

да для диагностики образцов полуизолирующего GaAs. Данная методика измерений обеспечивает основные метрологические показатели на уровне не хуже ранее известных. Так, погрешность измерений толщины и электропроводности пластин не превышает 3%, а для случая измерения на эпитаксиальных пленках — не более 5%.

Литература: 1. *Арсенид* галлия в микроэлектронике: Пер. с англ./ Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмена. М.: Мир. 1993. 555 с. 2. *Аболтиньш Э.Э.* Неразрушающие методы контроля характеристик полупроводниковых слоев// RAU Scientific Reports. Computer Modelling & New Technologies. 1998. Vol. 2. P. 71-78. 3. *Роцин В.М., Чмырева О.Л., Лемешко С.В., Шевяков В.И.* Определение толщины сверхтонких пленок проводников и диэлектриков // Изв. вузов, Сер. Электроника, 2001. № 1. С. 100. 4. *Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А.* Измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970. 430 с. 5. *Блад П., Ортон Дж. В.* Методы измерения электрических параметров полупроводников // Зарубежная электроника. 1991. Вып. 2. С. 3-49. 6. *Павлов Л. П.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. шк., 1987. 230 с. 7. *Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.* Метод оценки толщины ультратонких пленок // ПТЭ, 2003. №3. 8. *Батавин В.В.* Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. М.: Сов. радио, 1976. 102 с. 9. *Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В.* Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с. 10. *Иващук А.В.* Измерение толщины эпитаксиальных пленок в арсениде галлия // ПТЭ, 1983. №2. С. 200-203. 11. *Бородовский П.А., Будыгин А.Ф.* СВЧ-контроль качества структур кремний на сапфире // Автотметрия. 2002. №2. 12. *Ханугин Е.Ю.,*

Доронина Н.А., Соколов О.Ю. Применение СВЧ резонантного метода для измерения электрофизических параметров структур GaAs // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып 8. С.45-47. 13. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.И.* Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника. 1995. Вып. 110. С.71-80. 14. *Гордиенко Ю. Е.* Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике многослойных структур // Радиотехника. Вып. 100. 1996. С. 253-260. 15. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Криворучко В.И.* Определение характеристик резонаторов со слоистым заполнением// Радиотехника. 1982. Вып. 60. С. 17-23. 16. *Вятчинин С.П.* Простой метод измерения высоких добротностей СВЧ резонаторов // ПТЭ. 1983. №4.

Поступила в редколлегию 07.01.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Аркуша Ю.В.

Бабыченко Сергей Васильевич, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

Бородин Борис Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: контроль параметров полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

Гордиенко Юрий Емильевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 702-93-62.

УДК 621.385.6.029.6

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С ВЧ ВОЛНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

ФРОЛОВА Т.И., ЧУРЮМОВ Г.И., ИСАЕВА Е.Б.

Описываются результаты математического моделирования энергетических характеристик двухкаскадного магнетрона при различных режимах его работы. Показывается, что применение новой конструкции прибора со скрещенными полями (двухкаскадный магнетронный автогенератор) дает возможность усовершенствовать эксплуатационные показатели (увеличить выходную мощность), а в перспективе реализовать новые режимы работы (модуляции и синхронизации) по сравнению с классическими приборами. Моделирование выполняется методом крупных частиц в многопериодном, одновиновом и нерелятивистском приближениях.

1. Введение

Механизм электронно-волнового взаимодействия в приборах со скрещенными электрическим и магнитным полями включает в себя взаимодействие электронного потока (замкнутого или разомкнутого) с

электромагнитной волной (или волнами) резонансной (или нерезонансной) замедляющей системой [1]. Такие магнетронные приборы можно рассматривать как классические или как традиционные. В настоящее время подробно разработана линейная аналитическая теория таких приборов [2, 3], а также решены многие вопросы нелинейного взаимодействия в них, включая исследования механизмов возбуждения паразитных и побочных колебаний [4-6], режимов многочастотного и многовинового взаимодействия [7, 8], ограничения эмиссии полем пространственного заряда [9] и неоднородности распределений статического электрического и магнитного полей [10], а также срывов колебаний и механизма ограничения усиления [11, 12], ограничивающих достижения приборами предельных значений выходных параметров (выходной мощности, КПД и др.) и конкуренции основного (рабочего) вида колебания с ближайшими низковольтным и высоковольтными видами колебаний [13].

