

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В МАГНЕТРОНЕ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Л. М. Грошков

Проведено экспериментальное исследование распределения потенциала в магнетроне методом зондирования электронным лучом. Установлено, что двухпоточное состояние пространственного заряда с распределением потенциала, близким к линейному, в статическом режиме не имеет места и что распределение потенциала в магнетроне весьма близко к тому, которое следует из теории однопоточного состояния пространственного заряда.

Вопрос о распределении потенциала в цилиндрическом магнетроне в статическом режиме при магнитном поле, большем критического, в настоящее время остается неясным. Теоретические исследования, проведенные в предположении нулевых начальных скоростей эмитируемых катодом электронов, допускают два возможных решения: так называемое двухпоточное решение [1-4] и однопоточное решение [5,6]. В первом случае траектории электронов представляют собой петли, начинающиеся и кончающиеся на катоде; плотность пространственного заряда принимает бесконечные значения на катоде и на границе электронного облака, а распределение потенциала $V(r)$ внутри облака близко к линейному (двухпоточное состояние пространственного заряда). Во втором случае (однопоточное состояние пространственного заряда) траекториями электронов являются окружности, концентрические с катодом, а распределения плотности пространственного заряда и потенциала определяются выражениями:

$$\rho(r) = 2\varepsilon_0 m \omega_H^2 e^{-1} (1 + r_k^1 r^{-4}); \quad (1)$$

$$V(r) = m \omega_H^2 (2e)^{-1} r^2 (1 - r_k^2 r^{-2})^2. \quad (2)$$

Здесь r_k — радиус катода, $\omega_H = eB/2m$, B — индукция внешнего магнитного поля, e и m — заряд и масса электрона.

В настоящей работе была предпринята попытка исследовать экспериментально, какое распределение потенциала имеет место в магнетроне.

Метод исследования заключается в следующем. Если изнутри полого цилиндрического катода сквозь малое отверстие на его боковой поверхности пустить узкий электронный луч в направлении, перпендикулярном оси магнетрона, то этот луч (назовем его зондирующим) придет на анод, отклонившись от первоначального направления на некоторый угол θ (рис. 1). Величина угла θ зависит от напряженности магнитного поля, скорости, с которой выходят электроны луча из катода, и распределения потенциала в магнетроне. Задав определенные значения магнитного поля и начальной скорости электронов луча, можно найти угол θ задав то или иное распределение потенциала. Сравнив рассчитанный угол с измеренным экспе-

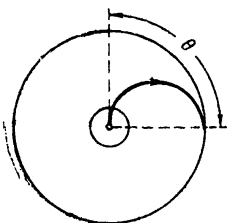


Рис. 1.

риментально, можно судить о том, насколько принятое при расчете распределение близко к реальному.

Следует отметить, что описанный метод позволяет измерить и сравнить с теоретическим лишь интегральное действие поля магнетрона на электронный луч в пространстве катод-анод, а не значения этого поля в каждой точке междуэлектродного промежутка. Поэтому на основании результатов, полученных с помощью этого метода, нельзя сделать однозначного заключения о том, что в магнетроне существует именно такое-то состояние пространственного заряда. Можно только сказать, какого состояния в магнетроне нет и какое распределение потенциала близко к действительному.

Для проведения эксперимента была сконструирована специальная лампа (рис. 2). Анодом лампы служил изготовленный при помощи прецизионной оправки стеклянный цилиндр, вся внутренняя поверхность которого, за исключением пояска в середине шириной 1 мм, была покрыта тонким слоем серебра, спеченного со стеклом. На поясок, свободный от серебра, путем распыления в вакууме наносилась полупрозрачная вольфрамовая пленка, так что вся внутренняя поверхность стеклянного цилиндра оказывалась проводящей (сопротивление вольфрамового пояска составляло 8 ом). Затем поясок покрывался виллемитом, по свечению которого, наблюдаемому снаружи, можно было определить место прихода зондирующего луча на анод. Для считывания угла отклонения луча на внешней поверхности анода были нанесены риски. Катодом магнетрона являлся покрытый оксидом никелевый цилиндр, в середине которого вдоль образующей была прорезана щель ($1 \times 0,11$ мм) для выхода зондирующего луча. Катод подогревался с помощью тонкой вольфрамовой нити ($\varnothing 0,18$), проходившей внутри него. Эта нить служила также источником электронов луча; скорость выхода электронов из катода магнетрона определялась напряжением между катодом и нитью $V_{\text{ск}}$. Диаметры электродов лампы, а также соотношение анодного и ускоряющего напряжений были выбраны так,

