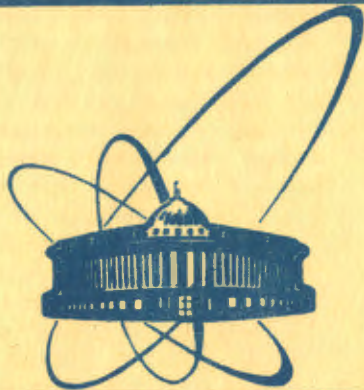


27/II-84



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

1174/84

11-83-782

Ю.С.Дерендяев, И.Б.Енчевич, М.К.Михов

**РАСЧЕТ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
С ИЗМЕНЯЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ**

1983

Электронные пучки широко используются в электронных приборах, ускорителях заряженных частиц, установках для структурной обработки, теплового нагрева, сварки и плавки металлов в вакууме^{1,2/}. В последнее время большое внимание уделяется поверхностной местной закалке различных металлов, эффект которой заключается в быстром и кратковременном разогреве поверхности с использованием электронных пучков^{3,4/}. Для закаливания металлов, имеющих различную температуру плавления, на одной и той же установке желательно плавно изменять мощность электронного пучка. В данной работе приведен анализ и синтез источника электронного пучка, в конструкции которого применен отражательный электрод, подобный электроду в отражательном клистроне^{1/}, позволяющий регулировать ток пучка. Задача анализа источника электронного пучка сводится к расчету электромагнитного поля и траекторий электронов в нем при заданных граничных и начальных условиях, то есть к численному решению соответствующих дифференциальных уравнений. При решении задачи синтеза определяется такой набор исходных параметров источника электронного пучка, который бы удовлетворял с заданной точностью требованиям, предъявляемым к электронному пучку.

Электромагнитная система рассматриваемого источника схематически показана на рис.1. Она состоит из накаливаемого до 2000 К катода /1/ с электрическим потенциалом $-150,0$ кВ, отражающего электрода /2/ с потенциалом $-150,5$ кВ, двух анодов /3,4/ с потенциалами $U_{a1} = -100,0$ кВ, $U_{a2} = 0$ В и магнитной фокусирующей системы /5/. Эмиттирующая поверхность катода позволяет получить суммарный ток $5,0$ А. Аноды вытягивают и фокусируют электроны в цилиндрический пучок с током $2,5$ А, а соленоид осуществляет дополнительную фокусировку и сжатие пучка. Все перечисленные элементы имеют аксиальную симметрию. Далее будем пользоваться цилиндрической системой координат r, ϕ, z , ось z которой совпадает с осью симметрии электродов и соленоида. Основное требование к изображенной на рис.1 системе состоит в том, чтобы электроны, эмиттированные с левой стороны катода, давали вклад в ток пучка, отражаясь от электрода /2/.

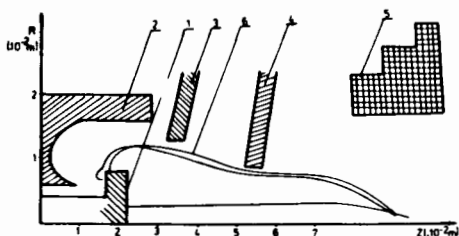


Рис.1. Схема электромагнитной системы: 1 - катод; 2 - отражающий электрод; 3 - первый анод; 4 - второй анод; 5 - соленоид; 6 - траектории электронов.

Для анализа и синтеза источника электронов проведем численный эксперимент, то есть рассчитаем траектории электронов, вылетающих с различных частей катода, при разных конфигурациях

электродов и потенциалах на них. Остановимся подробнее на расчетах полей и траекторий.

Напряженность электрического поля \vec{E} определяется по формуле

$$\vec{E} = -\text{grad} U \quad /1/$$

после решения уравнения Лапласа для электрического потенциала

$$\Delta U = 0 \quad /2/$$

с заданными граничными условиями. Уравнение /2/ аппроксимируется разностной схемой второго порядка. Полученная система разностных уравнений решается методом верхней релаксации, который известен как экстраполяционный метод Либмана^{/5-7/}. В данном случае этот метод требует построения прямоугольной сетки /шаг которой по осям задается в качестве исходных данных/ и замены дифференциальных уравнений в частных производных приближенными разностными уравнениями для каждой узловой точки сетки.

