

Н. С. ЗИНЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук,  
И. В. ЛОПАТИН, канд. физ.-мат. наук, В. Е. КАПИТОНОВ

### ШУМЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ, ФОРМИРУЕМЫХ ВЫСОКОПЕРВЕАНСНЫМИ ПУШКАМИ С ПРОДОЛЬНОЙ КОМПРЕССИЕЙ

Основным источником шумов в вакуумных электроннолучевых приборах являются шумы электронного пучка. До последнего времени шумы исследовались в пучках с малыми токами (единицы миллиампер) и первеансами ( $1-2 \text{ мка}/\text{в}^{3/2}$ ).

В данной работе приводятся результаты измерений шумов в пучках, формируемых высокопервеансными пушками с продольной компрессией [1—3]. Последние обладают рядом особенностей: 1) формируемые ими пучки имеют очень высокие первеансы (до  $60 \text{ мка}/\text{в}^{3/2}$  в пучках кругового сечения); 2) параметры пушки и условия формирования пучка можно изменять в больших пределах; 3) режим работы катода можно изменять от ограничения тока пространственным зарядом до насыщения тока; 4) катод пушки хорошо защищен от ионной бомбардировки. Кроме того, как показали измерения [4], радиальное распределение плотности тока в пучке можно изменять при сохранении хорошей ламинарности, больших первеансов и высоких коэффициентах токопрохождения. Поэтому шумы в высокопервеансных пучках измерялись при изменении режима питания пушки в широком интервале.

#### Методика измерений и экспериментальная установка

Измерение шумов в пучках проводилось на выходе из пушки и по длине пучка вне пушки. В первом случае пучок находился в электрическом поле, во втором — в магнитном.

Мощность шумов в пучке в выходной плоскости пушки измерялась с помощью тороидального резонатора, который являлся одновременно второй диафрагмой пушки. Резонатор имел высокочастотный зазор  $0,9 \text{ мм}$ , а диаметр центрального отверстия  $2,25 \text{ мм}$ . На частоте  $9400 \text{ мгц}$  его собственная добротность составляла  $315$ , нагруженная добротность  $98$ , а полоса пропускания  $65 \text{ мгц}$ . Связь резонатора с волноводом измерительного устройства осуществлялась коаксиалом.

Распределение шумов по длине пучка измерялось прибором, в котором электронная пушка перемещалась относительно резонатора. Несоосность пушки относительно резонатора на максимальном удалении ( $65 \text{ мм}$ ) не превышала  $0,05 \text{ мм}$ . В этом случае резонатор на частоте  $9400 \text{ мгц}$  имел собственную доб-

ротность 440, нагруженную добротность 185 и полосу пропускания 42 мгц при высокочастотном зазоре 0,6 мм.

Мощность шумов измерялась в децибелах относительно уровня дробовых шумов в результате сравнения с мощностью волноводного газоразрядного шумового генератора, калибруемого по мощности дробовых шумов. Ноль-индикатором служил радиометрический модуляционный приемник типа П5-10 с предельной чувствительностью  $3 \cdot 10^{-15}$  вт и полосой пропускания 8 мгц. Шумовой сигнал подавался для сравнения на один вход приемника через два аттенюатора поглощающего типа, а на второй вход подавались измеряемые шумы. Первый аттенюатор калибровался по уровню дробовых шумов при работе катода пушки в режиме насыщения тока. Последний получался при эквивалентном включении пушки (потенциал первой диафрагмы  $V_1$  равен потенциалу второй диафрагмы  $V_2$ ) с малыми токами пучка в результате понижения температуры катода и увеличения потенциала  $V_1$  ( $V_1 = 1500, 2000, 3000$  в). Уровень дробовых шумов для больших токов пучка определялся аппроксимированием линейного участка зависимости показаний аттенюатора от величины тока до пересечения с осью абсцисс. Наличие режима насыщения проверялось по вольт-амперным характеристикам пушки.

