

1. Rau E. I., Robinson V. N. E.// Scanning. 1996. V. 18. P. 556—561.
2. Борисов С. С., Грачев Е. А., Зайцев С. И. Моделирование взаимодействия электронного пучка с гетерогенными средами мето-

дом Монте-Карло в приближении дискретных потерь// Прикладная физика. 2004. № 3. С. 65.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Definition of parameters of subsurface structures for a sample through an energy distribution of secondary electrons

S. S. Borisov, E. A. Grachev, A. Bloshenko, T. Misyutina
Moscow State University, Physical Faculty, Moscow, Russia

S. I. Zayitsev

Institute for Problems of Microelectronics Technologies, Chernogolovka, Moscow, Russia

The analysis of energy distributions for secondary electrons is made with the help of the program for model operation by a Monte-Carlo method in approach of discrete losses. Shown is an opportunity of definition of thicknesses and stratification depths of subsurface structures by energy distributions of secondary electrons.

УДК 621.385.029.647

Формирование частично-замагниченного многолучевого пучка в мощном клистроне для сверхпроводящих линейных электрон-позитронных коллайдеров

А. В. Ларионов

Физико-технический центр ФИАН им. П. Н. Лебедева, г. Протвино, Россия

Представлены результаты моделирования электронно-оптической системы, предложенной и разработанной для мощного многолучевого клистрона Toshiba E3736 — шести-лучевого клистрона L-диапазона с выходной мощностью 10 МВт, разрабатываемого для сверхпроводящих ускорительных проектов ILC, TESLA (XFEL). Ключевые особенности прибора: новая компактная схема формирования частично-замагниченного пучка, наиболее низкая по сравнению с аналогами нагрузка катодов ($< 2,1 \text{ А/см}^2$), управляемый размер (диаметр) лучей в пролетных трубах клистрона.

В настоящее время мощные многолучевые клистроны L-диапазона рассматриваются как основной тип ВЧ-источников для питания будущих сверхпроводящих линейных электрон-позитронных коллайдеров. Использование таких приборов предполагается, в частности, в проектах TESLA (XFEL) и ILC. Известный и разработанный для этих целей клистрон Thales TH1801 [1] уже используется на ТТФ (Tesla Test Facility) и демонстрирует КПД на уровне 65 % при выходной мощности 10 МВт. Однако существенным недостатком этого прибора является высокая плотность тока на катоде, составляющая $5,5 \text{ А/см}^2$, и как следствие ограниченный срок службы.

Как попытку кардинального решения этой проблемы можно рассматривать развиваемый в настоящее время многолучевой клистрон СРІ VKL-8301 [2]. Конструкция этого прибора представляет собой пакет, состоящий из шести независимых однолучевых клистронов, которые связаны между собой по ВЧ на входе и

выходе с помощью кольцевых резонаторов на высшем типе колебаний. Использование резонаторов на высшем типе колебаний позволяет увеличить расстояние между лучами (клистроны), диаметр катодов и относительно легко решить задачу формирования лучей. Проектная плотность тока на катоде в VKL-8301 составляет $2,5 \text{ А/см}^2$, а ожидаемый срок службы превышает 100 000 ч. Очевидным недостатком подхода СРІ являются сложность и громоздкость всей конструкции клистрона, что, вероятно, скажется на его стоимости.

Лучшей, на наш взгляд, альтернативой указанным выше клистроном является разрабатываемый в настоящее время клистрон Toshiba E3736, оптическая система которого рассматривается ниже. Основные особенности этого прибора следующие:

- новая компактная схема фокусировки частично-замагниченного пучка, позволяющая использовать в клистроне кольцевые резонаторы, работающие на основной моде;

- наиболее низкая по сравнению с аналогами нагрузка катодов ($< 2,1 \text{ А/см}^2$);
- управляемый размер (диаметр) лучей в пролетных трубах клистрона.