Решения отыскиваются внутри области, ограниченной простыми замкнутыми кривыми, которые задают в виде координат совокупности точек каждой отдельной кривой. Соседние точки соединяют прямыми линиями. На прямых известно либо значение потенциала, либо нормальная к границе области производная потенциала. Поиск решения носит итеративный характер и прекращается при достижении заданной точности. Этот алгоритм решения уравнения /2/ реализован в программе ELLIPT на языке фортран^{/6,7/}, которой мы и воспользовались при расчетах на БЭСМ-6 в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ. В результате получили величину потенциала U в узлах прямоугольной в плоскости r, z сетки, охватывающей поперечное сечение электродов. Для анализа полученного решения использовали дисплейную станцию^{/8/}, которая позволяет на экране дисплея высвечивать линии равного потенциала, графики потенциала и электрического поля в сечениях, параллельных осям координат. Частные производные в уравнении /1/ рассчитывались в узлах сетки приближенно согласно уравнениям

$$E_r(r, z) = \frac{U(r - \Delta r, z) - U(r + \Delta r, z)}{2 \cdot \Delta r}, \quad E_\phi(r, z) = 0, \quad /3/$$

$$E_z(r, z) = \frac{U(r, z - \Delta z) - U(r, z + \Delta z)}{2 \cdot \Delta z}.$$

Здесь r, z - координаты узлов сетки, Δr и Δz - расстояния между узлами сетки по осям r и z соответственно.

Индукция магнитного поля соленоида \vec{B} определяется из следующего выражения^{/9/}:

$$\vec{B}(r, z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_s J(r', z') \vec{G}(r, z, r', z') dr' dz', \quad /4/$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; s' - поперечное сечение соленоида; $J(r', z')$ - плотность тока;

$$G_r = \frac{z - z'}{r \sqrt{(r + r')^2 + (z - z')^2}} [-K(x) + \frac{r^2 + r'^2 + (z - z')^2}{(r - r')^2 + (z - z')^2} E(x)], \quad G_\phi = 0,$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{(r + r')^2 + (z - z')^2}} [K(x) - \frac{r^2 - r'^2 + (z - z')^2}{(r - r')^2 + (z - z')^2} E(x)].$$

Здесь $K(x), E(x)$ - эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно, $x = 4rr' / [(r + r')^2 + (z - z')^2]$. При расчетах интегрирование заменяется суммированием, а точность определяется величинами dr' и dz' .

Определив поля \vec{E} и \vec{B} , интегрируем уравнения движения Лоренца

$$\frac{d\vec{m}\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v} \quad /5/$$

методом Рунге-Кутты и определяем траектории крупных частиц. В качестве начальных условий вводятся фиксированное положение начала траектории и начальная скорость крупной частицы. Для электронов за начало траекторий принимается сечение, перпендикулярное оси z . Сечение разделяем на несколько равных секций, предполагая, что все траектории электронов, выходящих из секций, подобны и образуют трубку тока. Далее трубку тока будем рассматривать как крупную частицу с зарядом q и массой m . Релятивистское уравнение /5/ запишем в переменных $t, r, s, z, \dot{r}, \dot{s}, \dot{z}, \ddot{r}, \ddot{s}, \ddot{z}$, где $\dot{s} = r\dot{\phi}$ - линейная скорость, с которой крупная частица движется по окружности, точка над буквой означает дифференцирование по времени t ,

$$\ddot{r} = \frac{1}{m_0 c^2 \gamma} [(c^2 - \dot{r}^2) F_r - \dot{r} \dot{s} F_\phi - \dot{r} \dot{z} F_z] + \frac{\dot{s}^2}{r},$$

$$\ddot{s} = \frac{1}{m_0 c^2 \gamma} [-\dot{s} \dot{r} F_r + (c^2 - \dot{s}^2) F_\phi - \dot{s} \dot{z} F_z] - \frac{\dot{r} \dot{s}}{r}, \quad /6/$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m_0 c^2 \gamma} [-\dot{z} \dot{r} F_r - \dot{z} \dot{s} F_\phi + (c^2 - \dot{z}^2) F_z],$$

$$\dot{r} = dr/dt; \quad \dot{s} = r d\phi/dt; \quad \dot{z} = dz/dt.$$

Здесь $m_0 c^2$ - энергия покоя крупной частицы, c - скорость света в вакууме,

$$\gamma = (1 - \frac{\dot{r}^2 + \dot{s}^2 + \dot{z}^2}{c^2})^{-0,5}, \quad F_r = q(E_r + \dot{s} B_z - \dot{z} B_\phi),$$

$$F_\phi = q(E_\phi + \dot{z} B_r - \dot{r} B_z), \quad F_z = q(E_z + \dot{r} B_\phi - \dot{s} B_r).$$

При численном решении системы /6/ в любой момент времени получим координаты и скорости крупных частиц. Результат расчета при разных положениях электродов и различных потенциалах на них выводился на печать в виде графика траекторий крупных частиц; эта процедура повторялась до тех пор, пока траектории не начинали

соответствовать запираанию части электронного пучка в системе в пределах заданной точности.

