

Проектирование современных перспективных мощных клистронов

Классическая схема клистрона, в котором электронная пушка формирует пучок круглого сечения, давно исчерпала себя в отношении перспектив повышения мощности. Для клистронов мощностью свыше 100 МВт более перспективными являются конструкции многолучевого клистрона и клистрона с плоским пучком. Однако, конструирование таких приборов является существенно более сложной задачей, поскольку их расчет возможен только в трехмерном приближении. В работе представлены методика и результаты проектирования указанных приборов и сопоставления расчетных параметров с экспериментальными данными.

Ключевые слова: мощные клистроны, машинное проектирование, вычислительные методы

Клистрон является главным элементом системы высокочастотного питания ускорителей заряженных частиц, радаров и других приборов СВЧ электроники. Он состоит из электронной пушки, формирующей импульс тока длительностью несколько микросекунд, модулятора, который «нарезает» из этого импульса множество коротких сгустков частиц, выходного резонатора, снимающего мощное электромагнитное поле из кинетической энергии ускоренных сгустков, и коллектора, в котором рассеивается остаточная мощность заторможенных выходным резонатором сгустков. В современном ускорителе вдоль канала ускорения установлены сотни клистронов мощностью десятки мегаватт каждый. Все клистроны должны быть синхронизованы с высокой точностью. Нестабильность синхронизации резко снижает эффективность ускорения, поэтому желательно иметь как можно меньше клистронов с как можно большей мощностью каждого из них. Типовой клистрон имеет мощность порядка 75 МВ (Рис.1). Дальнейшее повышение мощности ограничено ростом влияния объемного заряда, который препятствует формированию сгустков короткой протяженности и малых поперечных размеров, необходимых для уменьшения потерь частиц при их ускорении.



Рисунок 1. 75-МВ клистрон

Существуют два перспективных направления повышения мощности клистронов: формирование множества разнесенных в пространстве малых пучков в диодном зазоре пушки клистрона и формирование плоского пучка на выходе из пушки. В обоих случаях значительно снижается расталкивающее действие объемного заряда пучка, но оптика пучка сильно усложняется, поскольку задача из осесимметричной становится существенно трехмерной. Сквозной расчет клистрона от катода до коллектора в трехмерном приближении представляет собой сложнейшую задачу. Принципы автоматизированного проектирования

приборов физической электроники рассмотрены автором в монографии [1]. Для расчета пушек многоструйных клистронов предложен метод теории возмущений, в котором при решении нелинейной задачи самосогласованного поля каждый пучок предполагается почти осесимметричным, а по завершению итераций по объемному заряду накладывается внешнее магнитное трехмерное поле. Такой подход позволяет решать квазитрехмерные задачи с высокой точностью и значительной экономией машинного времени на основе модифицированного пакета POISSON-2, использующего метод граничных элементов для расчета электромагнитных полей [2]. Результаты расчетов показаны на Рис.2 и опубликованы в работах [3-4].

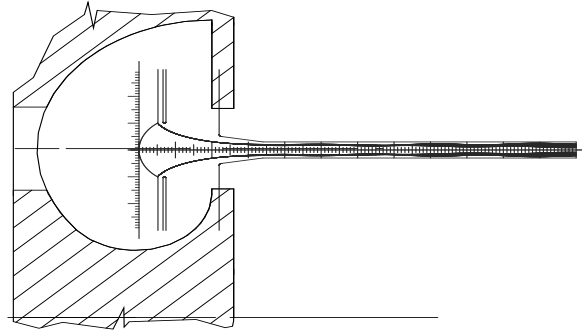


Рисунок 2. Расчет оптики микропучка многоструйного клистрона

Расчеты клистрона с плоским пучком проводились на основе трехмерного пакета POISSON-3 [5-8], в котором используется техника аналитического интегрирования по поверхностным и объемным элементам. В методе граничных элементов потенциал электрического поля представляется в виде суммы интегралов

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\int_S \sigma(s') G(r, s') ds' + \int_V \rho(s') G(r, r') dV' \right), \quad s' \in S, \quad r' \in V, \quad (1)$$

