

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СИЛЬНОТОЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПУШКИ

*А. А. Дроздовский¹, С. А. Дроздовский, А. В. Канцырев, С. М. Савин,
В. А. Волков, В. А. Панюшкин, А. О. Хурчиев*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Объектом исследования является электронная пушка с десорбционным щелевым катодом и импульсным трансформатором Льюиса на напряжение до 300 кВ. В каждом импульсе пушки измеряется ток пучка и входное напряжение трансформатора. Путем решения уравнений, описывающих электрическую схему электронной пушки, получена спектральная характеристика электронного пучка, соответствующая конкретным электрическим параметрам пушки. Измерения, выполненные с помощью магнитного спектрометра, показали удовлетворительное совпадение энергетических характеристик, полученных при расчетах и прямых измерениях.

The object of the study is an electron gun with a desorption slit cathode and a Lewis pulse transformer at a voltage of up to 300 kV. In each pulse of the gun, the beam current and the input transformer voltage are measured. By solving the equations describing the electrical circuit of the electron gun, the electron beam spectral characteristic corresponding to the specific electrical parameters of the gun is obtained. Measurements performed using a magnetic spectrometer showed satisfactory agreement of the energy characteristics obtained during calculations and direct measurements.

PACS: 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Электронная пушка [1], созданная для плазменных и методических исследований, обеспечивает длительную работу в условиях низкого вакуума (до 10^{-3} мбар) благодаря конструктивным особенностям катода и генератора ускоряющего напряжения. На рис. 1 показана схема электронной пушки при измерении энергетического спектра пучка.

Эмиттером электронного пучка в пушке является десорбционный щелевой катод площадью 10 см^2 , представляющий собой набор пластинок слюды и меди толщиной соответственно 0,1 и 0,3 мм. Такой катод, не требующий накала и высокого вакуума, обладает большим ресурсом и удобен в эксплуатации. Эмиссионные возможности

¹E-mail: drozdovsky@mail.ru

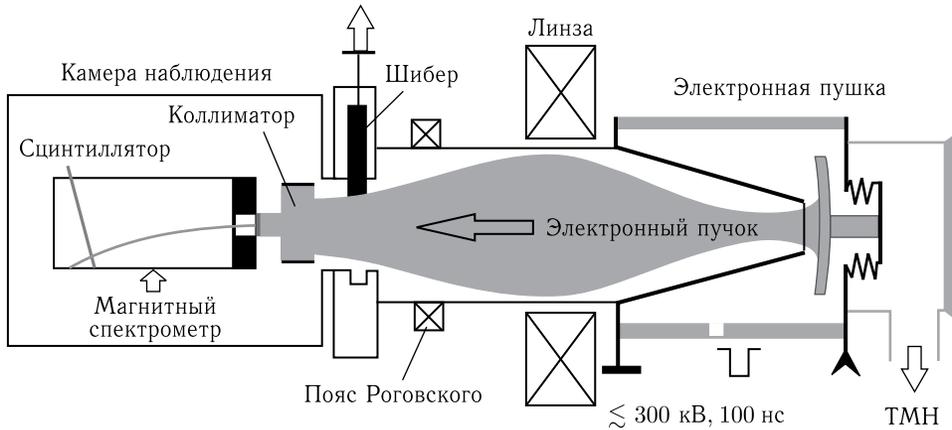


Рис. 1. Электронная пушка с магнитным спектрометром

катода обеспечивают стабильную работу пушки с токами до 200 А при максимальной энергии до 300 кэВ. Анод представляет собой плоский сетчатый диск диаметром 70 мм. Прозрачность анода — 80 %, поэтому выходящий из пушки ток пучка электронов составляет 80 % от тока эмиссии: $I_g = 0,8I_c$.

Для создания ускоряющего напряжения используется генератор на кабельных линиях (схема представлена на рис. 2) с использованием двойной формирующей линии Блюмляйна (ЛБ) с последующим умножением напряжения на ускоряющем зазоре с использованием кабельного трансформатора Льюиса (ТЛ) [2]. Для коммутации линии Блюмляйна использован сильноточный тиратрон ТДИ4-100к/45П. Формирующая линия выполнена из 18 пар 10-м кабелей РК-50. Кабельный трансформатор состоит

