

Электронные и ионные пучки

УДК 621.385.6

Расчет нестационарных процессов в электронно-оптических системах

В. Д. Журавлева, С. О. Семенов

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

Для моделирования электронных пучков с периодически изменяющимися во временной области характеристиками с использованием метода интегральных уравнений разработан алгоритм расчета поля пространственного заряда пучка с учетом запаздывания электрических потенциалов. С помощью предложенного алгоритма исследована динамика нестационарного электронного пучка в многоступенчатых коллекторах лампы бегущей волны (ЛБВ), определены отличия результатов расчетов при стационарном и нестационарном подходах, влияние степени группировки пучка и эффекта запаздывания на характеристики коллекторов.

В электровакуумных СВЧ-приборах, таких как клистроды, электронный пучок уже от катода имеет изменяющиеся во времени характеристики. В ЛБВ, клистродах характеристики пучка начинают изменяться во времени в процессе взаимодействия с полем электродинамической системы. Решением волновых уравнений [1], описывающих поле движущихся зарядов, являются запаздывающие потенциалы, и для решения задач с учетом запаздывания обычно применяют алгоритмы непосредственного численного решения уравнений Максвелла, например [2]. В программах расчета движения пучка во временной области на основе решения уравнения Пуассона [3—7] запаздывание обычно не учитывается, т. е. дальное действие считается мгновенным.

Для электронов, движущихся со скоростью v , магнитное взаимодействие по порядку величины равно электрическому взаимодействию, умноженному на $(v/c)^2$, где c — скорость света, т. е. при нерелятивистских скоростях мало и может не учитываться [8].

В работе [9] предложен метод учета запаздывающих электрических потенциалов при решении уравнения Пуассона с использованием алгоритма "частица—сетка—частица", а в [10] — в алгоритме "частица—частица" и применен для анализа релятивистского ленточного пучка.

Одной из задач, где электронный пучок имеет изменяющиеся во временной области характеристики: поперечные размеры, плотность тока, продольные и поперечные скорости частиц, — является движение пучка в коллекторах ЛБВ и клистронов. Имеющиеся на сегодня оценки влияния временных изменений пучка на характеристики и тепловой режим коллекторов, проведенные в квазистационарном приближении, показали их существенные отличия от результатов моделирования в стационарном режиме [11—13].

Цель настоящей работы — применение разработанного алгоритма расчета электронных пучков во временной области для исследования динамики нестационарного электронного пучка в многоступенчатых

коллекторах ЛБВ; определение влияния группировки пучка и эффекта запаздывания по [9] на характеристики коллекторов.

Метод расчета

В разработанной на основе данных работы [6] программе расчета характеристик нестационарных электронных пучков используется метод крупных частиц. Для сглаживания полей пространственного заряда и уменьшения машинного шума применен алгоритм "облако в ячейке" [14] (частица имеет размер ячейки прямоугольной сетки с равномерной плотностью заряда). Распределение зарядов по узлам сетки проводится с помощью квадратичной интерполяции. Для согласования схем распределения заряда и вычисления поля, действующего на частицу (в целях устранения эффекта "самодействия" [15]), вычисление производных электрического потенциала проводится по 12-точечной схеме.

Для запоминания пространственного заряда строится ряд сеток, соответствующих различным моментам времени. При вычислении потенциалов электрического поля методом интегральных уравнений [16] расстояние между точками истока и наблюдения пересчитывается в соответствующий временной сдвиг, по величине которого определяется номер сетки, из которой выбирается значение заряда.

Для ограничения числа сеток при учете запаздывания потенциалов проведена оценка эффекта экранировки поля пространственного заряда сгустков электронов. Решена тестовая задача по нахождению поля от ряда сгустков с идеальной группировкой (относительная величина первой гармоники сгруппированного тока равна двум), расположенных в трубе с проводящими стенками (рис. 1, а). В результате расчетов показано (см. рис. 1, б, в), что при варьировании в широких пределах радиусов пучка и трубы относительно расстояния между сгустками погрешность расчета поля простран-

ственного заряда при учете влияния уже двух соседних с тестовым сгустков не превышает 5 % относительно точного решения.

