Изв. вузов «ПНД», т. 20, № 5, 2012 УДК 621.385.6

МАГНИТНАЯ ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ КЛИНОТРОНОВ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА*

В. В. Завертанный, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко, Б. П. Ефимов, А. Ф. Забродский, Л. А. Кириченко, Т. В. Кудинова, А. Н. Кулешов

Представлены результаты расчета многосегментной магнитной фокусирующей системы на постоянных магнитах для клинотрона субмиллиметрового диапазона [1]. При помощи компьютерного моделирования проведена визуализация распределения постоянного магнитного поля в зазоре магнитной системы. Результаты, полученные в процессе моделирования, сопоставляются с данными, полученными экспериментально. Приведены кривые распределения магнитной индукции как для одного сегмента, так и для целой обоймы магнитной системы. Показано, что при заданной конфигурации магнитов в зазоре 32 мм создается магнитное поле не менее 1.1 Тл. Приведены параметры генерируемых сигналов клинотронами субмиллиметрового диапазона длин волн при их фокусировке в разработанной магнитной системе.

Ключевые слова: Лампа обратной волны, магнитная фокусирующая система, редкоземельные металлы, интенсивный электронный пучок, субмиллиметровый клинотрон.

Введение

При разработке электронно-вакуумных приборов коротковолнового диапазона большое внимание уделяется проблеме формирования и фокусировки интенсивного электронного потока с малыми пульсациями. С целью обеспечения эффективного взаимодействия интенсивного электронного потока с замедленными волнами в ЛОВ-клинотроне электроны должны находиться в поле волны, на расстояниях порядка периода замедляющей структуры от ее поверхности, что уже на длине волны излучения в 1.0 мм соответствует расстояниям менее 100 мкм. В субмиллиметровом диапазоне статические неоднородности пучка становятся сравнимыми с величиной слоя, в котором сосредоточено высокочастотное поле замедляющей системы клинотрона. Проблема формирования и фокусирования в пространстве взаимодействия

*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

Характеристики клинотронов миллиметрового
и субмиллиметрового диапазонов

Тип генератора	Длина волны, мм		Частота, ГГц		Мощность, Вт		Магнитное поле, Тл
	min	max	min	max	min	max	
Клинотрон-8	7.7	8.7	34.48	38.96	3	25	0.35
Клинотрон-5	4.7	5.7	52.63	63.83	3	10	0.35
Клинотрон-4	3.8	4.6	65.22	78.95	3	10	0.35
Клинотрон-3	2.7	3.7	81.08	111.11	0.5	2	0.35
Клинотрон-2	2.1	2.6	115.38	142.86	0.5	2	0.37
Клинотрон-1.5	1.3	1.8	166.67	230.77	0.2	1	0.45
Клинотрон-0.95*	0.9	1.1	272.73	333.33	0.05	0.25	0.75
Клинотрон-0.85*	0.83	0.95	315.79	361.45	0.05	0.2	0.85
Клинотрон-0.55*	0.55	0.7	428.57	545.45	0.05	0.1	1.1

интенсивного электронного пучка с необходимыми границами может решаться путем оптимизации электронно-оптической системы формирования и транспортировки электронного потока, что в случае магнитных фокусирующих систем (МФС) требует создания достаточно высоких магнитных полей.

Зависимость величины магнитного поля, необходимого для фокусировки и транспортировки электронного пучка, от рабочей длины волны прибора представлена в таблице, где приведены характеристики образцов пакетированных клинотронов миллиметрового диапазона согласно ТУ 4436.00.00.00 и образцов не пакетированных (в таблице отмечены *) субмиллиметровых клинотронов.

Как видно из таблицы, при работе на длине волны вплоть до 1.5 мм достаточно МФС, создающих магнитное поле до 0.45 Тл. Такие МФС, как правило, состоят из двух шайб с высокой остаточной индукцией (Sm-Co или Nd-Fe-B), либо имеют вид обоймы из намагниченного железа марки Армко (рис. 1). Однако МФС, показанная на рис. 1, при массе в 10 кг позволяет получить в зазоре 32 мм поле величиной лишь 0.35 Тл, что недостаточно для продвижения в субмиллиметровый диапазон.