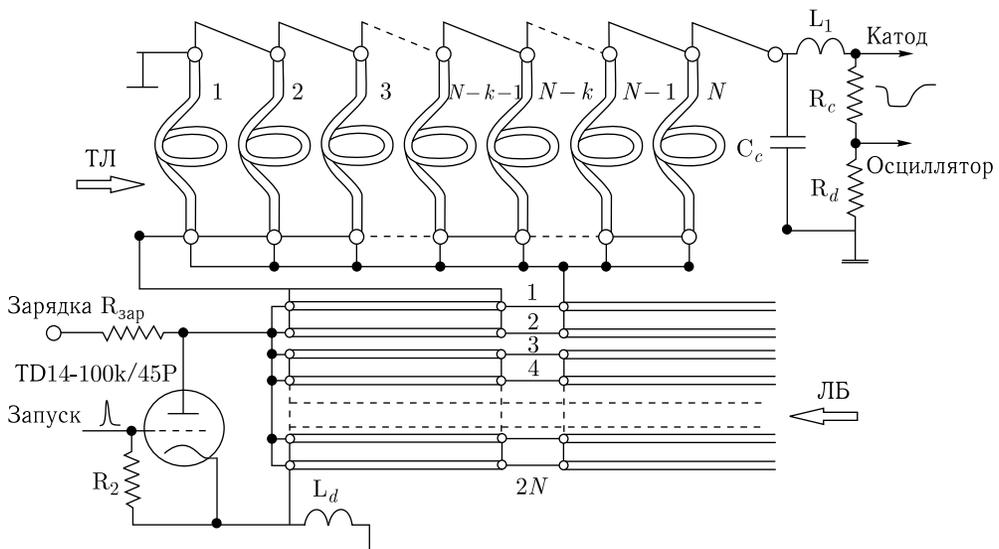


Рис. 2. Схема генератора ускоряющего напряжения электронной пушки

из девяти 20-м кабелей. Чтобы уменьшить электромагнитную связь между кабелями, каждый из них намотан на два последовательно расположенных кольца. Первое выполнено из пермаллоевой ленты, второе — ферритовое.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУШКИ

Основные, регистрируемые в каждом импульсе характеристики электронной пушки: ток пучка и входное напряжение на кабелях трансформатора Льюиса. Величины этих характеристик зависят от электрофизической схемы пушки, включая генератор ускоряющего напряжения. На рис. 3 представлены зависимости тока эмиссии пучка I_c (сплошная кривая) и входного напряжения U (пунктирная кривая). Амплитуда тока $I_{c \max} = I_{g \max}/0,8 = 137$ А, амплитуда напряжения $U_{\max} = 20$ кВ. Ток пучка I_g измерялся (см. рис. 1) поясом Роговского (Bergoz, тип FCT). Напряжение на кабелях ТЛ определялось с помощью высоковольтного делителя.

Схема замещения генератора ускоряющего напряжения с электронной пушкой показана на рис. 4. Правая часть схемы соответствует нагрузке, создаваемой электронной пушкой, и включает в себя: L_1 — индуктивность линии подключения напряжения к катоду пушки ($L_1 = 1,0$ мкГн), C_c — емкость между анодом и катодом ($C_c = 0,1$ нФ), L_b — индуктивность пучка ($L_b = 0,1$ мкГн), R_c — активный импеданс электронной пушки. Левая часть схемы соответствует генератору ускоряющего

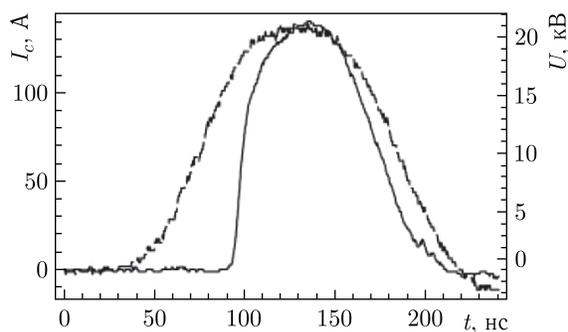


Рис. 3. Осциллограммы тока пучка электронной пушки и напряжения на кабелях ТЛ

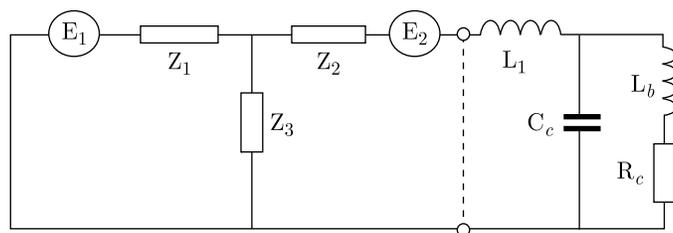


Рис. 4. Схема замещения генератора с электронной пушкой

напряжения. Ее элементы, определенные в работе [2], представляются выражениями

$$Z_1 = Z \operatorname{ctg}^2 \varphi / (2N - 1); \quad Z_2 = ZN - Z_1; \quad Z_3 = 4L_d \cos^2 \varphi / t_u (2N - 1); \\ E_1 = 2UZ_1/Z; \quad E_2 = 2UN - E_1.$$

Здесь Z — волновое сопротивление кабелей ТЛ (в нашем случае $Z = 50$ Ом); N — число кабелей в ТЛ; U — входное напряжение на кабелях ТЛ; t_u — длительность импульса напряжения (~ 250 нс); L_d — величина развязывающей индуктивности отдельного кабеля ($L_d = 1$ мкГн); $\varphi = \pi/2(2N - 1)$.