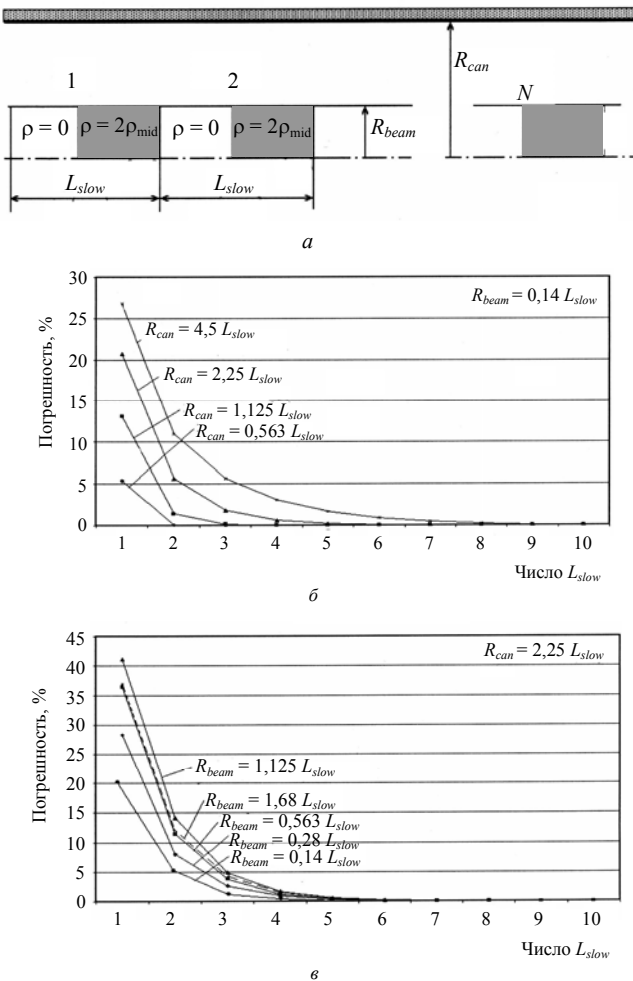


Рис. 1. Эскиз модулированного пучка в проводящей трубе (а); зависимости погрешности вычисления поля пространственного заряда от числа учитываемых периодов L_{slow} при изменении радиуса трубы (б) и радиуса пучка (в)

Таким образом, точный учет запаздывания можно проводить внутри зоны радиусом в три длины волны рассматриваемого процесса (применительно к ЛБВ, клистронам — замедленной длины волны) относительно точки наблюдения, а на расстояниях больше указанного, в дальней зоне, можно ограничиться приближенным его учетом.

Результаты расчетов

С помощью предложенного алгоритма исследована динамика нестационарного электронного пучка в двух- и четырехступенчатых коллекторах ЛБВ средней мощ-

ности с безразмерными параметрами: $C = 0,1$; $Q_0 = 6,93$; $d_0 = 0,052$; $\gamma_e = 0,985$ и микропервансом пучка $0,67 \text{ мкА/В}^{3/2}$. На рис. 2 приведены диаграммы распределения крупных частиц по энергиям и радиусам в течение периода ВЧ-сигнала T и интегральных распределений электронов по энергиям на выходе ЛБВ для случаев максимального электронного КПД и максимального усиления, полученных в результате расчета по нелинейной двумерной модели взаимодействия [17]. Значения электронного КПД и относительной величины первой гармоники сгруппированного тока в первом случае составили 25,6 и 0,634 %, во втором — 18,15 и 1,381 %. Длина замедленной волны, т. е. пространственная периодичность процесса, равна 17,93 мм.

Результаты расчетов расширения пучка под действием собственного пространственного заряда в нестационарном и стационарном режимах приведены на рис. 3, а—з. Шаг по времени в расчетах составлял 1/16 периода. Продольные координаты частиц в момент старта пересчитывались в соответствии с фазой частиц (см. рис. 2). Учет остаточной группировки пучка приводит к более быстрому расширению радиуса. Например, при $Z = 40$ радиус пучка в режиме максимального КПД на 9,1 % больше, чем при стационарном подходе, в режиме максимального усиления — на 19 %.

Расчеты характеристик коллекторов проводили с учетом влияния вторичной эмиссии — при оседании частицы на поверхность коллектора из точки оседания по нормали к поверхности вылетала вторичная частица с зарядом первичной частицы и со скоростью 30 % от скорости первичной в момент оседания.