Для изучения указанных выше вопросов нелинейного взаимодействия в приборах магнетронного типа наиболее строгим в постановке задачи и полным с точки зрения учета всех влияющих на процесс физических явлений является метод макрочастиц (Particle-in-Cell (PIC) method [14]). Основу данного метода составляет самосогласованная система уравнений для электромагнитного поля (уравнения Максвелла) и уравнения движения, описывающие поведение электронного потока. Такой подход традиционно

используется для исследований нелинейных явлений в классических (традиционных) приборах магнетронного типа и направлен на понимание особенностей взаимодействия с точки зрения достижения ими предельных выходных параметров. Решение такой задачи и экспериментальное ее подтверждение на практике позволило расширить возможности математического моделирования для исследования нелинейных процессов в новых более сложных конструкциях магнетронных приборов [15-17]. В этом случае применение апробированных математических моделей, т.е. моделей, результаты расчета которых сравнены с экспериментом, позволяет понять физический механизм процессов в новых предлагаемых конструкциях приборов без практической реализации их макетирования. В частности, такой подход был применен для сложных магнетронных систем, в которых имеет место взаимодействие двух электронных потоков с электромагнитной волной (двухкаскадный магнетронный автогенератор) [17, 18].

В работах [15, 19] показано, что среди перспективных путей улучшения выходных параметров приборов магнетронного типа следует выделить направление, связанное с созданием двухкаскадных приборов, основу работы которых составляет взаимодействие двух электронных потоков с ВЧ волной замедляющей системы. Данная конструкция может найти применение в многоканальных и многофункциональных РЛС. При этом возможно упрощение их конструкции при сохранении функциональных возможностей.

Целью данной работы является исследование нелинейного взаимодействия двух замкнутых электронных потоков с ВЧ полем резонансной замедляющей системы (РЗС), изучение динамики основных выходных характеристик и определение оптимальных режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора, а также определение его функциональных возможностей и областей практического применения.

Ранее в работах [17, 18] были описаны математическая модель и результаты полномасштабного моделирования электронно-волновых процессов в двухкаскадном магнетронном автогенераторе. Представленные теоретические количественные характеристики (как амплитудные, так и частотные), полученные для различных режимов работы двухкаскадного магнетрона, указывают на возможность улучшения выходных характеристик магнетронных генераторов при включении дополнительного внешнего каскада.

2. Постановка задачи

Для исследования нелинейного механизма взаимодействия двух замкнутых электронных потоков с ВЧ волной РЗС рассмотрим различные режимы работы двухкаскадного магнетронного автогенератора, внутреннее пространство взаимодействия которого представлено импульсным магнетроном МИ29, а внешнее взято для трех различных конструкций. Основные геометрические и электрические параметры для двухкаскадного магнетрона представлены в таблице.

Параметры двухкаскадного магнетрона	Внутренний каскад	Внешний каскад		
	МИ 29	1	2	3
1. Количество резонаторов	12	12	12	12
2. Радиус катода, мм	5,65	14,68	14,68	15
3. Радиус анода, мм	10	12,7	12,7	11
4. Высота катода, мм	24	24	24	24
5. Магнитная индукция, Тл	0,25	0,127	0,21	0,25
6. Анодное напряжение, кВ	27	3,3	17	27

Различные варианты геометрии внешнего каскада взяты с целью определить наиболее эффективную конструкцию двухкаскадного магнетрона.

Особенности электронно-волнового взаимодействия в двухкаскадном магнетроне связаны с нелинейными явлениями, сопутствующими взаимодействию двух замкнутых электронных потоков с электромагнитным полем РЗС. Полагая, что эквивалентная схема двухкаскадного магнетрона представляет собой схему с параллельным включением каскадов, суммарная средняя за период ВЧ колебаний энергия, отбираемая от электронных потоков (внутреннего и внешнего), равна

$$\langle W(t) \rangle = \langle W_1(t) \rangle + \langle W_2(t) \rangle, \quad (1)$$

где $\langle W_1(t) \rangle$ и $\langle W_2(t) \rangle$ – средние за ВЧ период энергии, отбираемые, соответственно, от внутреннего и внешнего электронных потоков.

Выражение (1) соответствует линейному режиму работы прибора (режим малых амплитуд). В этом случае предполагается, что в рабочем диапазоне анодных напряжений фазовое положение спицы пространственного заряда относительно максимума тормозящей фазы ВЧ волны остается неизменным (приближение заданного поля или тока (модель жесткой спицы)). На практике, как показано в [11], фазовое положение спиц изменяется, что обусловлено нелинейным характером взаимодействия. Поэтому с учетом данной нелинейности выражение (1) для двухкаскадного магнетрона может быть переписано в виде, когда средняя за ВЧ период суммарная энергия удовлетворяет следующим выражениям:

$$\langle W^*(t) \rangle \leq \langle W_1^*(t) \rangle + \langle W_2^*(t) \rangle \quad (2)$$

$$\text{или} \quad \langle W^*(t) \rangle \geq \langle W_1^*(t) \rangle + \langle W_2^*(t) \rangle, \quad (3)$$