Представленная схема замещения позволяет определить ускоряющее напряжение между анодом и катодом U_c , зная измеренные временные зависимости тока эмиссии электронной пушки I_c и напряжения U на кабелях ТЛ. Это осуществляется путем решения обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$U_c'' + \frac{r_i}{L_1} U_c' + \frac{1}{L_1 C_c} U_c = -\frac{r_u}{L_1 C_c} U - \frac{r_i}{L_1 C_c} I_c - \frac{L_1 + L_b}{L_1 C_c} I_c' - \frac{r_i L_b}{L_1} I_c'' - L_b I_c''', \quad (1) \\ U_c'(0) = U_c(0) = 0, \quad I_c'''(0) = I_c''(0) = I_c'(0) = I_c(0) = 0,$$

где $r_i = (Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3) / (Z_1 + Z_3)$, $r_u = c_2 + (c_1 Z_3) / (Z_1 + Z_3)$, $c_1 = 2Z_1/Z$, $c_2 = 2N - c_1$.

Уравнение (1) решается аналитически в явном виде

$$U_c(t) = \int_0^t k_u(t-s)U(s)ds + \int_0^t k_i(t-s)I_c(s)ds. \quad (2)$$

Ядра интегральных преобразований k_u и k_i зависят от следующих параметров: $c = r_i^2/4L_1 - 1/C_c$, $a = r_i/2L_1$, $b = \sqrt{|c|/L_1}$.

Если $c > 0$, то

$$k_u(x) = -\frac{r_u}{L_1 C_c} \frac{e^{-ax}}{b} \sinh bx, \quad k_i(x) = \frac{e^{-ax}}{b} (d_s \sinh bx + d_c \cosh bx), \quad (3)$$

где

$$d_s = \frac{(L_1 + L_b)a - r_i}{L_1 C_c} + L_b \left(-\frac{r_i}{L_1} (a^2 + b^2) + 3ab^2 + a^3 \right), \\ d_c = -\frac{L_1 + L_b}{L_1 C_c} b + L_b \left(\frac{2r_i}{L_1} ab - 3a^2b - b^3 \right).$$

Если $c < 0$, то

$$k_u(x) = -\frac{r_u}{L_1 C_c} \frac{e^{-ax}}{b} \sin bx, \quad k_i(x) = \frac{e^{-ax}}{b} (d_s \sin bx + d_c \cos bx), \quad (4)$$

где

$$d_s = \frac{(L_1 + L_b)a - r_i}{L_1 C_c} + L_b \left(\frac{r_i}{L_1} (b^2 - a^2) - 3ab^2 + a^3 \right), \\ d_c = -\frac{L_1 + L_b}{L_1 C_c} b + L_b \left(\frac{2r_i}{L_1} ab - 3a^2b + b^3 \right).$$

В нашем случае $c < 0$.

Вычисления осуществлялись в среде Wolfram Mathematica. Для зарядного напряжения генератора 20 кВ, чему соответствует максимальная энергия пучка электронов 220 кэВ, получено решение, графически представленное на рис. 5 (ток — сплошная линия, напряжение — штриховая). Рассчитанной зависимости напряжения между катодом и анодом от тока соответствует интегральный спектр электронного пучка в плоскости анода, представленный на рис. 6.

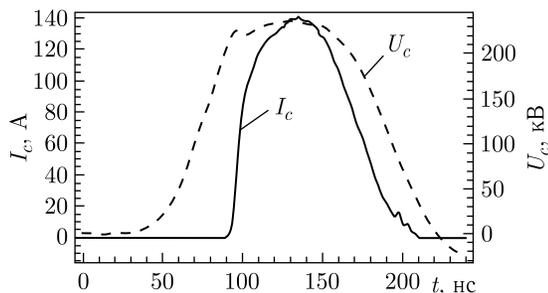


Рис. 5. Ток эмиссии и ускоряющее напряжение

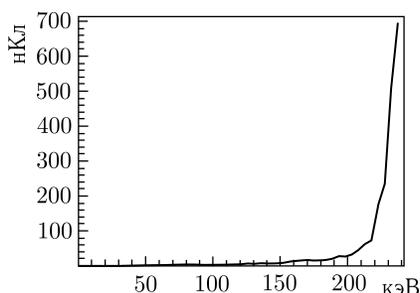


Рис. 6. Спектр электронного пучка в плоскости анода

Этот спектр сохранялся бы и в последующей области движения электронного пучка, если бы не было взаимодействия электронов с анодной сеткой. В результате часть пучка поглощается в сетке, часть рассеивается с уменьшением энергии электронов. При этом значительная часть частиц сохраняет максимальную или близкую к ней энергию (см. ниже рис. 11).

