

Электронно-оптическая система для низковольтных ламп обратной волны с компрессией ленточного пучка

Исследована конструкция системы формирования интенсивного ленточного пучка, позволяющая понизить плотность тока на катоде за счет частичного экранирования сильного внешнего магнитного поля в области электронной пушки с компрессией. Предложен способ улучшения токопрохождения в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Показана возможность дальнейшего улучшения токопрохождения за счет лучшего согласования электронно-оптической и магнитной систем.

Ключевые слова: Электронная оптика, ленточный пучок, компрессия пучка, магнитное поле, ЛОВ

Для проведения фундаментальных исследований в ряде областей физики, химии и структурной биологии требуется иметь генераторы терагерцового излучения, обладающие возможностью перестройки частоты в широких пределах [1]. С точки зрения диапазона перестройки лампы обратной волны (ЛОВ) не имеют конкурентов [2, 3]. Вместе с тем, особенности формирования и транспортировки электронных потоков, обеспечивающих генерацию колебаний на заданной частоте, предъявляют повышенные требования ко всем элементам конструкций ЛОВ [3].

В настоящее время АО НПП «Исток» серийно выпускаются ЛОВ с неэкранированным катодом и не имеющие компрессии пучка в пушке, что влечет необходимость использования сильного магнитного поля для транспортировки пучка с плотностью тока порядка 140 А/см^2 . На рис. 1 схематически представлена конструкция ЛОВ (размеры даны в миллиметрах) с плоским металлопористым катодом – 1, формирующим ленточный пучок – 2, взаимодействующий со штыревой замедляющей системой – 3. Вывод энергии осуществляется через окно – 4. Перестройка частоты такого генератора обеспечивается варьированием ускоряющего напряжения в пределах 3–6 кВ.

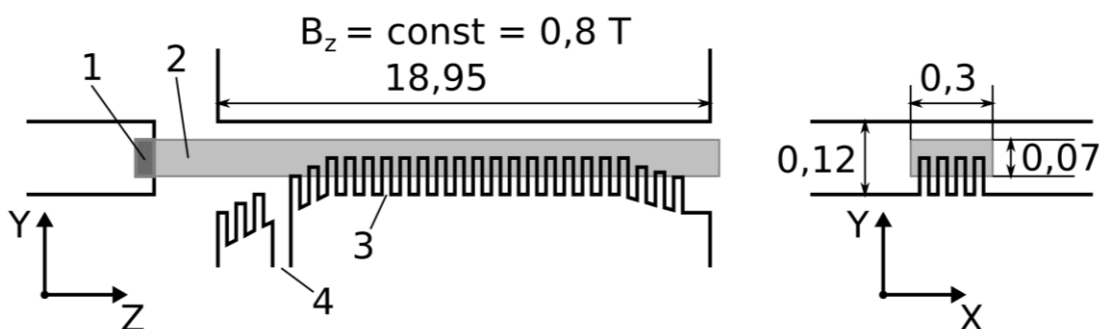


Рис. 1. Схематическое изображение ЛОВ с плоским катодом

Важно отметить, что ограничение ленточного потока по ширине (координата X), движущегося в соленоидальном магнитном поле, обуславливает развитие диокотронной неустойчивости, ограничивающей токопрохождение интенсивных ленточных пучков в длинных каналах [4–6].

Именно для подавления диокотронной неустойчивости применяется жесткая магнитная фокусировка пучка в соленоидальных магнитных полях (порядка 1 Т и более) [6–8]. Другой важной проблемой является согласование электронной пушки с магнитной системой, что представляет собой сложную задачу даже в узком диапазоне ускоряющих напряжений. Для ленточных пучков конечной ширины неудачное согласование может спровоцировать быстрое развитие диокотронной неустойчивости.

Все это оправдывает погружение катода в сильное магнитное поле с целью формирования жесткого ленточного потока на старте и последующей его транспортировки в пространстве взаимодействия в широком диапазоне ускоряющих напряжений. К сожалению, долговечность такого катода, определяемая плотностью отбираемого с него тока, сравнительно мала. Кроме того, особенности технологического процесса производства металлопористых катодов не позволяют обеспечить высокий процент выхода годных вследствие малых размеров деталей.