Данные электронной пушки, применявшейся в экспериментах, следующие: первеанс  $2 - 60$  мка/ $e^{3/2}$ ; ток пучка  $I - 220$  ма; потенциал пучка  $100 - 1000$  в; потенциал первой диафрагмы  $400 - 3000$  в; коэффициент токопрохождения не менее 99%; диаметр пучка на выходе из пушки  $\sim 2$  мм. В пушке использовался импрегнированный (алюминатный) катод. Пучки, формируемые такой пушкой, исследовались ранее. В частности, были проведены измерения профилей пучков, радиального распределения плотности тока, ламинарности [4] и распределения электронов по скоростям [6].

После прохождения через резонатор (первый случай) пучок попадал на коллектор, расположенный на расстоянии 25 мм от пушки. Распределение шумов по длине пучка измерялось при наложении магнитного поля на пучок за пределами пушки. Пушка экранировалась от магнитного поля экраном из стали «армко». Однородное магнитное поле с напряженностью до 1000 э создавалось с помощью катушек Гельмгольца. Величина магнитного поля, необходимая для фокусировки, выбиралась по максимуму токопрохождения через резонатор. Коэффициент волнистости пучка в зависимости от режима работы пушки изменялся от 1,05 до 1,4.

Измерения проводились при давлении  $(3 - 5) \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.

Устройство измерительной установки позволяло измерять температуру катода с точностью  $\pm 20^\circ$  С.

## Измерение шумов в пучке на выходе из пушки

Трехэлектродные пушки с продольной компрессией позволяют в больших пределах изменять параметры пучков и условия их формирования. Поэтому важно установить зависимости мощности шумов и степени подавления дробовых шумов в пушке от потенциалов диафрагм  $V_1$  и  $V_2$  и тока пучка  $I_{e2}$ .

Зависимости мощности шумов от потенциала первой диафрагмы измерялись при постоянных значениях тока пучка и потенциала второй диафрагмы. Для сохранения постоянной величины тока пучка (и первеанса  $P_2$ ) при повышении потенциала  $V_1$  температура катода уменьшалась. Измерения показали, что увеличение потенциала  $V_1$  вызывает повышение уровня шумов, что связано с уменьшением степени подавления дробовых шумов в минимуме потенциала при переходе к режиму насыщения тока. Например, для  $I_{e2} = 100$  ма,  $P_2 = 12,5$  мка/в<sup>3/2</sup>,  $V_2 = 400$  в изменение  $V_1$  от 1750 до 2300 в вызывает увеличение мощности шумов от 34 до 26 дб ниже уровня дробовых шумов. Соответствующее изменение температуры катода составляет 100° С (от 1150 до 1050° С). Крутизна зависимостей возрастает с увеличением первеанса пучка.

Зависимости мощности шумов от потенциала второй диафрагмы измерялись при фиксированном токе пучка, когда потенциал  $V_1$  и температура катода  $T_k$  являлись параметрами. Было установлено, что уменьшение потенциала  $V_2$  вызывает значительное снижение мощности шумов. Например, при  $I_{e2} = 100$  ма и  $V_1 = 1770$  в уменьшение потенциала  $V_2$  от 1000 до 200 в вызывает уменьшение мощности шумов от  $A = 30$  дб до  $A = 36$  дб ниже уровня дробовых шумов. Относительные изменения мощности шумов  $\Delta A / \Delta V_1$  больше  $\Delta A / \Delta V_2$  почти в два раза и составляют 0,014 и 0,007 дб/в соответственно. Это объясняется тем, что потенциал первой диафрагмы оказывает большее влияние на режим работы катода и многоскоростную область пушки, чем потенциал второй диафрагмы.

Зависимости мощности шумов от тока пучка измерялись при постоянных потенциалах диафрагм, что обеспечивалось изменением температуры катода. В этом случае увеличение тока пучка и первеанса также вызывает уменьшение мощности шумов.

Экспериментальные зависимости мощности шумов от первеанса  $P_2 = I_{e2} / V_2^{3/2}$  мка/в, изменяющегося за счет тока пучка или его потенциала, представлены на рис. 1. Они получены при различных потенциалах: 1 —  $V_1 = 1800$  в,  $I_{e2} = 100$  ма,  $V_2$  изменялся от 300 до 1000 в; 2 —  $V_1 = 2100$  в,  $I_{e2} = 100$  ма,  $V_2$  изменялся от 300 до 1000 в; 3 —  $V_1 = 840$  в,  $V_2 = 200$  в,  $I_{e2}$  изменялся от 5 до 38 ма. Как следует из рисунка, увеличение первеанса вызывает уменьшение мощности шумов. Уменьшение крутизны зависимостей при высоких значениях первеанса обусловлено главным образом

увеличением шумов токов перехвата на диафрагмы и измерительный резонатор. Общий ток перехвата равен  $I_1 + I_2 = (1 - \eta) I_k$  ( $\eta$  — коэффициент токопрохождения;  $I_k$  — катодный ток;  $I_1, I_2$  — токи перехвата на первую диафрагму и резонатор). Экспериментальные данные показывают (рис. 1), что с ростом первеанса токи перехвата увеличиваются и для условий, соответствующих

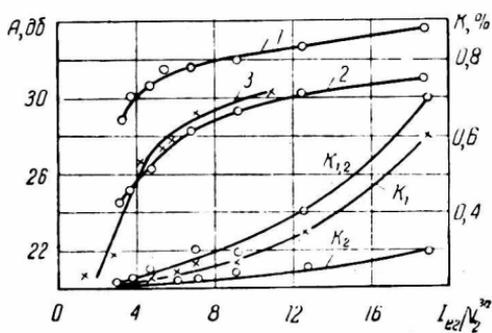


Рис. 1. Зависимость мощности шумов от первеанса пучка.

кривой 1, коэффициент токоперехвата на первую диафрагму и резонатор  $K = (I_1 + I_2) / I_k \cdot 100\%$  изменяется от 0,01 до 2,4%, на первую диафрагму  $K_1 = I_1 / I_k \cdot 100\%$  — от 0,05 до 1,8% и на резонатор  $K_2 = I_2 / I_k \cdot 100\%$  — от 0,015 до 0,6%.

Экспериментальные данные показывают, что мощность шумов в пучках зависит от их параметров и условий формирования.

Минимальное значение мощности шумов в диапазоне 3 см достигает 36 дБ ниже уровня дробовых шумов при оптимальном выборе режима питания пушки с продольной компрессией.

### Распределение мощности шумов по длине пучка

Шумовые волны пространственного заряда исследовались при наложении на пучок фокусирующего магнитного поля (бриллюэновская фокусировка), напряженность которого  $H$  являлась дополнительным параметром. Измерение распределения мощности шумов по длине пучка позволяло определять уровень шумов в максимуме ( $A_{\max}$ ) и минимуме ( $A_{\min}$ ) волны, ее длину и шумовой параметр  $S$ . Последний рассчитывался по формуле

$$S = 1,608 \cdot 10^{-24} \cdot 2 \frac{V_2^{3/2}}{\lambda} \cdot 10^{\frac{A_{\max} + A_{\min}}{20}} \text{ вт} \cdot \text{сек},$$

где  $\lambda$  — длина шумовой волны. Минимальный теоретический коэффициент шума прибора определялся по значению параметра  $S$  в предположении, что шумовой параметр  $\Pi$  равен нулю.

Измерения показали, что при постоянных токе пучка и потенциале  $V_2$  уменьшение потенциала  $V_1$  снижает мощность шумов в максимуме и минимуме волны, величину ( $A_{\max} + A_{\min}$ ) и шумовой параметр  $S$ . Уменьшение этих величин происходит также при увеличении первеанса вследствие понижения потенциала  $V_2$  и увеличении тока пучка. Наименьшее значение  $A_{\min}$  состав-

ляет 34 дб ниже уровня дробовых шумов. Кривые распределения мощности шумов по длине пучка, соответствующие различным значениям тока (5,15 и 39 ма), приведены на рис. 2. С ростом тока и первеанса  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$  и  $(A_{\max} + A_{\min})$ , а следовательно, и параметр  $S$  уменьшаются. Наименьшее значение  $A_{\min}$  составляет 36 дб ниже уровня дробовых шумов в случае высокого первеанса ( $13,5 \text{ мка/в}^{3/2}$ ).

Наименьшие значения  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$ ,  $A_{\max} + A_{\min}$ ,  $S$  и минимального теоретического коэффициента шума  $F_{\min}$  получаются в магнитных полях, напряженность которых близка к расчетным (бриллюэновским) значениям. Увеличение магнитного поля вызывает рост мощности шумов. Например, при  $I_{e2} = 15 \text{ ма}$ ,  $V_2 = 100 \text{ в}$ ,  $V_1 = 840 \text{ в}$ ,  $P_2 = 15 \text{ мка/в}^{3/2}$  и  $T_k = 1050^\circ \text{C}$

изменение магнитного поля от 320 до 900 э вызывает увеличение мощности шумов  $A_{\min}$  от 36 до 26 дб и  $A_{\max}$  от 33 до 15 дб ниже уровня дробовых шумов. Увеличение мощности шумов в этом случае вызвано возникновением резко выраженной неламинарности при значениях  $H$ , больших расчетных в 2—3 раза [4].

Следует отметить, что коэффициент токопрохождения через резонатор периодически изменялся при перемещении последнего вдоль пучка. Однако значения коэффициентов токопрохождения через пушку и резонатор были не менее 99%. Сопоставление зависимостей коэффициента токопрохождения и мощности шумов от расстояния между пушкой и резонатором показало, что шумы токоперехвата не оказывали заметного влияния на результаты измерений.

Измеренная длина шумовой волны хорошо согласуется с расчетными значениями. На рис. 3 приведены зависимости длины волны шумов от  $I_{e2}$  и  $V_2$ , где пунктирные линии расчетные [6],

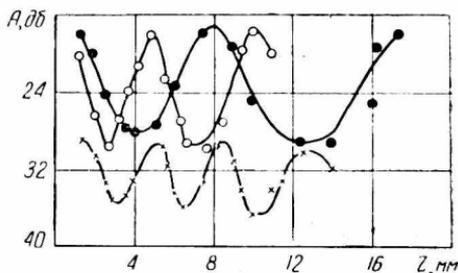


Рис. 2. Распределение мощности шумов по длине пучка при различных токах ( $V_1 = 840 \text{ в}$ ,  $V_2 = 200 \text{ в}$ ):  
 ●●● —  $I_{e2} = 5 \text{ ма}$ ,  $H = 150 \text{ э}$ ,  $T_k = 885^\circ \text{C}$ ;  
 ○○○ —  $I_{e2} = 15 \text{ ма}$ ,  $H = 900 \text{ э}$ ,  $T_k = 960^\circ \text{C}$ ;  
 ××× —  $I_{e2} = 39 \text{ ма}$ ,  $H = 750 \text{ э}$ ,  $T_k = 1200^\circ \text{C}$ .

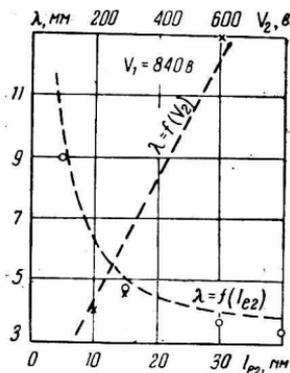


Рис. 3. Зависимости длины шумовой волны от тока пучка и потенциала второй диафрагмы.

а экспериментальные точки показаны кружочками и крестиками. Кривая  $\lambda = f(I_{e2})$  получена при  $V_2 = 200$  в, кривая  $\lambda = f(V_2)$  при  $I_{e2} = 30$  ма. В расчетах использовались ранее полученные значения радиуса пучка [4]. Изменение потенциала первой диафрагмы при постоянных значениях  $V_2$  и  $I_{e2}$  практически не вызывает изменения длины шумовой волны.

