

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК С БОЛЬШИМ ТОКОМ

Г. С. КАЗЬМИН, Г. М. КАССИРОВ, Ю. Е. КРЕЙНДЕЛЬ, Т. И. ЛАПТЕВА

В связи с развитием ускорительной техники актуальным стал вопрос увеличения тока в пучке ускорительной электронной трубки. Импульсные трансформаторы, применяемые для питания электронных ускорительных трубок, дают возможность пропускать через трубку практически неограниченные разрядные токи. Однако не всякая система электродов трубки позволяет иметь большие токи в пучке. Ограничения накладываются эмиссионными свойствами катода и возможностями фокусировки, которая должна обеспечиваться формой и потенциалами электродов. Мы решали вопросы второй группы, т. е. вопросы фокусировки пучка. Существенным препятствием здесь является наличие пространственного заряда в пучке. Ни классическая электронная оптика, ни техника ускорителей не сталкивались до сих пор с ограничениями пространственного заряда, потому что токи высоковольтных установок были слишком малы для этого. Использование импульсной техники меняет дело. Нами исследовалась возможность получения существенно больших токов в пучке многоэлектродной ускорительной трубки секционированного типа. Задача получения больших токов в пучке решается теорией и практикой электронных пушек для электронно-лучевых и СВЧ приборов [1]. Некоторые понятия и технические приемы из области разработки пушек с высокой проводимостью можно использовать в технике ускорительных трубок. В частности, перспективным является применение электронных пушек типа Пирса [3] в качестве первых секций ускорительных трубок.

Теория вопроса

Неограниченному увеличению тока препятствует собственный пространственный заряд, действие которого проявляется в двух направлениях.

1. Ограничение полного тока. Это находит свое выражение в так называемом законе „степени три вторых“

$$I_{mp} = P_{mp} \cdot U_n^{3/2}, \quad (1)$$

если эмиссия катода достаточно велика. Здесь I_{mp} — ток трубки, U_n — полное напряжение трубки, а P_{mp} — коэффициент, зависящий от

геометрии электродов, который определяет проводимость трубки и называется в теории электронных пушек „первеанс“.

2. Увеличение размеров поперечного сечения пучка из-за внутреннего расталкивания [2]. Для пучка круглого поперечного сечения, распространяющегося в эквипотенциальном пространстве, это обстоятельство выражается соотношением

$$88 \frac{z_0}{r_0} \sqrt{P} = \frac{1}{2} \int_1^{r/r_0} \frac{dy}{\sqrt{\ln y}}, \quad (2)$$

здесь r_0 — минимальный радиус пучка в „тали“, z_0 — расстояние от „тали“ до того места, где пучок имеет радиус r , P — первеанс пучка.

Задача разработки ускорительных трубок с большим током сводится к оптимальному обходу этих ограничений в тех или иных конкретных обстоятельствах.

Согласно (1), следует увеличивать P_{mp} при удовлетворении определенных технических требований. Если мы умеем определять оптимальный P_{mp} , тем самым мы можем решить вопрос однозначно.

В такой постановке нами решена эта задача для одной конкретной схемы ускорительной трубки (рис. 1). В этой схеме предполагается, что электронная пушка типа Пирса выдает параллельный пучок, который на выходе из отверстия в первом аноде получает расходимость согласно общеизвестной формуле Дэвиссона:

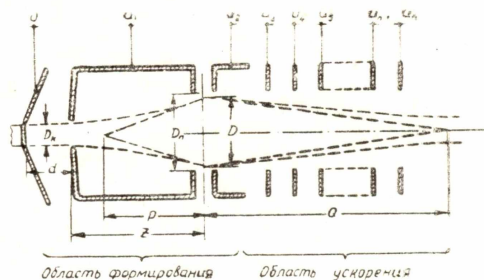


Рис. 1. Схема электродов секционированной ускорительной трубки.

$$F = \frac{4U_1}{E}, \quad (3)$$

где E — напряженность поля у анода пушки, U_1 — потенциал этого анода, F — фокусное расстояние, определяющее расходимость пучка. В области линзы пучок приобретает сходимость [4] согласно соотношению

$$p = D_L \varphi(\alpha, \beta), \quad (4)$$

где D_L — диаметр „зрачка“ линзы, $\alpha = \frac{U_2}{U_1}$, $\beta = \frac{Q}{D_L}$, Q — длина подкасающей к траектории пучка в области линзы, но с выходной стороны, U_2 — напряжение на втором аноде. Функция φ несколько „зависит“ от геометрии линзы, но незначительно.