В данной работе решается задача проектирования новой конструкции электронно-оптической системы (ЭОС), обеспечивающей компрессию пучка, и, следовательно, увеличенные размеры катода, пониженную плотность токоотбора, а также больший срок службы. На рис. 2 представлена предлагаемая электронно-оптическая система (референтная), состоящая из плоского катода – 1, фокусирующего электрода – 2, анодного раструба – 3, анода – 4, пролетного канала – 5.

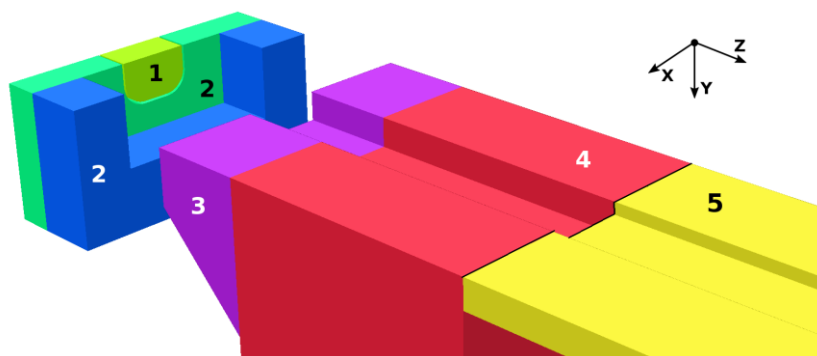


Рис. 2. Геометрическая модель референтной пушки

Замечание об именовании характеристических размеров. Ширина откладывается по оси X , высота – по оси Y , а длина по оси Z . Таким образом, в рассматриваемой конструкции высота эмитирующей поверхности катода составляет 475 мкм, ширина – 380 мкм. Высота выреза в фокусирующем электроде 800 мкм, ширина – 900 мкм. Длина зазора между фокусирующим электродом и анодным раструбом – 655 мкм. Высота отверстия в анодном раструбе и аноде – 300 мкм; высота пролетного канала – 120 мкм. Ширина пролетного канала – 400 мкм.

На рис. 3. слева представлены для сравнения левая и правая части двух различных магнитных экранов (NS25 – левая половина, NS27 – правая половина), а также вид экранированной пушки – справа.

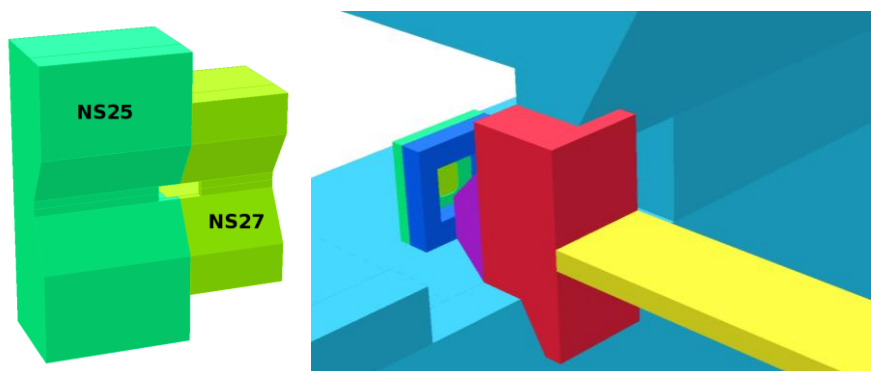


Рис. 3. Экранирование электронной пушки

На рис. 4. представлен типичный ленточный поток, формируемый референтной системой, а также его поперечное сечение в плоскости (z-координата 16,2 мм). Можно заметить, что края пучка закручиваются против часовой стрелки относительно оси Z (ось Z направлена на нас).

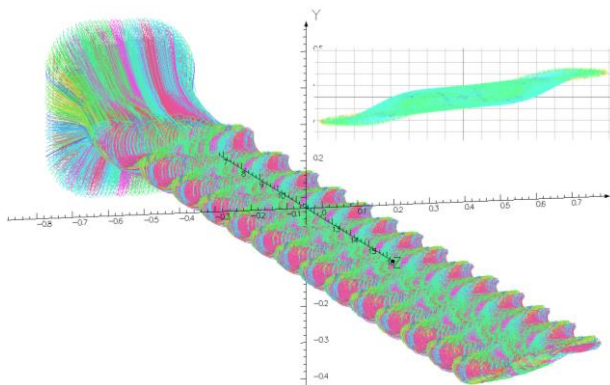


Рис. 4. S-образная деформация пучка

В табл. 1 приведены основные результаты траекторного анализа референтной системы для двух магнитных экранов, габариты которых отличаются в 1,5 раза, для различных напряжений на аноде (U_a) и фокусирующем электроде ($U_{фэ}$).