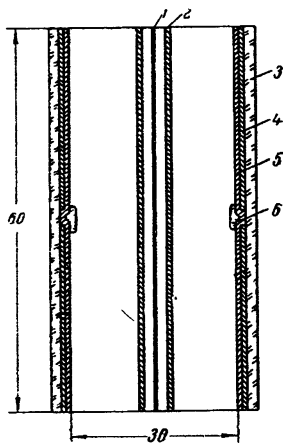


Рис. 2. 1 — вольфрамовая нить $\varnothing 0,18$, 2 — катод $\varnothing 5$, 3 — стеклянный цилиндр, 4 — слой серебра, 5 — вольфрамовая пленка, 6 — поясок виллемита; щель в катоде на рисунке не показана.

чтобы электронный луч хорошо фокусировался щелью: при отсутствии пространственного заряда в магнетроне светящееся пятно на аноде имело ширину не более 0,25 мм (дуга не более одного градуса). Для наиболее точного определения направления начальной скорости луча вольфрамовая нить тщательно центрировалась по отношению к цилиндру катода. Однородное магнитное поле, в которое помещалась лампа, создавалось электромагнитом, полюсные наконечники которого имели размеры, в несколько раз превосходившие поперечные размеры лампы.

Для оценки возможных ошибок измерений, обусловленных неточностью конструкции лампы, перекосом магнитного поля, а также погрешностью измерения напряженности магнитного поля и напряжений на электродах, производилось сравнение измеренных отклонений зондирующего луча с рассчитанными для известного распределения потенциала в лампе, когда в ней отсутствует пространственный заряд. Результаты этого сравнения для магнитного поля $H = 141$ эрстед приведены в таблице 1. Они показывают, что ошибка измерений не превосходит 2,5%. Такая ошибка, очевидно, имела место и при измерениях в присутствии пространственного заряда в магнетроне.

Чтобы не увеличить ошибку, обусловленную неточностью в определении напряженности магнитного поля, все измерения проводились при одном строго фиксированном значении магнитного поля (электромагнит, питающийся от аккумуляторов, не выключался в течение всего эксперимента). Неточность же в определении анодного и ускоряющего напряжений, которые в процессе эксперимента приходилось менять, не могла существенно изменить ошибку измерений, так как эти напряжения подавались от стабилизированных выпрямителей и измерялись приборами класса точности 0,5.

Таблица 1

	Анодное напряжение V_a (в)			
	915			800
$V_{\text{уск}}$ (в)	210	240	280	240
$\theta_{\text{расч}}$ (град)	77	74	70,4	84
$\theta_{\text{эксп}}$ (град)	76	73	69	84

Расчет отклонения зондирующего луча в магнетроне проводился путем интегрирования дифференциального уравнения траектории электрона, вылетающего из катода с заданной начальной скоростью. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{d\theta}{dr} = \left\{ \frac{2e}{m\omega_H^2} [V_{\text{уск}} + V(r)] - r^2 \right\}^{-1/2}. \quad (3)$$

При отсутствии пространственного заряда в магнетроне распределение потенциала определяется выражением:

$$V(r) = \frac{V_a \ln(r/r_k)}{\ln(r_a/r_k)}.$$

Отклонение луча в этом случае находилось с помощью численного интегрирования уравнения (3) методом Адамса-Штермера.

В случае однопоточного состояния пространственного заряда распределение потенциала внутри электронного облака определяется выражением (2), и отклонение луча в облаке находится вычислением определенного интеграла

$$\begin{aligned} \theta &= \int_{r_k}^{r_{\text{обл}}} \left[\left(\frac{2e}{m\omega_H^2} V_{\text{уск}} - 2r_k^2 \right) r^2 + r_k^4 \right]^{-1/2} r dr = \\ &= \left(\frac{2e}{m\omega_H^2} V_{\text{уск}} - 2r_k^2 \right)^{-1/2} \left[\sqrt{r_{\text{обл}}^2 + r_k^4 \left(\frac{2e}{m\omega_H^2} V_{\text{уск}} - 2r_k^2 \right)^{-1}} - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{r_k^2 + r_k^4 \left(\frac{2e}{m\omega_H^2} V_{\text{уск}} - 2r_k^2 \right)^{-1}} \right]. \end{aligned}$$

Здесь $r_{\text{обл}}$ — радиус облака пространственного заряда.