Из соотношения (2) получаем для длины подкасающей p

$$p(z_0, x) = \frac{z_0 \cdot x}{2f(x) \sqrt{\ln x}} : \quad (5)$$

$$x = \frac{r}{r_0}, \quad f(x) = \frac{1}{2} \int_1^x \frac{dy}{\sqrt{\ln y}}.$$

Совместно уравнения (1) — (5) при условии, что пучок проходит через зрачок линзы и $Q < \infty$, дают для первеанса трубки

$$P_{mp} = \left(\frac{U_1}{U_n} \right)^{3/2} \left[\frac{\delta}{352 \sqrt{\ln x}} \right]^2 \frac{1}{\varphi^2(\alpha, \beta)}. \quad (6)$$

Здесь $\delta = \frac{2r}{D_L}$, $\varphi(\alpha, \beta)$ — функция, которая может быть найдена по графикам $p - Q$ [4], r — радиус пучка в области линзы. Если радиус пучка внутри пушки обозначить через r_k , то [5]

$$x = 1,31 \frac{r}{r_k}. \quad (7)$$

Выражение (6) можно переписать, принимая в качестве основного параметра напряжение на линзе:

$$U_L = U_2 - U_1 = (\alpha - 1) U_1; \quad (8)$$

$$U_1 = \frac{U_L}{\alpha - 1};$$

$$P_{mp} = \left(\frac{U_L}{U_n} \right)^{3/2} \left[\frac{\delta}{352 \sqrt{\ln x}} \right]^2 \frac{1}{(\alpha - 1)^{3/2} \varphi^2(\alpha, \beta)}. \quad (9)$$

Функция $\Phi(\alpha, \beta) = \frac{1}{(\alpha - 1)^{3/2} \varphi^2(\alpha, \beta)}$ имеет максимальное значение при $\alpha \approx 5$ и $\beta \rightarrow \infty$, равное

$$\Phi(5, \infty) = 0,0108. \quad (10)$$

После подстановки (7) и (10) в (9) и подсчета численных коэффициентов, получим

$$I_{mp} = 8,7 \cdot 10^{-8} \frac{\delta^2}{\ln \left(1,31 \frac{r}{r_k} \right)} \cdot U_L^{3/2}. \quad (11)$$

С другой стороны, ток трубки, если пренебречь потерями электронов на первом и последующих анодах, будет согласно „закону $3/2$ “ равен

$$I_{mp} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{\pi r_k^2}{d^2} \left(\frac{U_L}{\alpha - 1} \right)^{3/2}; \quad (12)$$

d — расстояние — катод-анод 1.

Сопоставляя (11) и (12), получим соотношение между основными геометрическими параметрами формирующей части ускорительной трубки

$$d = 3,48 \frac{r_k}{\delta} \sqrt{\ln \left(1,31 \frac{r}{r_k} \right)}. \quad (13)$$

При этом, разумеется, $\delta \leq 1$, $\alpha \approx 5$, $Q \rightarrow \infty$ (60 ÷ 100). Однако, вследствие слабой зависимости Φ от α , конструкция не будет критична относительно выбора α , если критерием служит отношение тока I_{mp} к напряжению U_L .

Экспериментальные исследования

α - характеристики

Мы назвали α - характеристиками кривые изменения токов на электроды трубки при изменении α , но при неизменных остальных параметрах. Так как при изменении α изменяется не только форма пучка, но и величина тока с катода, то нужно ожидать максимума тока на выходе трубки при некотором $\alpha_{кр}$.

Исследование α -характеристик проводилось на макете ускорительной трубки, который имел лишь четыре электрода (рис. 1) [6].

