

УДК 621.385.6

КОЛЛЕКТОР МЕГАВАТТНОГО ГИРОТРОНА СО СТАТИЧЕСКИМ НЕАДИАБАТИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Г. Г. Денисов, В. Н. Мануилов

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского;
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработаны концепция и проект коллектора со статическим неадиабатическим магнитным полем, позволяющие исключить влияние импульсных тепловых нагрузок и накопление неупругих деформаций в теле коллектора и реализовать близкое к равномерному распределение плотности мощности тепловыделения по его поверхности при его энергетической нагрузке около 500 Вт/см^2 . Такой коллектор характеризуется умеренной критичностью к вариациям энергетического распределения электронов и влиянию стороннего магнитного поля рассеяния. Снижение критичности достигнуто за счёт выбора цилиндрической формы коллектора и использования в коллекторной системе двух пар встречно включённых соленоидов малой мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны являются наиболее мощными источниками электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин электромагнитных волн [1]. Большой уровень выходной мощности (около мегаватта в непрерывном режиме на частотах $100 \div 170 \text{ ГГц}$) позволяет успешно применять эти приборы в установках управляемого термоядерного синтеза для нагрева плазмы. Проектируемые в настоящее время гиротронные комплексы (например в рамках проекта ITER) должны иметь мощность единичного модуля P около 1 МВт при его коэффициенте полезного действия (КПД) η порядка 50 % на частоте 170 ГГц и работать в квазинепрерывном режиме с длительностью импульса не менее 1000 с [1]. При этом одной из наиболее сложных научных и технологических проблем оказывается обеспечение приемлемого теплового режима коллектора гиротрона, где происходит рассеяние остаточной энергии электронов после взаимодействия с высокочастотным (ВЧ) полем. Для $\eta \approx 50 \%$ и $P = 1 \text{ МВт}$ остаточная мощность пучка $P_{\text{rest}} \approx 1 \text{ МВт}$. Имеющиеся в настоящее время системы охлаждения коллекторов гиротронов могут обеспечить необходимый теплосъём с их поверхностей в непрерывном режиме при плотности мощности не более $0,4 \div 0,6 \text{ кВт/см}^2$. В результате при используемых диаметрах медных коллекторов $D < 350 \text{ мм}$ необходимо обеспечить длину следа L на коллекторе порядка $300 \div 600 \text{ мм}$ и даже больше.

В настоящее время наиболее разработанным вариантом коллектора, удовлетворяющим указанным требованиям, является коллектор с продольным динамическим уширением [1, 2] (рис. 1), где меняющееся во времени по синусоидальному закону с частотой сканирования f поле надетой на коллектор катушки приводит к сдвигу ведущей магнитной силовой линии и изменению положения следа электронного пучка. Однако при увеличении частоты сканирования переменное магнитное поле уже плохо проникает сквозь толщу медного коллектора, что приводит к ограничению f на уровне около 10 Гц. Малая частота сканирования вызывает последовательность периодических по времени сильных локальных перегревов участков коллектора с нагрузкой до $2 \div 3 \text{ кВт/см}^2$. Это ведёт к неупругим деформациям его поверхности, эффект действия которых накапливается, и коллектор разрушается. Суммарная наработка коллектора до разрушения оказывается крайне малой: порядка 10 часов. В то же время для надёжной долговременной работы

