

8. Бондарь Ю. Ф., Ипатов А. Л., Мхеидзе Г. П., Цонн Л. Э.// Препринт ФИАН № 177. 1980. — 12 с.; Бондарь Ю. Ф., Заворотный С. И., Ипатов А. Л. и др.// Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1192.

9. Сегре Е. Экспериментальная ядерная физика. — М.: Наука, 1956. Т. 1. С. 216.

10. Бондарь Ю. Ф., Заворотный С. И., Ипатов А. Л. и др.// Краткие сообщения по физике ФИАН. 1982. № 1. С. 3.

11. Арланцев С. В., Климов В. И., Мхеидзе Г. П. и др.// Труды ИОФАН. Релятивистская плазменная СВЧ-электро-ника. Т. 45. — М.: Наука, 1994. С. 166.

12. Арланцев С. В., Бондарь Ю. Ф., Кузьмин Г. П. и др.// Прикладная физика. 2006. № 1. С. 43.

13. Мхеидзе Г. П.// Энциклопедия низкотемпературной плазмы/ Под ред. Фортова. — М.: Наука, 2000. Кн. 4. С. 126.

14. Королев А. А., Мхеидзе Г. П., Савин А. А.// Прикладная физика. 2005. № 6. С. 105—113.

15. Ипатов А. Л., Кабанов С. Н., Королев А. А. и др.// Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 3. С. 162.

16. Бондарь Ю. Ф., Гоманько А. А., Грудницкий В. Г. и др.// ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 884.

17. Аскарьян Г. А., Мхеидзе Г. П., Савин А. А.// Там же. 1984. Т. 10. Вып. 23. С. 1465.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2007 г.

## Formation and application of the pulse high-current electron beams

### Part IV. Transportation of a beam

G. P. Mkheidze, A. A. Savin

A. M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

*Some results of researches of the plasma diodes and the beam plasma are resulted in the brief form. The review of works is broken into four parts. The fourth part describes works on transporation of a beam and on its energy-release.*

PACS: 41.75.-i

УДК 621.3.032.266

## Расчет энергии продольного движения высокоперевансных электронных пучков

В. Д. Журавлева, С. О. Семенов

ФГУП «Научно-производственное предприятие "Алмаз"», г. Саратов, Россия

*Представлено численное решение задачи расчета усредненной энергии продольного движения реального электронного пучка в магнитном поле.*

PACS: 41.85.-p

### Введение

В работах [1, 2] показано, что при расчете процесса взаимодействия пучка с бегущей волной по одномерным программам принципиально необходимо учитывать отличия энергии продольного движения высокоперевансного электронного пучка от напряжения на замедляющей системе, возникающие из-за провисания потенциала за счет пространственного заряда пучка, вращения электронов под действием фокусирующего магнитного поля и релятивистского фактора. Приведенные приближенные формулы для расчета энергии получены при допущениях, которые не всегда выполняются для реальных пучков: постоянной плотности тока по сечению пучка — при расчете

поля пространственного заряда и релятивистского фактора скорости всех частиц в пучке брались одинаковыми и равными средней скорости частиц, величина фокусирующего магнитного поля выбиралась равной бриллюэновскому значению для соответствующего заполнения пучком пролетного канала и не изменялась по радиусу.

Данные об энергии пучка могут быть получены из расчетов электронно-оптических систем по двух- или трехмерным программам, но при этом в случае магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) необходимо проводить усреднение энергии по периоду магнитного поля. Кроме того, проектирование приборов обычно начинается с расчетов замедляющей системы, и параметры

электронно-оптической системы могут быть неизвестны.

В данном сообщении приводится алгоритм оперативного численного расчета эквивалентной энергии продольного движения электронных пучков.