Отклонение луча в пространстве между границей облака пространственного заряда и анодом находилось путем численного интегрирования уравнения (3); в качестве функции $V(r)$ было взято логарифмиче-

ское решение, удовлетворяющее условию непрерывности потенциала и поля на границе облака и принимающее заданное значение на аноде.

Для нахождения распределения потенциала при двухпоточном состоянии проводилось численное интегрирование однопараметрического дифференциального уравнения второго порядка, к которому Гринбергом [3] была сведена задача о магнетроне в статическом режиме:

$$\frac{d^2U}{dq^2} = a \frac{q}{U} + b \mu U \left(1 - \frac{1}{U}\right). \quad (4)$$

Здесь $U = r/r_k$, $q = -(r_k^2 I^2/2)^{1/3} Q$, $Q = -(r/2) (\partial V/\partial r) -$ заряд, находящийся внутри цилиндра радиуса r и приходящийся на единицу длины оси, I — ток, определяемый выражением $I = -2\pi r r' \rho_0$, a и b — постоянные коэффициенты, μ — параметр, равный $H^2 r_k^{4/3}/I^{-2/3}$, H — напряженность внешнего магнитного поля.

После нахождения зависимости $U(q)$ распределение потенциала внутри облака пространственного заряда определяется из уравнения

$$V(U) = \frac{2^{2/3} H^2 r_k^2}{\mu} \int_1^U \frac{q}{U} dU. \quad (5)$$

Значение параметра μ было выбрано так, чтобы решение для потенциала, полученное из (5) и „сшитое“ на границе облака с логарифмическим решением, имеющим место в области $r_{обл} \leq r \leq r_a$ (r_a — радиус анода), удовлетворяло граничному условию на аноде.

Найденное таким образом распределение потенциала $V(r)$ подставлялось в уравнение (3) и вычислялось отклонение зондирующего луча в предположении двухпоточного решения.

Результаты эксперимента и расчетов при $H = 141$ эрстед приведены в таблице 2*. Из них следует, что а) двухпоточное состояние пространственного заряда с распределением потенциала, близким к линейному, в магнетроне в статическом режиме не имеет места; б) распределение потенциала в магнетроне в статическом режиме весьма близко к (2).

Таблица 2

	Анодное напряжение V_a (в)							
	915				800			
$V_{уск}$ (в)	240	260	280	300	240	260	280	300
$\theta_{эксп}$ (град)	102 ÷ 107	98 ÷ 102	94 ÷ 98	90 ÷ 94	109 ÷ 114	104 ÷ 109	98 ÷ 103	94 ÷ 98
$\theta_{расч}$ (град) для однопоточного состояния	108,7	103,5	98,8	94	115,2	108,6	103,1	98,4
$\theta_{расч}$ (град) для двухпоточного состояния	85,3	82,6	80,2	78				

* При наличии пространственного заряда в магнетроне зондирующий луч дает на аноде светящееся пятно гораздо большей ширины (дуга $4 \div 5^\circ$), чем в случае отсутствия пространственного заряда (дуга не более 1°). Это объясняется ухудшением фокусировки луча щелью при уменьшении напряженности электрического поля у катода и наличием в магнетроне интенсивных флюктуаций электрического поля.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С. Я. Брауде, ЖТФ, **15**, 107 (1945).
2. С. В. Беллюстин, ЖТФ, **10**, 455 (1940).
3. Г. А. Гринберг, Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений, изд. АН СССР, М.—Л., 1948.
4. L. Page, P. Adams, Phys. Rev., **69**, 492 (1941).
5. Теория магнетрона (по Бриллюену), сб. перев., изд. Сов. радио, М., 1946.
6. L. Brillouin, V. Bloch, Adv. in Electronics, **3**, 145 (1951).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
17 мая 1959 г.