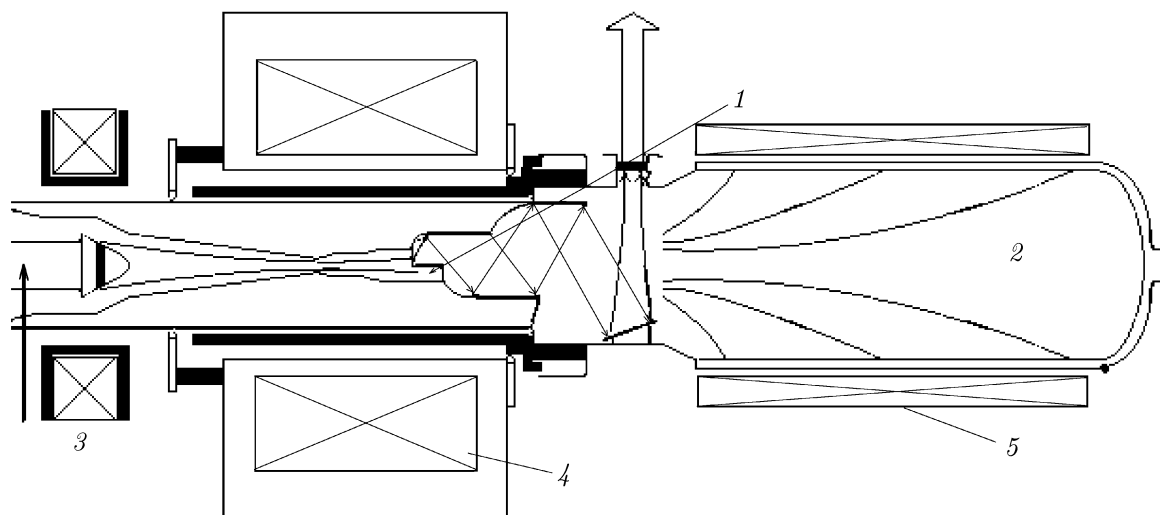


Рис. 1. Принципиальная схема гиротрона с продольным сканированием пучка вдоль коллектора: 1 — резонатор, 2 — коллектор, 3 — электронная пушка, 4 — основные соленоиды, 5 — сканирующие электронный пучок соленоиды. Также показано положение ведущих магнитных силовых линий в разные моменты времени

сверхвысокочастотных (СВЧ) комплексов нагрева плазмы желательно, чтобы прибор был способен работать в течение хотя бы 5 000 часов.

Очевидно, что импульсная тепловая нагрузка на поверхности коллектора отсутствует в двух предельных случаях: $f = 0$ или $f \rightarrow \infty$ (оценки показывают, что на практике достаточно иметь $f > 100 \div 1\,000$ Гц). В последнем случае, очевидно, эффект сканирования усредняется и поле температур, как и при $f = 0$, перестаёт зависеть от времени. Однако анализ высокочастотных систем сканирования [3] показывает, что соответствующие источники переменного магнитного поля должны размещаться внутри коллектора, а их конструкция весьма сложна. Поэтому ниже рассмотрен случай статического магнитного поля. Известно, что даже при малом угле φ наклона ведущей магнитной силовой линии к поверхности коллектора при выполнении условия адиабатичности магнитного поля выполняется соотношение $L \leq h$, где h — шаг электронной траектории в области осаждения пучка. В практических случаях для уменьшения влияния внешних магнитных полей необходимо обеспечить $\varphi \geq 5^\circ$. Тогда $L \approx h/3$, что примерно на порядок меньше требуемого значения. Увеличить величину L в статическом поле можно, если нарушить условие адиабатичности движения электронов, например за счёт включения в магнитную систему двух встречных катушек [4] с примерно равными и противоположно направленными магнитными полями (рис. 2). В поле такого однопериодного ондулятора электроны получают дополнительную осцилляторную скорость, близкую по величине к полной скорости электронов. При этом pitch-фактор g электронов в коллекторной области возрастает до величины порядка 1, их ларморовский радиус резко увеличивается, и если после этого осуществить перемешивание электронов по

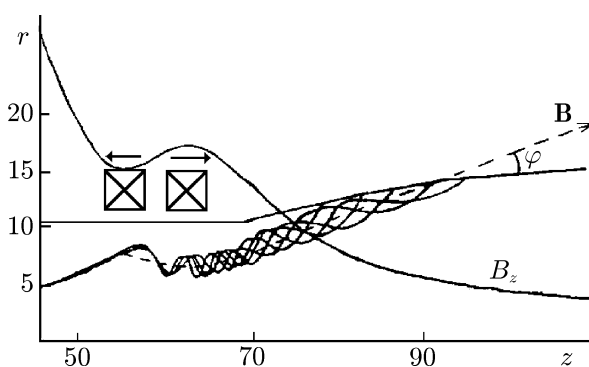


Рис. 2. Схема коллектора с сильной локальной неоднородностью магнитного поля. Показано распределение осевого магнитного поля B_z , ход ведущей силовой линии $\mathbf{B}$ и типичные электронные траектории