Анализ характеристик четырехступенчатого коллектора проводился при следующих значениях потенциалов электродов: 1 — предколлектор под ускоряющим потенциалом U_0 ; 2 — 1-я ступень — $0,562U_0$; 3 — 2-я — $0,415U_0$; 4 — 3-я — $0,268U_0$; 5 — 4-я — $0,146U_0$; 6 — игла — под потенциалом катода (рис. 4, а). В режиме максимального КПД ЛБВ при расчете без учета вторичной эмиссии после начала влета частиц в коллектор процесс полностью устанавливается во времени через 18 периодов (см. рис. 4, б), когда средние за период КПД коллектора токи электродов и тепловые нагрузки на них далее не изменяются. Из-за медленного движения вторичных частиц процесс установления характеристик коллектора оказывается более длительным (см. рис. 4, в). Стационарный режим моделировался (см. рис. 4, г) заданием на каждом временном шаге на входе в коллектор всех частиц пучка. Процесс установления закончился через 280 шагов по времени, т. е. примерно через 17 периодов. В режиме максимального усиления (см. рис. 4, д—ж) время установления процесса мало отличается от приведенного выше.

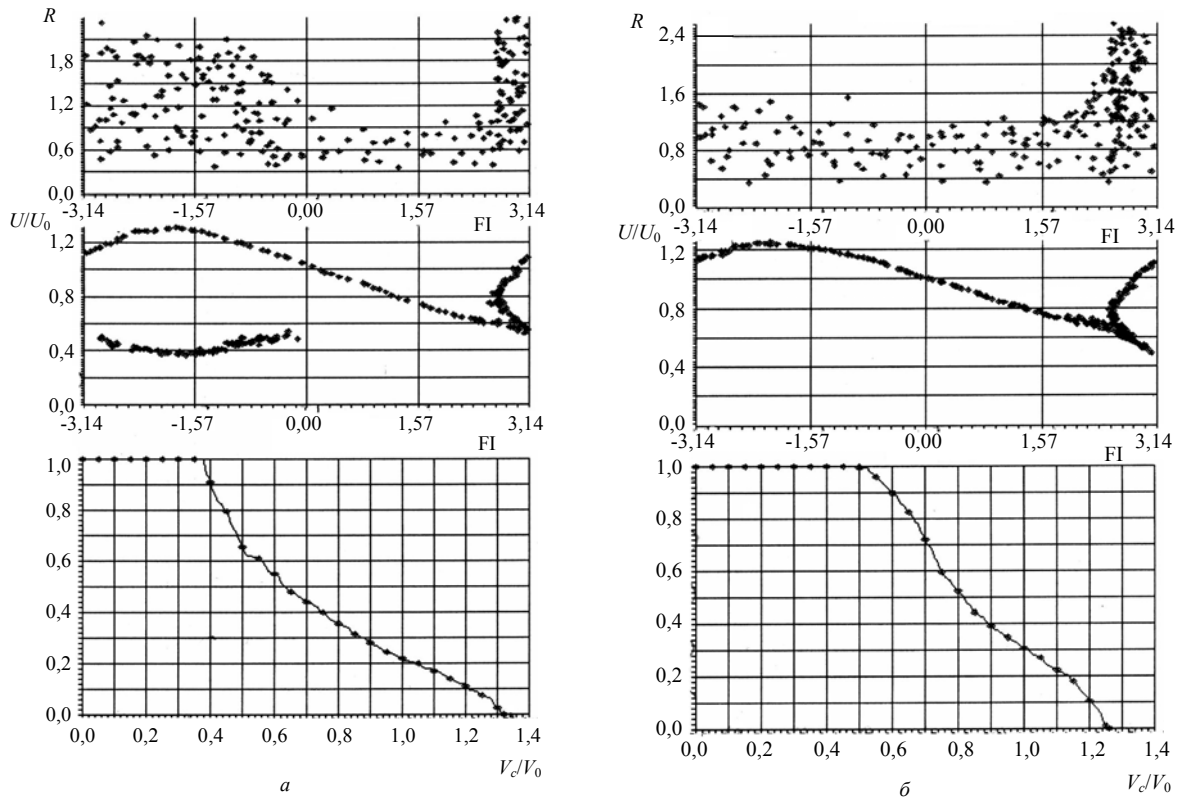


Рис. 2. Распределение крупных частиц по радиусам и нормированным энергиям в зависимости от фазы и интегральные распределения частиц по энергиям на входе в коллектор: а — в режиме максимального КПД; б — в режиме максимального усиления

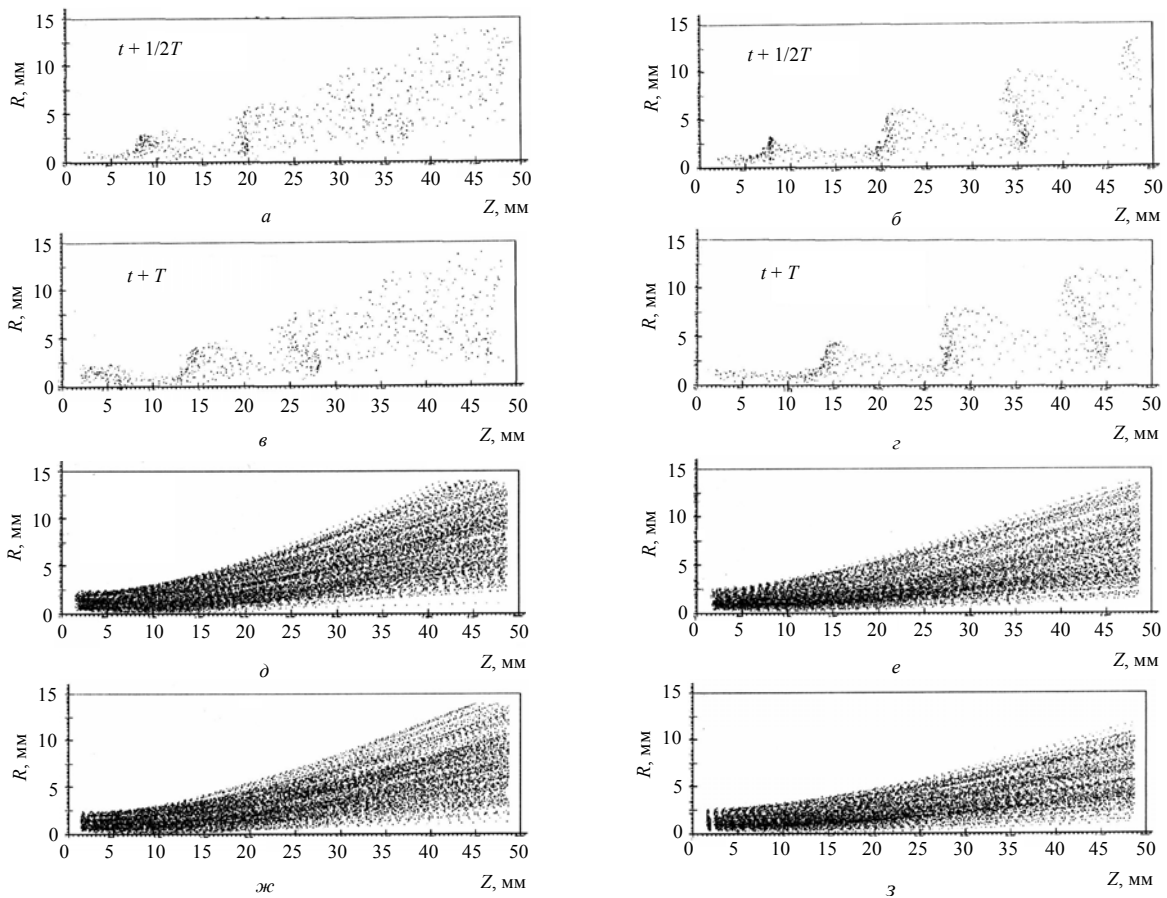


Рис. 3. Положение крупных частиц при расширении пучка под действием собственного пространственного заряда в режимах максимального КПД (а, в, д, ж) и максимального усиления (б, г, е, з); а, б, в, г — положение частиц в различные моменты времени; д, е — суммарное за период положение частиц; ж, з — стационарный режим

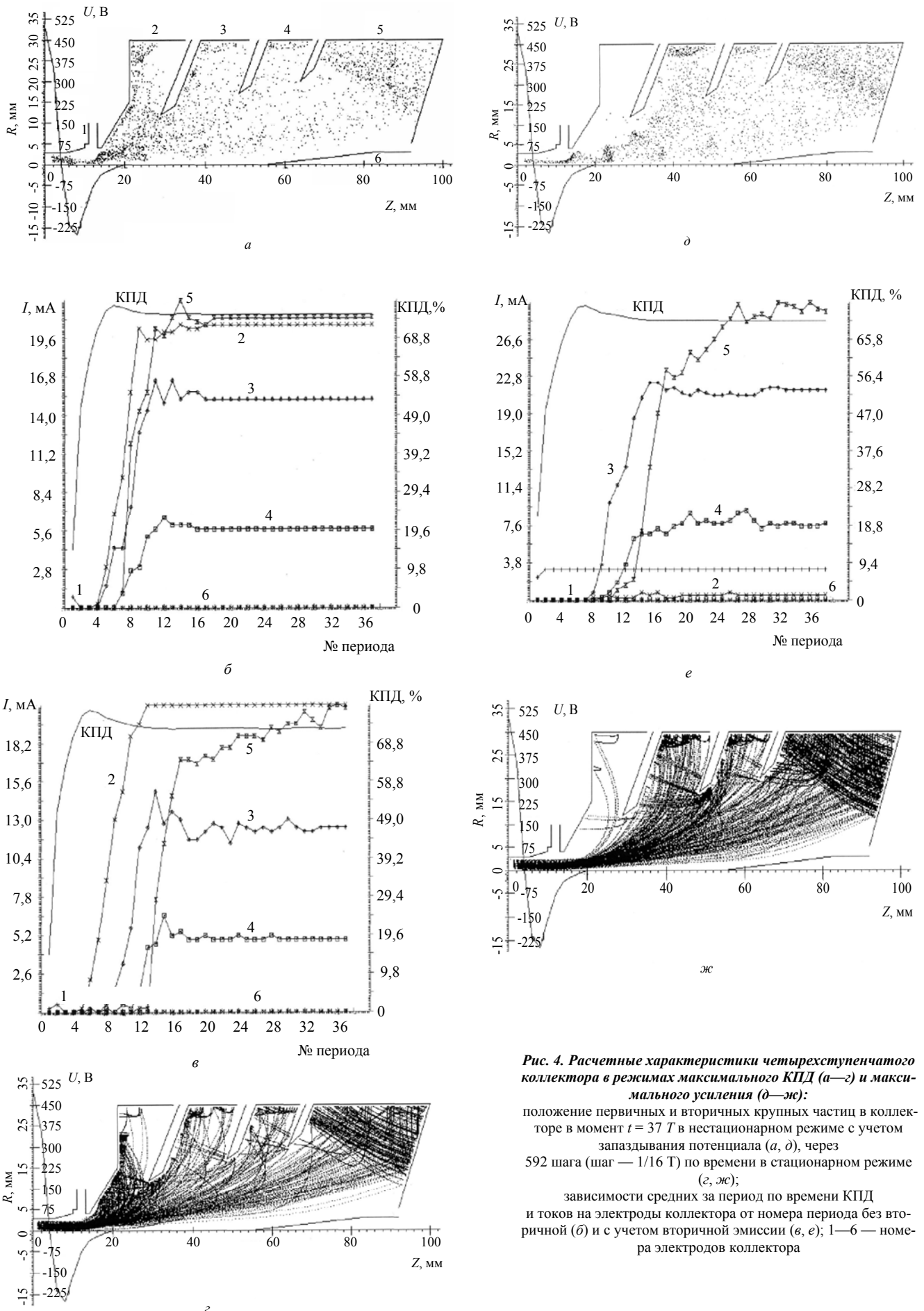


Рис. 4. Расчетные характеристики четырехступенчатого коллектора в режимах максимального КПД (а—г) и максимального усиления (д—ж): положение первичных и вторичных крупных частиц в коллекторе в момент $t = 37 T$ в нестационарном режиме с учетом запаздывания потенциала (а, д), через 592 шага (шаг — $1/16 T$) по времени в стационарном режиме (г, ж); зависимости средних за период по времени КПД и токов на электродах коллектора от номера периода без вторичной (б) и с учетом вторичной эмиссии (в, е); 1—6 — номера электродов коллектора

При рассматриваемых параметрах задачи учет эффекта запаздывания слабо влияет на КПД коллектора и распределение токов по электродам (табл. 1). По сравнению со стационарным подходом учет остаточной группировки приводит к уменьшению токооседания на ступени с низким потенциалом, причем с увеличением группировки этот эффект проявляется сильнее.

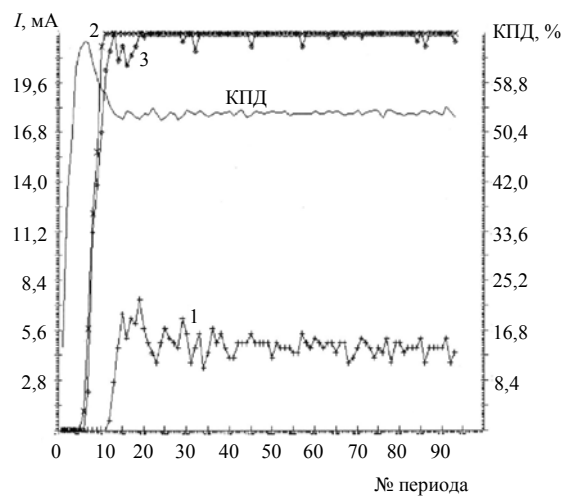
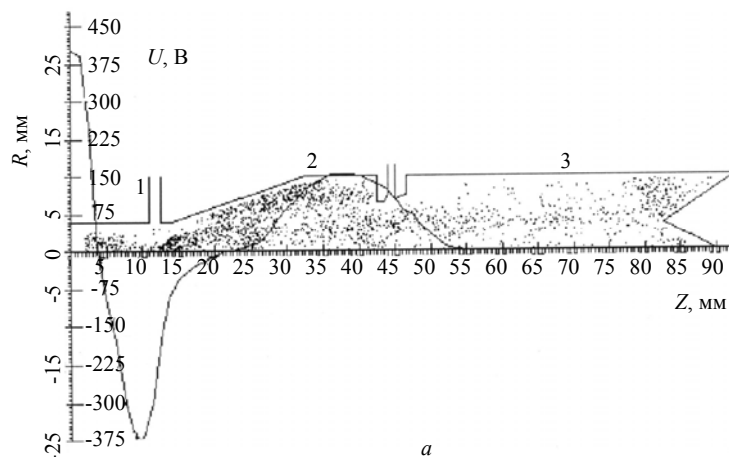
Аналогичные расчеты были проведены для двухступенчатого коллектора в режиме максимального КПД (рис. 5 и табл. 2). Наличие дополнительной фокуси-

рующей магнитной линзы между первой и второй ступенями (электроды 2 и 3) приводит к отражению части медленных частиц от входа второй ступени, выходу их из коллектора и оседанию на предколлектор. Процесс установления по сравнению с четырехступенчатым коллектором, имеющим магнитное поле только во входной части, становится более длительным, эффект запаздывания потенциала и остаточной группировки пучка проявляется сильнее.

Таблица 1

Расчетные характеристики четырехступенчатого коллектора

Режим			КПД _{колл.} , %	Токи электродов коллектора					
				I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
Максимального КПД	Нестационарный	Без учета запаздывания потенциала	72,35	0	25,2	11,8	5,1	20,3	0
		С учетом запаздывания потенциала	72,37	0	24,9	12,4	4,9	20,5	0
	Стационарный		73,03	0,2	24,3	10,6	6,8	20,6	0
Максимального усиления	Нестационарный	Без учета запаздывания потенциала	70,55	3,1	0,5	20,5	8,6	29,9	0
		С учетом запаздывания потенциала	70,56	3,1	0,5	21,5	7,9	29,6	0
	Стационарный		71,15	2,3	1,6	17,7	11,0	29,7	0