Табл. 1. – основные результаты траекторного анализа референтной пушки

$U_{фэ}$, В	U_a , кВ	Экран NS27 (20x20) мм		Экран NS25 (30x30) мм	
		I_k , мА	T, %	I_k , мА	T, %
0В	6	73,94	96,39 / 86,60 / 76,58	73,94	96,99 / 86,40 / 80,10
	5	54,18	96,10 / 88,07 / 79,55	56,37	96,99 / 88,91 / 84,04
	4	40,46	95,81 / 90,18 / 83,64	40,46	97,11 / 91,11 / 88,47
	3	26,41	95,66 / 92,07 / 86,65	26,41	97,03 / 93,03 / 90,70
-15	6	66,41	100 / 91,03 / 83,94	66,41	100 / 91,55 / 88,26
	5	49,58	99,88 / 92,06 / 86,75	49,58	100 / 93,05 / 91,04
	4	34,48	99,47 / 93,44 / 89,67	34,48	99,73 / 94,41 / 92,41
	3	21,35	98,60 / 93,65 / 90,99	21,3	99,18 / 95,27 / 93,45

Токопрохождение (Т) измеряется в процентах и определяется в трех сечениях: перед ступенькой пролетного канала (z-координата – 3 мм); после ступеньки (z-координата – 4 мм); на выходе из пространства взаимодействия (z-координата – 20,15 мм). Ступенька пролетного канала отмечена на рис. 2 линией. Следует отметить, что увеличение габаритов рамки магнитного экрана в 1,5 раза улучшает токопрохождение приблизительно на 4% за счет лучшего экранирования катода.

Принимая во внимание закручивание краев пучка против часовой стрелки, была предпринята попытка повернуть катод и фокусирующий электрод электронной пушки в противоположную сторону (по часовой стрелке) на небольшой угол (до 20 градусов) с тем, чтобы скомпенсировать S-образную деформацию сечения пучка. Вычислительный эксперимент показал, вопреки ожиданиям, резкое падение токопрохождения (20%).

В результате исследования пучка по сечениям было установлено, что траектории, находящиеся в первом квадранте сечения потока на входе в переходную область магнитного поля, имеют тенденцию к дрейфу во второй квадрант. Крен пушки по часовой стрелке приводит к тому, что второй квадрант уже заполнен траекториями, которые вследствие дрейфа начинают оседать уже на стенках анодного раструба.

На основании полученных результатов было принято решение наклонить пушку против часовой стрелки (рис. 5) с тем, чтобы уменьшить количество траекторий во втором квадранте поперечного сечения пучка, соответствующего началу переходной области, и уменьшить токооседание на входе в канал. Результаты моделирования представлены в табл. 2. Как и ожидалось, доля траекторий, достигающих выходного сечения возросла. Следует также отметить, что вариация напряжения на фокусирующем электроде заметно сказывается только в том случае, когда используется магнитный экран NS27.

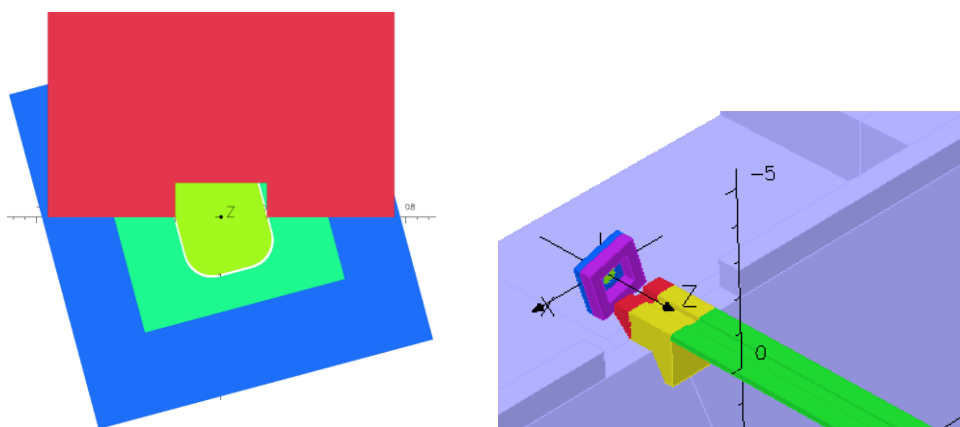


Рис. 5. Пушка, повернутая против часовой стрелки

Табл. 2. – основные результаты траекторного анализа наклоненной пушки

U _{фэ} , В	U _а , кВ	NS27		NS25	
		I _к , мА	T, %	I _к , мА	T, %
0В	6	74,02	100 / 96,60 / 90,46	74,02	100 / 95,74 / 92,31
	5	56,43	100 / 98,02 / 94,30	56,43	100 / 97,35 / 94,59
	4	40,50	100 / 98,80 / 96,52	40,50	100 / 98,47 / 96,67
	3	26,43	100 / 99,82 / 98,45	26,43	100 / 99,53 / 98,26
-15	6	66,50	100 / 97,43 / 92,26	66,50	100 / 96,95 / 92,60
	5	49,64	100 / 97,99 / 93,07	49,64	100 / 97,78 / 93,83
	4	34,52	99,80 / 98,20 / 93,97	34,47	99,85 / 98,24 / 94,43
	3	21,38	99,35 / 96,15 / 94,62	21,38	99,42 / 96,76 / 94,99

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Электронная пушка, обеспечивающая требуемую компрессию, должна быть хорошо экранирована от сильного внешнего магнитного поля 0,8 Т (поле на катоде, обеспечиваемое экраном NS25 составляет порядка 0,018 Т, что возможно только при использовании сравнительно громоздких экранов).

- Крен электронной пушки в сторону, соответствующую закручиванию краев ленточного потока, может заметно увеличить токопрохождение за счет более благоприятного распределения частиц в переходной области магнитного поля, а значит лучшего согласования электронно-оптической и магнитной систем формирования и транспортировки ленточного потока, что позволяет обеспечить токопрохождение в канале на уровне (96–98)%.

- Очевидно, что рассмотренные варианты магнитных экранов не исчерпывают всего многообразия возможных конструкций и в дальнейшем могут и должны быть оптимизированы, однако разработка критериев такой оптимизации является предметом отдельного исследования.

Следует особо подчеркнуть, что поведение ленточного электронного потока конечной ширины гораздо сложнее, чем его описание в двумерной постановке. Для успешного решения задачи транспортировки должны быть тщательно исследованы особенности прохождения переходной области магнитного поля. Предложенный в настоящей работе способ повышения токопрохождения за счет поворота электронной пушки вокруг оси Z является первым шагом в этом направлении.

Авторы выражают благодарность Ларисе Александровне Сапрынской и Ирине Петровне Натуре за проведение расчетов в двумерной постановке и ряд ценных замечаний.

Библиографический список

1. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. Освоение терагерцового диапазона источники и приложения. УФН, № 8. – 2011, С. 867–864
2. Айхмайер Дж., Тамм М. Справочник по вакуумной электронике. Компоненты и устройства. – М.: «Техносфера», 2011. – 504 с.
3. Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев В.С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. – М.: «Радио и связь», 1985. – 136 с.
4. Nguen K., Pasour J., Antonsen T., Larsen P., Petillo J., Levush B. Intense Sheet Electron Beam Transport in a Uniform Solenoidal Magnetic Field. 2009 IEEE Trans. On Electron Devices 56 744.
5. Wang J.-X., Barnett L., Luhmann N., Shin Y.-M., Humphries S. Electron Beam Transport Analysis of W-band sheet beam klystron. 2010 Physics of Plasmas 17 043111.
6. Pasour J., Nguen K., Wright E., Balkcum A., Atkinson J., Cusick M., Levush B. Demonstration of a 100-kW Solenoidally Focused Sheet Electron Beam for Millimeter-Wave Amplifiers. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 58, No 6, 2011, pp. 1792–1797.
7. Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В. Формирование высокоперевансных тонких ленточных электронных потоков в слабых магнитных полях. Труды 13-й международной конференции, КрыМиКо 2003, 8-12 сентября 2003г., Севастополь, Вебер, 2003, с.291.
8. Ю.А.Будзинский, С.В.Быковский, И.И.Голеницкий, Н.Г.Духина. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства 8-мм диапазона длин волн. Труды 25-й международной конференции в 2т, КрыМиКо 2015, 6-12 сентября 2015г., Севастополь, том 1, с.181-182.