

## РАДИОФИЗИКА

УДК 621.372.2.01

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕНИОТРОНА 3-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН В МАГНИТНОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

А. П. Сухоруков, А. Ф. Королев, А. В. Шелудченков, Г. И. Сергеев<sup>\*)</sup>,  
И. И. Голеницкий<sup>\*)</sup>, О. В. Евтушенко<sup>\*)</sup>, Е. И. Каневский<sup>\*)</sup>, О. И. Карнаух<sup>\*)</sup>,  
И. П. Чепурных<sup>\*)</sup>

(кафедра радиофизики)

Разработан и испытан пениотронный генератор 3-мм диапазона длин волн, работающий на 10-й гармонике циклотронной частоты. Представлены результаты расчета и оптимизации электронно-оптической и электродинамической системы прибора. Отличительной особенностью пениотрона является то, что моновинтовой электронный поток формируется и фокусируется в магнитной фокусирующей системе на постоянных SmCo-магнитах. Приведены результаты экспериментального исследования характеристик пениотронного генератора.

**Введение**

Исследования характеристик приборов пениотронного типа показали, что взаимодействие моновинтового электронного потока на высоких гармониках циклотронной частоты с ВЧ-полем магнетронного волновода происходит с высоким кпд. В импульсном режиме в диапазоне  $90 \div 100$  ГГц осуществлена генерация на 10-й гармонике с электронным кпд 40% и выходной мощностью 10 кВт. В качестве рабочего типа колебаний использовался  $\pi$ -вид ( $TE_{11,1}$ ) магнетронного волновода с 22 ламелями [1]. На частоте 35 ГГц достигнуто усиление 20 дБ с эффективностью  $25 \div 30\%$  на 2-й гармонике гирочастоты [2].

<sup>\*)</sup> Государственное научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино.

В этом случае пениотрон работал на  $\pi$ -виде колебаний ( $TE_{3,1}$ ) магнетронного волновода с 6 ламелями.

Существенным недостатком, сдерживающим широкое внедрение приборов этого типа, является использование соленоида для создания однородного магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия. Использование магнитной фокусирующей системы (МФС) на постоянных магнитах вместо сверхпроводящих или резистивных соленоидов позволило бы существенно улучшить технические параметры приборов этого класса. Однако это требует применения принципиально новой электронно-оптической (ЭОС) и электродинамической систем, поскольку связано с реверсом магнитного поля на полюсных наконечниках МФС и неадиабатическим характером движения винтового электронного потока в области компрессии.

Применение традиционной для гиротронных приборов магнетронно-инжекторной пушки в МФС на постоянных магнитах оказывается невозможным, так как, согласно численным расчетам, при неадиабатической компрессии винтового электронного потока должен возникнуть недопустимо большой разброс поперечных скоростей электронов:  $\Delta v_{\perp}/v_{\perp} \geq 20\%$  [3]. Существуют также еще две проблемы, связанные с характеристиками магнитного поля в рабочем зазоре. Во-первых, необходимы меры по термостабилизации или термокомпенсации величины ведущего магнитного поля, так как магнитные материалы, из которых обычно изготавливаются МФС электронных вакуумных приборов, характеризуются температурным дрейфом намагниченности, составляющим 0,1% на 1°C (NdFeB) и 0,04% на 1°C (SmCo). Поэтому при относительной ширине циклотронного резонанса, равной 0,5%, изменение температуры МФС на 10°C нарушает синхронизм электронного потока с ВЧ-полем и эффективный энергообмен между ними невозможен. Во-вторых, необходимо, чтобы была обеспечена высокая однородность магнитного поля в области взаимодействия, т. е. величина  $\Delta B_0/B_0$  была меньше 0,5%, так как большие отклонения приводят к выходу электронного потока из циклотронного резонанса.

Реверс и быстрый спад магнитного поля в коллекторной области делают невозможным применение в пениотроне хорошо зарекомендовавшего себя в гиротронах адиабатического вывода энергии, совмещенного с коллектором. В этом случае электронный поток оседает на стенках в виде тонкого кольца, что приводит к сильному локальному перегреву коллектора. Согласующее устройство между областью взаимодействия и коллектором также должно преобразовывать  $\pi$ - или  $2\pi$ -вид колебаний электродинамической системы в удобную для передачи (транспортировки) и использования моду круглого волновода, например  $TE_{0,1}$ .