Использование описанных выше закономерностей позволяет получить минимальную мощность шумов при заданных значениях тока пучка и скорости электронов. Это достигается изменением условий формирования и управлением многоскоростной областью трехэлектродных высокоперевансных пушек с продольной компрессией. Наименьшее значение шумового параметра  $S$ , полученное в высокоперевансной пушке с током 30 ма, составляет  $1,3 \cdot 10^{-21}$  вт·сек, а коэффициента  $F_{\min} — 5$  дб. Такие значения  $S$  и  $F_{\min}$  получаются при больших перевансах пучка (10—20 мка/в<sup>3/2</sup>). Эти данные соответствуют лучшим известным малоглумящим пушкам, исследованным в диапазоне 3 см (с низкими перевансами). Сравнение с магнетронными пушками при равных перевансах пучка показывает, что электронные пушки с продольной компрессией формируют пучки, в которых уровень шумов ниже на 3—4 порядка.

## ВЫВОДЫ

Трехэлектродные электронные пушки с продольной компрессией формируют высокоперевансные пучки с мощностью шумов, значительно меньшей уровня дробовых шумов. Мощность шумов и шумовой параметр  $S$  достигают минимальных значений при наибольших значениях переванса ( $\sim 20$  мка/в<sup>3/2</sup> при бриллиантовой фокусировке). Наименьшие значения мощности шумов, параметра  $S$  и минимального теоретического коэффициента шума получаются при минимальном потенциале первой диафрагмы, достаточном для формирования пучка с заданным перевансом.

В оптимальных режимах работы пушки мощность шумов в пучке на 36—38 дб ниже уровня дробовых шумов; в этом случае в пучках с током  $\sim 30$  ма параметр  $S$  имеет значение  $1,3 \cdot 10^{-21}$  вт·сек, а минимальный коэффициент шума достигает 5 дб, что на 3—4 порядка ниже, чем в пучках, формируемых магнетронными пушками при тех же перевансах.

В магнитных полях с напряженностью, близкой к расчетному значению, шумы имеют наименьшую величину. Увеличение магнитного поля приводит к росту мощности шумов, вызванному неламинарностью пучка.

Длина волны шумов зависит от тока пучка и потенциала второй диафрагмы и практически не зависит от потенциала  $V_1$ . Влияние температуры катода на шумы значительно меньше режима питания пушки.

Полученные в эксперименте данные являются следствием возможности управления условиями формирования высокоперевансных пучков в пушках с продольной компрессией и не относятся к предельно достижимым. Использование особенностей шумов этого типа позволит, по-видимому, снизить мощность шумов по сравнению с полученными результатами. Для этого необходимо создать полную теорию шумов рассматриваемых пушек, что, на наш взгляд, может быть выполнено с учетом провисания потенциала в пучке, проходящем в замедляющем поле.

Результаты исследования шумов в высокоперевансных пучках показывают перспективность использования электронных пушек с продольной компрессией в малозумящих приборах СВЧ-диапазона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко Н. С., Саенко В. И. Расчет распределения потенциала в системе цилиндрический пучок — постоянное электрическое поле. — ЖТФ, 1963, 33, 2, с. 154—156.
2. Зинченко Н. С. Теория трехэлектродных электронных пушек, использующих продольную компрессию. — ЖТФ, 1968, 38, с. 184—188.
3. Зинченко Н. С. Теория, экспериментальные результаты и некоторые применения высокоперевансных трехэлектродных пушек. — УФЖ, 1967, 12, с. 1828—1832.
4. Зинченко Н. С., Лопатин И. В. Экспериментальное исследование свойств пучков высокоперевансных трехэлектродных пушек. — УФЖ, 1971, 16, 6, с. 999—1004.
5. Зинченко Н. С., Лопатин И. В. Распределение электронов по скоростям в пучках, формируемых высокопереванскими трехэлектродными пушками. — УФЖ, 1972, 17, 7, с. 1100—1105.
6. Пирс Дж. Р. Лампа с бегущей волной, пер. с англ. М., «Советское радио», 1962, с. 79—100.