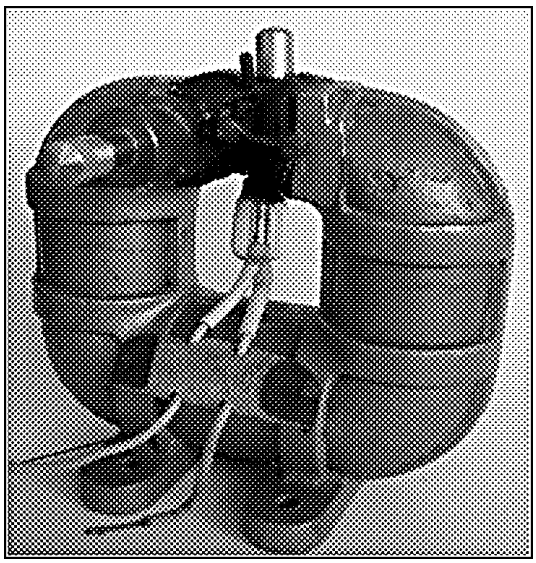


Рис. 1. Магнитная система на 0.35 Тл

1. Разработка магнитной фокусирующей системы для субмиллиметрового клинотрона

Для работы клинотронов субмиллиметрового диапазона требуется обеспечить постоянное магнитное поле порядка 1.0 Тл. Традиционно поля такой величины создавались с помощью электромагнитов, но громоздкость, большой вес, дороговизна, расход мощности для питания, расход воды для охлаждения ограничивают возможности применения таких устройств. Постоянные магниты на основе сплавов ЮНДК также имеют значительный вес (несколько десятков килограммов) и габариты. Появление постоянных магнитов из интерметаллических соединений (редкоземельных металлов) позволяет создать достаточно простую и компактную магнитную систему, весом примерно 10 кг, обеспечивающую в зазоре 30...35 мм магнитное поле более 1.0 Тл.

Для расчета магнитных систем из редкоземельных материалов известен метод многолучевого разбиения пространства совместно с принципом геометрического подобия для расчета магнитов и создаваемых ими полей [2]. Для создания оптимальных магнитных систем блоки магнитотвердого материала в них располагаются соответствующим образом в пространстве и позволяют создать системы без применения магнитопроводов и элементов из магнитомягких материалов с минимальным весом.

Однако изготовление магнитных блоков сложной формы с заданным направлением вектора намагниченности магнитного материала встречает определенные технологические трудности и требует существенно повышенного расхода дорогостоящих редкоземельных магнитов. Кроме того, для электронно-вакуумных приборов с ленточным электронным пучком предъявляются повышенные требования к однородности и форме магнитного поля в рабочем зазоре, что требует от создателей магнитных систем тщательного отбора реально применяемого магнитотвердого материала по разбросу магнитных свойств, который может достигать 10...15%. Требования к структуре магнитного поля в рабочем зазоре значительно возрастают по мере укорочения длины волны генерируемых колебаний, а величина поля возрастает с 0.3...0.4 Тл для генераторов середины миллиметрового диапазона до 1.0 Тл для приборов с длиной волны короче 1.0 мм. Соответственно возрастают и требования к качеству магнитных элементов. Поэтому с целью уменьшения влияния объемной неоднородности свойств используемого магнитотвердого материала на структуру поля в рабочем зазоре применены полюсные наконечники из магнитомягкого материала (технически чистое железо Армко), частичное экранирование магнитных систем наружным магнитопроводом уменьшает величину собственных внешних полей рассеяния и влияние других магнитных полей на поле в рабочем зазоре.

В предложенной магнитной системе форма магнитотвердых элементов кольцевых секторов, намагниченных в радиальном направлении, достаточно просто реализуется в пространстве.

Все расчеты производились в программе SuperFish [3] и проводилось сравнение результатов с экспериментальными данными, а также с результатами расчетов в программе CST Electromagnetic Studio [4]. В программе SuperFish был использован Pandira solver, который предназначен для расчета магнитостатических полей. Pandira solver использует прямой метод обращения матрицы и может работать с материалом постоянного магнита.