Например, при меньшей плотности тока на катоде поперечный размер (диаметр) Toshiba E3736 меньше, чем размер СРІ VKL-8301, в 1,7 раза.

Формирование внешнего магнитного поля в пушке

Общая схема клистрона показана на рис. 1. В приборе используется частично замагниченная многолучевая пушка, имеющая шесть катодов диаметром 38 мм. Формируемые лучи располагаются равномерно по окружности с диаметром 120 мм. Для согласования сформированного многолучевого пучка с полем соленоида в клистроне используются две магнитные линзы, выполненные в виде однотипных катушек соленоида и разделяемые друг от друга плоскими магнитными экранами с отверстиями для лучей.

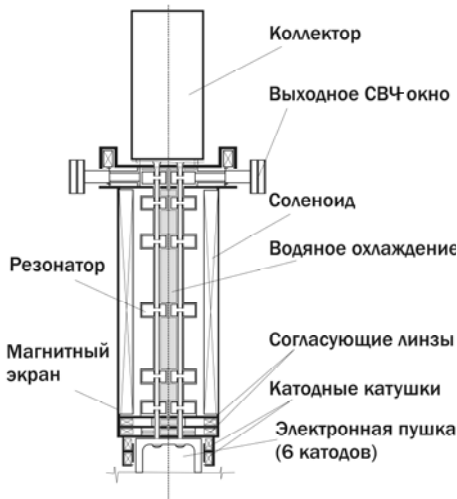


Рис. 1. Общая схема клистрона Toshiba E3736

Основные проектные параметры клистрона Toshiba E3736

Рабочая частот, МГц.....	1300
Импульсная мощность, МВт.....	10
Средняя мощность, кВт.....	150
Напряжение, кВ.....	115
Ток, А.....	132(6×22)
КПД, %.....	>65
Длительность импульса, мс.....	1,5—2
Частота повторений, Гц.....	10
Усиление, дБ.....	47
Число лучей.....	6
Катодная нагрузка, А/см ²	<2,1

Заметим, что в большинстве известных многолучевых клистронов используется брелленовская фокусировка, что существенно затрудняет работу приборов при высокой мощности. В то же время известные и предлагаемые схемы с частичным замагничиванием являются конструктивно очень сложными и громоздкими. Например, в работе [3] предложено размещать локаль-

ные неаксиально-симметричные магнитные экраны вокруг каждой индивидуальной микропушки, формирующей луч, причем конструкция этих микропушек также является неаксиально-симметричной.

Основная задача для формирования внешнего магнитного поля в пушке E3736 — достижение высокой локальной симметрии поля в области распространения лучей. При этом предполагалось не использовать в конструкции какие-либо специальные элементы для симметризации поля, располагаемые в непосредственной близости от лучей. Решение такой задачи было получено в схеме с двумя общими катодными катушками, располагаемыми вокруг многолучевой пушки. В основе схемы лежит двухмерный аналог магнитной системы, в котором в области, соответствующей промежутку катод—анод, реализуется высокооднородное магнитное поле (рис. 2). Переход к реальной трехмерной схеме осуществляется здесь простым введением отверстий для лучей в плоском экране и соответствующим добавлением других элементов магнитной системы — магнитных линз и соленоида. Очевидно, что если расстояние между отверстиями превышает в 1—2 раза их диаметр, влияние соседних отверстий на формируемое поле в области микропушки становится слабым, что вместе с однородным полем двухмерного аналога позволяет рассчитывать на достижение в такой схеме высокой локальной симметрии поля относительно оси отверстий.

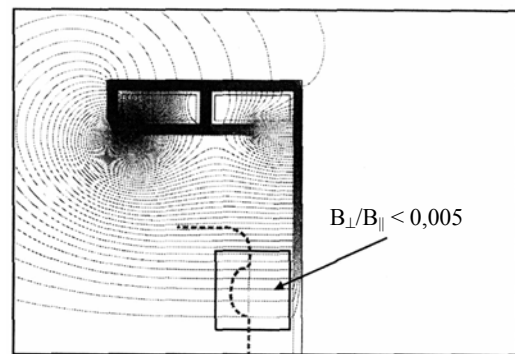


Рис. 2. Двухмерный аналог магнитной системы для формирования магнитного поля в пушке

Оптимальное соотношение между токами катушек для двухмерной задачи может быть найдено методом наименьших квадратов в пренебрежении эффектами насыщения в материале магнитных экранов ($\mu \sim 500—1000$). В этом случае магнитное поле в пушке можно представить в виде $\vec{B} = \vec{b}_1(r, z)I_1 + \vec{b}_2(r, z)I_2$ и минимизировать интеграл $F(I_1, I_2)$, вычисляемый по области формирования лучей V

$$F(I_1, I_2) = \int_V (\vec{B} - \vec{b}_0)^2 dV,$$

где I_1, I_2 — полные токи катушек;

$\vec{b}_0 = b_0 \vec{e}_z$ — заданное постоянное поле;

$\vec{b}_1(r, z)$ — сеточное решение для магнитного поля при $I_1 = 1, I_2 = 0$;

$\bar{b}_2(r, z)$ — сеточное решение при $I_1 = 0, I_2 = 1$.

Условие минимума $F(I_1, I_2)$ приводит к следующему выражению для I_1 и I_2 :

$$I_1 = (\langle \bar{b}_0 \bar{b}_1 \rangle \langle \bar{b}_2^2 \rangle - \langle \bar{b}_0 \bar{b}_2 \rangle \langle \bar{b}_1 \bar{b}_2 \rangle) / \Delta;$$

$$I_2 = (\langle \bar{b}_0 \bar{b}_2 \rangle \langle \bar{b}_1^2 \rangle - \langle \bar{b}_0 \bar{b}_1 \rangle \langle \bar{b}_1 \bar{b}_2 \rangle) / \Delta,$$

где

$$\Delta = \langle \bar{b}_1^2 \rangle \langle \bar{b}_2^2 \rangle - \langle \bar{b}_1 \bar{b}_2 \rangle^2;$$

$$\langle \bar{b}_i \bar{b}_k \rangle = \int_V (\bar{b}_i \bar{b}_k) dV.$$

Такой подход требует выполнения только двух промежуточных расчетов двумерной задачи для нахождения сеточных функций $\bar{b}_1(r, z)$ и $\bar{b}_2(r, z)$. Интегралы в выражении $\langle \bar{b}_i \bar{b}_k \rangle$ вычисляются численно.

Поскольку однородность магнитного поля в двумерной задаче зависит только от отношения I_1 / I_2 , в реальном приборе катушки соединяются последовательно, а необходимое соотношение между I_1 и I_2 достигается за счет соответствующего выбора числа витков.

Таким образом, пара катодных катушек, питаемая от одного источника тока, обеспечивает варьирование магнитного поля в многолучевой пушке в широком диапазоне, сохраняя при этом свойство локальной симметрии поля в области формирования лучей.

Построенная указанным выше способом магнитная система в окончательном (трехмерном) варианте совместно с согласующими линзами моделировалась программой ANSYS. На рис. 3 приведен типичный пример полученного в расчетах распределения продольного магнитного поля на оси индивидуального луча $B_{||}$, а также зависимость $B_{\perp} / B_{||}$, где B_{\perp} — поперечное магнитное поле, т. е. составляющая магнитного поля неаксиально-симметричная относительно оси луча. Как видно, величина $B_{\perp} / B_{||}$ в области пушки находится на уровне 10^{-2} и уменьшается до 10^{-3} при переходе в область согласующих линз и селеноида. По абсолютной величине максимальное значение B_{\perp} в пушке составляет ~ 1 Гс и определяется в основном эффектами насыщения.