### Постановка задачи

Для вычисления действующей энергии продольного движения высокоперевансного электронного пучка была составлена программа численного решения рассмотренной самосогласованной задачи. Распределение потенциала по радиусу осесимметричного пучка вычисляется при решении одномерного уравнения Пуассона, проводимого методом конечных разностей [3]. Пролетный канал разбивается на 100 ячеек одномерной сетки, в узлах которой вычисляется плотность пространственного заряда пучка, т. е. имеем

$$\rho_m = \frac{P_\mu}{33} \frac{I_m}{\sqrt{(U_{mj-1} - U_{\theta mj})KR_{mj}}} \quad \text{для } m \geq 2$$

и

$$\rho_1 = \frac{P_\mu}{16,5} \frac{I_1}{\sqrt{U_{1j-1} KR_{1j}}}, \quad (1)$$

где  $P_\mu$  — микропереванс пучка;

$I_m$  — относительный ток пучка в кольце толщиной  $1/100 R_{can}$ ;

$R_m$  — средний радиус;

$j$  — номер внешней итерации;

$KR$  — релятивистская поправка.

Вращательная энергия электронов, равная нулю на оси пучка и в случае МПФС, усредненная за период, вычисляется по формуле

$$U_{\theta mj} = 0,2199 \cdot 10^{-3} \frac{B_0^2 KB}{U_0} KR_{mj} KI_m R_m^2, \quad (2)$$

где  $B_0$  — величина магнитного поля;

$KB = 0,5$  — для МПФС;

$KB = 1$  — для однородного магнитного поля;

$U_0$  — ускоряющее напряжение на замедляющей системе;

$KI_m = I_0(2\pi R_m/L)$  — модифицированная функция Бесселя;

$L$  — период МПФС.

Релятивистская поправка определяется по формуле [4]

$$KR_{mj} = \frac{1}{0,1957445 \cdot 10^{-5} U_0 U_{mj-1} + 1}. \quad (3)$$

Усредненная энергия продольного движения пучка вычисляется как

$$U_{EKB} = U_0 \left( 1 - \sum_{m=1}^{100} (1 - U_{mj}) I_m - \sum_{m=1}^{100} U_{\theta mj} I_m \right), \quad (4)$$

где  $I_m$  — относительная величина тока в  $m$ -слое.

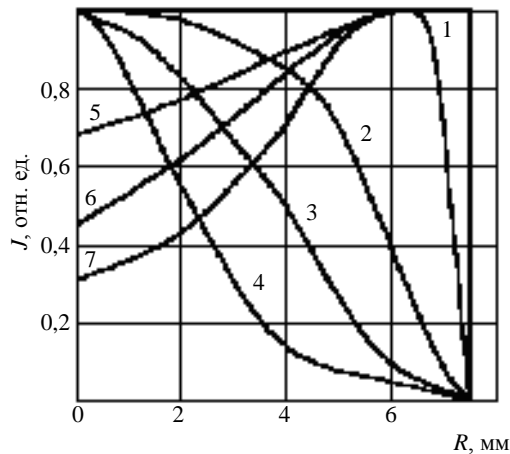
### Решение и результаты

Решение задачи проводится методом итераций. Итерационным методом решается уравнение Пуассона — внутренние итерации. Самосогласованный учет пространственного заряда и релятивистской поправки проводится с помощью внешних итераций. На каждой из них вначале вычисляются значения  $KR$ ,  $U_0$ ,  $\rho$ , а далее новые значения потенциалов в узлах сетки. Распределение плотности тока по радиусу пучка может задаваться произвольным.

Оценка погрешности расчета показала, что, например, отличие расчетной величины провисания потенциала на оси от точного аналитического решения для случая постоянной плотности тока по радиусу пучка [5] не превышает сотых долей процента.

Проведем расчеты энергии пучка для лампы бегущей волны (ЛБВ) со следующими параметрами: ускоряющее напряжение — 16500 В, ток пучка — 8 А, магнитное поле на оси — 370 Гс, период МПФС — 36 мм, радиус канала — 11 мм, радиус пучка — 7,7 мм. Средняя энергия электронного пучка  $U_{EKB}$ , полученная по методике [1], составила 14751 В. Отметим, что при заданной величине магнитного поля на оси бриллюэновский радиус пучка равен 7,92 мм, что близко к заданному значению — 7,7 мм. В рассмотренном примере изменение магнитного фокусирующего поля по радиусу пучка является существенным. Так, на радиусе пролетного канала величина поля увеличивается примерно в 2,2 раза, на радиусе 0,7 от радиуса канала — в 1,5 раза.

