Харьковского Университета, № 548, сер. Физическая «Ядра, частицы, поля», - 2002, вып.1(17). - С.23-28.
5. Yu.M. Saveliev, W. Sibbett, D.M. Parkes Crossed-field secondary emission electron source //Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimore, USA, June 29- July 2, 1997. - Vol.1. - P.340.
6. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, Н.А. Довбня Исследование режимов генерации электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом //Тезисы XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц. - Алушта, Крым, Украина, 12-18 сентября 2005 г. - С.110.

FORMING OF ELECTRON CURRENT BUNCHES IN MAGNETRON GUN WITH SECONDARY EMISSION CATHODE

N.I. Ayzatskiy¹, A.N. Dovbnya¹, V.V. Zakutin¹, T.A. Kovalenko², N.G. Reshetnyak¹, V.P. Romas'ko¹, I.A. Chertishcev¹

¹Scientific-Production Complex "Accelerator"
Natal Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"
Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Academicheskaya St.

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

²Kharkov National University
Ukraine, 61077, Kharkov, sq. Svobody, 4

Three generation regims of electron current bunches in the magnetron gun were obtained. Magnetron guns are capable to generate electron current bunches during a long pulse ≤ 20 msec with the travel period ~ 2 msec bunch duration ~ 1 msec. To gain the quantity of bunches one can achieve by incresing the pulse voltage duration and by decreasing its peak non-uniformity. And to decrease the bunch duration can be achieved by decreasing the stray parameter value (inductance and capacity) of the pulse generator.

KEY WORDS: magnetron gun, secondary-emission cathode, electron current bunches, pulse voltage.