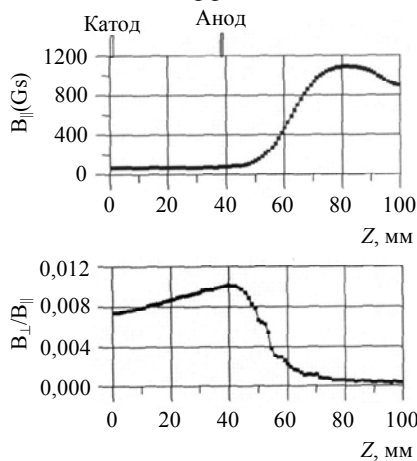


Рис. 3. Распределение магнитного поля на оси индивидуального луча

Моделирование оптики многолучевого пучка

Выбор формы электродов пушки был также нацелен на минимизацию трехмерных возмущений лучей, включая эффекты собственного магнитного поля. Для моделирования использовался стационарный трехмерный код GUN3D*, развиваемый в настоящее время в ФТИАН (г. Протвино). Модель расчета, используемая в GUN3D, включает в себя расчет как трехмерных электрических полей с учетом пространственного заряда, так и трехмерного собственного магнитного поля пучка. Собственное магнитное поле рассчитывается в предположении идеальной проводимости металлических электродов пушки, т. е. предполагается, что в течение импульса тока поле в металл не проникает, глубина скин-слоя $\delta = 0$, а соответствующее краевое условие для поля $B_n = 0$. Внешнее магнитное поле задается в виде сетки, которая строится на данных, полученных из ANSYS. Пример расчета кодом GUN3D приведен на рис. 4.

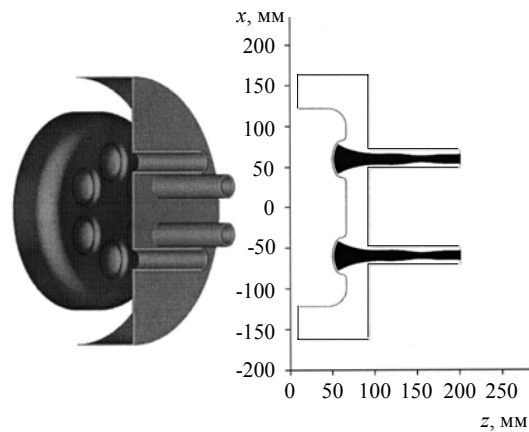


Рис. 4. Пример моделирования кодом GUN3D

В окончательном варианте пушки максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов составила 5,6 кВ/мм (для сравнения в клистроне Thales 1801 — 7,0 кВ/мм), максимальная плотность тока на катоде 2,1 А/см². Общим результатом трехмерного моделирования является тот факт, что в разработанной пушке смещение лучей относительно их оптических осей, а также различные деформации их поперечного сечения являются достаточно малыми. Характерная величина этих смещений и деформаций, полученная в расчетах, не превышает 0,3—0,5 мм для типичного размера сформированного луча 10—12 мм. Как пример на рис. 5 показана траектория центра индивидуального луча, полученная из данных GUN3D.

* Государственная регистрация № 2005611242.



Рис. 5. Траектория центра индивидуального луча

Малость трехмерных возмущений оптики лучей является основанием для применения в расчетах двухмерных программ, позволяющих, например, относительно быстро решать задачу согласования лучей с соленоидом. Двухмерная модель также важна для расчета динамического (СВЧ) режима работы клистрона. Внешнее магнитное поле в этом случае берется из решения аксиально-симметричной задачи, в которой отверстия в магнитных экранах пушки и линз расположены на оси прибора. При этом обязательным является сохранение уже выбранного соотношения между токами катодных катушек, что фактически в реальной трехмерной системе исключает эффект поворота многолучевого пучка вокруг оси прибора. Пример такого двухмерного моделирования кодом DGUN [4] показан на рис. 6.