б

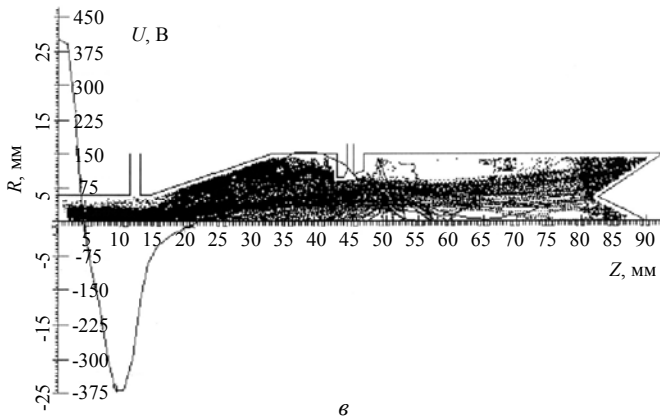


Рис. 5. Расчетные характеристики двухступенчатого коллектора в режиме максимального КПД: положение первичных и вторичных крупных частиц в коллекторе в момент $t = 150 T$ в нестационарном режиме с учетом запаздывания потенциала (а), через 2400 шага (шаг — $1/16 T$) по времени в стационарном режиме (б); зависимости средних за период по времени КПД и токов на электроды коллектора от номера (б); 1—3 — номера электродов коллектора

Отличия в величине тепловой нагрузки на электроды коллекторов в различных режимах близки к рассмотренным выше изменениям токов электродов.

Таблица 2

Расчетные характеристики двухступенчатого коллектора

Режим		КПД _{колл.} , %	Токи электродов коллектора		
			I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
Максимального КПД	Нестационарный	Без учета запаздывания потенциала	4,3	36,3	22,0
		С учетом запаздывания потенциала	4,9	34,4	23,3
	Стационарный	57,10	3,4	31,3	27,9

Заключение

Учет временных изменений характеристик пучка на входе в коллектор приводит к уменьшению по сравнению со стационарным режимом тока на ступени с низким потенциалом и как следствие — к уменьшению КПД коллектора, отличия увеличиваются с ростом группировки пучка. Учет запаздывания потенциала электрического поля при рассмотренных параметрах задачи слабо влияет на характеристики коллекторов.

Л и т е р а т у р а

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М.: Наука, 1967.

2. Chevalier C. T., Herrmann K. A., Cory C. L. et al.// Proc. Third IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2002). Monterey. CA. USA. 2002. P. 15.
 3. Блейвас И. М., Ильин В. П., Свешников В. М.// ПМТФ. 1974. № 11. С. 31.
 4. Блейвас И. М., Дубровина С. А., Ильин В. П. и др.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. № 10. С. 105.
 5. Куцевская Т. П., Холмич В. Б.// Там же. 1979. № 11. С. 98.
 6. Журавлева В. Д., Роговин В. И., Семенов С. О.// Там же. 1986. № 1. С. 69.
 7. Федяев В. К., Козлов В. Н., Бронин И. П.// Актуальные проблемы электронного приборостроения: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. 20—22 сент. 2000. — г. Саратов, 2001. С. 261.
 8. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Сов. радио, 1973.
 9. Журавлева В. Д., Семенов С. О.// Современные проблемы электроники СВЧ- и радиофизики: Тез. докл. междунар. межвуз. конф. — г. Саратов, 20—24 марта 2001. С. 59.
 10. Шейн А. Г., Насачев А. Г., Ковтун Д. Г.// Электромагнитные волны и электронные системы, 2004. Т. 9. № 2. С. 34.
 11. Калинин Ю. А., Кац А. М., Хлусова Т. И. и др.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. № 10. С. 111.
 12. Дацковский В. А., Калинин Ю. А., Можейко С. Б.// Там же. 1978. № 7. С. 115.
 13. Роговин В. И., Семенов С. О.// Вопросы анализа и расчета твердотельных и электровакуумных приборов: Тез. докл. конф. по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ "Электроника". 1979. Вып. 2 (129). С. 16—17.
 14. Морз Р. Вычислительные методы в физике плазмы. — М.: Мир, 1974.
 15. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. — М.: Атомиздат, 1979.
 16. Пензяков В. В., Роговин В. И.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. № 10. С. 84.
 17. Ильина Е. М., Морев С. П., Роговин В. И. и др.// Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 10. С. 1271.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

The calculation of nonstationary processes in electron-optic systems

V. D. Zhuravleva, S. O. Semenov
 Federal State Unitary Enterprise «NPP "ALMAZ"», Saratov, Russia

The algorithm of space charge field calculations with latening electric potential taken into account for electron beams having periodically changes in time domain performances are developed using integral equation method. Using suggested algorithm the dynamics of nonstationary electron beam in TWT multistage collectors are investigated, the differences under stationary and nonsta-

tionary model applications, influence of the value of beam grouping and the latening effect under collector performances are presented.