

Эффективная группировка вторичных электронов в СВЧ резонаторе с неоднородным полем

А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Рассмотрен новый механизм группировки вторичных электронов в зазоре с сильно неоднородным СВЧ электрическим полем. Показана возможность значительного повышения тока сгруппированного пучка в таком модуляторе по сравнению с группировкой в плоском зазоре. При этом появляются возможности низковольтного управления параметрами пучка. В результате при работе в S-диапазоне возможно достижение плотности тока на выходе модулятора до 5 A/cm^2 .

Ключевые слова: группировка электронного пучка, ускоритель электронов, инжектор, мультипактор, резонатор, вторичная эмиссия.

1. Введение

Сравнительно недавно были выполнены теоретические и экспериментальные работы по применению двухэлектродного вторичноэмиссионного разряда (мультипактора) в качестве источника сгруппированного пучка для ускорителей электронов [1-6]. В рассмотренной структуре входное вч напряжение приложено к диоду (являющемуся частью резонатора), электроды которого состоят из вторичноэмиссионного материала, а один из электродов выполнен в виде сетки. Электронный сгусток, стартовавший с одного из электродов в определенной фазе вч сигнала, подгруппировывается вч полем и достигает противоположного электрода в тормозящей фазе. Здесь он выбивает сгусток вторичных электронов («запомнивший» уменьшенную длину первичного сгустка), который возвращается, подгруппировываясь, к первому электроду спустя период вч сигнала после старта исходного сгустка. В следующем периоде весь процесс повторяется. Ток пучка увеличивается (а длина сгустка уменьшается) до тех пор, пока не наступает динамическое равновесие, при котором разгруппирующее влияние пространственного заряда компенсирует группирующее действие вч поля. Каждый раз при попадании сгустка на сетку часть электронов проходит сквозь нее, выходит за пределы входного зазора и доускоряется до высокой энергии. Как и в случае с термокатодом требуемый зазор сетка-катод пропорционален рабочей длине волны, но его величина существенно выше. Характеристики полученного электронного пучка показаны на Рисунке 1.

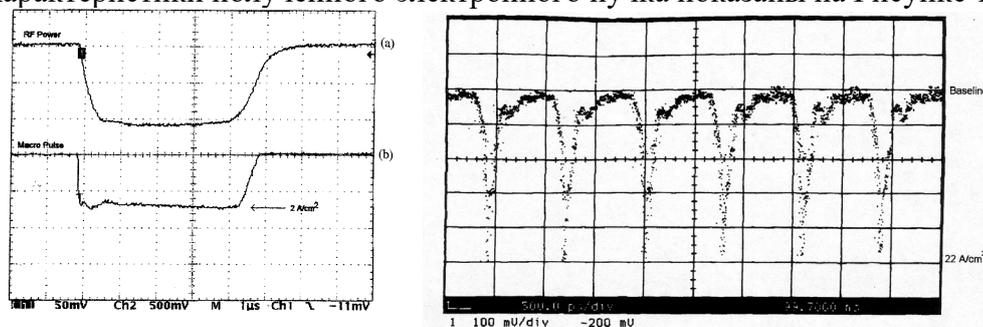


Рисунок 1. Осциллограммы импульса плотности тока пучка в MPG (MicroPulse Gun) - инжекторе на базе двухэлектродного вторично-эмиссионного разряда и радиочастотных микроимпульсов внутри него [2].

Мы предлагаем использовать для получения модулированного пучка механизм одноэлектродного мультипактора, в котором возврат электронов к эмиттеру осуществляется за счет приложенного к зазору дополнительного постоянного напряжения смещения [7]. Такой вариант модулятора не требует накала, компрессии пучка и магнитного поля. Из анализа процесса формирования сгустка становится ясно, что электроны, стартовавшие раньше, чем центр сгустка, удаляются от катода на наибольшее расстояние и, вследствие этого, возвращаются к катоду заметно позже, чем центр сгустка. Это означает удлинение сгустка и ослабление качества группировки. Отсюда становится очевидным, что если бы при увеличении расстояния от катода величина возвращающего электрического поля возрастала, то это приводило бы к уменьшению времени дрейфа наиболее удаленных электронов, укорочению сгустка и повышению качества группировки. В частности, этот фактор противодействовал бы разгруппирующему влиянию сил пространственного заряда и разброса начальных скоростей вторичных электронов. В результате можно ожидать повышения равновесной величины сгруппированного тока и выходной мощности прибора. Структура поля в зазоре и интенсивность группировки сгустка заметно зависит от геометрии зазора. В частности, в коаксиальном цилиндрическом диоде, в котором перфорированный катод является внешним проводником коаксиала, а вторичные электроны стартуют с него к центральному проводнику коаксиала, возвращающее электрическое поле сильно неоднородно. В результате наиболее удаленные от катода электроны оказываются очень близко к центральному проводнику (отражателю) и испытывают сильное возвращающее воздействие, что обеспечивает сокращение длительности сгустка и усиление группировки.

Ниже мы детальнее рассмотрим процесс группировки электронов в цилиндрическом диоде с вторичным эмиттером.

2. Анализ группирующих свойств электрического поля цилиндрического диода

Рассмотрим коаксиальный диод, в котором внешний проводник радиуса a является вторичным эмиттером, а на внутренний электрод (отражатель) радиуса b подается постоянное напряжение смещения U_0 и СВЧ напряжение U_1 (Рисунок 2а).

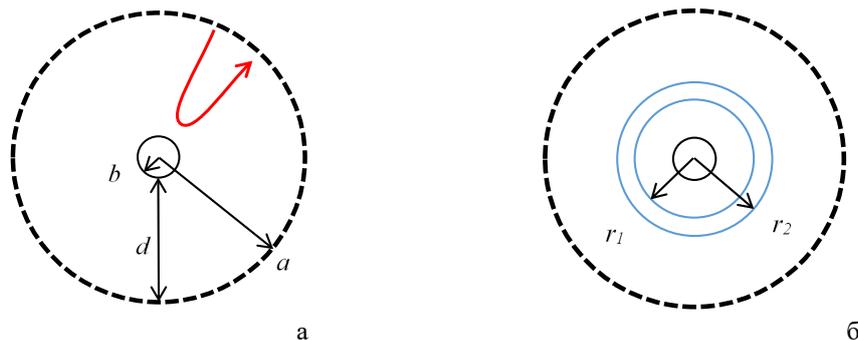


Рисунок 2. Модель цилиндрического диода с вторичным эмиттером и траектория частицы в нем (а); модель кольцевого сгустка в коаксиальном диоде (б).

Фактически, такой диод является формирователем цилиндрического электронного сгустка (группирователем). Часть сгустка периодически проникает через внешний перфорированный проводник для дальнейшего использования.

Проанализируем, в какой степени неоднородность поля электродов цилиндрического диода способна компенсировать разгруппирующее действие сил пространственного заряда сгустка. Рассмотрим модель сгустка с внутренним и внешним радиусами r_1 и r_2 (Рисунок 2б) с однородной плотностью пространственного заряда ρ , который дрейфует в цилиндрическом диоде, к отражателю которого

приложено СВЧ напряжение $U(t)$ (6).

В этом случае электрическое поле электродов описывается выражением:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \quad F(r) = -eE(r) \quad (1)$$

При отрицательном потенциале на отражателе сила, действующая на частицы, направлена от центра, и на внутренней поверхности сгустка она заметно превышает силу, действующую на внешней границе сгустка. Это означает, что поле цилиндрических электродов обладает дополнительным группирующим действием по сравнению с полем плоского диода.

Поле, обусловленное пространственным зарядом сгустка, равно

$$E_{пз}(r) = \frac{1}{2\pi r \epsilon_0} \begin{cases} Q & b < r < r_1 \\ Q + \pi\rho(r^2 - r_1^2) & r_1 < r < r_2 \\ Q + \pi\rho(r_2^2 - r_1^2) & r_2 < r < a \end{cases} \quad (2)$$

где $Q(r_1, r_2) = \frac{\pi\rho}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \left[r_1^2 \left(\ln\left(\frac{a}{r_1}\right) + \frac{1}{2} \right) - r_2^2 \left(\ln\left(\frac{a}{r_2}\right) + \frac{1}{2} \right) \right]$ - наведенный на отражателе заряд. Отсюда суммарное поле на внутренней и внешней границах, описывается выражениями

$$E_{tot}(r_1) = \frac{1}{r_1} \left[\frac{U}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q(r_1, r_2)}{2\pi\epsilon_0} \right] \quad E_{tot}(r_2) = \frac{1}{r_2} \left[\frac{U}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q(r_1, r_2) + \pi\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2\pi\epsilon_0} \right] \quad (3)$$

Оценим эти силы количественно. Рассмотрим случай, когда в зазоре с радиусами внутреннего и внешнего проводников $b = 0.5$ мм и $a = 3$ мм движется сгусток со средним током на единицу длины $I = 1$ А/см с частотой повторения 3 ГГц. Тогда плотность заряда ρ выражается через средний ток сгустков, бомбардирующих эмиттер:

$$\rho = \frac{-I}{\pi f (r_2^2 - r_1^2)} \quad (4)$$

При внутреннем и внешнем радиусах сгустка $r_1 = 0.55$ мм и $r_2 = 0.9$ мм (Рисунок 2б) поле пространственного заряда составляет, согласно (2), 0.858 кВ/мм на внутреннем радиусе (сила направлена к центру) и -0.142 кВ/мм на внешнем радиусе (сила направлена от центра). Таким образом, имеется сильный разгруппирующий эффект пространственного заряда, приводящий к расширению сгустка.

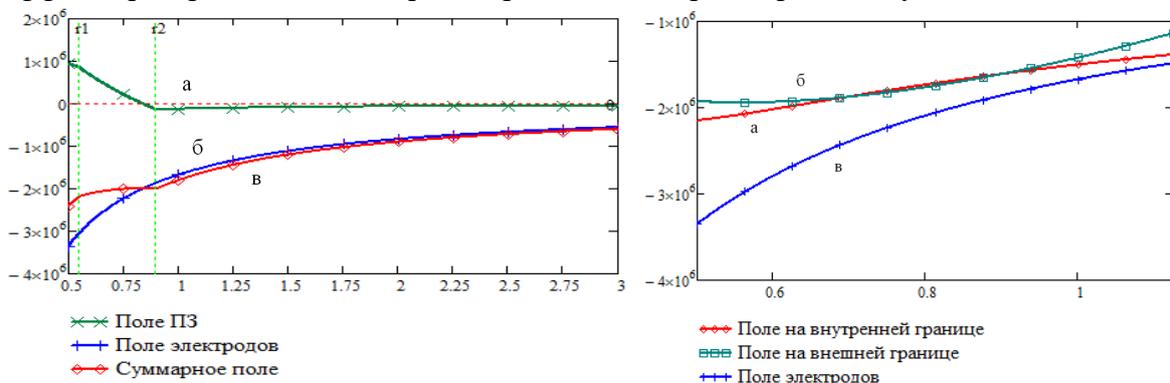


Рисунок 3. Профиль электрического поля в зазоре (а), поля электродов (б), суммарного поля (в); Зависимость поля на внутренней границе (а) и внешней границе (б), а также поля электродов (в) от радиуса внутренней границы.

Однако если к отражателю приложено напряжение $U = -3000$ В, то суммарное поле, в соответствии с (3), равно -2.187 кВ/мм на внутреннем радиусе и -2.002 кВ/мм

на внешнем радиусе (силы направлены от центра). Таким образом, неоднородное поле электродов полностью компенсировало разгруппирующее действие пространственного заряда и даже создало дополнительный группирующий эффект. Этот механизм не наблюдается в модуляторе на основе плоского диода, и он тем сильнее, чем больше длина сгустка, и чем больше приложенное к отражателю напряжение. Он накладывается на кинематический механизм группировки, который имеет место и в модуляторе на основе плоского диода. Последний имеет сходство с группировкой в отражательном клистроне и в генераторе с тормозящим полем и обусловлен тем, что частицы испытывающие воздействие более сильного поля имеют большую скорость, но и вынуждены проходить больший путь, что приводит к сближению фаз возвращения частиц.

3. Анализ цилиндрического диода-группирователя с вторичным эмиттером

Рассмотрим движение частиц сгустка в зазоре толщины $d = r_2 - r_1$. Для предварительной оценки группирующих свойств поля в зазоре пока не будем рассматривать влияние поля пространственного заряда на движение частиц. Учитывая аксиальную симметрию задачи, рассмотрим только изменение радиальных координат и скорости. Изменение радиальной координаты частицы описывается уравнением

$$\ddot{r} = -\frac{eU(t)}{mr \ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{v_{\varphi 0}^2 a^2}{r^3} \quad U(t) = U_0 + U_1 \cos(\omega t) \quad (5)$$

где $v_{\varphi 0}$ - азимутальная компонента начальной скорости частицы, $e > 0$, m - заряд и масса электрона, $U(t)$ - напряжение между наружным и внутренним проводниками.