На основе анализа и синтеза, проведенных по указанной выше методике, мы остановились на форме электродов, соленоида и траекторий крупных частиц, показанных на рис.1. Из рисунка видно, что частица, вылетающая с левой стенки катода, проходит через электромагнитную систему и фокусируется. Прохождение этой крупной частицы дает право утверждать, что можно эффективно использовать всю эмиттирующую поверхность катода. На рис.2 показано, что если отодвинуть катод на расстояние 2 мм, то электроны с левой поверхности катода запираются, а фокусировка оставшегося пучка не нарушается. Тем самым мы уменьшаем интенсивность пучка примерно в два раза. Анализ показал, что такой же эффект получается при изменении потенциала отражающего электрода от $-150,5$ до $-151,0$ кВ.

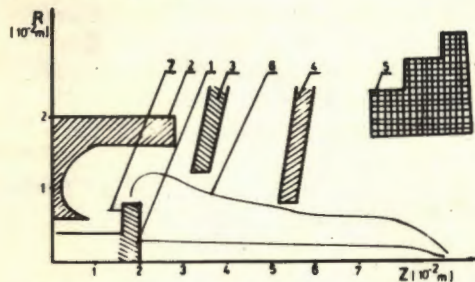


Рис.2. Схема запирающей электромагнитной системы: обозначения 1-6 имеют тот же смысл, что и на рис.1, 7 - траектория электрона в случае запираания.

В заключение авторы выражают благодарность Н.И.Балалыкину, Э.А.Перельштейну за полезные обсуждения и активную поддержку этой работы, А.А.Карлову и Т.Ф.Смоляковой за помощь в проведении анализа результатов на дисплейной станции, Н.Ю.Казаринову за ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков. "Советское радио", М., 1956.
2. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. "Советское радио", М., 1966.
3. Шубин А.Ф., Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И. Известия вузов, физика, 1974, № 7, с. 50-53.
4. Месяц Г.А. и др. ДАН СССР, 1980, т.253, № 6, с. 1383-1386.
5. Вазов В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. ИЛ, М., 1963.
6. Hornsby A. Preprint CERN, 63-7, Geneva, 1963.
7. Дерендяев Ю.С., Хохлова Э.С. ОИЯИ, Б1-11-8275, Дубна, 1974.
8. Дерендяев Ю.С., Карлов А.А., Смолякова Т.Ф. ОИЯИ, Б1-11-1299, Дубна, 1979.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Гостехиздат, М., 1957.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 ноября 1983 года.

Дерендяев Ю.С., Енчевич И.Б., Михов М.К.

11-83-782

Расчет источника электронного пучка с изменяемой интенсивностью

Приведен результат расчета источника электронного пучка с изменяемой интенсивностью тока на выходе. Такие пучки предполагается использовать при поверхностной обработке /закалке/ металлов. Решена задача анализа и синтеза электромагнитной системы источника на ЭВМ с использованием дисплея. При анализе рассчитанных электромагнитных полей, созданных электродами и соленоидом, решалось уравнение движения электронов, эмиттированных катодом. Синтез /выбор оптимальных параметров источника/ осуществлялся путем численного эксперимента. Определены как форма электродов, так и потенциалы на них, дающие пучки электронов с поперечным сечением на выходе 3 мм^2 при токе 5 А. Показано, что в результате изменения положения эмиттирующего электрода или потенциала отражающего электрода можно изменить ток на выходе источника в два раза.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Derendyaev Yu.S., Enchevich I.B., Mikhov M.K.

11-83-782

Calculation of Electron Beam Source with a Variable Intensity

Calculation on an electron beam source with a variable intensity of the current on the output is presented. Such beams are planned to be used at surface metal treatment (casehardening). The problem of analysis and synthesis of source electromagnetic system is computerized with the use of display. When analysis is performed in calculated electromagnetic fields due to electrodes and solenoid, equation of motion for filament electron emission was solved. The synthesis (the choice of source optimal parameters) was realized by numerical experiment. The form of electrodes, their potentials, which produce electron beams with a cross section of 3 mm^2 on output at 5A current have been found. It is shown that the variation of position of emitting electrode or of deflecting electrode potential could change twice the current on the source output.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой