УДК 621.385.6

Григорьев А.Д.
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

Проблемы разработки усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн

Описаны проблемы, возникающие при увеличении рабочей частоты мощных усилительных клистронов и способы их решения. Приведены примеры зарубежных клистронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Представлены результаты проектирования усилительного клистрона W-диапазона с выходной мощностью 1 кВт и пониженным ускоряющим напряжением. В клистроне используется ленточный электронный пучок и многозазорные резонаторы.

Ключевые слова: Миллиметровые волны, клистроны, многозазорные резонаторы, электронные пучки

Тенденция повышения рабочей частоты радиотехнических систем сохраняется на протяжении 100 лет, так что в настоящее время активно осваивается терагерцевый частотный диапазон (ТГЧ диапазон). Трудности освоения этого диапазона связаны, в частности, с отсутствием достаточно мощных источников когерентного излучения. Имеющиеся генераторы – лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), гиротроны обладают слишком большими массой и габаритами, их общий КПД небольшой, а качество генерируемых колебаний далеко не всегда удовлетворяет разработчиков аппаратуры. Между тем, с помощью таких источников можно было бы решить целый ряд проблем, стоящих перед современной радиоэлектроникой. К таким проблемам относятся, в частности, увеличение разрешающей способности радиолокационных станций, разработка систем радиовидения сквозь облака с высоким разрешением, создание скрытных высокоскоростных систем связи, мониторинг атмосферы Земли и других планет. В ускорительной технике повышение рабочей частоты ускоряющего поля ведет к увеличению темпа ускорения частиц и, как следствие, к сокращению длины ускорителя.

В настоящее время используются два механизма генерации высокочастотного электромагнитного излучения: использование переходов между энергетическими уровнями связанных заряженных частиц (квантовые приборы) и использование излучения свободных заряженных частиц (классические электронные приборы). Квантовые приборы хорошо работают в оптической области спектра, а классические – в микроволновой и более низкочастотных областях.

Уменьшение рабочей частоты квантовых приборов приводит к уменьшению энергии кванта – фотона, а, следовательно, и уменьшению выходной мощности. Для компенсации этого эффекта необходимо увеличивать число частиц, совершающих переходы в единицу времени, однако это трудно сделать, так как при комнатной температуре частоте, соответствующей терагерцевому диапазону, разность энергии между уровнями много меньше энергии тепловых колебаний, и создать заметную разность заселенности уровней не представляется возможным. Связь мощности и частоты квантовых приборов в первом приближении характеризуется законом $Pf^{-1} = \mathrm{Const}$.

Основные размеры классических электронных приборов пропорциональны длине волны, а такие параметры, как площадь катода, площадь охлаждаемой поверхности пропорциональны квадрату длины волны. Поэтому выходная мощность и частота этих приборов связаны соотношением $Pf^2 = \text{Const}$. В результате на частотах вблизи 1 ТГц мощность и тех и других типов приборов оказывается малой, образуя так называемый «терагерцевый провал» (рис. 1). Кроме того, при конструировании приборов на высокие частоты необходимо учитывать технологические ограничения.