Первый, неоптимизированный вариант такой системы представляет собой два полюса, помещенные в железную обойму. Каждый полюс состоит из двух магнитов:

центрального – вектор намагниченности направлен вдоль оси системы, и окружающего его магнита, радиально намагниченного внутрь. В другом полюсе вектор намагниченности центрального магнита направлен вдоль оси системы, а окружающий его магнит радиально намагничен наружу. Это сделано для увеличения однородности и величины магнитного поля в зазоре системы, который составлял 35 мм (рис. 2).

В качестве магнитного материала был выбран Nd-Fe-B, который обладает остаточной намагниченностью 11300 Гс и коэрцитивной силой 836 кА/м [5]. Использование магнитотвердых материалов на основе сплавов неодима с железом и бором (Nd-Fe-B) обусловлено более высокими энергетическими характеристиками, повышенной объемной однородностью свойств и более низкой стоимостью по сравнению с магнитами из сплавов самарий–кобальт (Sm-Co).

Как видно из рис. 2, неоптимизированная МФС создает в зазоре 35 мм магнитное поле величиной в 0.935 Тл, при массе системы 25 кг. Такой величины магнитного поля достаточно для продвижения в диапазон длин волн 0.95...0.83 мм, однако для продвижения в еще более короткие волны величины магнитного поля уже недостаточно.

Для того чтобы получить величину индукции магнитного поля, достаточного для продвижения в диапазон длин волн 0.7...0.55 мм, была разработана новая конструкция МФС. Основными требованиями являлись уменьшение ее массы и увеличение величины магнитного поля в зазоре. В отличие от системы, показанной на рис. 2, разработанная МФС имеет более сложную конструкцию и состоит из большего количества частей, что и позволило обеспечить достижение поставленной цели. Основными отличиями являются: замена центральных магнитов железными сердечниками; использование составной структуры магнитных полюсов; уменьшение рабочего зазора; изменение конфигурации внешнего магнитопровода.

Магнитная система состоит из 4 секций. Каждая секция – из 8 магнитных сегментов, соединенных между собой и закрепленных в железной обойме.

Поскольку создаваемого одной секцией поля недостаточно для создания МФС с заявленными выше параметрами, каждый полюс системы составлен из двух секций. В одном из полюсов секционные сегменты намагничены по направлению к

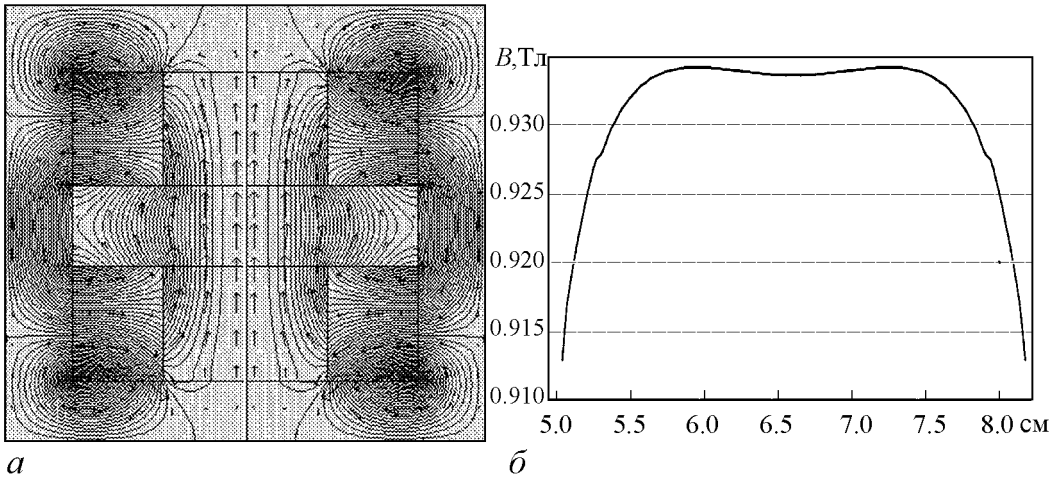


Рис. 2. Направление линий магнитной индукции и распределение магнитного поля в зазоре МФС (неоптимизированный вариант)

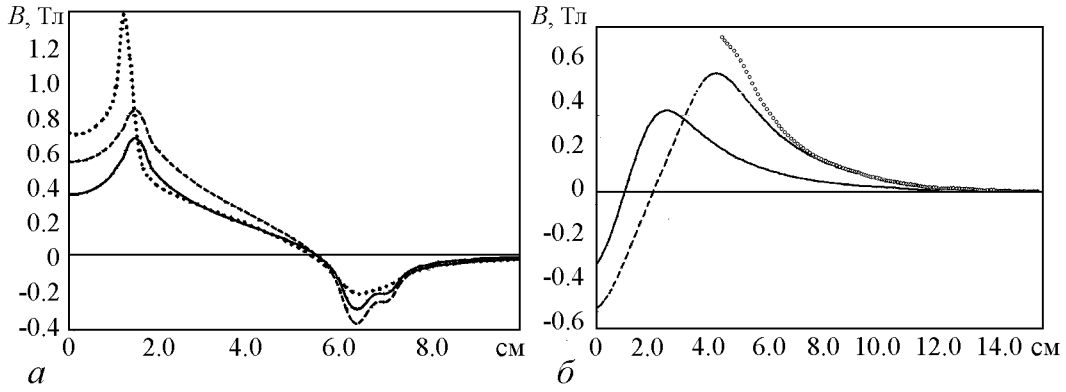


Рис. 3. Распределение продольной компоненты магнитного поля в новой разработанной конструкции МФС на расстоянии 1 мм от поверхности секций (*а*) и на оси системы (*б*). Начало координат оси абсцисс совмещено с центром секций. Сплошная линия соответствует индукции поля, создаваемого одной секцией, штриховая линия – сдвоенным секциям, точечная – сдвоенным секциям с сердечником и внешней крышкой

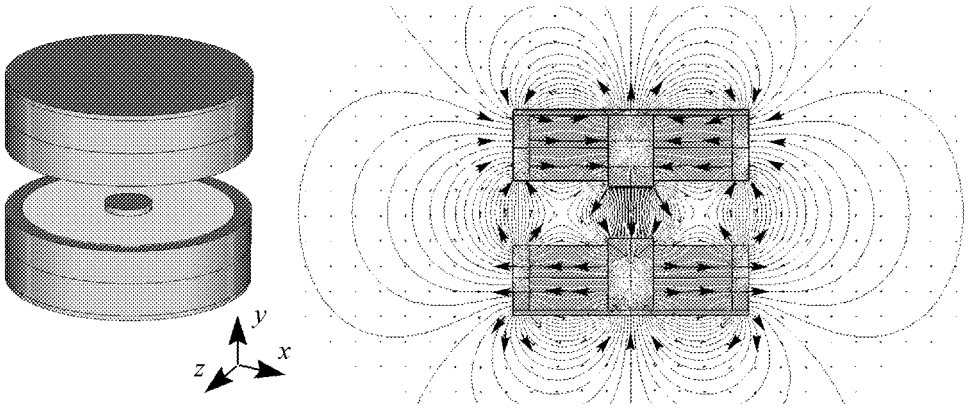


Рис. 4. Общий вид магнитной системы и распределение индукции магнитного поля для двух полюсов на расстоянии 32 мм друг от друга

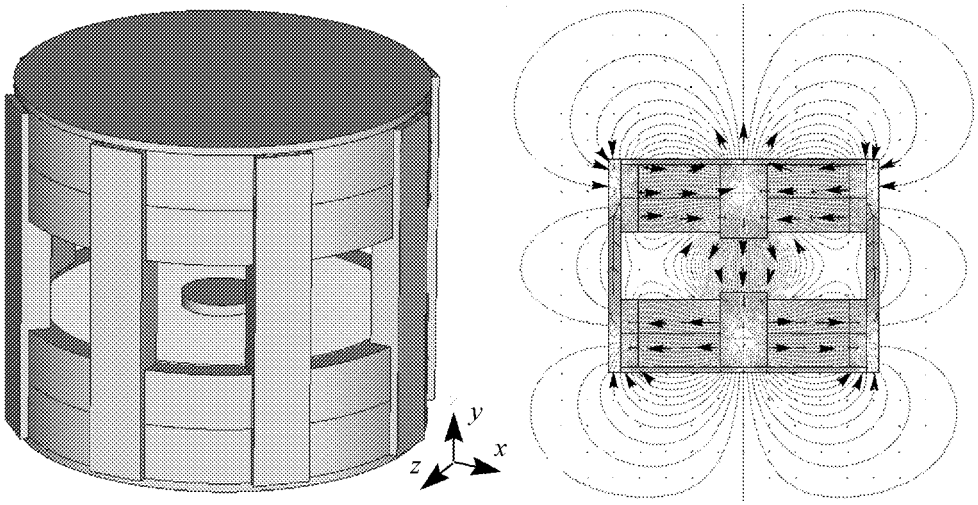


Рис. 5. Общий вид магнитной системы с ограничителями и распределение индукции магнитного поля

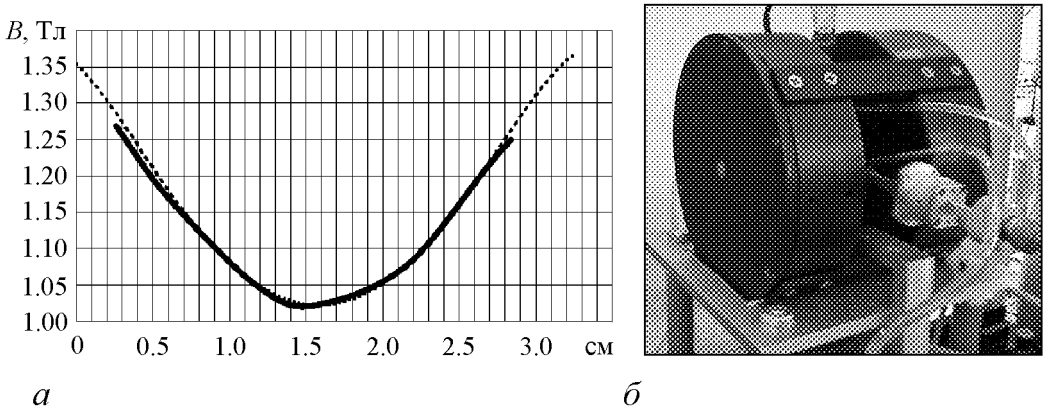


Рис. 6. Распределение продольной компоненты магнитного поля вдоль оси системы (*а*); пунктирная линия соответствует результатам расчета МФС, а сплошная линия – экспериментально измеренной характеристике в зазоре 32 мм. Фотография МФС с клинотроном-0.75 (*б*).

оси системы, а в другом – в противоположном. В центре каждого полюса находятся концентраторы магнитного поля диаметром 28 мм, которые увеличивают индукцию магнитного поля в центре системы. Снаружи полюсы закрыты железными крышками, которые также помогают концентрировать магнитное поле. Распределение магнитного поля в 1 мм над поверхностью секций и по оси системы показано на рис. 3. Видно, что использование двух секций в полюсе в сочетании с железным сердечником и наружной крышкой существенно увеличивает магнитную индукцию в зазоре системы.

Общий вид системы и распределение индукции магнитного поля для двух полюсов, расположенных на расстоянии 32 мм друг от друга, показаны на рис. 4. Для практической реализации такой системы необходимо наличие ограничителей между полюсами. Для удержания магнитных полюсов на нужном расстоянии и увеличения индукции магнитного поля в зазоре было сделано 8 ограничителей из технического чистого железа, которые также являются элементами магнитопровода (рис. 5).