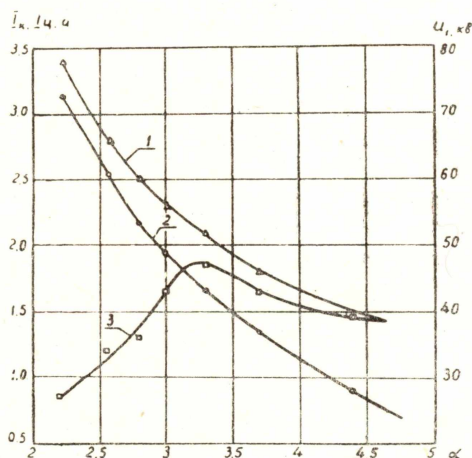


Рис. 2. Сопоставление α -характеристик выходного тока (2) и тока катода (1) с напряжением на первом аноде U_1 (3).

Геометрия этих электродов определялась конструкцией изоляторов и была далеко не оптимальной с точки зрения достижения максимального тока.

На рис. 2 сопоставляется α - характеристика выходного тока I_c и α -характеристика катодного тока пушки.

Третья кривая показывает изменение напряжения U_1 . На макете было также установлено, что полезный ток трубки в известной мере определяется правильным выбором расстояния „катод-анод 1“ трубки.

Трубка на 1000 кВ

На основе исследований α - характеристик, подтверждавших теоретические положения, была разработана и изготовлена трубка [7], конструкция которой схематически показана на рис. 3. Трубка рассчитана для работы в масле на напряжение 1000 кВ при токе 0,5 а в импульсе. Корпус трубки состоит из 28 керамических и 27 пермаллоевых колец и имеет длину около 60 см. Керамика оказалась наилучшим из имеющихся у нас материалов. Этот выбор сделан на основе испытаний конструктивных узлов на электрическую прочность в условиях, близких к рабочим [8]. Катод трубки в форме плоской бифилярной спирали $\varnothing 10$ мм из торированного вольфрама должен обеспечивать ток эмиссии 1 а при достаточном сроке службы.

Трубка была испытана на напряжение до 500 кВ на импровизированной установке.

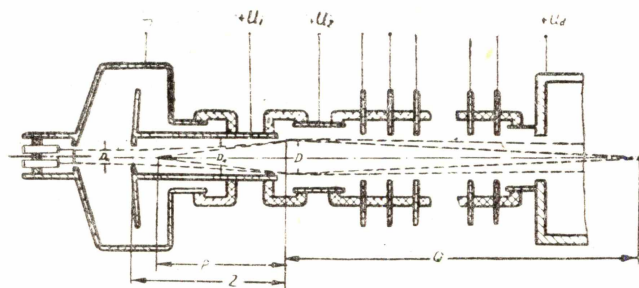


Рис. 3. Конструктивная схема ускорительной трубки на 1000 кв.

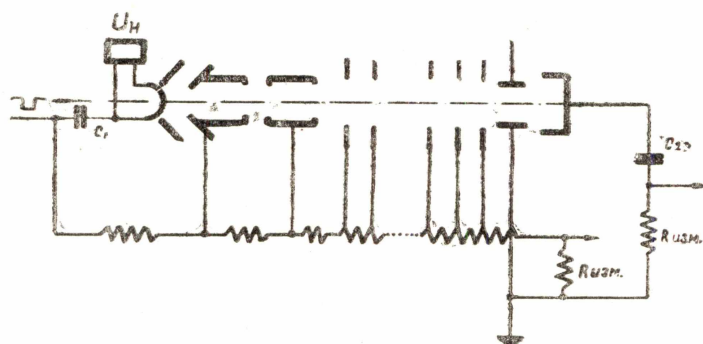


Рис. 4. Электрическая схема электродов ускорительной трубки 1000 кв.

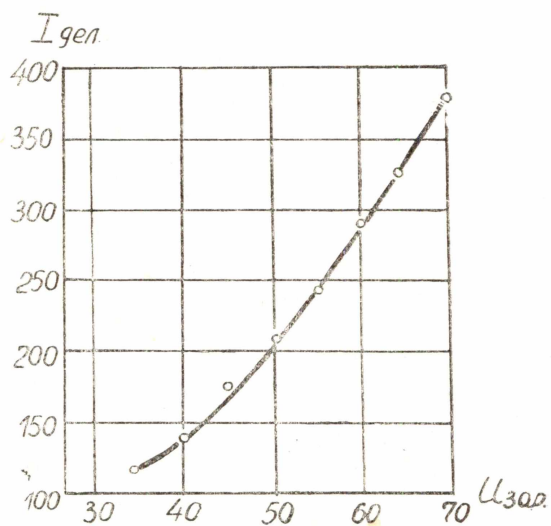


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика трубки 1000 кв.

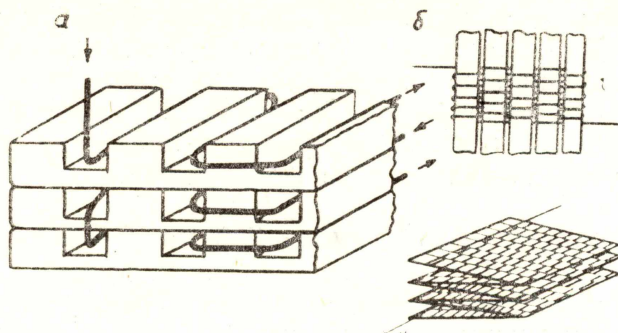


Рис. 6. Схема укладки провода делителя напряжения.

В качестве источника высокого напряжения использовался ГИН. Вместо расчетных 170 *ма* при напряжении 500 *кв* было получено 130 *ма* при диаметре пучка не более 1,5 *см* на выходе. Была сделана попытка измерить долю тока на первый анод путем сравнения зарядов, накопленных в конденсаторах, которые включались по схеме рис 4. Оказалось, что в трубке теряется от 30 до 70% электронов, покидающих катод при наложении на трубку напряжения.

Вольт-амперная характеристика трубки (рис. 5) показывает, что уравнение (1) справедливо для такой конструкции. Существенной частью схемы является активный делитель напряжения. Делитель должен иметь достаточно малые паразитные емкости и индуктивности; достаточно большое и стабильное сопротивление; должен обеспечивать простое присоединение отводов к электродам трубки; обладать необходимой электрической прочностью и надежностью работы; должен вписываться в ограниченные габариты по длине и поперечному сечению.

Нами разработано два типа таких делителей из нихромовой проволоки: 1 — на плексигласовых галетах (рис. 6, а) с полным сопротивлением 40 *ком*; 2 — тканый на бумажной основе (рис. 6, б) с полным сопротивлением 250 *ком*.

Оба делителя имеют бифилярную объемную укладку провода

высокого сопротивления. Основной характеристикой делителя является наибольшая величина его сопротивления на единицу длины. Для делителя 1 оно составляет примерно 600 *ом/см*, для делителя 2 — 3100 *ом/см*.

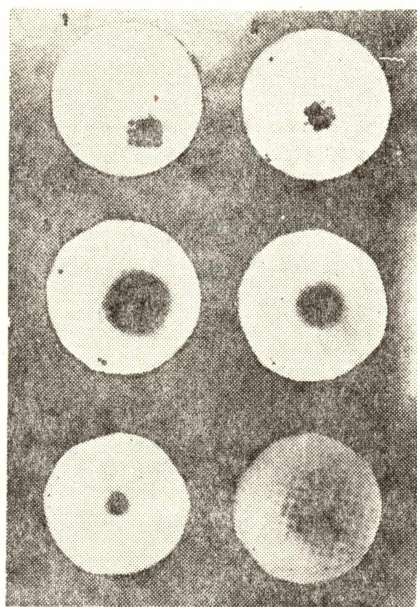


Рис. 7. Фотоавтографы пучка: 1. Третий слой фотобумаги при $U_n=550$ *кв.*, $I_n=17,5$ *а*. 2. Первый слой фотобумаги при $U_n=550$ *кв.*, $I_n=18$ *а* после поворота трубки вокруг оси на 90°. 3. Форма пучка непосредственно за магнитной линзой при $I_{м.л}=0$, $U_n=450$ *кв.*, $I_n=15,4$ *а*. 4. Форма пучка непосредственно за магнитной линзой при $I_{м.л}=2,2$ *а*, $U_n=450$ *кв.*, $I_n=15,4$ *а*. 5. Форма пучка на расстоянии 60 *см* от линзы при $I_{м.л}=1,2$ *а*, $U_n=450$ *кв.*, $I_n=15,4$ *а*. 6. Форма пучка на расстоянии 60 *см* от линзы при $I_{м.л}=2$ *а*, $U_n=450$ *кв.*, $I_n=15,4$ *а*.