где $\langle W_1^*(t) \rangle$ и $\langle W_2^*(t) \rangle$ – средние за ВЧ период энергии, отбираемые, соответственно, от внутреннего и внешнего электронных потоков при условии наличия фазового сдвига между электронными спицами пространственного заряда и максимумом тормозящей фазы ВЧ поля (самосогласованная постановка задачи). Для понимания особенностей выполнения условий (2) и (3) требуется проведение полномасштабного моделирования нелинейного взаимодействия двух электронных потоков с электромагнитным полем РЗС.

3. Анализ нелинейного взаимодействия двух электронных потоков с полем РЗС

Как было отмечено в работе [17], двухкаскадный магнетронный автогенератор сочетает в себе две разновидности азимутально-симметричных электронно-волновых систем: обычную (внутренний каскад) и обращенную (внешний каскад), что

позволяет реализовать несколько режимов работы. Это значит, что возможно включение как отдельных каскадов, так и всего прибора в целом. Математическое моделирование проводится для трех конструкций двухкаскадного магнетрона с геометрией внутреннего каскада (аналог магнетрона МИ29, см. таблицу) при частоте генерирования $f = 2,83$ ГГц и внешнего каскада, представленного в виде трех конструкций.

На рис. 1 показаны зависимости анодного напряжения от индукции магнитного поля для заданных геометрических размеров пространств взаимодействия внутреннего и внешнего каскадов. Как видно, значения анодного напряжения практически совпадают со значениями пороговых напряжений, вычисленных в работе [1]. Изменение геометрии пространств взаимодействия (например, за счет выбора высоты РЗС) приводит к изменению хода кривых для критического и порогового напряжений.

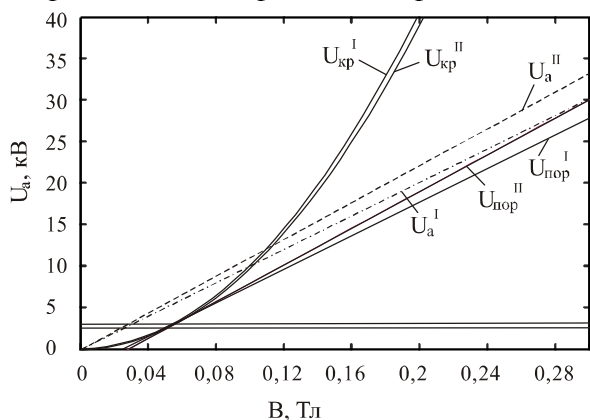


Рис. 1. Рабочие участки анодных напряжений: $U_{кр}^I$ и $U_{кр}^{II}$ — параболы критического режима в I и II каскадах; $U_{пор}^I$ и $U_{пор}^{II}$ — пороговые прямые π -вида колебаний в I и II каскадах; U_a^I и U_a^{II} — рабочие напряжения в I и II каскадах

Процесс группировки пространственного заряда в азимутальном (а) и аксиальном (б) распределениях в двухкаскадном магнетроне представлен на рис. 2.

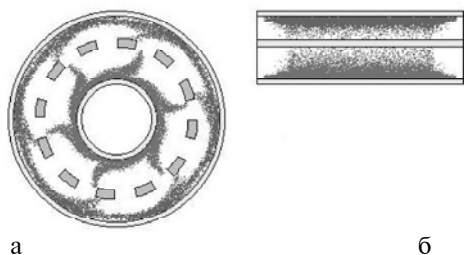


Рис. 2. Распределение пространственного заряда в двухкаскадном магнетронном генераторе

При совместной работе двух каскадов (внутреннего и внешнего), но при различных геометрических и электрических параметрах внешнего каскада, рассматривая полученные выходные характеристики, можно отметить, что применение дополнительного каскада не всегда улучшает эти характеристики. Однако наблюдаются режимы работы двухкаскадного магнетронного автогенератора, когда на выходе имеет место значительное увеличение выходной мощ-

ности (в два и более раза), при этом КПД прибора падает незначительно (не более чем на 8-10%).

На рис. 3 и 4 изображены вольтамперные характеристики для различных двухкаскадных магнетронов, где внутренний каскад представляет собой аналог импульсного магнетрона МИ29, а внешний имеет геометрию одноконтурного обращенного магнетрона (см. работу Хэлла [20]). Также на рис. 3 показаны характеристики для классических конструкций приборов МИ29 и одноконтурного обращенного магнетрона. Варианты комбинации геометрии внутреннего и внешнего каскадов, представленные на рис. 3 и 4, требуют для своей реализации применения двух источников питания, что усложняет общую схему генератора.