Рассмотрим несколько вариантов распределения плотности тока по радиусу пучка (рисунок) и рассчитаем  $U_{EKB}$ . Во всех случаях ток и радиус пучка оставались неизменными, релятивистский фактор также учитывался. Результаты расчетов потенциала на оси пучка —  $U_{ax}$ , усредненных значений провисания потенциала —  $\Delta U_{mid}$ , вращательной энергии —  $\Delta U_{rot. mid}$  и энергии продольного движения пучка —  $U_{mid}$  для тока пучка 8 А (микропереванс пучка  $P_m = 3,77 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ) приведены в табл. 1 и 2. Все потенциалы указаны в вольтах.



Варианты (1—7) распределения плотности тока по радиусу пучка

Таблица 1

Расчет с учетом радиального изменения магнитного поля

Показатели	№ варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
$U_{ax}$	14782	14213	13842	13340	14796	14862	14952
$\Delta U_{mid}$	1213	1711	2011	2374	1238	1207	1163
$\Delta U_{rot. mid}$	585	338	256	198	564	584	615
$U_{EKB}$	14702	14450	14233	13927	14697	14709	14722

Таблица 2

Расчет без учета радиального изменения магнитного поля

Показатели	№ варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
$U_{ax}$	14788	14239	13845	13342	14802	14868	14958
$\Delta U_{mid}$	1208	1681	2009	2373	1233	1202	1157
$\Delta U_{rot. mid}$	439	284	214	166	429	443	465
$U_{EKB}$	14853	14535	14278	13961	14838	14855	14877

Величина потенциала на оси пучка существенно зависит от формы распределения плотности тока, доля вращательной энергии в общей величине уменьшения энергии пучка не превышает 29 %. При постоянной плотности тока по сечению пучка средняя энергия пучка равна 14702 и 14853 В с учетом и без радиального изменения магнитного поля, соответственно, и отличается от приведенного выше результата приближенного расчета. Учет формы распределения плотности тока (см. рисунок, кривые 2—7) приводит к дополнительному изменению энергии пучка (в основном к уменьшению) примерно на 800—900 В, что составляет около 50 % от величины общего уменьшения энергии в 1647—1798 В при постоянной плотности тока по радиусу пучка.

Во всех рассмотренных случаях для решения уравнения Пуассона на первой внешней итерации потребовалось примерно 1500 внутренних итераций при величине невязки  $10^{-6}$ , число внешних итераций было равно 4—6 при невязке  $10^{-5}$  и на последней внешней итерации число внутренних итераций составило 2—11.

Величина  $U_{EKB}$  при уменьшении тока пучка до 4 А и величины магнитного поля на оси до 262 Гс с учетом его радиального изменения составила 15270—15628 В.

Для пучка в ЛБВ с параметрами: ускоряющее напряжение — 4000 В, ток пучка — 0,13 А ( $P_m = 0,514$  мкА/В<sup>3/2</sup>), магнитное поле на оси — 2700 Гс, период МПФС — 6,6 мм, радиус канала — 0,55 мм, радиус пучка — 0,3 мм и колоколообразным измеренным распределением плотности тока по сечению пучка имеем  $U_{EKB} = 3900$  В.

### Заключение

Разработан уточненный алгоритм расчета эквивалентной энергии продольного движения электронных пучков в магнитных полях. Его применение показало, что форма распределения плотности тока в поперечном сечении пучка оказывает существенное влияние на величину уменьшения энергии пучка относительно ускоряющего напряжения.

**Л и т е р а т у р а**

1. Григорьев Ю. А., Ильина Е. М., Роговин В. И., Усов В. Н.// СВЧ-техника. 1994. Сер. 1. № 3. С. 52.
2. Архипов Д. А., Ильина Е. М., Кудряшов В. П., Усов В. Н.// Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 1. С. 112.
3. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. — Новосибирск: Наука, СО, 1974.

4. Глазер В. Основы электронной оптики. — М.: Изд. Техн.-теор. литер., 1957.

5. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Сов. радио, 1966.

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.*

## **Calculation of axial motion energy for high perveance beams**

*V. D. Juravleva, S. O. Semenov*  
R&P Corporation “Almaz”, Saratov, Russia

*The numerical solving of axial motion average energy calculation task for real electron beam in magnetic field is presented.*

PACS: 41.85.-p

\* \* \*