

## Компьютерное моделирование траекторий электронов в квадрупольной секции СВЧ усилителя на лампе Адлера

Елизаров А.А., Сорокин Е.А.

Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет)

Среди малошумящих параметрических усилителей с поперечным полем наибольший интерес представляет усилитель с квадрупольной секцией (лампа Адлера) [1, 2]. Этот прибор по своим характеристикам сравним с лучшими образцами малошумящих ЛБВ – обладая на частоте порядка 1 ГГц коэффициентом усиления 20 дБ при уровне шума 350<sup>0</sup>К. Такие параметры создают лампе Адлера известные перспективы в радиолокации, заметно увеличивая радиус действия станций снижением шума на 5-8 дБ в диапазоне частот 1 - 4 ГГц [3 - 5]. Одной из главных проблем, возникающих при работе лампы Адлера, является необходимость стабильного генератора накачки, а также продольного магнитного поля  $B$ , величина которого должна линейно возрастать с ростом частоты сигнала  $\omega_s$ , так как оптимальные условия работы соответствуют  $\omega_s \approx \omega_c = \eta B$ , где  $\omega_c$  - циклотронная частота.

Процесс параметрического усиления происходит в квадрупольной секции (рис.1.), в которой поле накачки с удвоенной циклотронной частотой воздействует на поток электронов. Она предназначена для постепенного увеличения радиуса траекторий электронов, степень возрастания которых характеризует коэффициент усиления прибора. Чтобы усиление было линейным, то есть коэффициент усиления был постоянным независимо от амплитуды сигнала, напряженность поля должна линейно зависеть от поперечных координат  $x$  и  $y$ . Такое поле может быть создано квадрупольным конденсатором – четырьмя электродами гиперболической формы, находящимися под потенциалами  $\pm V_p$ . В квадрупольной секции, состоящей из четырех идентичных цилиндрических поверхностей, поле на продольной оси отсутствует, а при удалении от оси возрастает линейно с расстоянием, что приводит к постепенному увеличению радиуса вращения электронов и росту их энергии.

Представленные ниже результаты получены с помощью программы Quadrupole [6, 7], разработанной авторами для моделирования физических процессов в квадрупольном СВЧ-усилителе на лампе Адлера. Она позволяет получить наглядные результаты

исследования распределения потенциала и траекторного анализа в квадрупольной секции лампы в зависимости от изменения формы и тока электронного пучка, габаритных размеров и напряжений на электродах.

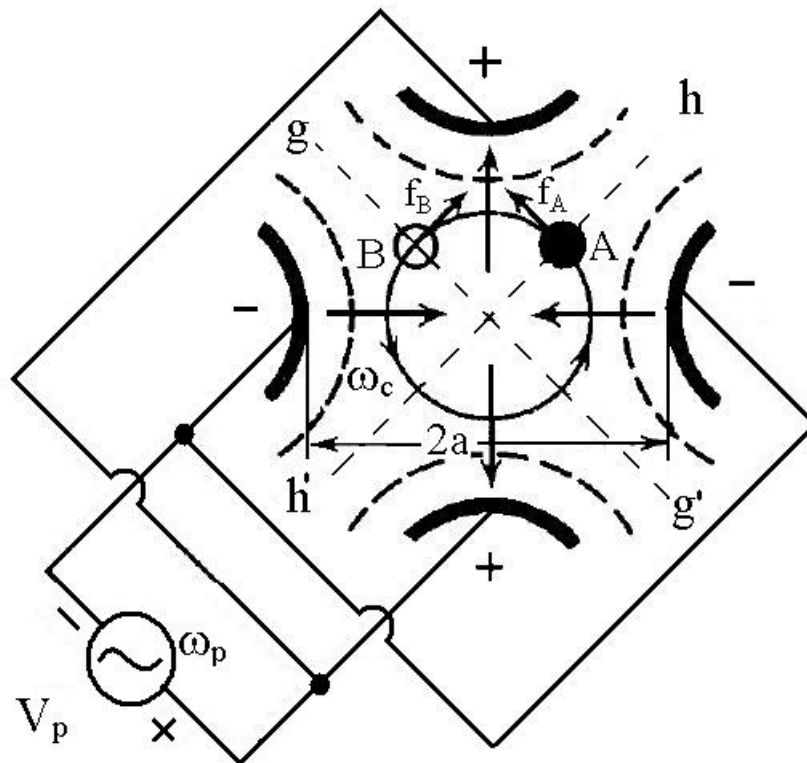


Рис.1

Напряженности электрического поля в резонаторе накачки находятся по формулам вида

$$E_x = -(V_p / a^2)2x \cos \omega_n t; \quad E_y = (V_p / a^2)2y \cos \omega_n t \quad (1)$$