С учетом перечисленных особенностей был разработан и испытан генератор пениотронного типа (рис. 1), описание и результаты экспериментальных исследований которого представлены в настоящей работе.

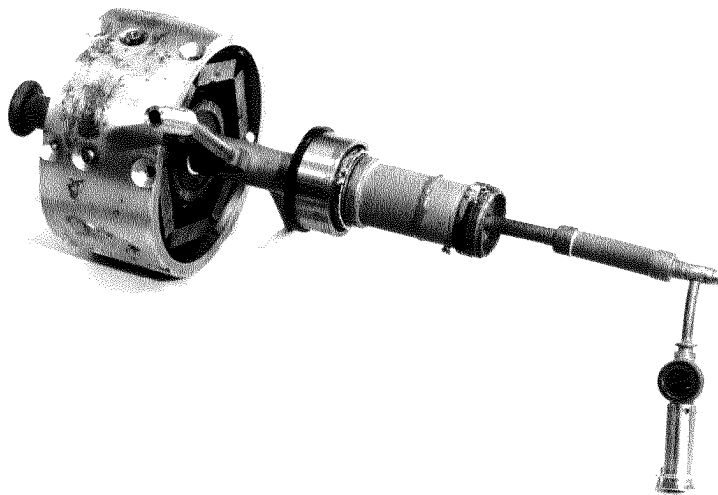


Рис. 1. Внешний вид пениотрона 3-мм диапазона длин волн в МФС на постоянных магнитах

### Электронно-оптическая и магнитная фокусирующая системы пениотрона

Ослабление влияния пространственного заряда на разброс ведущих центров электронных орбит относительно геометрической оси прибора ( $\Delta r_{\text{cycl}}/r_{\text{cycl}}$ ) в электронном потоке возможно в неадиабатических гиротронных пушках *O*-типа, которые использовались на ранних стадиях разработки гиротронов [4]. Как показали численные и экспериментальные исследования [5], параметры винтового электронного потока, в частности разброс поперечных скоростей электронов  $\Delta v_{\perp}/v_{\perp}$ , поперечный КПД и разброс  $\Delta r_{\text{cycl}}/r_{\text{cycl}}$  для моновинтовых потоков, существенным образом зависят от двух факторов — способа первоначальной накачки осцилляторной энергии электронов и крутизны переходной области магнитного поля (участок реверса и компрессии).

При выборе окончательной конструкции ЭОС и МФС учитывалось, что разрабатываемые узлы должны обеспечивать возможность регулирования:

- 1) ускоряющего напряжения в пределах  $\pm 10 \div \pm 20\%$ ,
- 2) тока катода от нуля до максимального без изменения остальных параметров электронного потока для работы в импульсном режиме (управляющий электрод должен быть бестоковым),
- 3) магнитного поля в рабочем зазоре в пределах  $\pm 2 \div 3\%$  для подстройки синхронизма взаимодействия;
- 4) величины магнитного поля на катоде в пределах  $\pm 20 \div 30\%$  для изменения диаметра электронных орбит и уровня осцилляторной энергии моновинтового электронного потока.

Конфигурация электродов, распределение потенциала и электронные траектории в ЭОС представлены на рис. 2. В результате численной оптимизации были получены следующие параметры моновинтового электронного потока: ток пучка  $I_0 = 0,65$  А,

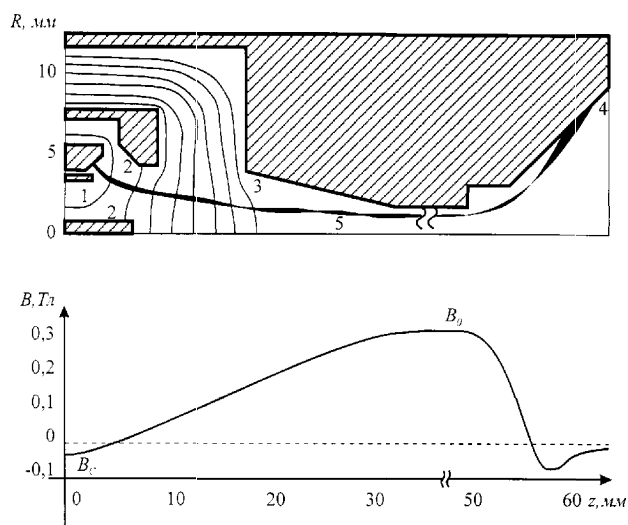


Рис. 2. Форма электродов, распределение электрического потенциала и магнитного поля в ЭОС пениотрона: 1 — катод, 2 — первый анод, 3 — второй анод, 4 — коллектор, 5 — электронные траектории