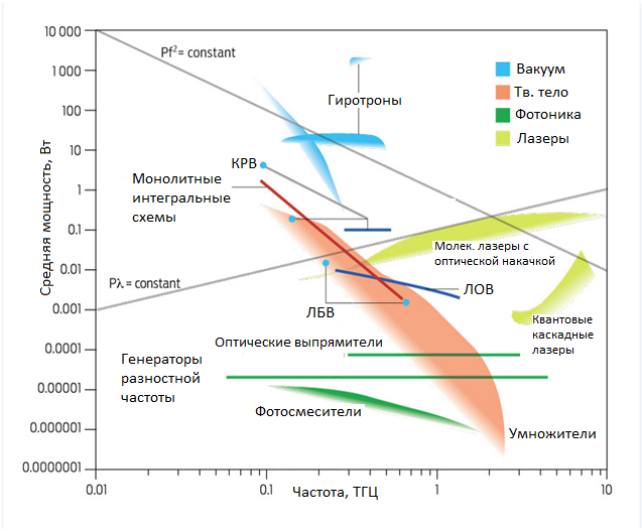

Рис. 1. Терагерцевый провал

Не считая гиротронов и ЛСЭ, наиболее перспективным классическим электронным прибором для продвижения в ТГЧ диапазон является многорезонаторный клистрон. Он имеет большую выходную мощность, высокий КПД и достаточно широкую рабочую полосу частот. Так как это усилитель, качество его выходного сигнала определяется задающим генератором и может быть достаточно высоким. Однако, при конструировании клистронов на частоты 100 ГГц и выше необходимо решить ряд задач, связанных как с электроникой, так и с технологией производства.

Прежде всего, нужно выбрать ускоряющее напряжение U_0. Чем оно выше, тем, при заданной выходной мощности, меньше ток пучка, а, следовательно, упрощается конструкция электронной пушки и фокусирующей системы. При повышении ускоряющего напряжения увеличивается длина зазоров резонаторов, что важно как с точки зрения электрической прочности, так и технологии изготовления. В тоже время увеличение U_0 приводит к увеличению сопротивления пучка постоянному току $R_0 = U_0 / I_0$, а это требует использования резонаторов с высоким эквивалентным сопротивлением $R_e = \rho Q$, которое для достижения высокого КПД должно быть сравнимым с R_0. Создание таких резонаторов – достаточно сложная проблема. Кроме того, высокое напряжение усложняет конструкцию источников питания и увеличивает их массу и габариты.

За рубежом выпускается целый ряд мощных усилительных клистронов на частоты от 95 до 280 ГГц. В качестве примера в табл. 1 приведены параметры клистронов, выпускаемых фирмой CPI (Канада). Данные представлены за 2015 г. [1].

Таблица 1. Параметры клистронов CPI

Достигнутые параметры клистронов		
Частота	Имп. мощность	Ср. мощность
95 GHz	3000 W	400 W
140 GHz	400 W	50 W
183GHz	50 W	10 W
220 GHz	50 W	6 W
280 GHz	30 W	0.3 W

Как видно, на частоте 280 ГГц (длина волны 1.07 мм) импульсная мощность приборов достигает 30 Вт, что сравнимо с выходной мощностью гиротронов на этой частоте.

Конструкция клистронов этой фирмы показана на рис. 2. Во всех приборах используются многозазорные резонаторы и рекуперация. Приборы работают при ускоряющем напряжении 20…25 кВ и имеют ширину рабочей полосы частот около 1%. Разработанных приборы используются в РЛС наведения, а также в РЛС мониторинга атмосферы Земли и других планет.

Рис. 2. Линейка клистронов фирмы CPI

Фирма утверждает, что имеющаяся у нее технология позволяет изготавливать клистроны на частоты вплоть до 700 ГГц при выходной импульсной мощности 2 Вт.

Разработана также серия клистронов с ленточным пучком на частоту 95 ГГц для питания линейного ускорителя [2]. Приборы имеют импульсную выходную мощность 5, 50 и 240 кВт при ускоряющем напряжении 25, 50 и 100 кВ, соответственно. Использование этих приборов существенно снижает длину ускорителя.

Учитывая перспективность повышения рабочей частоты клистронов, нами был спроектирован усилительный клистрон с рабочей частотой 95 ГГц и выходной мощностью в импульсе 1 кВт. Прибор имеет низкое ускоряющее напряжение $U_0 = 10$ кВ, что отличает его от зарубежных аналогов.

Приняв общий КПД прибора равным 10%, получим следующие параметры электронного пучка:

- Постоянная составляющая тока пучка $I_0 = 1$ А;
- Сопротивление пучка на постоянном токе $R_0 = 10$ кОм;
- Замедление скорости электронов $n = c / v \approx 5$;
- Поперечная постоянная распространения $\gamma_e = \frac{\omega}{c}\sqrt{n^2 - 1} = 9.62$ 1/мм.

Отсюда радиус пучка $b = 0.8 / \gamma = 0,08$ мм, а плотность тока в пучке $J_0 \approx 5000$ А/см^2. Создать такой пучок невозможно, поэтому в приборе используется ленточный пучок. Его толщина $t = 1.2 / \gamma = 0.12$ мм, а ширина w выбирается так, чтобы пролетный канал был запредельным для волны H_{10} в нем. Это условие выполняется, если взять $w = 1$ мм. Плотность тока в пучке $J_0 \approx 800$ А/см^2, что более чем в 6 раз меньше, чем для круглого пучка. Значение фокусирующей магнитной индукции (Бриллуэновская индукция) $B_b = 0,3$ Тл, что вполне приемлемо.

Многозазорные резонаторы для взаимодействия с ленточным пучком были выполнены на основе двухсторонней гребенчатой замедляющей системы. Их поле и параметры моделировались с помощью программы RFS [3], основанной на методе конечных элементов. Входной и промежуточный резонаторы имеют 3 зазора, а выходной – 4 зазора. Резонаторы работают на 2π-виде колебаний. Модели резонаторов показаны на рис. 3, а их параметры – в табл. 2.

Связь входного и выходного резонаторов с внешними волноводами осуществляется через диафрагму в боковой стенке. Для подстройки частоты резонаторов служат керамиче-

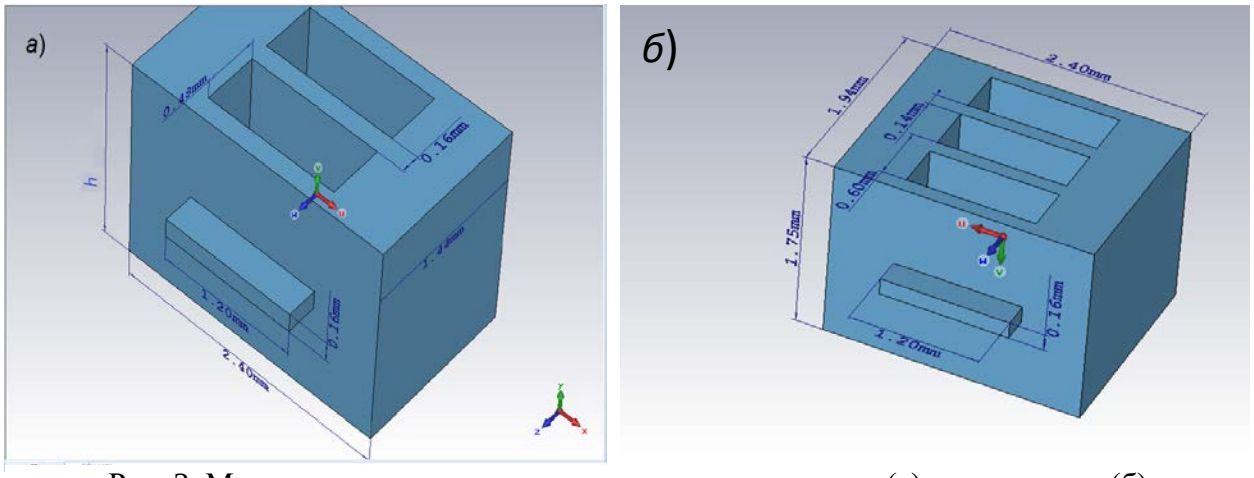

Рис. 3. Модели входного и промежуточных резонаторов (а) и выходного (б)

ские штифты, вводимые в боковую стенку. Такой штифт из поликора диаметром 0,6 мм обеспечивает перестройку частоты на 750 МГц при ходе 0,4 мм.

Таблица 2. Параметры резонаторов

Тип резонатора	Собственная частота, ГГц	Волновое сопротивление, Ом	Коэффициент взаимодействия	ρM^2, Ом	G_e / G_0
Входной и промежуточные	94,3667	83,1	0,63	33	0,3
Выходной	95,0617	112	0,64	45,8	0,2

Проектирование электронной пушки проводилось с помощью программы CST Particle Studio. Модель пушки показана на рис. 4, а траектории электронов в ней – на рис. 5. Ток катода пушки – 1,1 А, токопрохождение 92 %.

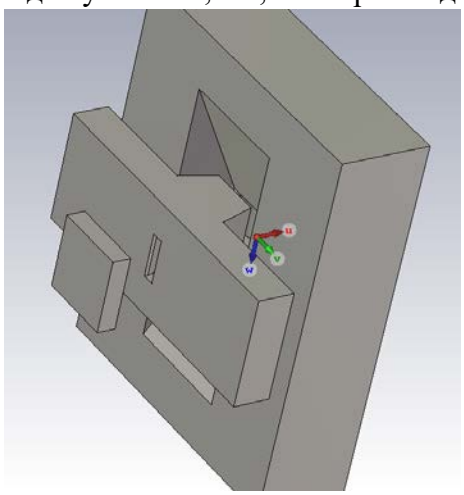

Рис. 5. Модель электронной пушки

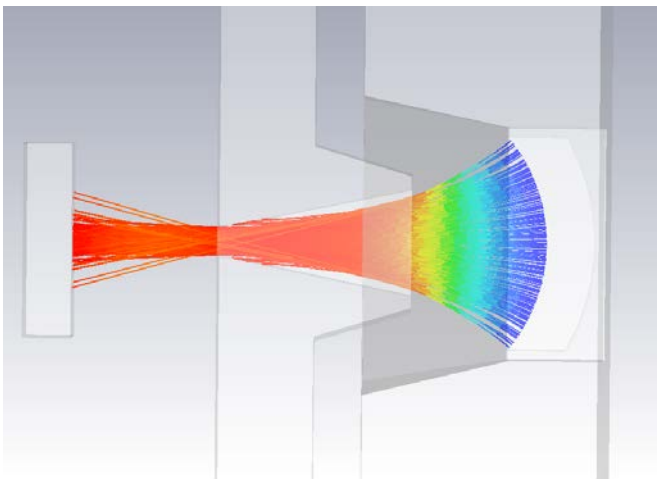

Рис. 5. Траектории электронов в пушке

Магнитная фокусирующая система, спроектированная с помощью программы Maxwell, создает однородное магнитное поле с индукцией 850 мТл. Она состоит из NbFeB магнитов, внешнего магнитопровода, и полюсных наконечников.

Электродинамическая система клистрона показана на рис. 6. Она содержит входной, 4 промежуточных и выходной резонаторы. Вакуумные окна на рис. 6. не показаны.

.

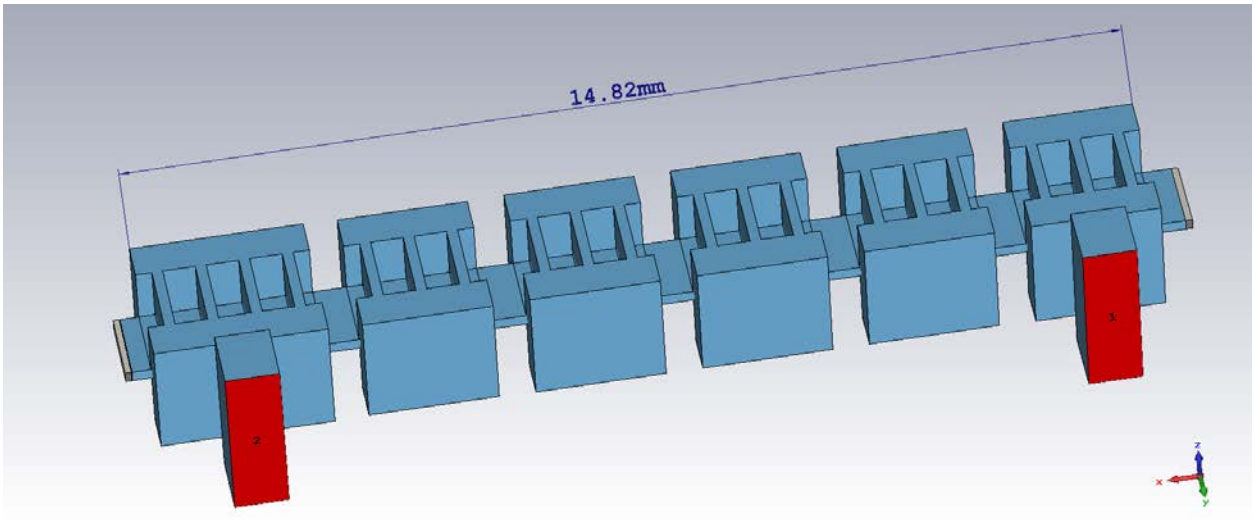

Рис. 6. Электродинамическая система клистрона

Ширина полосы частот и КПД клистрона зависят от настроек резонаторов. В данном приборе использована скиртронная схема настройки, в соответствие с которой входной резонатор настраивается на частоту, меньшую центральной частоты f_0, промежуточные резонаторы на частоты, большие центральной, а выходной резонатор – на центральную ча-

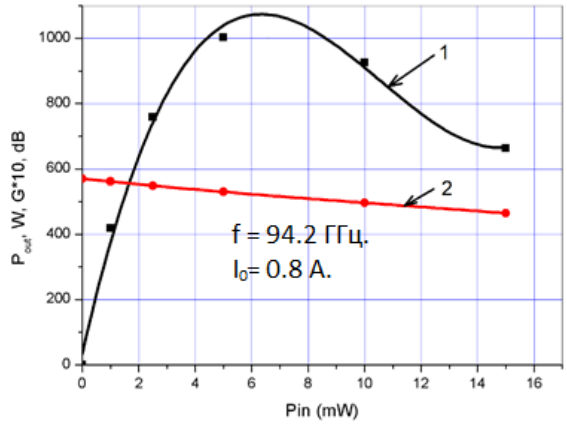

Рис. 8. Амплитудная характеристика клистрона. 1 - выходная мощность, 2 - усиление

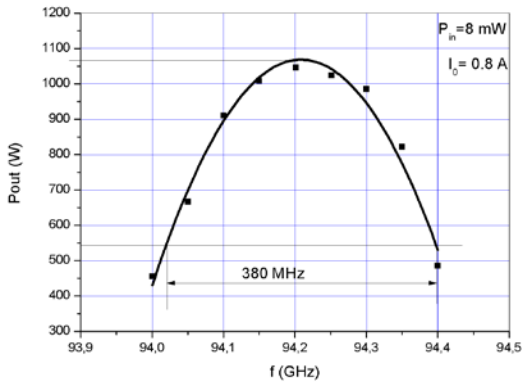

Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика клистрона

стоту. Такая схема позволяет получить достаточно широкую полосу частот при высоком электронном КПД.

Моделирование процесса взаимодействия проводилось с помощью программы CST Particle Studio методом крупных частиц. Ввиду недостатка вычислительных ресурсов использовалось 12 точек эмиссии на катоде, общее число крупных частиц в области 48000. Результаты расчета амплитудной характеристики прибора показаны на рис. 7, а амплитудно-частотной – на рис. 8. Как видно, прибор отдает максимальную мощность более 1 кВт, ширина полосы частот составляет 380 МГц, а коэффициент усиления при максимальной мощности 53 дБ.

Библиографический список

1. http://www.cpii.com/docs/rlated/40/EIK%20Technology%20at%20MMW%20&%20SubMMW%20Wavelengths.pdf
2. Solyga S., Schmolke M., Henke H. The mm-wave sheet beam klystron: performance at different voltages. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. pp 1034-1036.
3. Григорьев А.Д. Вычислительная электродинамика. М.: Физматлит, 2012, 430 с.