Введем безразмерные переменные $\varphi = \omega t$, $x = \frac{a-r}{d}$, так что радиальная координата x изменяется от 0 до 1. Тогда уравнение движения приобретает вид:

$$\ddot{x}(\varphi) = \frac{V_0 + V_1 \cos \varphi}{D - x} - \frac{B}{(D - x)^3} \quad (6)$$

где $D = \frac{a}{d}$, $V_0 = AU_0$, $V_1 = AU_1$, $A = \frac{e}{mc^2 \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2$, $B = \frac{2W_{az}}{mc^2} \left(\frac{\lambda D}{2\pi d}\right)^2$, $W_{az} = \frac{mv_{\varphi 0}^2}{2}$ - начальная энергия азимутального движения частицы. При этом скорость и энергия радиального движения частицы выражаются через безразмерную скорость \dot{x} :

$$v = -c \frac{2\pi d}{\lambda} \dot{x} \quad E = mc^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{\dot{x}^2}{2}$$

Уравнение движения (6) решается при начальных условиях

$$x(\varphi_s) = 0, \quad \dot{x}(\varphi_s) = \frac{\lambda}{2\pi d} \sqrt{\frac{2W_s}{mc^2}}$$

Где φ_s - фаза старта, W_s - начальная энергия радиального движения частицы. Так например, при приложенных к отражателю напряжениях $U_0 = -121.5$ В и $U_1 = 506$ В, нулевых начальных энергиях радиального и азимутального движения и фазе старта $\varphi_s = -1.14$ получаем траекторию частицы (Рисунок 4):

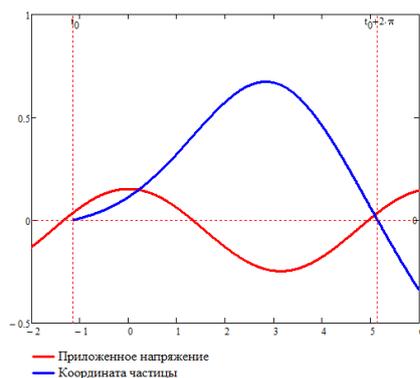


Рисунок 4. Зависимость нормированных приложенного напряжения и продольной (радиальной) координаты от времени.

В данном примере:

- частица стартует в фазе $\varphi_s = -1.14$, а возвращается на следующем периоде в фазе $\varphi_0 = 4.8$ с отставанием от фазы старта на 0.346 – т.е. для вторичных электронов эта траектория не повторится на следующем периоде;
- начальная фаза соответствует ускоряющему СВЧ полю, а конечная фаза соответствует тормозящему СВЧ полю, что будет препятствовать старту вторичных частиц;
- частица стартовала с нулевой начальной энергией радиального движения, а вернулась с энергией $E_f = 426.8$ эВ. Эта энергия получена от СВЧ поля. На отражателе нет токооседания, его средний ток равен нулю, энергия от источника смещения не потребляется. Энергия вращательного движения на финише равна начальной энергии вращательного движения, так как движение происходит в аксиально-симметричном поле.

Очевидно, что необходимо подобрать параметры конструкции и режима так, чтобы выполнялись следующие условия:

- Должна существовать равновесная (неподвижная) фаза φ_0 : частица, стартовавшая в этой фазе, возвращается в той же фазе φ_0 , но на следующем периоде и создает вторичные частицы, которые повторят ее траекторию (с точностью до влияния начальных скоростей);
- Равновесная фаза должна соответствовать ускоряющему интервалу СВЧ поля;
- Равновесная фаза должна быть устойчива: если под действием каких-то причин частица стартует в фазе $\varphi_0 + \delta\varphi_s$, сдвинутой на некоторую величину $\delta\varphi_s$, а возвращается в фазе $\varphi_0 + \delta\varphi_f$, то должно быть $|\delta\varphi_f| < |\delta\varphi_s|$. Фактически, это условие означает наличие группировки частиц при их движении;
- Энергии частицы на финише W_f должно быть достаточно для размножения вторичных частиц, т.е. $W_f \geq eU_{cr}$, где U_{cr} – первый критический потенциал вторичного эмиттера.