Здесь r - точка наблюдения, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная вакуума, σ – неизвестная плотность поверхностных зарядов, а ρ – плотность объемных зарядов. Функция Грина точечного источника $G=1/R$, где R – расстояние между точкой наблюдения и координатами интегрирования источников поля s' и r' . Удовлетворяя граничным условиям на поверхности границы прибора, получим интегральные уравнения для определения искомой функции σ . При дискретизации эта функция аппроксимируется полиномом, а сложная трехмерная поверхность границы – плоскими треугольными или криволинейными изопараметрическими элементами. Объем, занимаемый пучком также заменяется объемными элементами. Автором была развита техника аналитического интегрирования [9-15] по поверхностным и объемным элементам, которая позволяет рассчитывать электромагнитные поля с высокой точностью при малых затратах времени вычислений. Полная система уравнений самосогласованного поля включает уравнения движения релятивистских заряженных частиц с зарядом q и массой m

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(p_x) &= q(E_x + v_y B_z - v_z B_y), \\ \frac{d}{dt}(p_y) &= q(E_y + v_z B_x - v_x B_z), \\ \frac{d}{dt}(p_z) &= q(E_z + v_x B_y - v_y B_x),\end{aligned}\tag{2}$$

где импульс частицы $\vec{p} = m\gamma\vec{v}$, $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$, t – время пролета, а E и H – напряженности электрического и магнитного полей. Полную систему уравнений замыкает уравнение непрерывности для объемных зарядов

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}\vec{j} = 0, \quad \vec{j} = \rho\vec{v}.\tag{3}$$

К указанной системе уравнений (1)-(3) следует добавить начальные данные для координат и скоростей заряженных частиц и плотности тока эмиссии, например, в виде законча Чайлда-Ленгмюра, а также учесть, что релятивистские частицы порождают собственное магнитное поле пучка, согласно закону Био и Савара.

В результате численного проектирования впервые в мире в Стенфордском центре линейных ускорителей был построен надежно работающий клистрон X-диапазона с плоским пучком. Электронная пушка клистрона имеет катод цилиндрической формы (Рис.3), фокусирующие электроды катодного узла обеспечивают высокую компрессию пучка в одном из поперечных направлений, сохраняя поперечный размер пучка в другом направлении. Таким образом, на входе в анодное отверстие пучок имеет поперечное сечение прямоугольника с отношением сторон 1:20, и влияние объемного заряда в направлении компрессии становится ничтожно малым. Главная сложность теперь состоит в том, что заряженный лист неустойчив к малым возмущениям, что на достаточно больших продольных расстояниях приводит к распадению пучка на отдельные струи – эффект филаментации. Этот эффект можно подавить вводом пучка в стабилизирующее внешнее магнитное поле. Нами рассматривались два варианта конструкции пушки – диодный и триодный.



Рисунок 3. Диодная пушка (слева. 1-катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – анод) и триодная пушка мощного клистрона с плоским пучком

Результаты расчета представлены на Рис.4, а конструкция электронной пушки прототипа клистрона с плоским пучком, изготовленного в СЛАК с привлечением фирмы “Calabasas Creek Inc.” показаны на Рис.5.

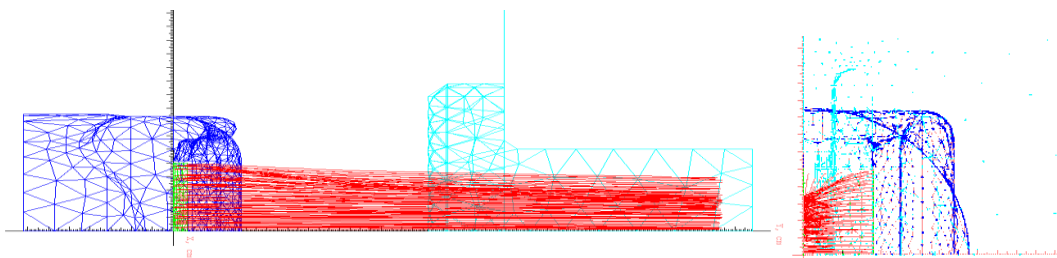


Рисунок 4. Оптика электронного пучка (красные линии) в диодной пушке. Эмиттер показан зеленым цветом, катодный узел – синим, анод – голубым. Слева показано продольное сечение пучка, справа – поперечное

