



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–6

В.Е. Балакин^{*}, Ю.Д. Валяев^{*}, А.В. Ларионов^{*}, В.Е. Теряев^{*}, Y.H. Chin^{**}

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОШИБА РРМ КЛИСТРОНА

* Филиал ИЯФ СО РАН (г. Протвино, Россия)

** КЕК (Япония)

Аннотация

Балакин В.Е., Валяев Ю.Д., Ларионов А.В., Теряев В.Е., Chin Y.H. Разработка электронно-оптической системы Тошиба PPM клистрона: Препринт ИФВЭ 2001-6. – Протвино, 2001. – 12 стр. , 11 рис., библиогр.: 6.

Описана электронно-оптическая система Тошиба PPM клистрона. Тошиба PPM клистрон разрабатывается для нового поколения линейных коллайдеров по проекту JLC в коллаборации между КЕК (Япония) и филиалом ИЯФ СО РАН (г. Протвино, Россия). Главной особенностью описываемой электронно-оптической системы является возможность формировать перестраиваемый по размеру пучок в пролетной трубе клистрона. Это свойство может быть использовано как дополнительный параметр настройки выходной мощности (КПД) и токооседания при работе в динамическом режиме.

Электронно-оптическая система построена в простейшем виде – с одной согласующей магнитной линзой, сделанной по принципу clamp-on (зажим). Описана конструкция существующей и новой – гибридной линзы, – разработанной в ФИЯФ и имеющей пониженное энергопотребление.

Abstract

Balakin V.E., Valyaev Yu. D., Larionov A.V., Teryaev V.E., Chin Y.H. Development of Toshiba PPM Klystron Electron-optical System: Preprint IHEP 2001-6. – Protvino, 2001. – p. 12, figs. 11, bibliogr.: 6.

The electron-optical system of Toshiba PPM klystron is described. Toshiba PPM klystron is developed for new generation linear colliders at the collaboration Branch of INP (Russia) and KЕК (Japan) under the project JLC. The main feature of described electron-optical system is the tunable beam size at the klystron tube This property can be used as additional parameter of adjustment of output power (efficiency) and current passage at work in a dynamic mode.

The electron-optical system of klystron is developed in the elementary kind - with one matching magnetic lens on the clamp-on type. The existing lens and new hybrid lens developed in Branch of INP is described.

Для создания линейных коллайдеров нового поколения с темпом ускорения 50-150 МэВ · м требуется разработка мощных источников СВЧ в сантиметровом диапазоне. Такие источники должны иметь в течение времени 1 мксек импульсную выходную мощность не менее 50-100 МВт при частоте следования импульсов 100-300 Гц. Требуемое оценочное число таких приборов для линейного коллайдера составляет несколько тысяч.

В настоящее время как основной тип СВЧ-источника для линейного коллайдера рассматриваются мощные импульсные клистроны с РРМ фокусировкой (РРМ – Periodical Permanent Magnet). Разработка этих приборов осуществляется в рамках существующих проектов NLC (SLAC, США), JLC (КЕК, Япония), а также в рамках Российской Программы физики высоких энергий в филиале ИЯФ (г. Протвино).

Большое количество клистронов в линейном коллайдере накладывает дополнительные требования на характеристики этих приборов. Кроме высокой импульсной ВЧ-мощности, необходимыми являются: достижение высокой средней мощности ВЧ, высокого КПД, разработка простых и компактных конструкций, позволяющих осуществлять промышленный выпуск этих приборов.

Тошиба РРМ клистрон – это X-band клистрон с фокусировкой на постоянных магнитах, развиваемый КЕК (Япония) в коллаборации с филиалом ИЯФ (г. Протвино) по программе JLC. По своим характеристикам этот прибор близок к клистроны SLAC 75XP [1], разрабатываемому по проекту NLC. Общий вид электронно-оптической системы Тошиба РРМ клистрона показан на рис. 1, а его основные проектные параметры приведены в следующей таблице.

Импульсная мощность	>50 МВт
Высокое напряжение	480 кВ
Микропервеанс	0.8
Электронный КПД	50 %
Плотность тока на катоде	<10 А/см ²

Электронный пучок клистрона формируется в диодной пушке типа Пирса с частично замагниченным катодом. Скандатный катод клистрона имел диаметр 61 мм, что при рабочих параметрах $U = 480$ кВ, $I = 266$ А обеспечивало плотность тока $J < 10$ А/см². Магнитная система пролетного канала клистрона (РРМ – Periodical Permanent Magnet) была выполнена на постоянных магнитах Ne-Fe-B (неодим - железо - бор) с периодом 30 мм. Диаметр пролетного канала был 9 мм. Магнитное поле в области катода создавалось катодной катушкой, а для согласования пучка с магнитным полем РРМ использовалась реверсная разборная линза.

Реверсная разборная линза представляет собой новый тип линз, впервые примененный при разработке BINP РРМ клистрона, также разрабатываемого в рамках проекта JLC [2]. Схема линзы показана на рис. 2. Аксиально-симметричное магнитное поле в линзе создается двумя охлаждаемыми катушками расположенными перпендикулярно оптической оси. Обе катушки включаются в одном направлении (либо к оси, либо от оси). Сердечники катушек так же, как и полюса и экраны линзы, делаются из магнито-мягкого материала. Непосредственно аксиальная симметрия фокусирующего поля вблизи оптической оси достигается за счет формы полюсов линзы.