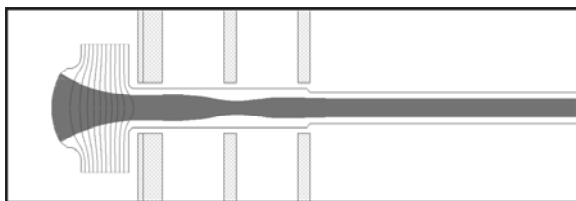


Рис. 6. Пример двухмерного моделирования кодом DGUN

Использование двух согласующих линз в клистроне придает оптической системе большую гибкость и позволяет согласовывать пучок в широком диапазоне полей соленоида и магнитного поля на катоде. Условные границы этих диапазонов, полученные с помощью DGUN, могут быть указаны как следующие:

$$B_{\text{катод}} \sim 0—100 \text{ Гс}, \quad B_{\text{соленоид}} \sim 500—1300 \text{ Гс}.$$

При этом размер (диаметр) луча в пролетном канале клистрона может изменяться более чем вдвое (6—14

мм), а пульсации (двухмерные) огибающей луча не превышают 3 %. Многолучевой пучок с изменяющимся (управляемым) диаметром лучей позволяет осуществлять дополнительную и эффективную “подстройку” клистрона, например оптимизировать КПД, токопрохождение в динамическом режиме, подавлять паразитные СВЧ-колебания в случае их появления и т. д.

Укажем также, что рассматриваемая оптическая система в сочетании с кольцевыми резонаторами клистрона позволяет реализовать простое и высокоэффективное охлаждение тела прибора, используя внутреннюю область (см. рис. 1). Как следствие, допустимый уровень потерь пучка в клистроне может быть очень высок.

Первые испытания клистрона Toshiba E3736. В недавно начатых испытаниях в диодном режиме в приборе было получено токопрохождение выше 98 % ($U = 115 \text{ кВ}$, $\tau = 1,5 \text{ мс}$, частота повторений 10 Гц). При работе с ВЧ при длительности импульса 1 мс на напряжении 115 кВ получена мощность 10,3 МВт, что соответствует КПД клистрона $\approx 68 \%$ [5].

Заключение

Представленная схема формирования многолучевого пучка является относительно простой, компактной и обеспечивает высокий резерв надежности прибора. Первые успешные испытания клистрона Toshiba E3736 позволяют сделать вывод о возможности развития нового поколения мощных многолучевых клистронов, использующих такую схему.

Л и т е р а т у р а

1. *Beunas A., et al.* A High Efficiency Long Pulse Multibeam Klystron, DESY-TESLA-2001-01, DESY-M-01-06F. Feb 2001. — 3 p.
2. *Wright E., et al.* Development of a 10 MW, L-Band Multiple Beam Klystron for TESLA, Proceedings of PAC 2003, paper TPAE029. P. 1144—1146.
3. *Lowrence Ives R., et al.* Development of Multiple Beam Guns for High Power RF Sources for Accelerators and Colliders, Presented at the 6th Workshop on High-Energy Density and High Power RF (RF 2003). June 22—26. 2003. Berkeley Springs, VA, USA; SLAC-PUB-10704.
4. *Larionov A., Ouglekov K.* DGUN-code for simulation of intensive axial-symmetric electron beams, 6th International Computational Accelerator Physics Conference, TU Darmstadt, Germany, 2000. P. 172.
5. *Choroba S.* RF Power Sources from TESLA for ILC and XFEL, Presented at the First ILC Workshop Towards an International Design of a Linear Collider. Nov. 13—15. 2004. KEK, Japan; <http://lcdev.kek.jp/ILCWS/>.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Confined flow multiple beam shaping at the powerful klystron for the superconductive linear electron-positron colliders

A. V. Larionov

Physical Technical Center of P. N. Lebedev Physical Institute, Protvino, Russia

The results of modeling of the electro-optical system proposed and designed for the powerful multiple beam klystron Toshiba E3736 have been represented. Toshiba E3736 is the 10 MW L-band six-beam klystron being developed for the superconductive accelerator projects TESLA (XFEL), ILC. The key features of device are the new compact scheme of the confined flow multiple beam shaping, the most low cathode loading ($<2.1 \text{ A/cm}^2$) in comparison with analogues, a controlled beamlet size (diameter) in the drift tubes of klystron.