Ток, потребляемый делителем, обратно пропорционален этой величине. На рис. 7 представлены „фотоавтографы“ пучка электронов на выходе трубки. Для их получения пучок выпускается в атмосферу через алюминиевую фольгу, за которой располагается пакет с несколькими слоями обычной фотобумаги. Перед фольгой в вакууме устанавливается толстая перфорированная свинцовая пластина, „рисунок“ которой выявляется на фотографии.

Ускорительная трубка 250 кв, 1,5 амп.

Низкое напряжение на втором аноде (U_2) определило своеобразную форму формирующей части (рис. 8). Линза приближена к анодному отверстию почти вплотную с тем, чтобы иметь малое значение r/r_k . Трубка предназначена для работы на воздухе, что обуславливает и другие ее конструктивные особенности: водяное охлаждение катодного узла и первого анода, увеличение длины и т. д.

Корпус трубки состоит из двух частей: катодного узла и ускорительной колонки, между которыми имеется разборное фланцевое соединение. Такая конструкция облегчает сборку внутренней арма-

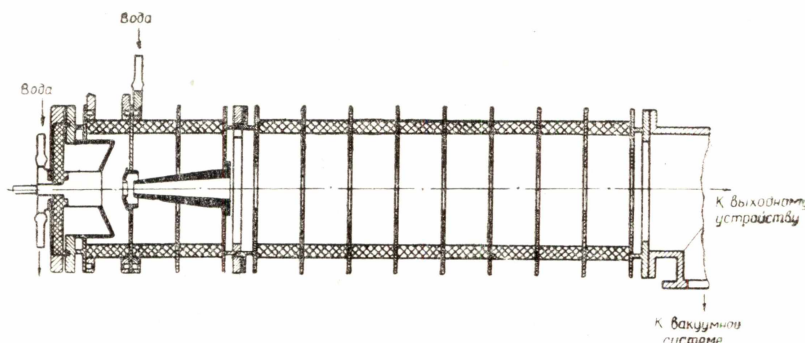


Рис. 8. Конструктивная схема ускорительной трубки на 250 кв.

туры и склейку трубки, а также позволяет провести раздельное испытание ее узлов.

Обе части трубки склеены из фарфоровых колец толщиной 40 мм с алюминиевыми электродами толщиной 3 мм между ними. Склейка осуществлена полиэтиленом в специальной оправке. Предварительные эксперименты по склейке фарфора с алюминием на основе полиэтиленовой пленки выявили хорошие вакуумные, механические и термические свойства подобных соединений.

Качество катода влияет на характеристики трубки. Используемый в настоящее время спиральный вольфрамовый катод [7] дает неоднородную плотность тока в пучке, коробится со временем, имеет большое магнитное поле, создаваемое током накала, неэквипотенциален.

Представляет большой интерес использование высокоэффективных подогревных катодов, лишенных перечисленных недостатков.

Заключение

В результате проделанной работы были выявлены преимущества системы с электростатической фокусировкой в том случае, когда по соображениям электрической прочности имеется необходимость секционировать корпус ускорительной трубки и в то же время недопустимо наличие резких неоднородностей поля. Однако структура пучка

в секционированной трубке хуже, чем в обычной двухэлектродной пушке. Поэтому во всех случаях, когда позволяют условия, лучше делать простую двухэлектродную систему, которая имеет более высокий первеанс, чем многоэлектродная система.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Зинченко. Курс лекций по электронной оптике, изд. ХГУ им. А. М. Горького, г. Харьков, 1958.
2. М. Д. Габович. УФН, 56, 2, 1956.
3. J. R. Pierce Journ. Appl. Phys. 11, 548, 1940.
4. Электронные лампы, ч. II, под ред. С. А. Оболенского, изд. „Сов. радио“, 1954.
5. Г. С. Казьмин. Изд. вузов СССР, Физика, № 5, 1959.
6. Г. С. Казьмин, Г. М. Кассиров. Испытание макета ускорительной трубки на 600 кв. в масле. Научный отчет, НИИ ТПИ, 1960.
7. Г. С. Казьмин, Г. М. Кассиров. Технический проект ускорительной трубки на 1000 кв. Технический отчет, НИИ ТПИ, 1960.
8. Г. С. Казьмин, Г. М. Кассиров. Результаты испытаний элементов корпуса ускорительной трубки на электрическую прочность. Технический отчет, НИИ ТПИ, 1960.