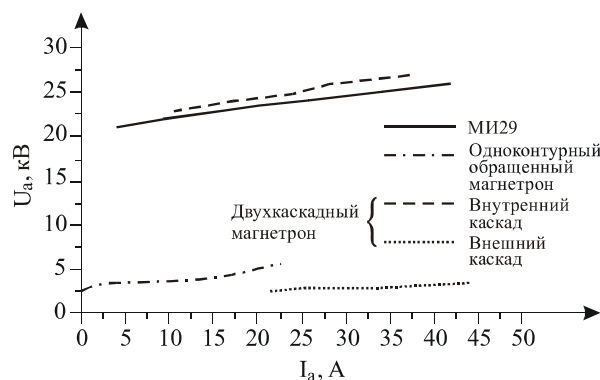


Рис. 3. Вольтамперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора (МИ29 + 1 вариант внешнего каскада)

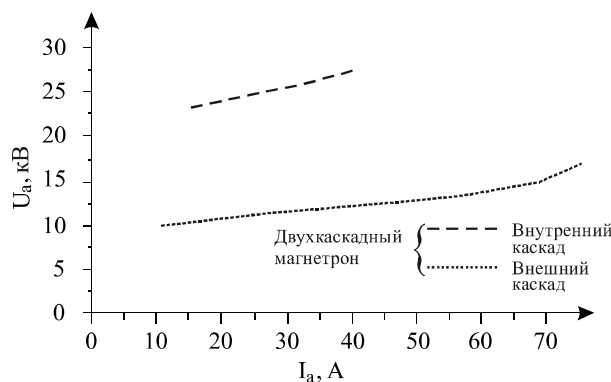


Рис. 4. Вольтамперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора (МИ29 + 2 вариант внешнего каскада)

Если взять геометрию двухкаскадного магнетронного автогенератора с внутренним каскадом в виде импульсного магнетрона МИ29 и внешним, имеющим геометрию пространства взаимодействия, определенную методом подбора высоты РЗС и внешнего катода (см. рис. 1), для случая совмещения кривых критического и порогового напряжений в целях реализации режима работы при $U_a^I = U_a^{II}$ и $V_0^I = V_0^{II} = \text{const}$, то из полученной характеристики, приведенной на рис. 5, видно, что ВАХ для внутреннего и внешнего каскадов лежат на одном уровне. При этом режиме было замечено, что максимальный уровень выходной мощности увеличился в 1,8 раза по сравнению с прибором МИ29 (710 кВт), а КПД — уменьшился на 8% и составил 52%.

Несомненным преимуществом такой конструкции является использование одного источника питания для работы внутреннего и внешнего каскадов. Варианты комбинаций геометрии внутреннего и внешнего каскадов, представленных на рис. 3 и 4, требуют для своей реализации применения двух источников питания, что усложняет конструкцию модуляции.

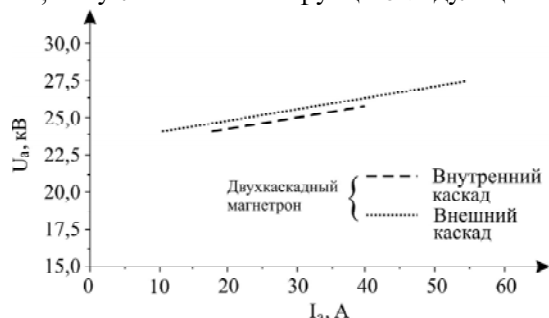


Рис. 5. Вольтамперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора

При исследовании последней конструкции, которая показала хорошие выходные данные по характеристикам, были рассмотрены режимы работы, когда включен один из каскадов (внутренний или внешний) двухкаскадного магнетронного автогенератора. При работе только внутреннего каскада, когда $U_a^I = 27$ кВ, $I_0^I = 40$ А, выходная мощность составила $P_{\text{вых}} = 696$ кВт, а КПД — 65%. Если же работает лишь внешний каскад, а внутренний выключен, то при $U_a^{II} = 27$ кВ, $I_0^{II} = 19$ А, выходная мощность составила $P_{\text{вых}} = 284$ кВт, а КПД — 55%.

Анализ процессов группировки электронных потоков во внутреннем и внешнем каскадах и полученных численных результатов расчета выходных характеристик двухкаскадного магнетрона, в частности, вольтамперных характеристик, указывает на возможность ступенчатого изменения выходной мощности в приборе в зависимости от включения каскадов, внутреннего или внешнего, либо обоих вместе (рис. 6).