УДК 621.385.632

Высокоперевансные электронные пушки для мощных широкополосных низковольтных ЛБВ с сеточным управлением

Д. А. Архипов, Е. М. Ильина, В. П. Кудряшов, В. И. Роговин, В. Н. Усов
Федеральное государственное унитарное предприятие НПП "Алмаз", Саратов, Россия

Рассмотрены вопросы уменьшения анодного напряжения, массы и габаритов мощных импульсных ламп бегущей волны (ЛБВ) с сеточной модуляцией, а также расширения рабочей полосы частот усиливаемых сигналов. Показано, что это достигается увеличением переванса электронного потока, формируемого оригинальной трехсеточной электронной пушкой. Представлены особенности фокусировки высокоперевансного электронного потока магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС). Приведены основные параметры таких ЛБВ.

Многочисленные исследования, направленные на оптимизацию выходных параметров и миниатюризацию СВЧ-изделий с протяженным электронным пучком и радиоаппаратуры с их использованием, показывают, что существенные успехи в этом направлении возможны при увеличении переванса электронно-оптической системы (ЭОС).

В ЛБВ О-типа обычно используются хорошо зарекомендовавшие себя ЭОС с так называемой электронной пушкой Пирса. Однако у ЭОС с пушкой Пирса имеется существенный недостаток: при увеличении переванса до значений более $2 \text{ мкА/В}^{3/2}$ провисание потенциала в отверстии анода препятствует хорошему согласованию электронного пучка с магнитным полем фокусирующей системы и достижению высокого значения токопрохождения через пролетный канал ЛБВ.

Высокоперевансные ЭОС

Возможность миниатюризации спиральных ЛБВ появилась после создания трехсеточной конструкции электронной пушки, свободной от указанного недостатка, присущего пушке Пирса, и поэтому способной формировать электронный пучок с перевансом до $8 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Конструкция этой электронной пушки защищена авторским свидетельством [1], патентом [2] и удостоена золотой медали на выставке "Эврика-95" в Брюсселе [3].

Принцип действия этой пушки заключается в следующем [4]: первой, теневой, сеткой электронный пучок, вышедший с катода, разбивается на ряд секторов, между которыми имеется "электронная тень". В этой "тени" расположены элементы второй, управляющей,

сетки и третьей дополнительной анодной сетки, которая закрывает анодное отверстие и препятствует провисанию эквипотенциальных поверхностей.

Для улучшения условий согласования электронного пучка с магнитным полем была выбрана конфигурация катода, теневой и управляющей сеток в форме части тороидальной поверхности [2], сопряженной с плоскостью (рис. 1). Таким образом, в зоне ускорения формируется квазипольный сходящийся пучок, который за анодом становится сплошным цилиндрическим ламинарным потоком. Это было подтверждено как теоретическими расчетами, так и экспериментальными измерениями с помощью подвижного зонда.

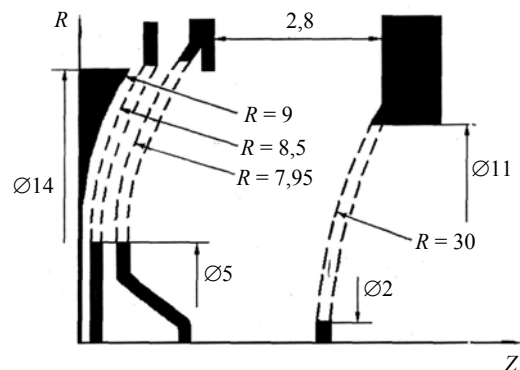


Рис. 1. Высокоперевансная электронная пушка

Испытания показали, что непосредственно за анодом электронный пучок имеет ярко выраженную секторную структуру. По мере удаления от анода сектора