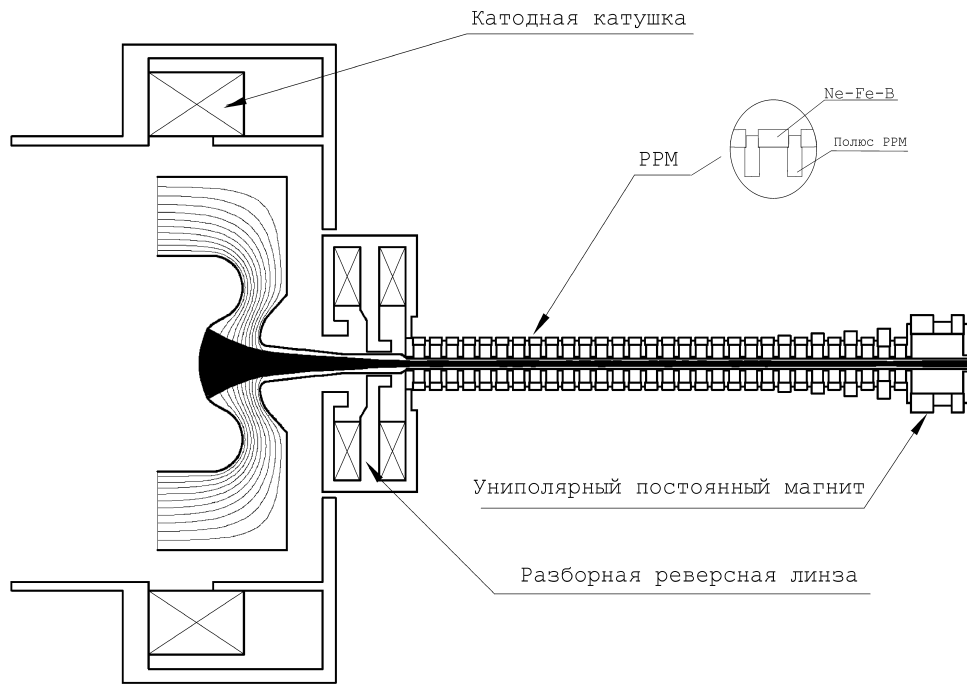


Рис. 1. Общий вид электронно-оптической системы Тошиба РРМ клистрона (DGUN расчет).

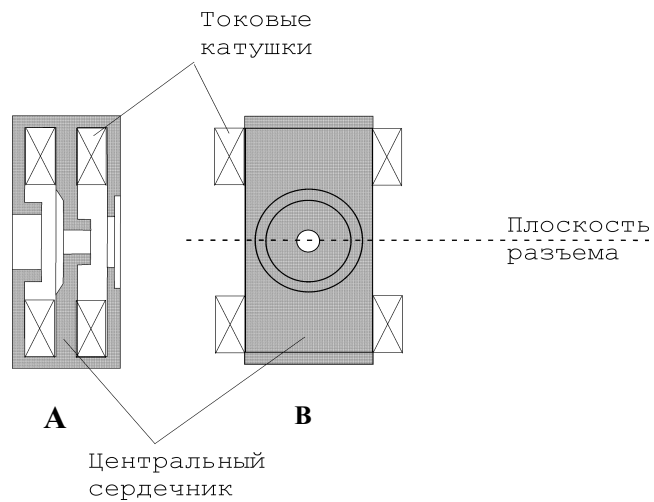


Рис. 2. Схема размещения обмоток в реверсной разборной линзе Тошиба РРМ клистрона.

Для расчета фокусирующих полей таких линз можно использовать двумерные программы, понимая геометрию, изображенную на рис. 2а, как полностью аксиально-симметричную. При этом токи в аксиально-симметричных катушках должны быть равны току в отдельной катушке трехмерной линзы, но направлены в противоположные стороны. Главным достоинством реверсной линзы является возможность сделать линзу разборной, т.е. состоящей из двух половинок, легко стыкуемых на клистроне при сборке.

Расчет всей электронно-оптической системы клистрона был выполнен программой DGUN [3]. Внешнее магнитное поле задавалось в виде сетки значений, полученной программой Pandira [4] при расчете всей магнитной системы. Численная оптимизация геометрии пушки позволила достичь напряженности электрического поля на поверхности анода < 230 кВ/см, а на прикатодном фокусирующем электроде ~ 200 кВ/см (рис.3). Укажем, что аналогичный клистрон 75XP, развиваемый в SLAC, при несколько большем диаметре катода (≈ 67 мм) имеет напряженности полей большие примерно на 10 %. Причем увеличение диаметра катода в 75XP относительно Тошиба PPM, казалось бы, должно было привести к обратному эффекту.

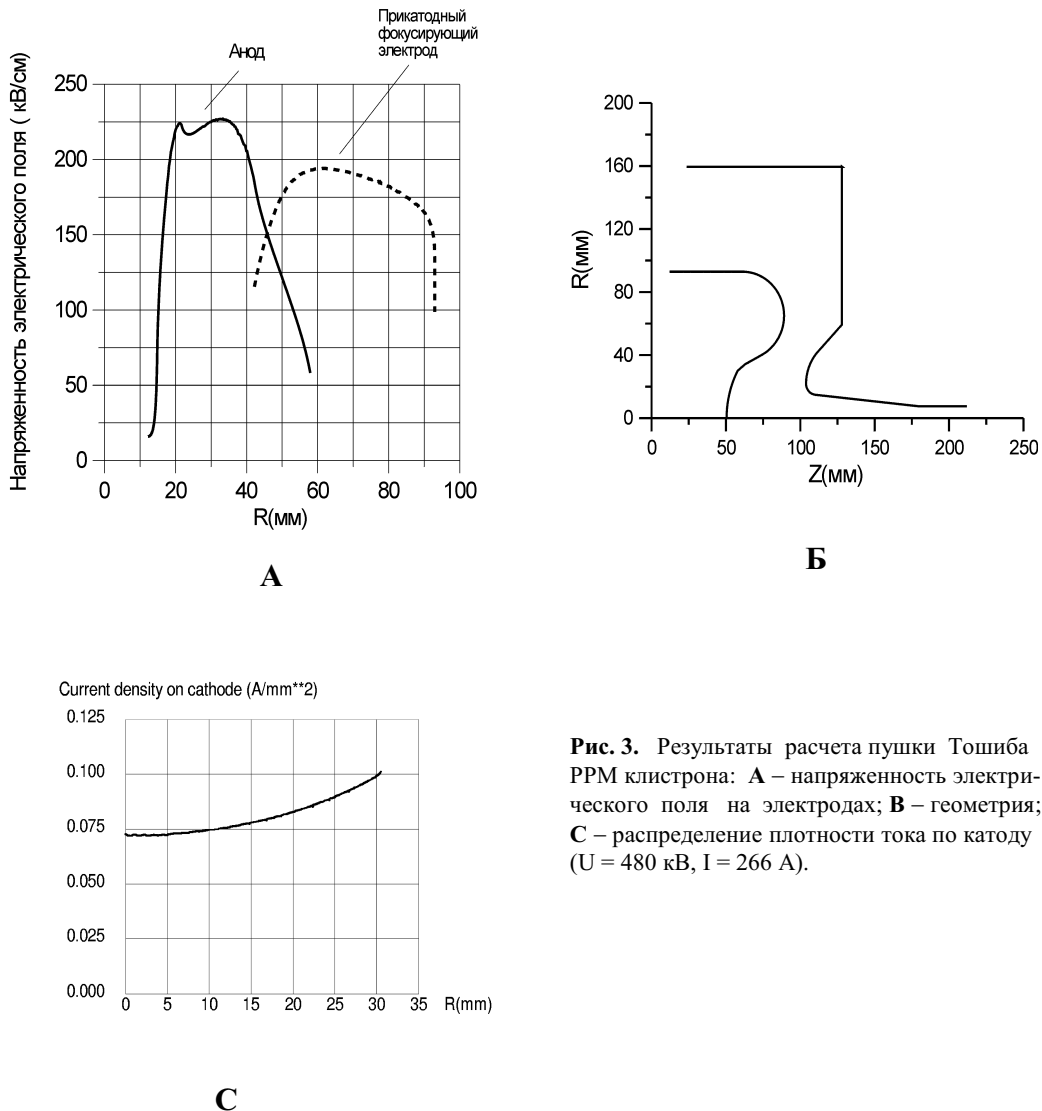


Рис. 3. Результаты расчета пушки Тошиба PPM клистрона: **А** – напряженность электрического поля на электродах; **Б** – геометрия; **С** – распределение плотности тока по катоду ($U = 480$ кВ, $I = 266$ А).

По отношению к другим мощным клистроном новым свойством оптической системы Тошиба PPM является возможность формировать в пролетном канале клистрона практически не пульсирующий пучок переменного размера. При диаметре пролетного канала 9 мм система формирования Тошиба PPM позволяет получить пучок в диапазоне диаметров 4.6 – 6.6 мм. При этом пульсации размера пучка относительно среднего значения не превышают, согласно расчетам, 5–6 % .

Перестраиваемый пучок придает оптической системе клистрона большую гибкость и позволяет дополнительно настраивать такие основные параметры клистрона, как электронный КПД и усиление. Другим важным свойством перестраиваемого пучка является возможность оптимизации токооседания в пролетном канале клистрона при работе в динамическом режиме с большой средней мощностью.

При заданных значениях тока и энергии равновесный (средний) размер пучка в PPM определяется двумя параметрами: магнитным полем на катоде (или степенью экранировки пушки) и среднеквадратичным значением периодического магнитного поля. Поэтому в рассматриваемой оптической системе функцию задания размера пучка выполняла катодная катушка, создающая магнитное поле на катоде в диапазоне от 7 до 25 Гс. (По аналогии с клистроном с соленоидальной фокусировкой эту катушку иногда называют *backing coil*).

Согласование пучка с магнитным полем PPM осуществлялось при помощи одной реверсной разборной линзы. В общем случае при произвольной конструкции линзы, обеспечивающей только оптическую силу или величину $\int B_z^2 dz$, можно говорить о согласовании пучка только в одной точке по магнитному полю на катоде. Класс решений, дающий “широкополосное” согласование, т.е. в широком диапазоне магнитных полей, при использовании только одной линзы, довольно узок и требует решения задач оптимизации. В данном случае обеспечить такую “широкополосность” оказалось возможным за счет несимметрии реверсной разборной линзы. Также важной особенностью конструкции линзы является объединение крайнего полюса линзы с первым полюсом PPM.

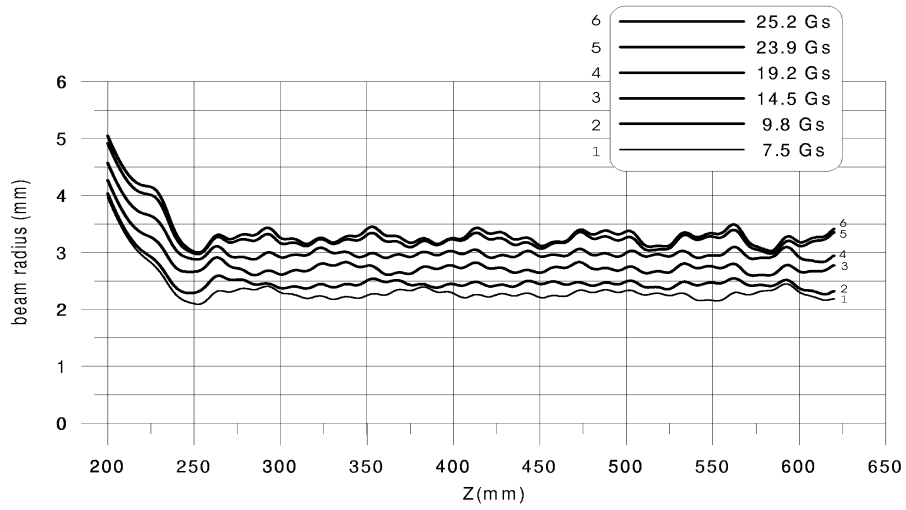
На рис. 4а показаны огибающие пучка, полученные кодом DGUN, при различных значениях магнитного поля на катоде. Все расчеты оптики Тошиба PPM выполнялись в один заход, т.е. сразу рассчитывалась пушка, движение пучка в согласующей линзе и магнитном поле PPM. Как видно, в диапазоне магнитных полей на катоде от 7 до 25 Гс относительная пульсация огибающей пучка в пролетном канале $\Delta = (R_{\max} - R_{\min}) / 2 < R >$ не превышает 5–6 % (здесь R_{\max} , R_{\min} – максимальное и минимальное значения радиуса пучка в пролетном канале на длине ≈ 350 мм, $< R >$ – среднее значение радиуса пучка на этой же длине). Диапазон перестройки для среднего значения радиуса пучка $< R >$ в зависимости от магнитного поля на катоде показан на рис. 4с. Соответствующие ему диапазоны токов (ампер-витков) для катодной катушки и реверсной разборной линзы приведены в таблице.

	Imin	Imax
Катодная катушка	100	500
Реверсная разборная линза	3800	4100

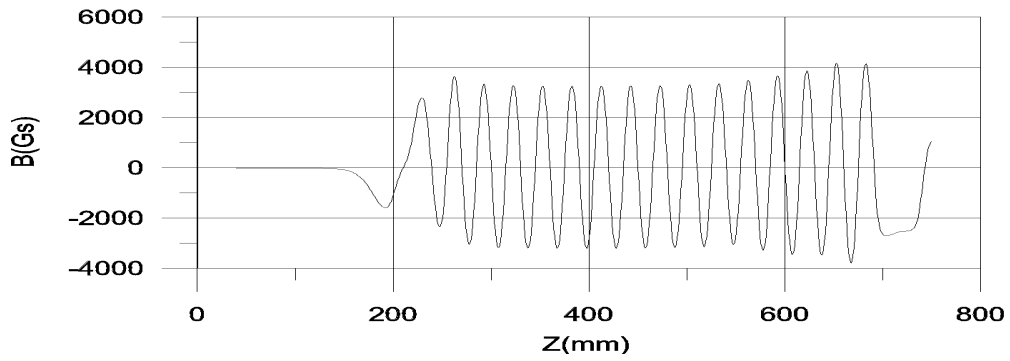
Видно, что при изменении размера пучка почти в полтора раза необходимый ток в обмотках согласующей линзы меняется очень слабо – менее 10%.

Точность численных решений, полученных DGUN, характеризуют графики на рис. 5. Здесь показаны огибающие пучка для одного и того же случая, рассчитанные на различных сетках. Видно, что при характерном радиусе пучка 3.2 мм разница в размерах огибающей пучка для этих сеток не превышает 0.1 мм. Причем легко просматривается сходимость решения, т.е. максимальное отклонение одной кривой от другой всегда уменьшается при переходе на более мелкую сетку.

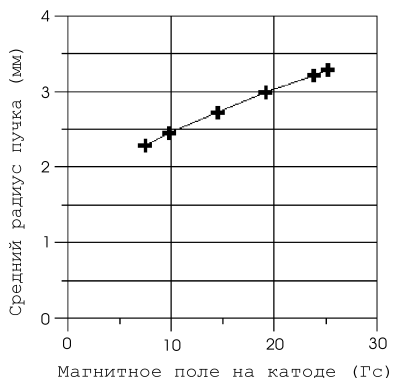
Важным вопросом для полученных решений является вопрос реализуемости их на практике. Неточности механической сборки пушки, магнитной системы, возможный разброс в характеристиках постоянных магнитов и т.д. – все это может приводить к разного рода отклонениям свойств реального пучка по отношению к расчетным. Для компенсации этих эффектов, а также для еще большего расширения диапазона перестройки размера пучка в конструкцию реверсной разборной линзы может быть включена дополнительная корректирующая аксиально-симметричная катушка (рис. 6). При токе $\sim 100-300$ А (или эквивалентных ампер-витках) такая катушка, оставаясь маломощной, может изменять распределение основного магнитного поля в линзе и тем самым осуществлять коррекцию оптики пучка. Малая мощность катушки позволяет обойтись без принудительного водяного охлаждения и допускает ее намотку непосредственно на приборе.



А



Б



С

Рис. 4. А – огибающие пучка в пролетном канале Тошиба РРМ клистрона при различных значениях магнитного поля на катоде;
 Б – общий вид распределения магнитного поля на оси клистрона;
 С – зависимость среднего радиуса пучка в канале клистрона $\langle R \rangle$ от магнитного поля на катоде (рабочий диапазон).

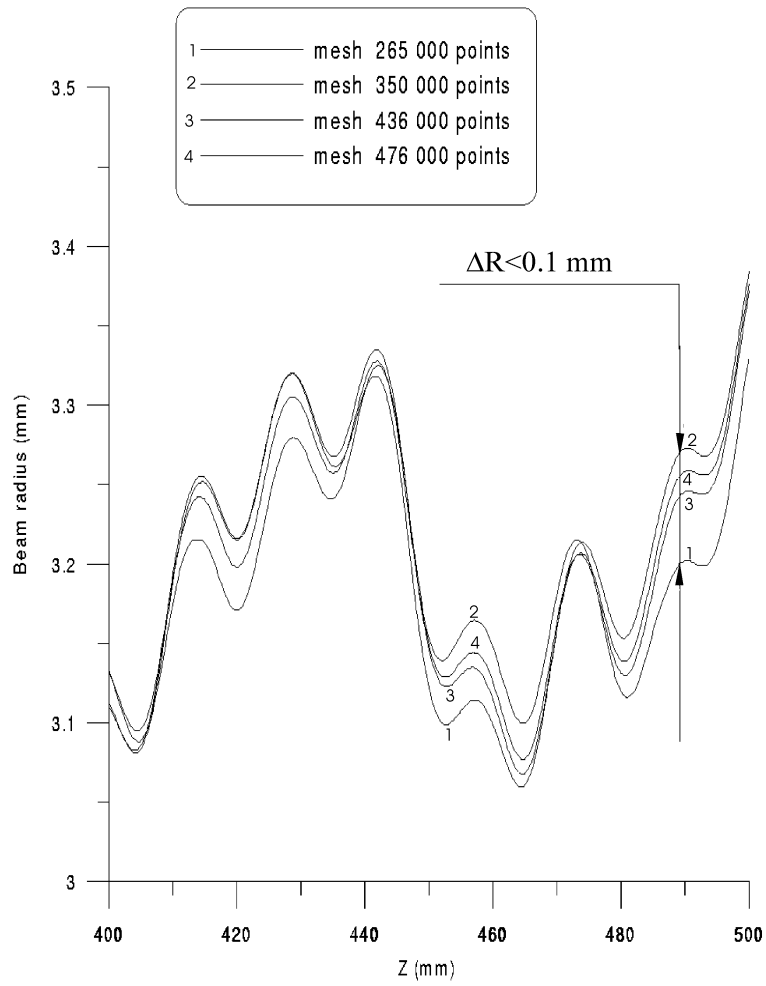
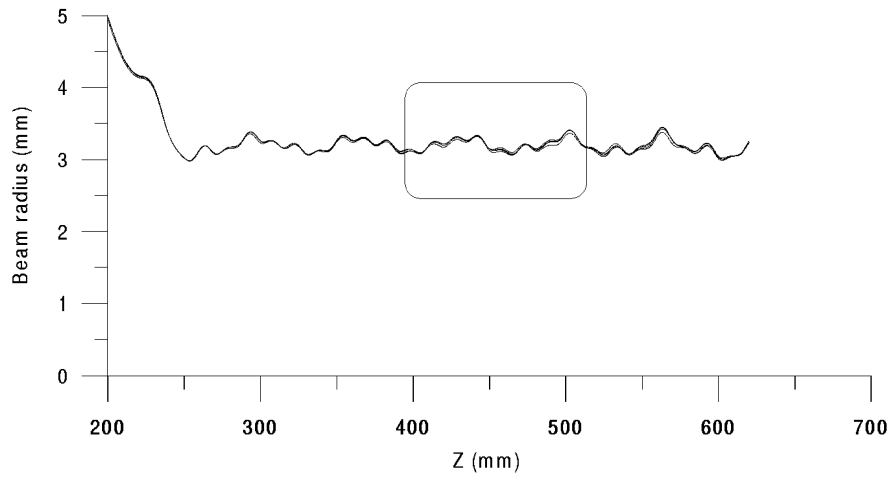


Рис. 5. Сходимость численных решений DGUN по конечно-разностной сетке ($U = 480 \text{ кВ}$, $I = 265.3 \text{ А}$, 700 трубок тока).

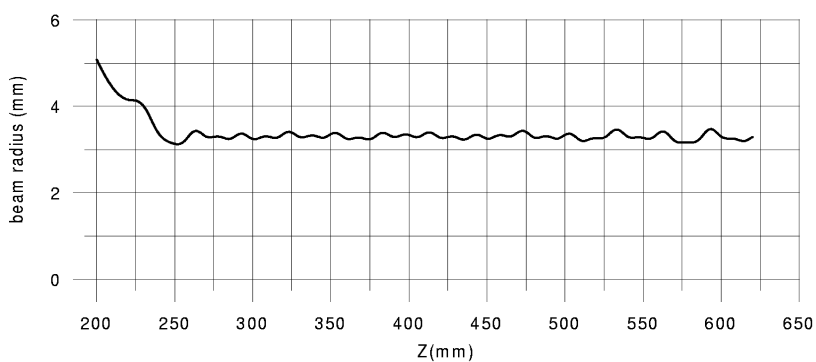
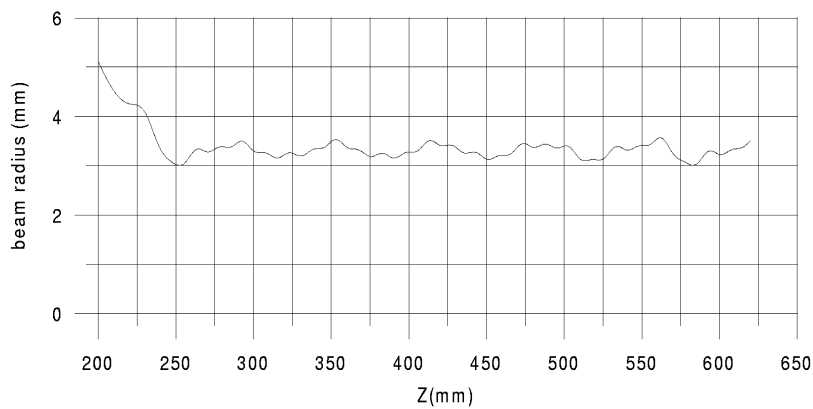
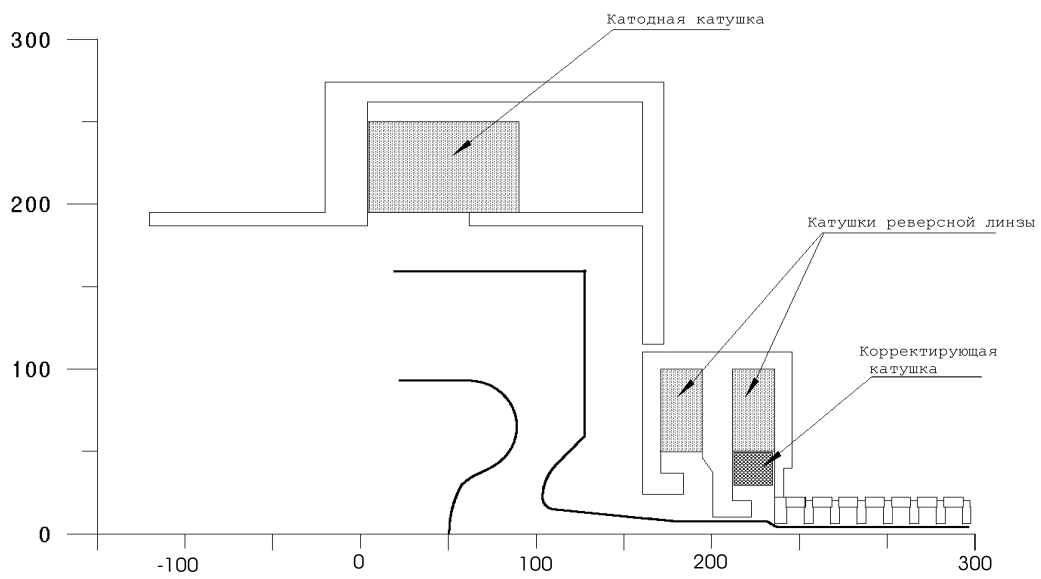


Рис. 6. Схема и пример использования корректирующей катушки.

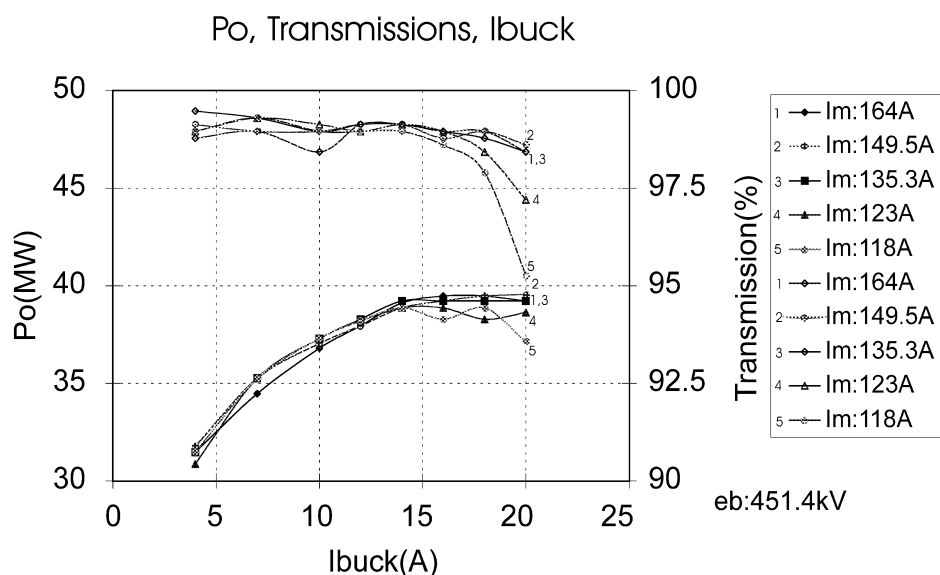


Рис. 7. Зависимость выходной мощности (ВЧ) и токопрохождения в Тошиба PPM клистроне от тока катодной катушки (I_{buck}) ($U = 451.4$ кВ, I_m – ток в обмотках реверсной разборной линзы).

Пример использования корректирующей катушки приведен на рис. 6. Электронный пучок здесь формируется при магнитном поле на катоде 26.2 Гс, т.е. согласно рис. 5 за пределами рабочего диапазона. Относительная амплитуда пульсаций огибающей пучка здесь $> 6\%$. Как видно, введение коррекции позволило в несколько раз уменьшить пульсацию.

Экспериментальное исследование Тошиба PPM клистрона было проведено в КЕК осенью 2000 г. На напряжении 482 кВ был получен пучок с током 265 А, что в пределах 1% соответствует приведенным выше расчетам. Величина токопрохождения через пролетный канал клистрона была на уровне 98–99%. Для напряжения ≈ 450 кВ на рис. 7 приведены экспериментальные зависимости токопрохождения пучка и выходной мощности клистрона от тока катодной катушки (приведено из доклада [5]). Параметры I_{buck} , I_m обозначают соответственно ток катодной катушки (I bucking coil) и ток реверсной разборной линзы. Видно, что в диапазоне $I_{buck} 4\text{--}20$ А выходная мощность клистрона варьируется в пределах $\approx 30\%$, при этом токопрохождение через канал клистрона изменяется в пределах 1%. По отношению к проектной точке ($I_{buck} = 8\text{--}12$ А, т.е. 200–300 ампер-витков в катодной катушке) настройка размера пучка позволила увеличить выходную мощность ВЧ на 5–7%.

Максимальная мощность ВЧ, полученная в Тошиба PPM, составила ≈ 72 МВт на напряжении $U = 514$ кВ, соответствующий ей экспериментальный электронный КПД был 47% [6].

Мощность, потребляемая реверсной разборной линзой в Тошиба PPM клистроне, составляет примерно 1 кВт, что, с одной стороны, затрудняет компактное и дешевое исполнение таких линз, а с другой – просто увеличивает энергопотребление и тем самым уменьшает полный КПД клистрона. Поэтому дальнейшее развитие электронно-оптической системы Тошиба PPM предусматривает переход на гибридную линзу, по сути являющуюся полным аналогом существующей, однако потребляющую примерно на порядок меньшую мощность.

Схема гибридной линзы показана рис. 8. Радиально намагниченный кольцевой магнит, или его аналог в виде многогранника, располагается непосредственно в центральном сердечнике под токовыми катушками. Аксиальная симметрия магнитного поля вблизи оптической оси обеспечивается формой полюсов линзы, т.е. так же, как в обычной реверсной разборной линзе. Также аналогично, для расчета фокусирующих полей таких линз можно применять двумерные программы, рассматривая геометрию на рис. 8а как аксиально-симметричную.

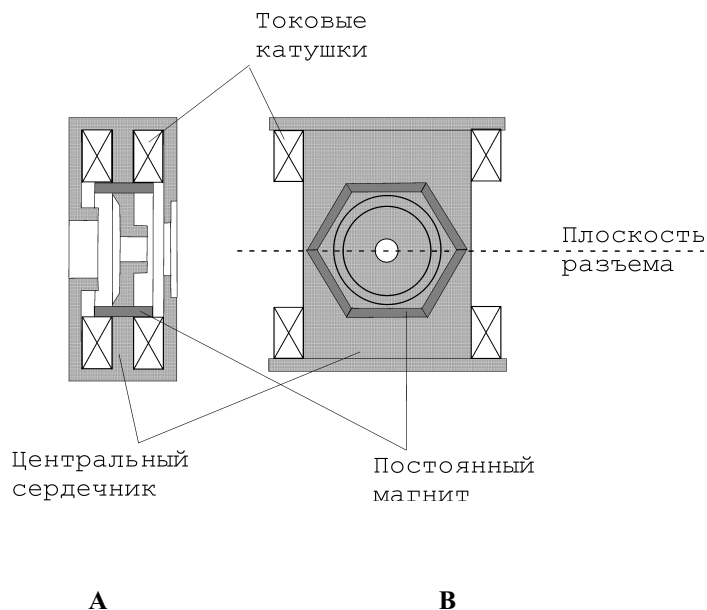
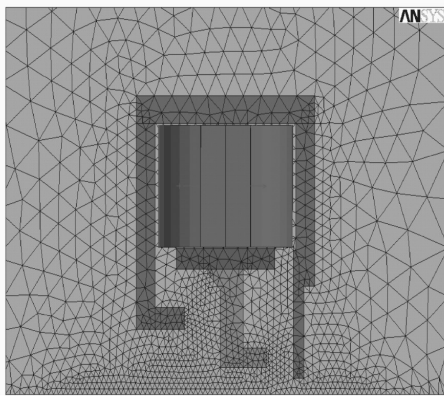


Рис. 8. Схема гибридной линзы.

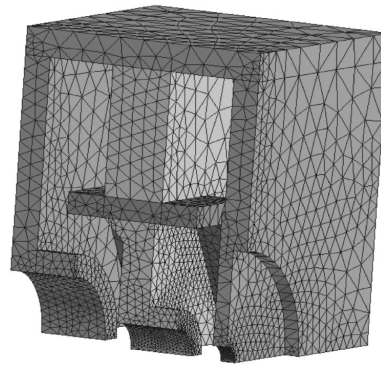
Диапазон возможной настройки фокусирующих магнитных полей гибридной линзы удобно характеризовать коэффициентом изменения магнитного поля $k_B = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$, здесь B_{\max} , B_{\min} – максимальное и минимальное магнитные поля в какой-нибудь точке на оси (кроме $B = 0$), получаемые за счет изменения тока в катушках. (Мы предполагаем отсутствие эффектов насыщения в полюсах линзы, поэтому распределение магнитного поля на оси, нормированное на какую-нибудь константу, будет всегда оставаться практически постоянным и не зависящим от тока в катушках.)

Необходимое для клистрона значение величины k_B можно оценить как лежащее в диапазоне 1.4–1.8. Не останавливаясь на детальном обсуждении выбора этого параметра, укажем, что при таком значении k_B линза позволяет оптимизировать токопрохождение в приборе в диапазоне напряжений ~250-600 кВ. (Работа на пониженных напряжениях необходима для высоковольтной и ВЧ-тренировки прибора.) Возможный разброс в характеристиках постоянных магнитов (~5-10%) также перекрывается указанной величиной k_B .

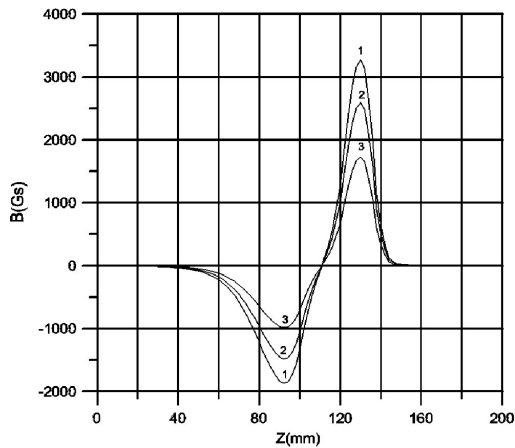
На рис. 9 приведены результаты 3D расчетов гибридной линзы для Тошиба PPM клистрона, полученные программой ANSYS. В расчетах материалом полюсов и магнитных экранов линзы служила сталь 10. Постоянный магнит (Ne-F-B) имел форму правильного шестигранника и состоял из шести отдельных плоских магнитов толщиной 7.5 мм. Конструкция линзы была оптимизирована на минимальную потребляемую мощность (минимум тока в обмотках) при коэффициенте изменения магнитного поля $k_B \approx 1.8$. Как видно из рис. 2б, с, указанное значение k_B достигается при токе (ампер-витках) в обмотках катушек $I = \pm 2000$ А, при этом рабочая точка клистрона (для напряжения $U = 480$ кВ) соответствует току $\approx +600$ А. Полный аналог этой геометрии без постоянных магнитов (простая разборная реверсная линза) для достижения максимального магнитного поля (кривая 1 на рис. 9с) требует тока в катушках $I_0 \approx 6000$ А. Соответственно оценка эффекта снижения мощности при переходе к гибридной линзе может быть равна 9 ($\approx (I_0 / I)^2$). Очевидно, что для меньших значений k_B ($1.4 < k_B < 1.8$) этот эффект будет еще сильнее. Например, для $k_B \approx 1.5$ “выигрыш” в мощности составляет ≈ 16 .



A



B



C

Рис. 9 3D-расчет гибридной линзы для Тошиба PPM клистрона (ANSYS):
 А-полная сетка конечных элементов
 В-3D вид сетки конечных элементов по телу линзы (без катушек);
 С-Распределение магнитного поля на оси:
 1-ток в катушках (ампер-витки)+2000 А,
 2- 0 А
 3- -2000 А

В приведенных оценках мы пренебрегли изменением сопротивления обмоток. В принципе, в случае обычной линзы, объем, соответствующий постоянным магнитам, также может быть заполнен обмоткой. В этом случае поперечное сечение обмотки увеличивается. Однако поправка на уменьшение мощности от этого не велика – ~15-20%. Кроме того, необходимость отвода тепла из обмотки в случае простой линзы требует принятия специальных мер. Так, например, в существующей линзе Тошиба PPM, разработанной в КЕК, обмотка выполнена медной трубкой с протекающей внутри водой. В линзах BINP PPM в многослойную обмотку введены специальные медные пластины для отвода тепла. Все эти меры приводят к уменьшению коэффициента заполнения обмотки и, можно сказать, компенсируют возрастание общего поперечного сечения.

Таким образом, можно считать, что при одинаковых размерах использование гибридных линз позволяет снизить потребляемую мощность системы согласования по меньшей мере на порядок.

На основании приведенных выше расчетов в ФИЯФ была разработана и испытана реальная конструкция гибридной линзы для Тошиба PPM клистрона. Общий вид линзы показан на рис. 10. На рис. 11 можно видеть экспериментальную зависимость амплитуды первого максимума магнитного поля линзы от тока. В рабочей точке, соответствующей напряжению клистрона 480 кВ, потребляемая мощность линзы составляет менее 20 Вт. При токе в катушках ± 8 А линза обеспечивает коэффициент изменения магнитного поля $k_B > 1.8$ при мощности < 80 Вт.



Рис. 10. Общий вид 2-составных модулей гибридной линзы Тошиба PPM клистрона.

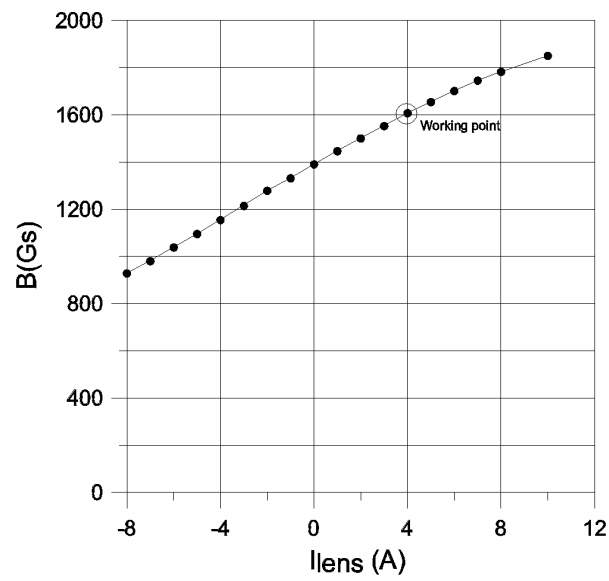


Рис. 11. Зависимость амплитуды первого максимума магнитного поля гибридной линзы от тока (измерения).

Список литературы

1. E. Jongewaard, G. Caryotakis, C. Pearson et al. The Next Linear Collider Klystron Development Program.- In: Proceed. of 20th Linear Accelerator Conference (Linac 2000), Monterey, CA, 2000.
2. P. Avrakhov, V. Balakin, V.Chashurin, ... A. Larionov et al. Studies of a Powerful PPM Focused X-Band Klystron. - High Energy Density Microwaves, Pajaro Dunes, California, 1998, p.59.
3. A. Larionov, K. Ouglekov. DGUN- code for simulation of intensive axial-symmetric electron beams. – In: 6th International Computational Accelerator Physics Conference, TU Darmstadt, Germany, 2000, p. 172 .
4. J.H. Billen and L.M. Young. Poisson Superfish. LA-UR-96-183, 1997.
5. S. Tokumoto. Some details about the testing of PPM 1. - Presented at 6th International Study Group Workshop on Next Linear Collider, ISG6, Tsukuba, Japan, November, 2000.
6. Y.H. Chin. Status of X-band klystron development at KEK. - Presented at 6th International Study Group Workshop on Next Linear Collider, ISG6, Tsukuba, Japan, November, 2000.

Рукопись поступила 31 января 2001 г.

Балакин В.Е. и др.

Разработка электронно-оптической системы Тошиба РРМ клистрона

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 1.02.2001.

Формат 60 × 84/8.

Офсетная печать.

Печ.л. 1, 5. Уч.–изд.л. 1,2. Тираж 130.

Заказ 28.

Индекс 3649.

ЛР №020498 от 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