ОЦЕНКА ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕСОРБЦИОННОГО КАТОДА

Как видно из представленных зависимостей для тока и напряжения, здесь закон три вторых не выполняется! Десорбционно-щелевой катод не является стационарным эмиссионным устройством. В момент прихода импульса напряжения свободные электроны практически отсутствуют. Они появляются при достижении напряжения пробоя в тонком слое материала, содержащего адсорбированные молекулы остаточного газа высокой концентрации. Возникающая за время пробоя приповерхностная плазма является эффективным эмиттером, но в течение ограниченного времени. Эмиссионные свойства такого катода можно представить в следующей модификации закона трех вторых:

$$I_e \approx pU_c^{3/2}[1 - \exp(-t/\tau_d)](1 - t/\tau_c), \quad (5)$$

где время отсчитывается от начала тока, τ_d — величина порядка времени пробоя; τ_c — величина порядка времени существования плотной плазмы на поверхности катода; p — первеанс; $p = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$.

Величины временных констант можно оценить из полученной зависимости для ускоряющего напряжения U_c (см. рис. 5). Проведенные оценки дают значения констант: $\tau_d = 25 \text{ нс}$, $\tau_c = 140 \text{ нс}$. В результате расчета тока эмиссии по предложенной

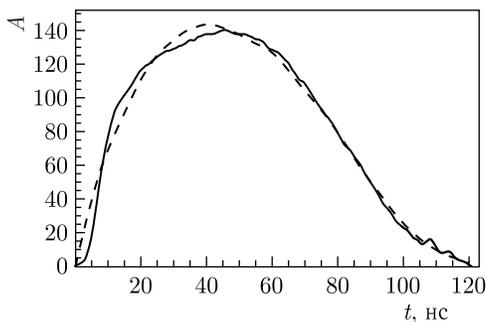


Рис. 7. Ток эмиссии, измеренный и рассчитанный (штриховая кривая)

формуле (4) при данной зависимости $U_c(t)$ (см. рис. 5) получается кривая тока эмиссии I_e , практически совпадающая с измеренным импульсом (рис. 7).

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНИТНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ

Определение энергетических параметров электронного пучка производилось с помощью магнитного спектрометра на постоянных магнитах с полем 12 мТл. Спектрометр обеспечивает измерение энергетического спектра электронов в диапазоне 80–800 кэВ при энергетическом разрешении $\Delta E/E \sim 0,35\%$. Регистрация спектров осуществлялась на органическом сцинтилляторе Kuragau m8 толщиной 3 мм, размером 100×15 мм. Временное разрешение сцинтиллятора 2 нс.

На рис. 8 приведена фотография вакуумной диагностической камеры с размещенным в ней магнитным спектрометром. Регистрация спектра электронов в течение импульса производится с помощью высокоскоростной стрик-камеры ВІFO К-008 [3] при полной длительности развертки 200 нс. При длительности электронного пучка пушки 100 нс обеспечивается измерение временной динамики энергетического спектра электронов с разрешением не хуже 2 нс. На рис. 9 показано свечение сцинтиллятора спектрометра в течение импульса тока электронного пучка. Отсутствие свечения в начале импульса обусловлено низкой плотностью тока пучка, а в конце импульса — величиной пороговой энергии регистрации спектрометра. Свечение сцинтиллятора слева вверху создают электроны максимальной энергии ~ 230 кэВ, а справа внизу оно соответствует энергии 80 кэВ. Вертикальный размер светящейся полосы отвечает ширине спектра в соответствующий момент времени. Количество частиц определенной энергии в каж-