ускоряющее напряжение  $U_0 = 20$  кВ, потенциал промежуточного анода  $U_a = 4$  кВ, микропервееанс  $p_\mu = 0,225$  мкА/В<sup>3/2</sup>, максимальный диаметр электронного потока  $D_b = 2,8$  мм, толщина стенки электронного потока  $h_b = 0,18$  мм, диаметр пролетного канала  $D = 3,2$  мм, средний диаметр эмиттера  $D_e = 9,7$  мм, ширина эмиттера  $h_e = 0,2$  мм, средняя плотность тока с катода  $j = 10$  А/см<sup>2</sup>, пич-фактор  $g = 1,8$ , вращательный КПД потока  $\eta_\perp = 76\%$ , магнитное поле в рабочем зазоре  $B_0 = 0,325$  Тл, на катоде  $B_c = -0,0225$  Тл, разброс поперечных скоростей электронов  $\Delta v_\perp/v_\perp = 3,6\%$ , разброс ведущих центров электронных орбит  $\Delta r_{cycl}/r_{cycl} = 6,8\%$ .

Известно, что при пениотронном механизме взаимодействия фазовая группировка электронов осуществляется в результате поперечного дрейфа ведущего центра электронной орбиты в область тормозящего электрического поля. При этом модуляция электронного потока по скорости отсутствует. Такой вид взаимодействия очень чувствителен именно к разбросу ведущих центров электронных орбит. Расчет эффективности взаимодействия показывает, что при  $\Delta r_{cycl}/r_{cycl} = 15\%$  выходная мощность пениотрона снижается вдвое. Поэтому при оптимизации ЭОС основное внимание уделялось снижению величины  $\Delta r_{cycl}/r_{cycl}$ . На рис. 3 изображены проекции электронных траекторий в азимутальной плоскости для неоптимизированного и оптимизированного вариантов электронно-оптической системы пениотрона.

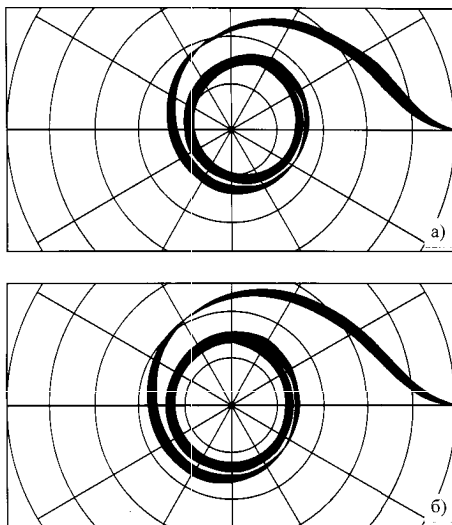


Рис. 3. Неоптимизированный (центры электронных орбит не совпадают с геометрической осью прибора) — а и оптимизированный (совпадают) — б по разбросу ведущих центров электронных орбит электронный поток

Наличие реверса и спад магнитного поля в коллекторной области приводят к быстрой расфокусировке электронного потока и оседанию последнего на коллектор в виде тонкого кольца, способного вызвать локальный перегрев и выход прибора из строя. Поэтому при использовании МФС на постоянных магнитах необходимо применять специальные меры для увеличения площади оседания электронного потока. В отличие от приборов гиротронного типа, работающих в криомагнитных или резистивных соленоид-

дах, зона оседания электронного потока в коллекторе находится в непосредственной близости от согласующего перехода между областью взаимодействия и коллектором. Из-за этих ограничений на геометрические размеры в данном приборе адиабатический конусный переход был заменен более коротким ступенчатым согласующим переходом.

