

УДК 621.385.624

## ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МОЩНОГО КЛИСТРОНА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2021 г. В. Е. Родякин<sup>1, \*</sup>, В. М. Пикунов<sup>1</sup>, В. Н. Аксенов<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения “Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника” Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Международный лазерный центр, Москва, Россия

\*E-mail: vrodyakin@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Представлены результаты теоретического исследования и оптимизации параметров электронной пушки мощного многорезонаторного клистрона с распределенным взаимодействием на частоту 95 ГГц, обеспечивающей формирование плотного кольцевого электронного пучка и его дальнейшую транспортировку через систему взаимодействия прибора с коэффициентом токопрохождения 99% с учетом теплового разброса скоростей электронов на катоде.

DOI: 10.31857/S0367676521010245

### ВВЕДЕНИЕ

Бурно растущие потребности в компактных мощных источниках СВЧ излучения вызвали в последние годы активное продвижение в терагерцовый диапазон традиционной техники электровакуумных приборов, среди которых наиболее перспективными являются лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ).

Неизбежное уменьшение размеров замедляющих структур ЛБВ и резонаторов КРВ миллиметрового диапазона приводит к уменьшению эффективности взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями электродинамических систем этих СВЧ приборов. Требуется компактность приборов также ограничивает величину используемого ускоряющего напряжения  $V_0$  (обычно менее 20 кВ [1]). Поэтому разработчикам приходится повышать мощность электронных потоков в основном за счет увеличения их силы тока. При этом из-за малых размеров сечения пролетного канала в миллиметровом диапазоне для увеличения силы тока приходится переходить к использованию электронных потоков с высокими значениями плотности тока в

пучке (более  $1 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$ ) [2], а также распределенных потоков (многолучевых, кольцевых и ленточных электронных пучков). Разработка электронно-оптических систем для формирования и транспортировки распределенных интенсивных электронных потоков является отдельной и весьма сложной задачей, которую необходимо решать при конструировании приборов вакуумной микроэлектроники, поскольку мощность и качество сформированного электронной пушкой электронного потока во многом определяют выходные характеристики КРВ в миллиметровом диапазоне.

Традиционным лидером в области разработки мощных КРВ миллиметрового диапазона является канадская компания СРІ. Разработчикам этой компании удалось достигнуть выходной импульсной мощности КРВ W-диапазона  $P_{\text{вых}} = 2 \text{ кВт}$  при электронном КПД 20% [3]. В приборе использовался аксиально-симметричный цилиндрический электронный пучок силой тока  $I_0 = 0.574 \text{ А}$ , ускоряющим напряжением  $V_0 = 16.3 \text{ кВ}$  и общей мощностью  $P_0 = 9.3 \text{ кВт}$ . Рекордной для данного диапазона выходной мощности  $P_{\text{вых}} = 7.3 \text{ кВт}$  сре-

Таблица 1. Исходные параметры КРВ

Параметр		Значение	Ед. измерения
Рабочая частота	$F_0$	95	ГГц
Ускоряющее напряжение	$V_0$	15	кВ
Сила тока	$I_0$	2.2	А
Мощность немодулированного пучка	$P_0$	33	кВт
Радиус трубы	$R_T$	0.28	мм
Радиус пучка	$R_n$	0.22	мм
Фокусирующее магнитное поле	$B_\Phi$	1.0	Тл

ди компактных КРВ удалось специалистам Исследовательской лаборатории ВМС США (Naval Research Laboratory, NRL) [4]. Электронный КПД разработанного ими КРВ с ленточным электронным пучком общей мощностью  $P_0 = 70$  кВт КРВ составил 8.6%.

В данной работе проведены теоретические исследования возможности разработки электронной пушки с кольцевым электронным пучком для мощного КРВ на частоту 95 ГГц, который бы смог по совокупности параметров превзойти существующие КРВ на цилиндрических и ленточных электронных пучках в данном диапазоне.

При анализе и оптимизации всех узлов прибора использовался программный комплекс PARS, разработанный авторами [5] на основе модернизации программы “Арсенал-МГУ”, зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследований многочисленных клистронных усилителей [6–9].