Результаты расчета и экспериментального измерения распределения магнитного поля в системе показывают, что использование ограничителей позволяет увеличить индукцию магнитного поля в зазоре (рис. 6, *а*). Видно, что расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными.

В результате была сконструирована МФС, создающая магнитное поле величиной в 1.1 Тл в зазоре 32 мм (рис. 6, *б*). МФС обладает компактными размерами и небольшой массой – 10 кг.

2. Использование в разработанной магнитной фокусирующей системе клинотронов субмиллиметрового диапазона длин волн

В МФС, представленной на рис. 6, была получена генерация электромагнитных колебаний с клинотроном-0.95, (длина волны 1.1...0.9 мм). Методом частичных областей [6] для клинотрона-0.95 была рассчитана дисперсионная характеристика замедляющей системы.

Исследование частотных характеристик клинотрона производилось интерферометрическим методом. Использовался квазиоптический волномер, основанный на интерферометре Майкельсона.

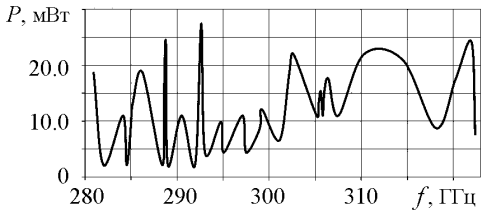


Рис. 7. Зависимость выходной мощности от частоты клинотрона-0.95 в МФС

Измерение мощности прибора производилось болометрическим методом при помощи калиброванного измерителя мощности. Зависимость выходной мощности при перестройке по частоте показана на рис. 7. Данная характеристика имеет немонотонный характер, что свидетельствует о резонансном возбуждении электродинамической системы клинотрона. Следует также отметить, что при тестировании МФС был использован клинотрон с несколько заниженным уровнем мощности.

В ходе данной работы был разработан и запущен в МФС клинотрон-0.75 (длина волны 0.89...0.74 мм) с выходной мощностью 40 мВт и перестройкой по частоте более 20 % в диапазоне рабочих напряжений от 2.4 до 4.2. Разработанный клинотрон в своем диапазоне частот превосходит по мощности традиционные ЛОВ и оротроны, а также современные электронно-вакуумные приборы аналогичного типа.

Заключение

Разработанная магнитная фокусирующая система обладает компактными размерами при весе всего 10 кг и создает в зазоре 32 мм магнитное поле величиной в 1.1 Тл. Магнитная система была использована для фокусировки интенсивных электронных пучков субмиллиметровых клинотронов, плотность тока в которых выше 50 А/см^2. В результате исследования клинотронов, фокусированных разработанной магнитной системой, показано, что в диапазонах частот 280...325 и 340...410 ГГц мощность и частотные характеристики клинотронов не уступают их характеристикам при фокусировке в электромагнитах. Результаты работы и созданная магнитная фокусирующая система могут быть использованы при разработке пакетированных приборов субмиллиметрового диапазона.

Библиографический список

1. *Левин Г.Я., Бородкин А.И., Кириченко А.Я., Усиков А.Я., Чурилова С.А.* Клинотрон / Под. ред. А.Я. Усикова. Киев: Наук. думка, 1992. 200 с.
2. *Капитонов В.Е.* Оптимизация магнитных фокусирующих систем методом синтеза // Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1988. 172 с.
3. http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml.
4. www.cst.com.
5. *Морозов О.А., Воскобойников М.Ф., Каргин А.Н., Савенко Г.П.* Второе рождение магнетронного направления // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-Техника. 2008. Вып. 3. С. 3.
6. *Альтшулер Ю.Г., Татаренко А.С.* Лампы малой мощности с обратной волной / Под ред. М.Ф. Стельмаха. М.: «Советское радио», 1963. 295 с.