где  $V_p$  - потенциал электродов квадрупольной секции,  $a$  - минимальное расстояние от продольной оси до поверхности электродов,  $\omega_n$  - частота накачки.

Указанные напряженности электрического поля соответствуют статическому потенциалу квадрупольной структуры

$$V = \frac{V_p}{a^2}(y^2 - x^2), \quad (2)$$

причем  $(y^2 - x^2) = const$  описывает эквипотенциальную поверхность. Тогда  $(y^2 - x^2) = a^2$  (рис.2).

В момент времени  $t = 0$  электрон находится в точке А и вращается с частотой  $\omega_c$ . Под действием электрического поля накачки электрон ускоряется и его поперечная скорость возрастает. Если  $\omega_n = 2\omega_c$ , то когда электрон попадет в точку В (совершив 1/4 оборота),

поле изменит знак, и электрон снова будет ускоряться и т.д. Это приводит к возрастанию радиуса вращения электрона, то есть к усилению сигнала за счет мощности накачки. Если в момент времени  $t = 0$  электрон находится в точке В, то под действием поля он будет тормозиться (рис.3).

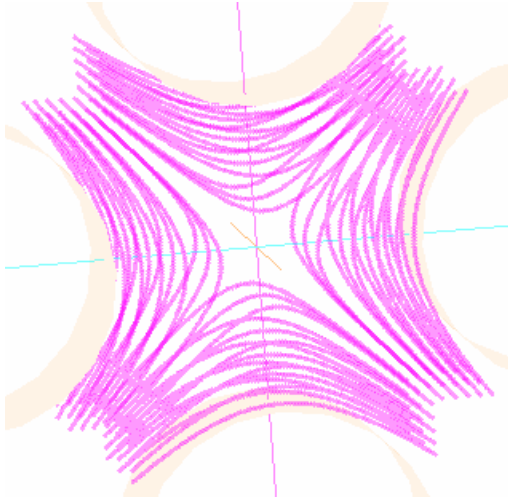


Рис.2

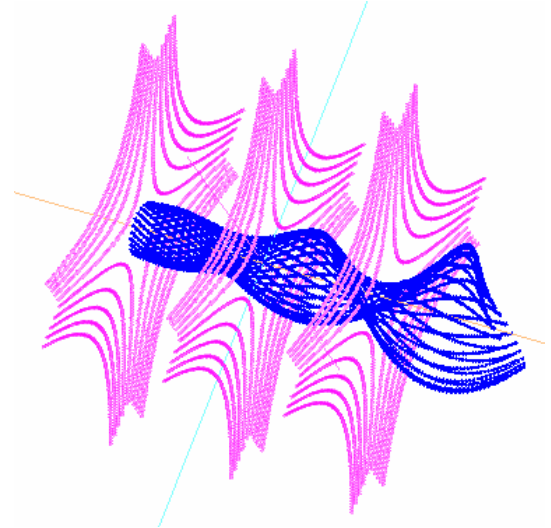


Рис.3

На рис.4 показаны поверхности, на которых лежат спиральные траектории электронов в квадруполе (1, 1') и в области дрейфа до (2) и после квадруполя (3, 3'). Поверхности 1', 3' отвечают электрону с наиболее неблагоприятной фазой. При  $\omega_s = \omega_c = \omega_n / 2$  фазовые условия на входе будут все время сохраняться. Если при этом луч поступает в квадруполь в наиболее благоприятной (или наиболее неблагоприятной) фазе, усиление (или соответственно затухание) будет максимальным.