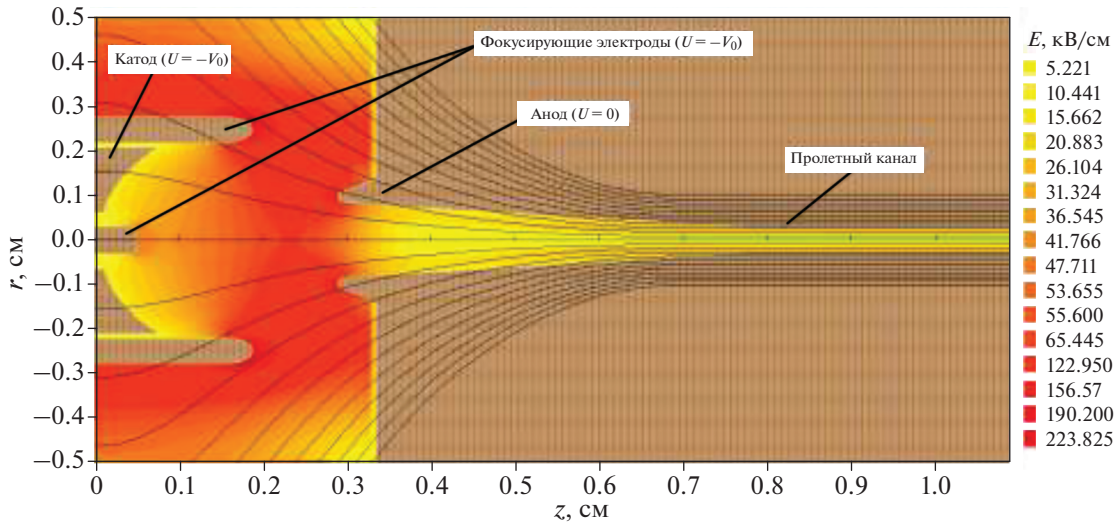
В качестве ускоряющего было выбрано напряжение 15 кВ для предотвращения вакуумных пробоев в резонаторах и элементах электронно-оптической системы прибора. Радиус пролетного канала был выбран равным 0.28 мм. Это значение соответствует условиям компромисса между величиной силы тока и эффективностью КРВ. Для фокусировки было выбрано магнитное поле с максимальной индукцией 1.0 Тл. Исходя из этих условий, была определена величина силы тока электронного пучка, которая составила 2.2 А. Выбранные в результате проведенного рассмотрения параметры электронного пучка и магнитного поля (табл. 1) послужили в качестве исходных при расчете и оптимизации конструкции узлов КРВ.

## КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

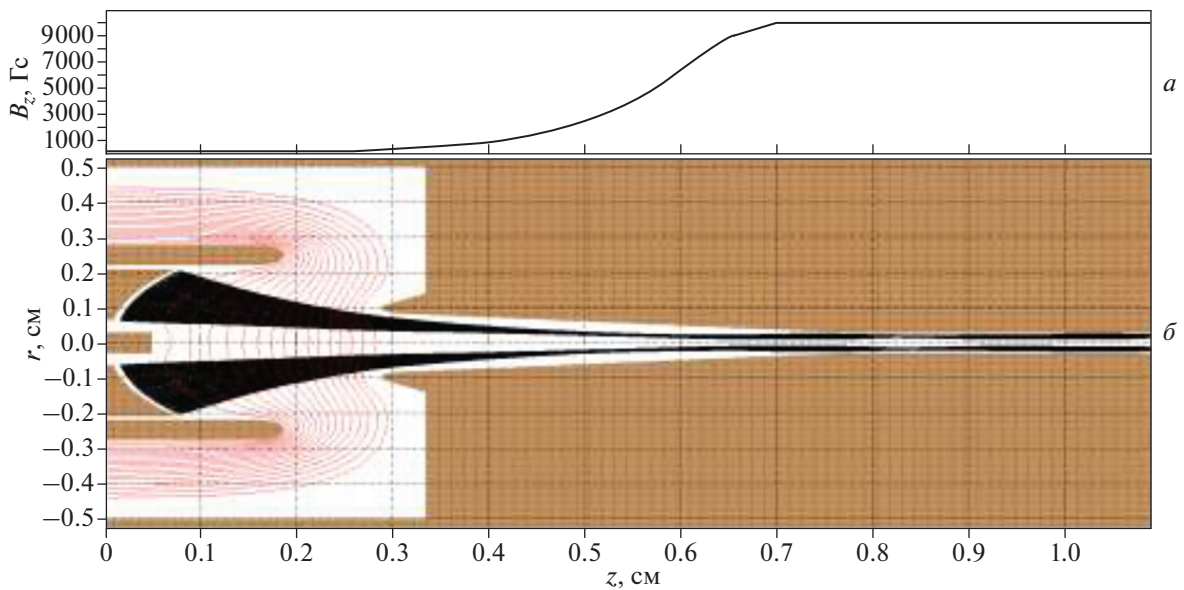
Для выбранных параметров электронного пучка плотность тока в нем при транспортировке в трубе дрейфа должна составлять около  $2000 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ . Поскольку в настоящее время термоэмиссионные катоды с приемлемым сроком службы позволяют получать ток с плотностью  $10\text{--}20 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ , то для разрабатываемого прибора требовалось разработать электронную пушку со сходящимся пучком, имеющую микропервианс  $1.2 \text{ мкА} \cdot \text{кВ}^{-3/2}$  и коэффициент компрессии 125. Форма электродов и осевое распределение магнитного поля были оптимизированы в результате численных расчетов с помощью комплекса программ PARS.