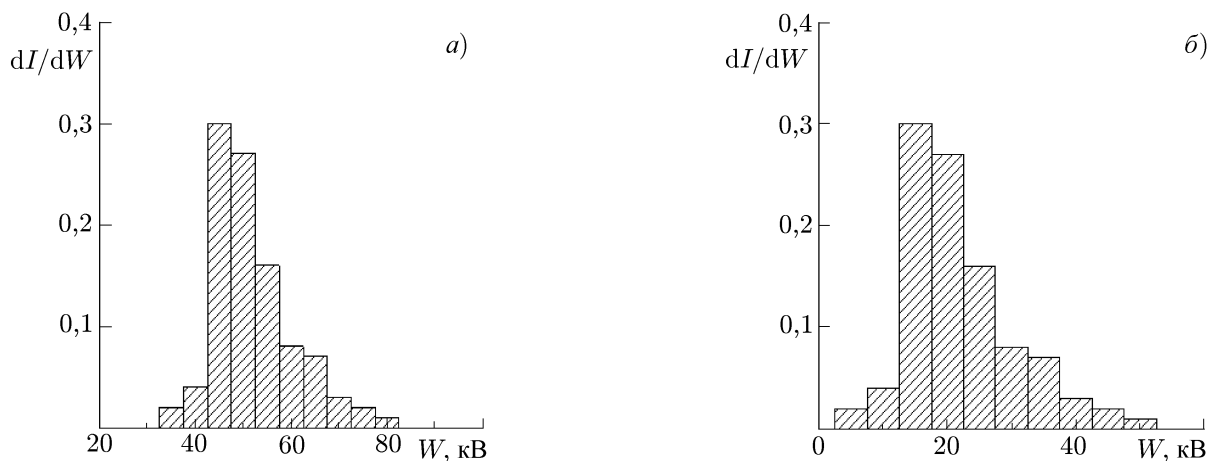


Рис. 3. Распределение электронов по энергии на выходе резонатора (а) и рекуперационной линзы (б). Пучок разбит на десять энергетических фракций

фазам осцилляторного движения θ ($\theta \in [0, 2\pi]$), то след пучка можно резко увеличить.

Ниже рассмотрены возможности использования указанного выше подхода для коллектора гиротрона с частотой 170 ГГц при остаточной мощности пучка 1 МВт. Максимальная энергия электронов пучка после торможения в рекуперационной линзе полагалась равной 50 кэВ, максимальный диаметр коллектора — 350 мм. Расчёт и оптимизация коллектора проводились с помощью версии программы ЭПОС [5], адаптированной для моделирования коллекторных систем гиротронов. При вычислениях предполагалось, что энергетическое распределение электронов на выходе из резонатора имеет вид, изображённый на рис. 3а, а после рекуперационной линзы на входе в область коллектора с неадиабатическим магнитным полем получается из распределения, показанного на рис. 3б, путём его сдвига по оси энергий влево на величину тормозящего потенциала (30 кВ) системы одноступенчатой рекуперации гиротрона. Указанное распределение соответствует электронному КПД гиротрона порядка 35 %.

1. ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ

Традиционно коллектор гиротрона делается профилированным (см. рис. 2), т.е. состоящим из нескольких конусов с разными углами наклона к оси системы, что позволяет увеличить длину следа за счёт подбора относительно небольших углов φ подхода ведущей силовой линии к разным участкам поверхности коллектора. Однако, как показал ряд расчётов, для неадиабатического профилированного коллектора характерна значительная чувствительность распределения плотности мощности $P_{уд}(z)$ к стороннему магнитному полю и вариациям энергетического распределения в электронном пучке на выходе из резонатора гиротрона. Поэтому далее форма коллектора была заменена на цилиндрическую.

Для снижения критичности коллектора необходимо обеспечить во всей зоне посадки пучка $\varphi \approx 7^\circ \div 10^\circ$. В рамках параксиального приближения угол между магнитной силовой линией и поверхностью цилиндрического коллектора с радиусом r_{coll} даётся формулой

$$\varphi = -\frac{r_{coll}}{2} \frac{dB_z}{dz}.$$

Следовательно, для постоянства угла φ уменьшение поля в области осаждения должно быть линейным по координате z . Кроме того, чтобы не менять место осаждения пучка и в то же

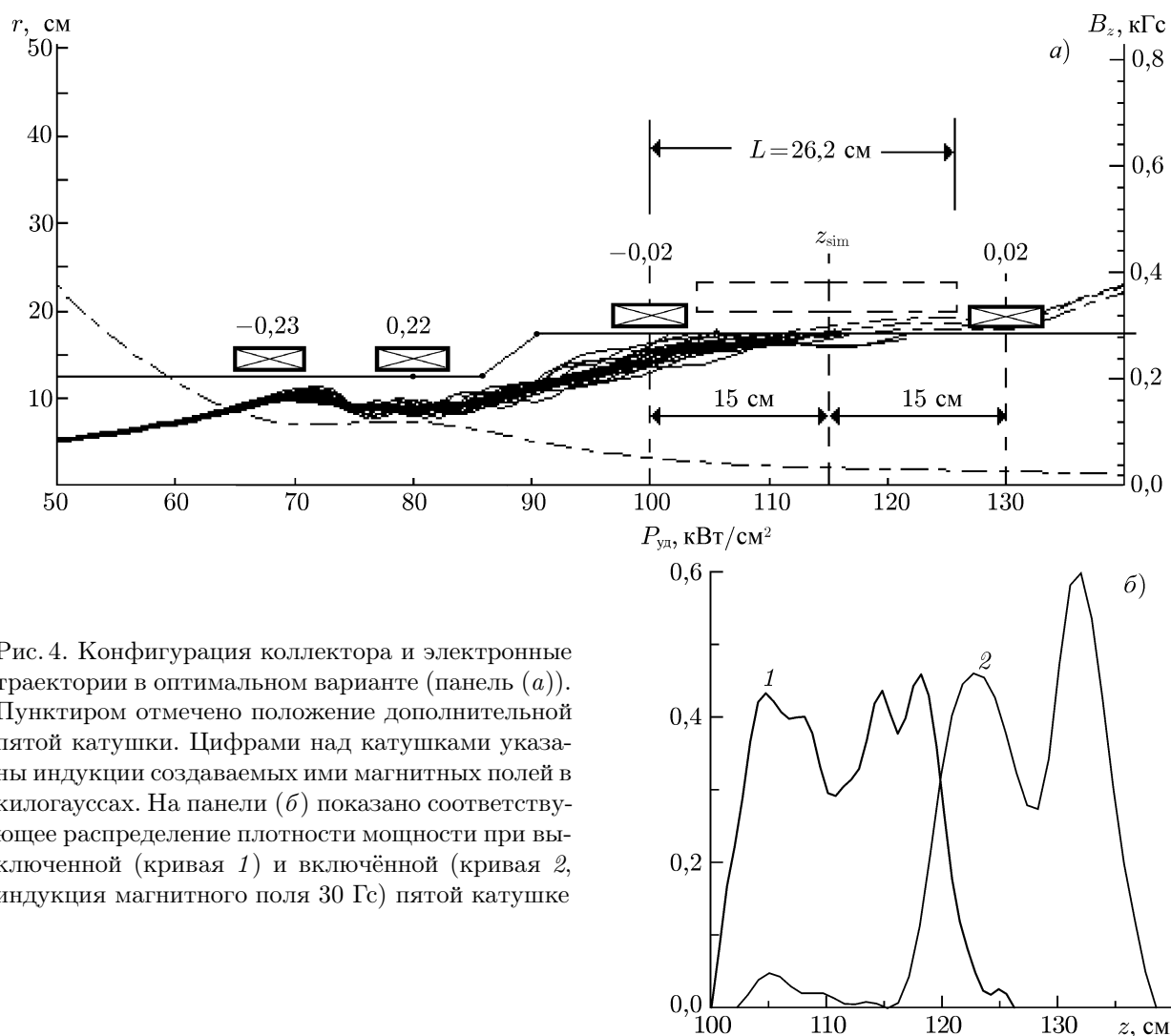


Рис. 4. Конфигурация коллектора и электронные траектории в оптимальном варианте (панель (а)). Пунктиром отмечено положение дополнительной пятой катушки. Цифрами над катушками указаны индукции создаваемых ими магнитных полей в килогауссах. На панели (б) показано соответствующее распределение плотности мощности при выключенной (кривая 1) и включённой (кривая 2, индукция магнитного поля 30 Гс) пятой катушке

время перестраивать угол φ , целесообразно добавить в магнитную систему дипольные катушки Гельмгольца с противоположными полярностями (см. рис. 4). Первые две катушки неадиабатически закручивают пучок, а вторая пара регулирует угол φ . Катушки во второй паре имеют одинаковые токи и включены навстречу друг другу. Оптимизация проводилась для следующего набора параметров: магнитное поле в центре резонатора $B_0 = 68,5$ кГс, ток пучка $I_0 = 37,5$ А, потенциал резонатора относительно катода $U_0 = 80$ кВ, напряжение рекуперации $U_{\text{rec}} = 30$ кВ. Отрицательное значение индукции означает, что соответствующая катушка имеет собственное поле, направленное против оси z .

Для обеспечения достаточно большой протяжённой зоны постоянного наклона магнитной силовой линии к поверхности коллектора, т. е. зоны с $\varphi \approx \text{const}$, необходимо, чтобы вторая пара катушек имела большой средний радиус R_{sec} . Простые численные расчёты показывают, что оптимальное расстояние от плоскости симметрии z_{sim} (см. рис. 4) до центра катушки должно быть равно $0,5R_{\text{sec}}$, а протяжённость участка, где угол $\varphi \approx \text{const}$, также должна быть примерно равна $0,5R_{\text{sec}}$.

Наконец, может оказаться необходимой пятая одиночная катушка, намотанная непосредственно на корпус коллектора (рис. 4, пунктир). Она служит для сдвига центра следа вправо на до-

статочное большое расстояние от первой пары катушек, чтобы изменение тока во второй паре не влияло на магнитное поле под первой парой и соответственно не меняло условия закрутки пучка. Эта же катушка может использоваться и для медленного продольного сканирования (перемещения) пучка (см. ниже).

Можно указать следующие потенциальные преимущества новой концепции коллектора.

- 1) Увеличивается, при прочих равных условиях, рабочая поверхность коллектора.
- 2) Возрастает величина декомпрессии пучка, и за счёт этого — ларморовский радиус в месте осаждения и величина L .
- 3) Коллектор не критичен к своему продольному сдвигу при юстировке гиротрона.
- 4) Имеется возможность более гибкой подстройки профиля магнитного поля в области посадки и регулировки угла подхода магнитной силовой линии к поверхности коллектора и, за счёт этого, увеличения области оседания пучка.
- 5) Используется относительно простая (по сравнению с системой продольного сканирования) магнитная система с умеренным энергопотреблением.
- 6) Упрощается технология изготовления коллектора.

Последующая численная оптимизация параметров магнитной системы привела к конфигурации, изображённой на рис. 4. Здесь пиковая плотность мощности $P_{\max} = 460 \text{ Вт/см}^2$, а распределение $P_{\text{уд}}(z)$ оказывается близким к равномерному. Наложение стороннего однородного радиального поля $B_{r\text{stor}} = \pm 1,5 \text{ Гс}$ приводит к увеличению $P_{\max}$ до 550 и 510 Вт/см^2 для азимутальных углов $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 180^\circ$ соответственно. Таким образом, пиковая плотность мощности возрастает примерно на 20 % и остаётся ещё в пределах допуска. К аналогичному изменению $P_{\max}$ приводит и вариация токов первой (раскачивающей) пары катушек в пределах $\pm 5 \%$ от их номинальных значений. Система также не критична к изменению токов второй пары катушек в пределах $10 \div 15 \%$ от их оптимального значения.