### Электродинамическая система пениотрона

В качестве рабочей моды пениотронного генератора, работающего на 10-й гармонике циклотронной частоты, использовался  $2\pi$ -вид колебаний 11-ламельного магнетронного волновода. Такой выбор был продиктован двумя причинами. Во-первых,  $2\pi$ -виду колебаний магнетронного волновода соответствует родственная волна  $TE_{0,1}$  круглого волновода, что облегчает расчет и настройку согласующего перехода. Во-вторых, 11-ламельный волновод по сравнению с 22-ламельным, поддерживающим  $\pi$ -вид колебаний, проще в изготовлении, и он способен выдержать большие тепловые нагрузки в случае плохого токопрохождения. При этом некоторое снижение сопротивления связи в генераторе можно компенсировать увеличением дифракционной добротности резонатора [6].

Расчет частоты отсечки и сопротивления связи проведен по программе [7] с погрешностью, не превышающей 0,1% и 1,0% соответственно. Для согласования области взаимодействия с коллектором при расчете коэффициента прохождения  $k$  использовался классический метод синтеза ступенчатых переходов. По программе [8] проведен расчет многомодовой матрицы рассеяния на стыке двух волноводов без учета омических потерь. Оказалось, что для согласования достаточно одной четвертьволновой 11-ламельной секции. Погрешность счета для коэффициентов отражения и прохождения основной волны в многомодовом режиме (с учетом восьми  $TE$ -волн и семи  $TM$ -волн, когда наступает насыщение и учет более высоких типов не влияет на результаты счета) не превышает 1,0%. В результате расчета геометрические размеры промежуточной четвертьволновой секции оказались следующими: внутренний радиус секции  $r = 2,0$  мм, внешний радиус  $R = 2,3$  мм, длина  $L = 2,25$  мм, частота отсечки  $f_{cut} = 84,5$  ГГц.

На рис. 4 изображена электродинамическая система с согласующим переходом и вакуумно-плотным

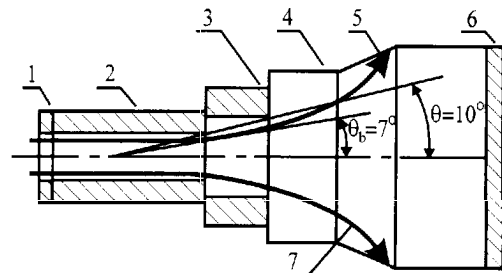


Рис. 4. Электродинамическая система пениотрона: 1 — запредельная диафрагма, 2 — область взаимодействия, 3 — согласующий магнетронный волновод, 4 — круглый волновод, 5 — конусный переход, 6 — вакуумноплотное окно, 7 — электронный поток

полуволновым согласованным окном для вывода излучения. Угол раскрытия согласующего перехода составляет  $\theta = 10^\circ$  при угле расхождения электронного потока в переходе  $\theta_b = 7^\circ$ . Это обеспечивает беспрепятственное прохождение электронного потока в коллектор. На рис. 5 (кривая 1) представлена расчетная зависимость амплитудно-частотной характеристики электродинамической системы пениотрона.

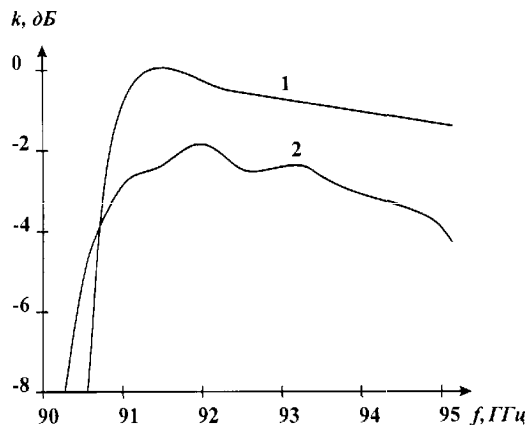


Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) амплитудно-частотные характеристики электродинамической системы пениотрона

### Результаты экспериментальных исследований пениотронного генератора

На основании проведенных расчетов была изготовлена электродинамическая система пениотрона. Магнетронный 11-ламельный волновод с частотой отсечки 90,3 ГГц поддерживал  $2\pi$ -вид колебаний. Согласующее устройство ступенчатого типа преобразовывало  $2\pi$ -вид колебаний в волну  $TE_{0,1}$  круглого волновода, которая затем через адиабатический конус проходила в коллектор. Максимальный коэффициент прохождения был равен 0,63 на частоте 92 ГГц. Экспериментально измеренная частота отсечки практически совпала с расчетной. Центральная частота согласования оказалась на 0,5 ГГц выше ожидаемой. Результаты «холодных» измерений представлены на рис. 5 (кривая 2).