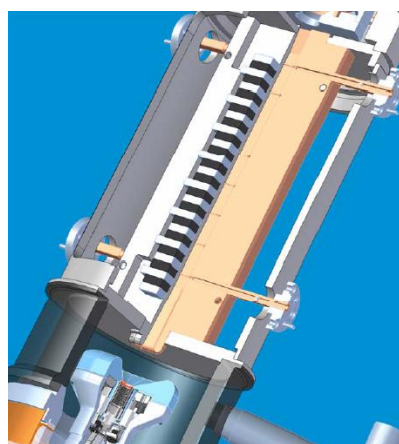
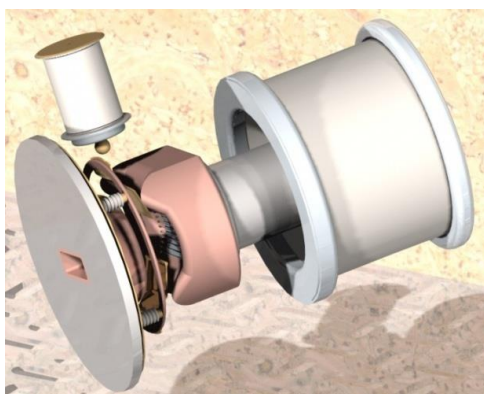


Рисунок 5. Конструкция пушки в сборке (слева) и клистрона (справа)

Библиографический список

1. Иванов В.Я. Методы автоматизированного проектирования приборов электроники. В 2-х частях.- Новосибирск: Изд-во ин-та математики, 1986.
2. Астрелин В.Т., Иванов В.Я. Пакет программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. Автометрия, т.3, 1980, с.92-99.
3. R.L. Ives, V. Ivanov, A. Krasnykh, G. Miram, Confined Flow Multiple Beam Guns for High Power RF Applications, Proc. of the 2nd IEEE Int. Vacuum Electronics Conference, 2-4 April, 2001, Moordwijk, Netherland.
4. V. Ivanov, K. Ko, A. Krasnykh, L. Ives, G. Miram. 3-D method for the design of multi or sheet beam RF sources. Proc. of IEEE Particle Accelerator Conference, Chicago, Illinois, 18-22 Jun 2001, pp 1213-1215.
5. M.E. Read, G. Miram, R.L. Ives, A. Krasnykh, V. Ivanov. An Electron gun for a sheet beam klystron. Proc. of 29th IEEE International Conference on Plasma Science, Banff, Alberta, Canada, 26-30 May 2002.
6. V. Ivanov, A. Krasnykh, M. E. Read, G. Miram, R.L. Ives, Proc. of Particle Accelerator Conference, Portland, Oregon, 12-16 May 2003, pp. 2664-2666.
7. R.L.Ives, G. Miram, A.Krasnykh, V. Ivanov *et al.* Proc. AIP Conf. 691:90-99, 2004.
8. V. Ivanov, A. Krasnykh, G. Scheitrum, D. Sprehn, L. Ives, G. Miram. Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC 03), Portland, Oregon, 12-16 May 2003, pp. 3312-3314.
9. Иванов В.Я. Аналитическая техника при решении трехмерных задач электронной оптики //Научное приборостроение, 2014, Т.24, №1.-с.17-23.
10. V. Ivanov. Analytical Technique in the Boundary Element Method for 3D Problems of Electron Optics. Int. Conf. on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA-2014), 30 June – 4 July, 2014, St.-Petersburg, Russia.
11. V. Ivanov. The Code “POISSON-3” for 3D Problems of Electron Optics. Int. Conf. on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA-2014), 30 June – 4 July, 2014, St.-Petersburg, Russia.

12. V. Ivanov. Modern Mathematical Models for Three-Dimensional Problems of Electron Optics. Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2014), 21-26 Sep., 2014, Tomsk, Russia //Известия ВУЗов, сер. Физика, Т57, №11/3, 2014.- с.136-139.
13. V. Ivanov. Analytical Technique in the Boundary Element Method for 3D self-consistent Problems of Electron Optics. 31 Aug.- 5 Sept., 2014, Charge Particle Optics Conf. (CPO-9), Brno, Czech Republic.
14. V. *Ivanov*. Analytical Technique in the Boundary Element Method for 3D self-consistent Problems of Electron Optics. Submitted to “Imaging and Microscopy”).
15. V. *Ivanov*. Comparative analysis for different mathematical models in electron optics. Journal of Chemistry & Chemical Engineering, **8**, N10, 2014, p.990-995.