Нами сравнивались также распределения плотности мощности для двух существенно различных энергетических распределений электронов на выходе из рабочего пространства: исходного распределения (см. рис. 3а) и равномерного распределения, в котором веса всех десяти энергетических фракций одинаковы ($dI/dW = \text{const} = 0,1$). Данные расчётов сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры следа пучка на коллекторе для двух энергетических распределений электронов. B_{01} , B_{02} — индукции первой пары катушек, z_{beg} и z_{end} — координаты краёв следа

Вид распределения	B_{01} , кГс	B_{02} , кГс	z_{beg} , см	z_{end} , см	L , см	$P_{\max}$, кВт/см ²
Исходное распределение	−0,23	0,22	100	126,2	26,2	0,46
Равномерное распределение	−0,22	0,22	100	126,2	26,2	0,61

Таким образом, даже радикальное изменение энергетического спектра приводит к относительно умеренному изменению пиковой плотности мощности на 30 %.

Нами была также рассмотрена возможность медленного (с частотой несколько герц) сканирования следа пучка по поверхности коллектора. Анализировались два варианта: когда сканирование осуществляется второй парой катушек, которые меняют угол φ наклона магнитного поля к поверхности коллектора, и когда сканирование осуществляется дополнительной пятой катушкой, установленной между третьей и четвёртой катушками. Анализ электронных траекторий показал, что сканирование наиболее эффективно с помощью пятой катушки, центр которой находится над центром зоны посадки, а её полуширина равна 10 см. Плюсое включение катушки (когда её собственное поле B_z направлено вдоль оси z) позволяет увеличить полный след за цикл сканирования примерно в 1,5 раза: до 40 см (рис. 4). Отметим, что индукцию пятой катушки целесообразно ограничить величиной 30 Гс, дальнейшее увеличение уже не приводит к

дополнительному смещению следа, а только к возрастанию пиковой плотности мощности в конце следа.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что в гиротроне при остаточной мощности электронного пучка порядка 1 МВт возможно использование коллекторной системы со статическим неадиабатическим магнитным полем, обеспечивающей близкое к равномерному распределение плотности мощности тепловыделения на поверхности коллектора и его пиковую нагрузку около 500 Вт/см². С этой целью предпочтительно использовать коллектор цилиндрической формы, а в магнитную систему добавить две пары встречно включённых коллекторных катушек. Численный анализ электронных траекторий показывает, что распределение плотности мощности тепловыделения достаточно слабо зависит как от вида энергетического спектра пучка электронов на выходе из резонатора гиротрона, так и от стороннего магнитного поля при величине последнего не более 1,5 Гс. Возможно медленное (с частотой несколько герц) продольное сканирование пучка за счёт установки пятой катушки малой мощности, расположенной примерно над центром следа пучка между второй парой катушек. При этом эффективная длина следа увеличивается в 1,5 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-02-00701).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., et al. // EPJ Web of Conferences. 2012. V. 32. Art. no. 04003.
2. Мануилов В. Н., Фикс А. Ш. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике: 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 2. Саратов: Изд-во Гос. УНЦ «Колледж», 1996. С. 138.
3. Галисевич С. Ю., Денисов Г. Г., Мануилов В. Н. // Вестник Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского. 2013 (в печати).
4. Гольденберг А. Л., Бородачева Т. В., Мануилов В. Н., Малыгина О. О. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 61, № 8. С. 1292.
5. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2001. V. 22, No. 8. P. 1119.

Поступила в редакцию 24 мая 2013 г.; принята в печать 28 июня 2013 г.

THE COLLECTOR OF A MEGAWATT GYROTRON WITH A STATIC NONADIABATIC MAGNETIC FIELD

G. G. Denisov and V. N. Manuilov

We have developed the concept and design of a collector with a static nonadiabatic magnetic field, which allow one to exclude the influence of pulser thermal loads and accumulation of nonelastic deformations in the collector body, as well as achieve the nearly-uniform distribution of the heat release power density over its surface for an energy load of about 500 W/cm². Such a collector is characterized by moderate criticality of variations in the electron energy distribution and the effect of an external magnetic scattering field. The decrease in criticality is achieved by choosing the cylindrical shape of the collector and using two pairs of back-to-back low-power solenoids in the collector system.

Г. Г. Денисов, В. Н. Мануилов