

УДК

Увеличение КПД ЛБВ W-диапазона при неизменных энергетических параметрах электронного пучка

А.А. Иванов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: в данной работе исследовались возможности улучшения электродинамических характеристик замедляющей системы типа «петляющий волновод» разработанной ЛБВ W-диапазона. Проведены расчёты выходных параметров и ширины рабочей полосы ЛБВ. Определена оптимальная конструкция ЗС, позволяющая увеличить выходную мощность и коэффициент усиления при неизменных энергетических характеристиках электронного пучка.

Ключевые слова: ЛБВ, замедляющая система, «петляющий волновод», сопротивление связи, рабочая полоса, коэффициент усиления, КПД

1. Введение

В нашей предыдущей работе [1] были представлены расчётные и экспериментальные результаты разработки ЛБВ W-диапазона длин волн. В её конструкции применяется двухсекционная цельнометаллическая замедляющая система (ЗС) типа «модифицированный петляющий волновод» (МПВ), электронная пушка с промежуточным анодом, магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) и одноступенчатый коллектор с рекуперацией.

Расчет выходных параметров проводился для модели ЛБВ с длиной замедляющей системы (ЗС) 80мм, в поле МПФС с амплитудой около 4000 Гс, ускоряющим напряжением 12 кВ, током пучка 90 мА с токопрохождением 100% и входным сигналом мощностью 35 мВт на центральной частоте рабочей полосы. Расчетная мощность СВЧ сигнала на выходе замедляющей системы ЛБВ составила 20-22 Вт. Электронный КПД не более 2%.

Реальная величина выходной мощности получилась меньше расчетной, из-за влияния неучтенных факторов, таких как неидеальные условия ввода пучка, неточность изготовления и сборки прибора. Так, на всех изготовленных образцах ЛБВ выходная мощность составила от 12,2 до 18,3 Вт, коэффициент усиления от 26,1 до 27,8 дБ в полосе частот 8%, при токопрохождении 85-95% и мощности входного сигнала не более 30 мВт. Оптимальное рабочее напряжение было равно 11.8 кВ, ток пучка 85 мА.

Сейчас поставлена задача по улучшению выходных параметров ЛБВ исключительно за счёт модернизации её замедляющей системы при неизменных энергетических характеристиках электронного пучка - напряжение 12.0 кВ и ток 90 мА. На первом этапе проводилась модернизация ЗС для увеличения её сопротивления связи, а также оптимизация длины пространства взаимодействия и положения локального поглотителя между секциями. На втором этапе в конструкцию ЗС была введена дополнительная секция с уменьшенной фазовой скоростью рабочей +1-й пространственной гармоники электромагнитной замедленной волны.

2. Оптимизация параметров ЗС

Для того чтобы улучшить эффективность взаимодействия замедленной волны с электронным пучком, необходимо сильнее сконцентрировать высокочастотное

электромагнитное поле в районе пролётного канала. Расчёты показывают, что сужение широкой стенки петляющего волновода до 1.9 мм увеличивает сопротивление связи до значений 35–50 Ом в рабочей полосе частот (рис. 1).

Необходимо отметить, что длинноволновая граница полосы пропускания такой ЗС $\lambda_{кр}$ определяется её поперечными размерами $\lambda_{кр} = 2a$, где a - ширина волновода [2]. Это согласуется с рис. 1, на котором видно, что уменьшение ширины ПВ повлекло за собой сужение общей полосы пропускания ЗС.

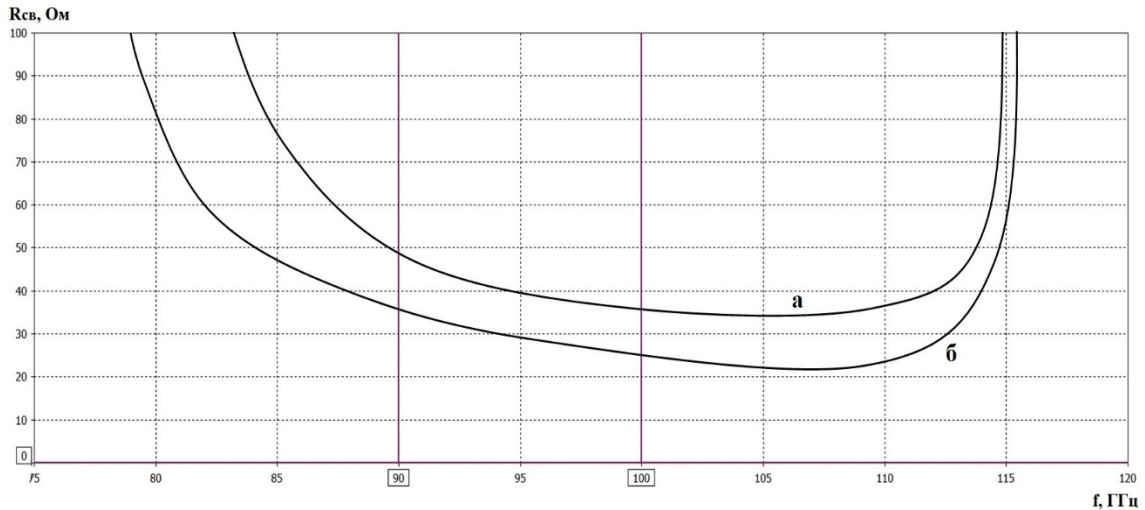


Рисунок 1. Сопротивление связи МПВ с зауженной (а) и стандартной (б) шириной.

Такие изменения конструкции ЗС, в свою очередь, потребовали корректировки элементов согласования с внешним волноводным трактом. Результаты расчёта КСВн новой системы представлены на рис. 2, в рабочей полосе частот его значения не превышают 1.2 ед.

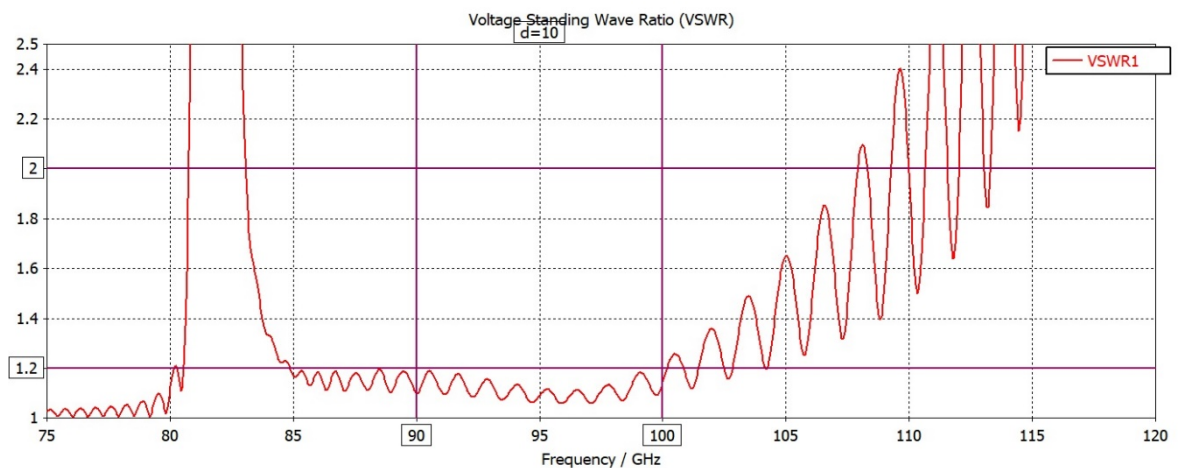


Рисунок 2. КСВн нового варианта ЗС.

Был проведён цикл расчётов по оптимизации выходных параметров ЛБВ путем изменения длин входной и выходной секций ЛБВ и расположения локального поглотителя. Оптимальной является модель, представленная на рис. 3. Две секции ЗС разделены пространством дрейфа, в котором расположен локальный поглотитель длиной 12 мм. В первой секции 17 регулярных периодов системы, во второй 38. В начале и конце секций находятся переходные согласующие области длиной 2 мм каждая. Общая длина блока ЗС составляет 75 мм. Размер минимальной ячейки разбиения сетки в области счета 0,005 мм, общее количество частиц в пучке $1,9 \times 10^8$.

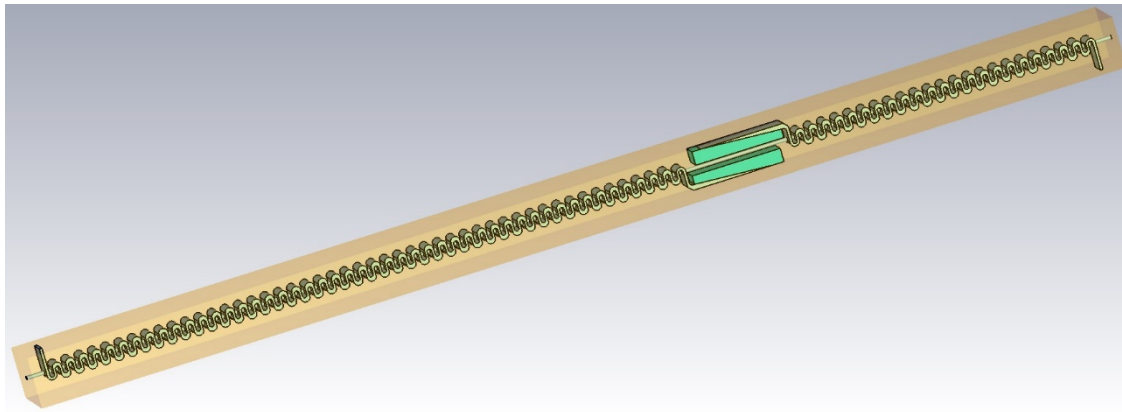


Рисунок 3. Расчетная модель ЛБВ с новым вариантом ЗС.

Для оценки выходной АЧХ и ширины рабочей полосы частот ЛБВ в расчётах использовался входной сигнал с постоянной мощностью 35 мВт и частотой линейно меняющейся от 80 до 110 ГГц за время счета 50 нс (рис. 4) при характерном времени пролета электронов вдоль ЗС порядка 1,5 нс.

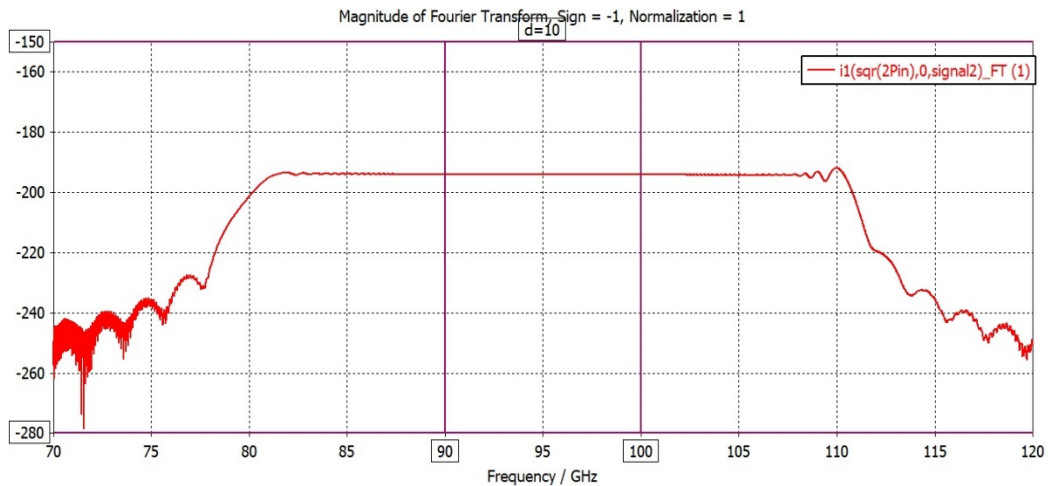


Рисунок 4. Спектр входного сигнала.

При напряжении пучка 12 кВ, токе 90 мА и мощности входного сигнала 35 мВт максимальная мощность сигнала на выходе не менее 45 Вт (рис. 5). Электронный КПД повысился до 4.3 %. Рабочая полоса частот по уровню -3дБ у оригинальной ЗС составляла 12%, а у оптимизированной сузилась до 7%.

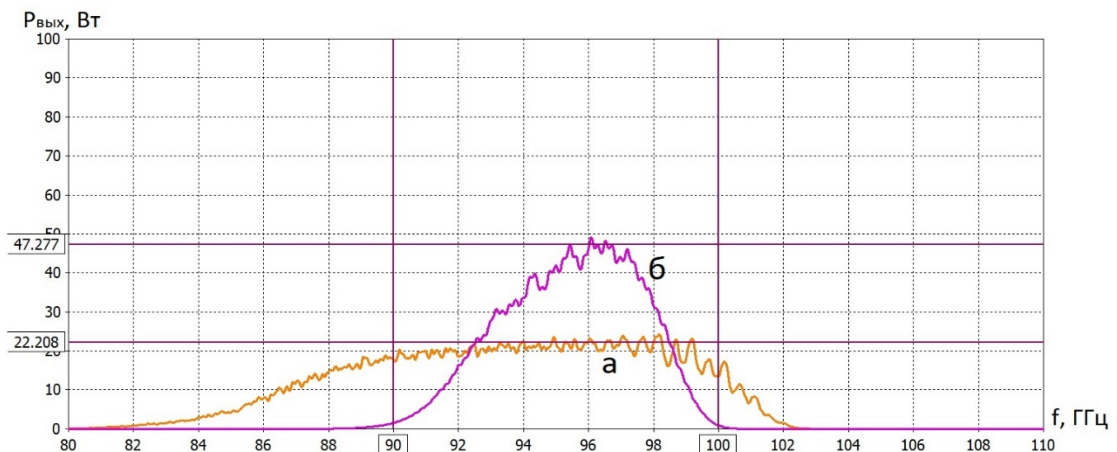


Рисунок 5. Расчётные выходные АЧХ ЛБВ с оригинальной (а) и оптимизированной (б) ЗС.

3. Дополнительная секция ЗС с увеличенным замедлением

Для того чтобы волна ЗС дольше не выходила из синхронизма с пучком её можно дополнительно замедлить ближе к выходу прибора, тем самым увеличить длину пространства взаимодействия и электронный КПД. Расчёты показывают, что введение дополнительной третьей секции ЗС длиной 7 периодов с увеличенным на 4% параметром замедления повышает выходную мощность и уменьшает её неравномерность в широкой полосе частот. С целью минимизации отражений от такого «скачка» замедления в ЛБВ промежуточные три периода между секциями ЗС являются переходными, плавно меняющими шаг. Максимальная выходная мощность 76 Вт с минимальной неравномерностью 0,6 дБ наблюдается в полосе частот 6%. Ширина рабочей полосы по уровню -3 дБ составляет 11% (рис. 7). Электронный КПД лампы с такой ЗС увеличился до 7%.

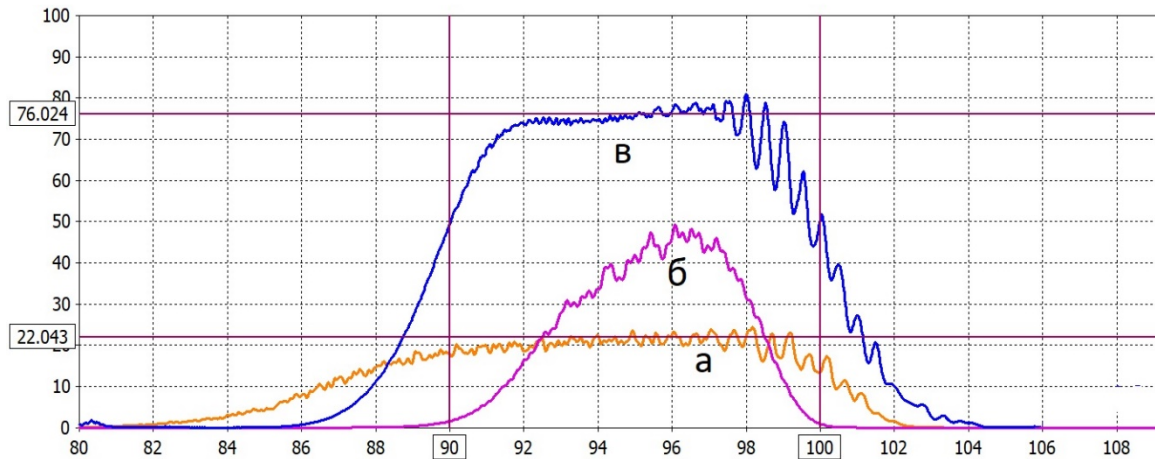


Рисунок 7. АЧХ выходного сигнала ЛБВ с оригинальной ЗС (а), оптимизированной ЗС (б) и ЗС с дополнительной секцией (в).

Кроме того, такая модификация ЗС позволила снизить уровень входной мощности с 35 до 12 мВт в режиме насыщения лампы с коэффициентом усиления 38 дБ.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФ РАН FFUF-2024-0027

Список литературы

1. Иванов А. А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны W-диапазона // Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – №. 8-9.
2. Р.А. Силин, Периодические волноводы. Издательство ФАЗИС, М. 2002г.
3. J.Feng, J.Cai, Y.Hu, X.Wu, Y.Du, J.Liu, P.Pan, and H.Li, “Development of W-Band Folded Waveguide Pulsed TWTs”, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 61, no. 6, pp. 1721–1725, 2014. doi: 10.1109/TED.2014.2307476.
4. Alexander N.Vlasov et al. Design of a low voltage folded waveguide four beam mini-TWT. Proceedings of the IVEC, 2018
5. Ш.Е. Цимринг, Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков, Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН 2012г.