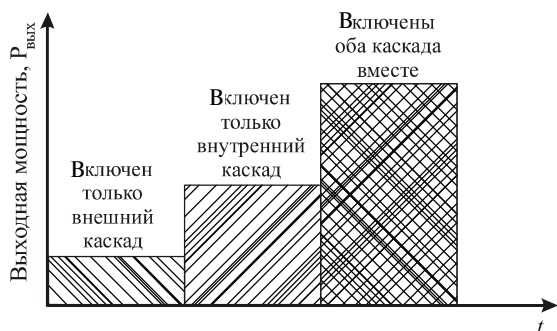


Рис. 6. Уровни выходной мощности в двухкаскадном магнетронном автогенераторе

4. Заключение

Рассмотрены результаты моделирования выходных характеристик двухкаскадного магнетрона — нового СВЧ прибора с расширенными функциональными возможностями. Приведенные количественные характеристики выходной мощности двухкаскадного магнетрона позволяют расширить область его применения в различных радиотехнических системах нового поколения.

Литература: 1. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1955. 344 с. 2. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Сов. радио, 1967. 216 с. 3. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. Мн.: Навука і тэхніка, 1990. 392 с. 4. Роу Дж. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 619 с. 5. Бецкий О.В., Палатов К.И., Цейтлин М.Б. Исследование побочных колебаний в электронных приборах СВЧ // Радиотехника и электроника. 1978. №9. С. 1904–1913. 6. Побочные колебания в сверхвысокочастотных электривакуумных приборах / Под ред. Ю.Н. Хлопова. Обзоры по электронной технике. Вып. 2. М., ЦНИИ «Электроника», 1970. 7. Ермолаев А.В. О спектральном составе тока в магнетронном генераторе при многочастотном взаимодействии // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 8. С. 24–27. 8. Гудилов С.М., Шейн А.Г. Анализ процессов возбуждения многочастотных колебаний в приборах М-типа // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, №5. С. 602–606. 9. Вайнштейн Л.А., Рошаль А.С. Пространственный заряд в магнетронных приборах, Лекции по электронике СВЧ (зимняя школа-семинар). Кн. 5. Саратов. 1978. 129 с. 10. Васюнович А.В., Чурюмов Г.И., Васильев С.В. Влияние режима работы амплитрона на уровни гармоник. Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1991. Т. 34. 10. С. 81–84. 11. Чурюмов Г.И. К анализу срыва усиления в амплитроне. Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. Вып. 6. С. 1237–1240. 12. Байбурун В.Б., Еремин В.П., Сысуев А.В., Теретьев А.А. Численное моделирование магнетронных генераторов с учетом конкуренции видов колебаний. Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 4. С. 37–46. 13. Churyumov G.I., Frolova T.I., Gritsunov A.V., Nikitenko O.M., Prokopchik V.A. Analysis of mode competition in magnetrons // Proceeding of Fifth International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2004), April 27 - 29, 2004. 14. Власов А.А. Теория многих частиц. М.: Гостехиздат, 1950. 324 с. 15. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. /Под ред Р.З. Сагдеева и В.И. Шевченко. М.: Мир, 1987. С. 638. 16. Цейтлин М.Б., Бецкий О.В., Цицонь И.Т. Анализ каскадного усилителя типа М с двумя электронными пучками в режиме больших амплитуд // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, Т. XIV, № 9. 1971. С. 1067–1074. 17. Чурюмов Г.И., Фролова Т.И. Математическое моделирование нелинейных электронно-волновых процессов в нетрадиционном магнетронном генераторе // Радиотехника. 2001. Вып. 117. С. 92–95. 18. Фролова Т.И., Чурюмов Г.И. Особенности режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Том 3. № 1. С. 57–64. 19. Герасимов В.П., Грицунов А.В., Загорин В.А., Чурюмов Г.И. Перспективы применения вычислительного эксперимента в теории и практике приборов со скрещенными полями // Радиотехника. 1999. Вып. 111. С. 17–25. 20. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями: Пер. с англ. /Под ред. М.К. Федорова. М.: Изд. иностр. лит. 1961. Т.1, Т.2. 456 с.

Поступила в редколлегию 17.06.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Лукин К.А.

Фролова Татьяна Ивановна, ассистент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: компьютерное моделирование нелинейных процессов в приборах со скрещенными полями, СВЧ электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: методы математического моделирования нелинейных процессов, СВЧ электроника и электродинамика, электронные и оптоэлектронные приборы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

Исаева Елена Борисовна, ведущий инженер кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов в электронных приборах СВЧ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.