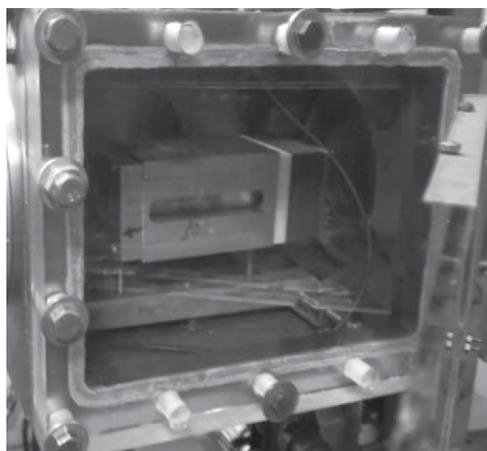


Рис. 8. Магнитный спектрометр в вакуумной диагностической камере

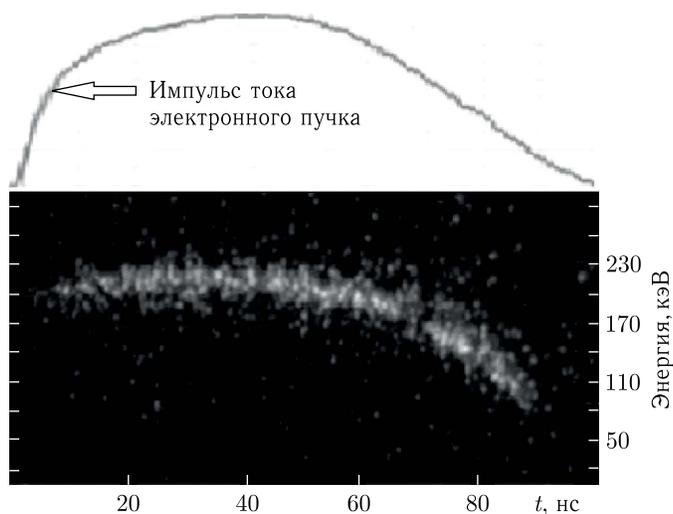


Рис. 9. Свечение сцинтиллятора, отображающее изменение спектра электронов с течением импульса (сверху показано одновременное изменение тока пучка)

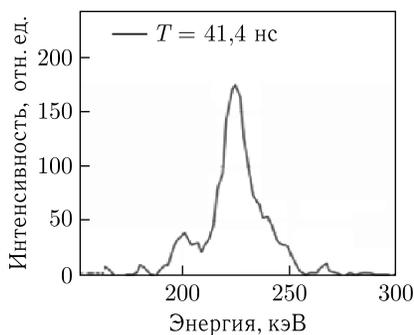


Рис. 10. Спектр в максимуме импульса тока

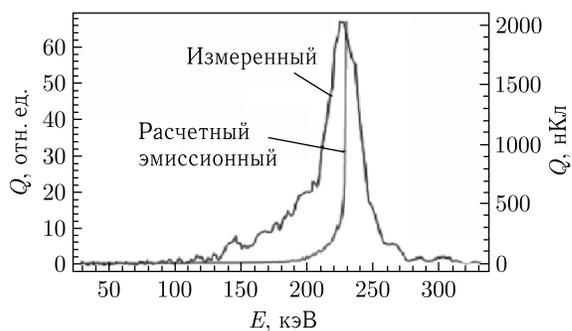


Рис. 11. Интегральный измеренный спектр и идеальный расчетный спектр

дый момент развертки пропорционально интенсивности свечения сцинтиллятора. На рис. 10 дано графическое изображение спектра в момент максимума импульса тока пучка. Разброс по энергии электронов в этот момент составляет ~ 20 кэВ.

Проинтегрированный по времени длительности тока пучка энергетический спектр электронов показан на рис. 11, где также приведена расчетная кривая спектра электронного пучка в плоскости анода, полученная по измеренным электрофизическим параметрам пушки. Следует отметить хорошее совпадение результатов расчета с измеренными значениями.

Ширина полученного в эксперименте спектра обусловлена не только реальным энергетическим разбросом, но и фазовым объемом и поперечным размером входящего в спектрометр пучка, его кулоновским расширением, а также приборными эффектами.

ВЫВОДЫ

На основании анализа электрической схемы электронной пушки получены уравнения, решение которых позволяет вычислить спектральную характеристику возникающего в пушке электронного пучка, соответствующую конкретным регистрируемым электрическим параметрам пушки. Измерения, выполненные с помощью магнитного спектрометра, показали удовлетворительное совпадение энергетических характеристик, полученных при расчетах и прямых измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drozdovsky A. A., Bogdanov A. V., Gavrilin R. O., Golubev A. A., Drozdovsky S. A., Kantsyrev A. V., Ladygina E. M., Roudskoy I. V., Savin S. M., Yanenko V. V. Electronic Gun for Physical Researches // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 5. P. 577–580.
2. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. М.: Наука, 1987.
3. www.bifocompany.com

Получено 18 ноября 2022 г.