Для предотвращения выхода прибора из строя в результате возможного токооседания на электродинамической системе при его испытании использовался импульсный режим со скважностью  $Q = 50$  и длительностью импульсов  $\tau = 25$  мкс. При работе электронной пушки в режиме, соответствующем расчетным параметрам  $U_0 = 20$  кВ,  $I_0 = 0,65$  А,  $B_c = -0,0225$  Тл, токопрохождение на коллектор составило 100%. Однако в этом режиме генерация не наблюдалась. По мере снижения поля на катоде, увеличения осцилляторного КПД электронного потока и увеличения радиуса электронных орбит возникали условия для генерации, однако токопрохождение при этом ухудшалось. При расчетном ускоряющем напряжении  $U_0 = 20$  кВ и токопрохождении 78,5% удалось достичь выходной мощности  $P = 80$  Вт и максимального КПД взаимодействия 7,5%. При дальнейшем росте выходной мощности до

$P = 100$  Вт КПД снижался до 6,8%, токопрохождение — до 71%. Также наблюдалось токооседание, составляющее  $3 \div 4\%$  на первом аноде. Максимального КПД (8%) удалось достичь при более высоком ускоряющем напряжении  $U_0 = 22,5$  кВ и токе катода  $I_0 = 0,5$  А. В «горячем» эксперименте частота выходного сигнала при перестройке магнитным полем менялась в пределах  $f = 91,0 \div 91,3$  ГГц, что хорошо согласуется с расчетом. В процессе проведения эксперимента заданные значения магнитного поля на катоде и в области взаимодействия поддерживались с помощью корректирующих соленоидов. Очевидно, что при таких параметрах токопрохождения провести испытания в непрерывном режиме было невозможно.

### Заключение

Результаты «холодных» измерений собственной частоты магнетронного волновода (частоты отсечки), коэффициентов прохождения и отражения от согласующего ступенчатого перехода, а также зафиксированная частота генерации в «горячем» эксперименте подтвердили правильность проведенных численных расчетов электродинамической системы пениотрона.

Как и ожидалось, проблема формирования высокоэффективного моновинтового электронного потока прежде всего связана с уменьшением разброса ведущих центров электронных орбит относительно геометрической оси прибора. Зазор между ВЭП и электродинамической системой составляет всего 0,2 мм и, как показывают численные расчеты и экспериментальные исследования, не может быть увеличен без значительного снижения КПД электронно-волнового взаимодействия. Испытанный вариант электронно-оптической системы оказался очень чувствительным к отклонению величины электрического и магнитного полей от оптимальной в области катода и компрессии винтового электронного потока. Прежде всего это связано с тем, что первоначальная накачка осцилляторной энергии электронов осуществляется комбинированным способом, за счет эмиссии электронов с катода под углом к магнитному полю и прохождения электронами области реверса магнитного поля. Поэтому повышение устойчивости электронно-оптической системы к дестабилизирующим факторам прежде всего связано с подбором такого распределения электрического и магнитного полей в области катода, при котором эмиссия электронов происходила бы параллельно магнитному полю, а преобразование продольной энергии в поперечную определялось бы только параметрами области реверса и компрессии магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Межотраслевой научно-технической программы «Физика микроволн».

### Литература

1. Dohler G., Gallagher D., Richards J., Scaffuri F. // IEEE Int. Electron Devices Meeting. Tech. Dig. 1993. P. 363.

2. *Park G.S., Hirshfield J.L., Kyser R.H., Armstrong C.M., Gangly A.K.* // Int. Conf. Infrared and Millimetre Waves. Dig. 1992. P. 500.
3. *Голеницкий И.И., Еремка В.Д., Евтушенко О.В.* // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 1992. № 5(449). С. 13.
4. *Голеницкий И.И., Еремка В.Д., Сазонов В.В.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1988. № 14.
5. *Евтушенко О.В., Голеницкий И. И., Еремка В.Д. и др.* // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 1992. № 6(450). С. 3.
6. *Королев А.Ф., Моносов Г.Г., Сухоруков А.П. и др.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. № 5. С. 62.
7. *Чепурных И.П., Самохин Г.С.* // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1976. № 2. С. 119.
8. *Оганян Э.В., Чепурных И.П.* // Там же. 1985. № 1. С. 36.

Поступила в редакцию  
23.06.99