На основе указанных исходных данных была разработана конструкция электронной пушки типа пушки Пирса со сферическим катодом, позволяющая получить электронный пучок с заданными параметрами. Для подавления теплового расширения потока и обеспечения дальнейшей устойчивости электронного пучка в трубе дрейфа была выбрана схема с магнитно-экранированным катодом. На рис. 1 показаны форма электродов разработанной электронной пушки, силовые линии фокусирующего магнитного поля и распределение напряженности электрического поля, рассчитанное с учетом влияния пространственного заряда электронного потока.

В данной конструкции электронной пушки создаваемая на внешней кромке фокусирующего электрода максимальная напряженность электрического поля  $223 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$  является приемлемой с точки зрения опасности вакуумного пробоя. Численный анализ проводился методом последовательных приближений по пространственному заряду с использованием 80 трубок тока для дискре-



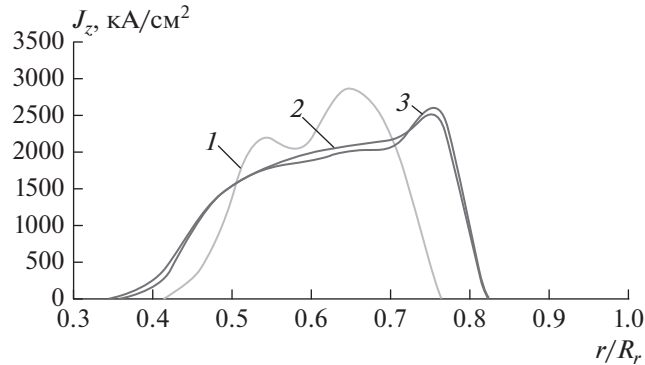
**Рис. 1.** Конструкция разработанной электронной пушки, силовые линии фокусирующего магнитного поля и рассчитанное распределение напряженности электрического поля с учетом пространственного заряда электронного пучка.



**Рис. 2.** Осевое распределение фокусирующего магнитного поля (*а*), эквипотенциали электростатического поля (красные кривые) и траектории тепловых электронов (черные кривые) в разработанной электронной пушке (*б*).

тизации электронного потока с катода. Значение силы тока эмиссии с катода, полученное в результате сходимости итераций, составило 2.2 А. За счет подобранной формы электродов удалось обеспечить работу катода в режиме ограничения плотности пространственным зарядом со средней плотностью тока эмиссии на катоде  $16 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$  с отклонением от среднего значения на краях катода 10%. Для обеспечения плавного ввода электронного пучка в пролетный канал прибора и сопряже-

ния фокусирующего магнитного поля с электронным пучком была проведена оптимизация формы фокусирующего магнитного поля. На рис. 2*а* приведено осевое распределение индукции магнитного поля на оси электронной пушки, полученное в результате расчетов. Траектории электронов и эквипотенциали электрического поля, установившиеся в результате итераций по пространственному заряду, показаны на рис. 2*б*.



**Рис. 3.** Зависимости плотности тока от радиуса, нормированного на радиус трубы дрейфа, в выходном сечении электронной пушки для холодного пучка (кривая 1), теплового с  $T_k = 1100$  К (кривая 2) и  $T_k = 1500$  К (кривая 3).

Как видно из рисунка, разработанная электронно-оптическая система электронной пушки обеспечивает плавное сжатие эмитированного катодом электронного пучка с минимальными пульсациями. Коэффициент компрессии разработанной электронной пушки достигает 125, что является весьма хорошим результатом для высокопервиансных термоэмиссионных электронных пушек со сходящимся электронным потоком.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РАЗБРОСА ПОПЕРЕЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА КАТОДЕ И УСТОЙЧИВОСТИ СФОРМИРОВАННОГО КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

При конструировании электронных пушек миллиметрового диапазона из-за малого размера поперечных размеров электронных потоков обязательно необходимо учитывать влияние начального разброса поперечных скоростей электронов, эмитированных с катода на их дальнейшую транспортировку в приборе [10]. Для исследования этого влияния на динамику электронного пучка в разработанной электронной пушке был использован алгоритм, учитывающий влияние разброса поперечных составляющих тепловых скоростей электронов на катоде, работающем в режиме ограничения плотности тока пространственным зарядом, описанный в работе [11] и включенный в комплекс программ PARS. При этом разброс касательных к поверхности составляющих скоростей электронов описывался распределением Максвелла для двух степеней свободы:

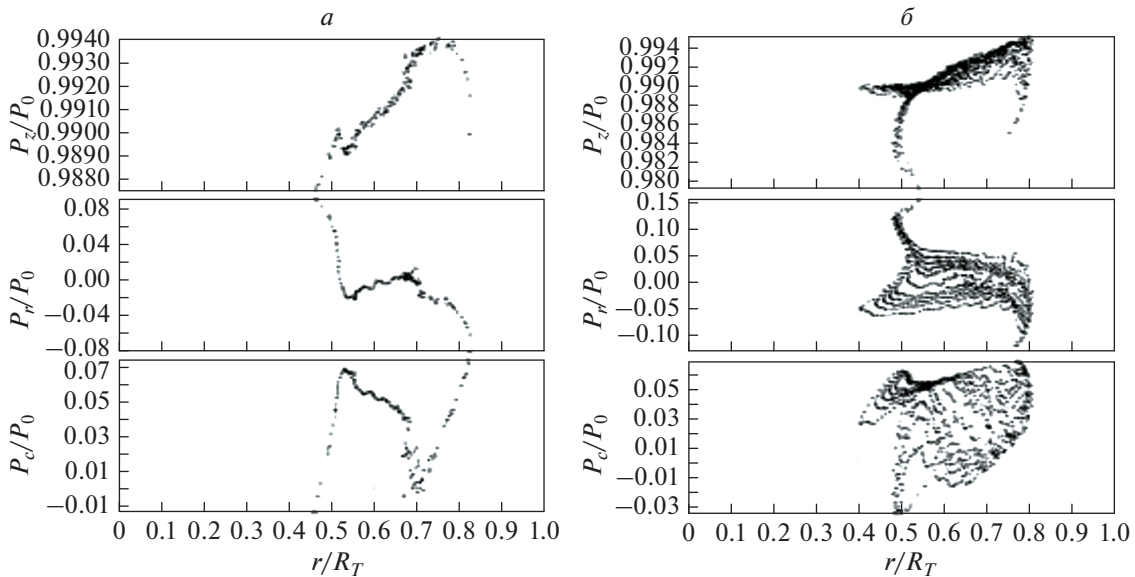
$$f(v_{\perp}) = 2 \frac{mv_{\perp}^2}{kT_k} \exp\left(-\frac{mv_{\perp}^2}{kT_k}\right). \quad (1)$$

В соответствии с этим распределением с каждого элементарного отрезка эквипотенциальной стартовой поверхности эмитировалось несколько уг-

ловых групп электронов, имеющих равный ток, с различными значениями угла влета, соответствующими разбиению плотности вероятности (1) на отрезки равной вероятности. Интервал изменения поперечной составляющей скорости ограничивался конечным значением, соответствующим 99% вероятности. Таким образом, при численном анализе не учитывалась лишь незначительная часть тепловых электронов, имеющих экстремальные поперечные компоненты скоростей на катоде. Такой подход позволил корректно учесть вклад испускаемых с катода электронов и проанализировать динамику подавляющего большинства тепловых электронов для различных значений температуры катода  $T_k$ . С помощью данного алгоритма разработанная конструкция электронной пушки была исследована на влияние теплового разброса поперечных скоростей. На рис. 3 приведены распределения плотности тока в выходном сечении электронной пушки для случая “холодного” электронного пучка (без учета тепловых скоростей) и для случаев температуры катода  $T_k = 1100$  и  $1500$  К.

Из анализа распределений следует, что в электронном пучке происходит незначительное перераспределение плотности тока с небольшим расплыванием внутренней и внешней границ пучка (около 10%). Об этом же свидетельствует приведенное на рис. 4 сравнение фазовых объемов “холодного” (рис. 4а) и “горячего” с  $T_k = 1300$  К (рис. 4б) электронных потоков в выходном сечении электронной пушки.

При численном моделировании динамики тепловых электронов использовалось 11 угловых групп, а общее число трубок тока при расчетах составляло 880. В целом выбранная конструкция электронной пушки с магнитно-экранированным катодом позволяет избежать сильного рас-



**Рис. 4.** Зависимости продольной, радиальной и азимутальной компонент импульса электронов в выходном сечении электронной пушки для “холодного” (а) и “горячего” с  $T_k = 1300$  К (б) электронных потоков.

плавания пучка за счет теплового разброса скоростей на катоде.

Для исследования устойчивости сформированного электронного потока во всем приборе был проведен численный анализ транспортировки пучка через систему взаимодействия в статическом режиме (без входного СВЧ сигнала). При этом моделирование проводилось для теплового электронного пучка с  $T_k = 1300$  К. Анализ показал, что в статическом режиме в системе взаимодействия клистрона не происходит оседания электронов на стенки трубы дрейфа, а все электроны достигают коллектора. Таким образом, принимая во внимание особенности вышеизложенного алгоритма учета теплового разброса поперечных скоростей электронов на катоде, в разработанной конструкции обеспечивается как минимум 99% токопрохождение сформированного электронного потока.

При транспортировке плотных кольцевых электронных потоков в пролетных каналах из-за наличия широкого азимутального разброса существует также опасность возникновения диокотронной неустойчивости [12], которая может ограничивать длину транспортировки пучка. Для оценки линейных инкрементов мод диокотронной неустойчивости использовались формулы работы [13]. Расчеты показали, что при заданных параметрах кольцевой пучок является устойчивым и может быть использован в системе взаимодействия КРВ без риска возникновения диокотронной неустойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных исследований разработана конструкция магнитно-экранированной высокопервиантной электронной пушки с коэффициентом компрессии, равным 125, а также конструкция электронно-оптической системы прибора, обеспечивающая формирование и 99% токопрохождение плотного электронного потока ( $2 \text{ кА/см}^2$ ) с силой тока 2.2 А и ускоряющим напряжением 15 кВ через систему взаимодействия мощного КРВ миллиметрового диапазона в статическом режиме. Проведенные исследования показали, что электронно-оптическая система клистрона является устойчивой к возмущениям электронного потока, вызванных тепловым разбросом поперечных скоростей электронов на катоде. Разработанные электронная пушка и система фокусировки обеспечивают формирование и транспортировку плотного электронного потока, с общей мощностью 33 кВт, что позволяет при использовании эффективной конструкции системы взаимодействия получить выходную мощность клистрона от 7 до 10 кВт.

Проведенные оценки линейных инкрементов мод диокотронной неустойчивости полученного кольцевого электронного пучка показали, что кольцевой пучок является устойчивым и может быть использован в системе взаимодействия КРВ без риска возникновения диокотронной неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках вы-

полнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Srivastava A.* // EJAET 2015. V. 2. No 8. P. 54.
2. *Booske J.H.* // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. No 5. Art. No 055502.
3. *Steer B., Roitman A., Horoyski P. et al.* // IEEE Nat. Radar Conf. Proc. (Pasadena, 2009).
4. *Pasour J., Wright E., Nguyen K.T. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61. No 6. P. 1630.
5. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Журн. радиоэлектрон. 2019. № 6. С. 1.
6. *Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. et al.* In: KEK report 1/1997, 1997. P. 185.
7. *Ding Y., Xiao X., Rodyakin V.E., Sandalov A.N.* // Proc. 2nd ICMWWT (Beijing, 2000). P. 299.
8. *Shen B., Ding Y., Sandalov A.N. et al.* // Proc. IVESC2004. (China, 2004). P. 312.
9. *Shen B., Ding Y., Zhang Z. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61. No 6. P. 1848.
10. *Алямовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 454 с.
11. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Журн. радиоэлектрон. 2020. № 6. С. 1.
12. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Вестн. МГУ. Физ. астрон. 2019. № 6. С. 614.
13. *Миллер Р.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984. 432 с.

## Electron gun for hollow beam of W-band high power extended interaction klystron

V. E. Rodyakin<sup>a,\*</sup>, V. M. Pikunov<sup>a</sup>, V. N. Aksenov<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>*Institute on Laser and Information Technologies – Branch of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” RAS, Shatura, 140700 Russia*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Physics Department, Moscow, 119991 Russia*

<sup>c</sup>*Lomonosov Moscow State University, International Laser Center, Moscow, 119991 Russia*

\*E-mail: vrodyakin@mail.ru

Received July 20, 2020; revised August 28, 2020; accepted September 28, 2020

As a result of optimization using computer code PARS, the design of electron gun for hollow electron beam of high power W-band extended interaction klystron have been developed. Electron gun has high beam current density convergence factor 90 and gives electron beam current 2.2 A. Magnetic focusing system provides 99% beam current transmission throw klystron interaction region with taking into account of thermal distributions of transverse energy of emitted electrons.