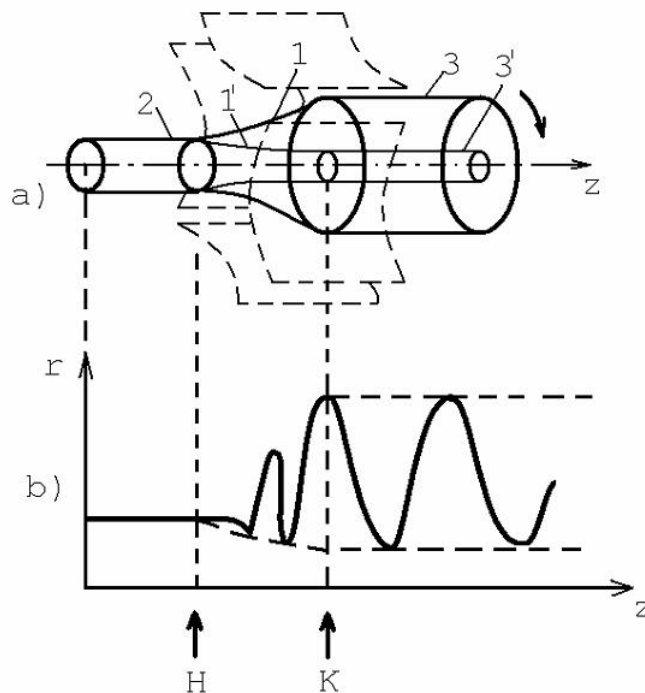


Рис.4

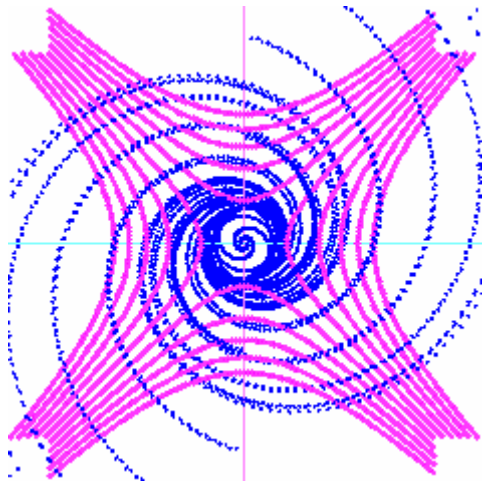


Рис.5

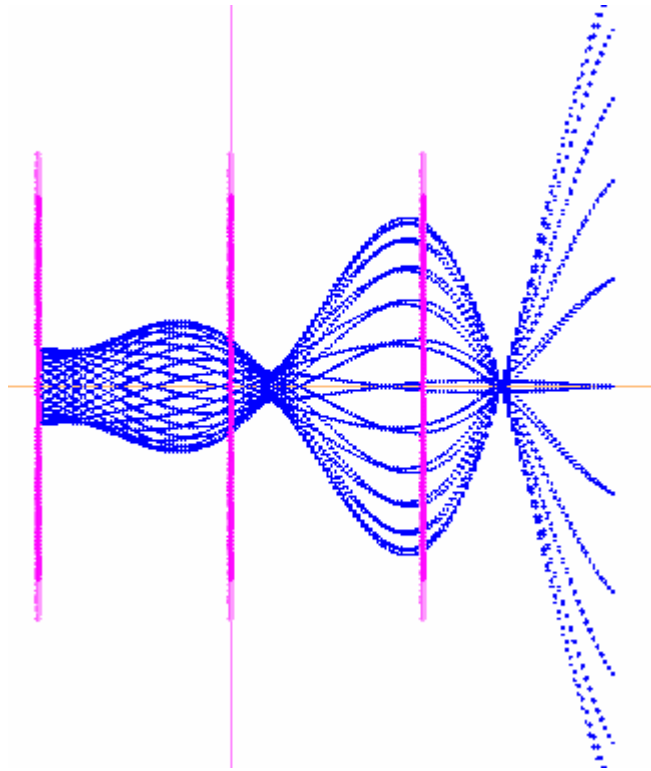


Рис.6

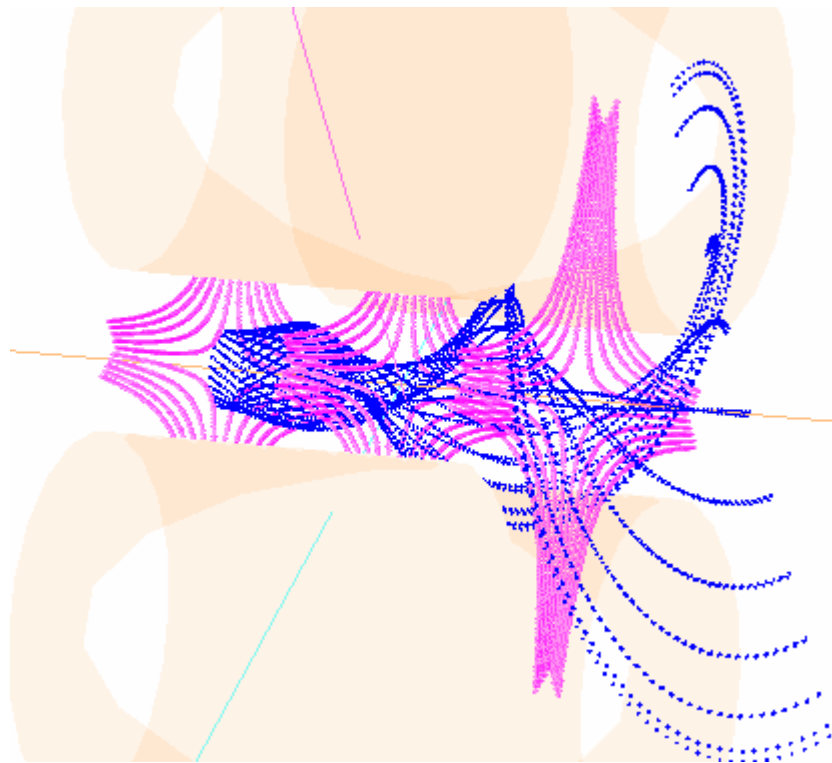


Рис.7

На рис.5 - 7 показаны результаты моделирования траекторий электронов пучка радиусом 0,01 м при прохождении через квадрупольную секцию накачки (расстояние между электродами и осью системы  $a = 0,05$  м,  $V_p = \pm 2000$  В). Анализ полученных зависимостей позволяет убедиться в том, что если частота сигнала  $\omega_s$  несколько отличается от  $\frac{\omega_H}{2}$ , сечение луча, вращаясь во входной плоскости, попеременно встречает то условия максимального усиления, то условия максимального затухания. Суммарное усиление определяется усреднением по всем электронам, каждый из которых поступает в квадруполь со своей фазой. В среднем результирующий сигнал превышает входной сигнал, поскольку экспоненциальное нарастание всегда превысит экспоненциальное убывание. Выходной сигнал состоит из двух синусоидальных волновых компонентов, один из которых на частоте сигнала  $\omega_s$ , а другой – на холостой частоте  $\omega_H - \omega_s$ .

### Литература

1. Adler R. Parametric amplification of the fast electron wave / Proc. IRE 46, 1300, (1958).
2. Adler R., Hrbek G., Wade G. The quadrupole amplifier, a low-noise parametric device / Proc. IRE 47, 1713, (1959).
3. Лопухин В.М., Магалинский В.Б., Мартынов В.П., Рошаль А.С. Шумы и параметрические явления в электронных приборах сверхвысоких частот. М.: Наука, 1966.
4. Лопухин В.М., Рошаль А.С. Электроннолучевые параметрические усилители. М.: Сов. радио, 1968.
5. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. В 2т. Т.2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
6. Свидетельство РФ № 2007610821 об официальной регистрации программы для ЭВМ «Моделирование физических процессов в квадрупольном СВЧ усилителе (Quadrupole)» // Елизаров А.А., Сорокин Е.А. Приоритет от 22.12.2006.
7. Елизаров А.А., Сорокин Е.А. Компьютерное моделирование физических процессов в квадрупольном СВЧ-усилителе на лампе Адлера // Труды VII Межвузовской научной школы «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – Москва, НИИЯФ МГУ, 2006. – С.106-110.