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

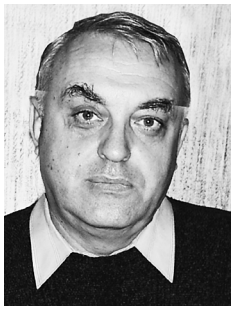
Поступила в редакцию *13.04.2012*
После доработки *06.07.2012*

MAGNETIC FOCUSING SYSTEM FOR INTENSE ELECTRON BEAMS OF SUBMILLIMETER CLINOTRONS

V. V. Zavertanniy, S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, B. P. Yefimov, A. F. Zabrodskiy, L. A. Kirichenko, T. V. Kudinova and A. N. Kuleshov

The simulation results of multi-segment permanent magnet magnetic focusing system for clinotrons in submillimeter range have been presented. The visualization of magnetic field distribution in the gap between the system magnetic poles was done with the help of computer simulations. The simulation results are compared with those obtained experimentally. The magnetic field distribution curves of both single segment and whole multi-segment magnetic system are presented. It is shown that for a given configuration of the magnets in the system gap of 32 mm the magnetic field of 1.1 T is obtained. The generation parameters of clinotrons with developed magnetic focusing system were experimentally obtained in submillimeter range.

Keywords: Backward wave oscillator, magnetic focusing system, rare-earth metals, intensive electron beam, submillimeter clinotron.



Завертанный Виктор Васильевич – родился в г. Корсаков Южно-Сахалинской области (1946), окончил Харьковский политехнический институт (1971). После окончания ХПИ работает в институте радиофизики и электроники НАН Украины главным инженером отдела вакуумной электроники. Опубликовал 20 научных статей по генераторам миллиметрового диапазона.

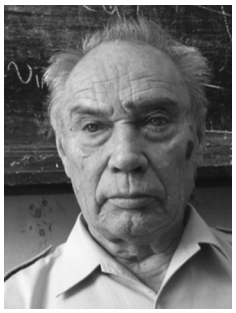
61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

Кишко Сергей Александрович – родился в городе Горловка, Донецкая область, Украина (1989). Окончил Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (2011). После окончания ХНУ им. В.Н. Каразина поступил в аспирантуру ИРЭ НАНУ.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: sergeykishko@gmail.com

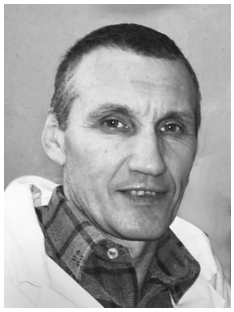
Пономаренко Сергей Станиславович – родился в Феодосии, Украина (1989). Окончил Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (2011). После окончания ХНУ им. В.Н. Каразина поступил в аспирантуру ИРЭ НАНУ.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: sergyponomarenko@gmail.com



Ефимов Борис Петрович – родился в Томске (1933), окончил Харьковский авиационный институт (1959). После окончания ХАИ работает в ИРЭ НАНУ ведущим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в ХИРЭ (1970) и доктора технических наук (1988) в области генерации когерентных и стохастических колебаний в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (радиофизика и электроника). Автор 25 авторских свидетельств. Опубликовал 150 научных статей.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: yefimov@ire.kharkov.ua



Забродский Александр Федорович – родился в Харькове (1948), окончил Харьковский институт радиоэлектроники (1971). После окончания ХИРЭ работает в ИРЭ НАНУ ведущим инженером отдела вакуумной электроники.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

Кириченко Людмила Александровна – родилась в г. Люботине Харьковской области (1934), окончила Харьковский государственный университет (1957). После окончания ХГУ работает в ИРЭ НАНУ ведущим инженером. Автор патента «Диодная электронная пушка для формирования тонких ленточных электронных потоков» (соавторы А.И. Бородкин, И.А. Книженко и др.).

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

Кудинова Татьяна Васильевна – родилась в Харькове (1945), окончила Харьковский институт радиоэлектроники (1970). После окончания ХИРЭ работает в ИРЭ НАНУ ведущим инженером отдела вакуумной электроники.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

Кулешов Алексей Николаевич – родился в Харькове (1978), окончил Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (2000). После окончания ХНУ работает в ИРЭ НАНУ научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИРЭ НАНУ (2010) в области формирования и транспортировки электронных потоков для приборов на магнитотормозном излучении. Опубликовал 20 научных работ.

61085 Украина, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
E-mail: jeanalexkh@gmail.com