Численно решая уравнения движения (6) при различных начальных фазах, построим зависимость фазы финиша от фазы старта (Рисунок 5а)

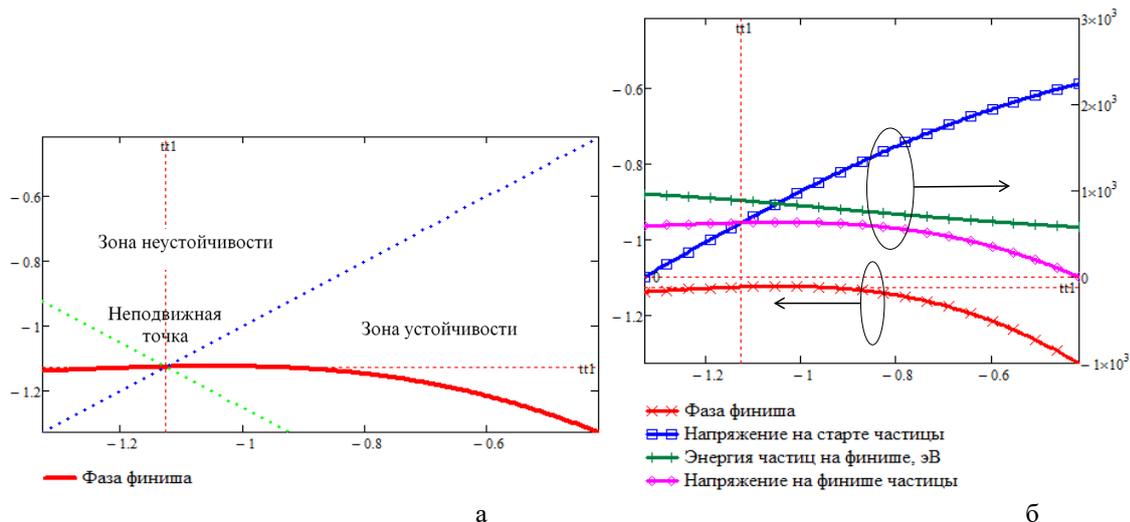


Рисунок 5. а) - зависимость фазы возврата частицы от начальной фазы; б) - фаза возврата частицы, напряжение на отражателе в момент старта, энергия частиц на финише в эВ, напряжение на финише как функции фазы старта частицы.

Здесь видно, что система обладает неподвижной точкой: частицы, стартовавшие при начальной фазе $tt_1 = -1.13$ возвращаются в следующем периоде в той же фазе. Кроме того, кривая находится в зоне устойчивости, описываемой пунктирными линиями $|\delta\varphi_f| = \pm|\delta\varphi_s|$. Таким образом, после нескольких периодов частицы будут группироваться вблизи фазы неподвижной точки. Чтобы этот процесс не прервался поле должно быть ускоряющим для вторичных частиц, как во время старта, так и на финише. Построим зависимость полей на старте и финише от начальной фазы частиц (Рисунок 5б). Из графика следует, что левая граница интервала допустимых начальных фаз -1.33 определяется условием наличия ускоряющего поля на старте, а правая граница -0.42 – условием наличия ускоряющего поля на финише частицы. Таким образом, существует диапазон фаз шириной 0.91 , откуда все частицы будут захвачены в сгусток. Рассмотрим траектории данных частиц в первом периоде СВЧ поля (Рисунок 6):

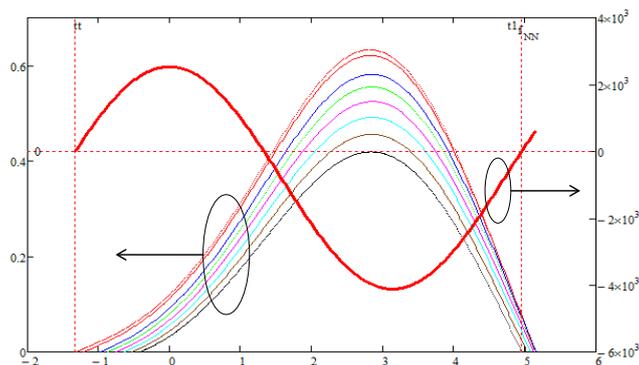


Рисунок 6. Траектории частиц с различными фазами старта и временная зависимость напряжения на модуляторе.

Очевидна заметная степень группировки частиц уже на одном периоде СВЧ колебаний.

4. Заключение

Рассмотренный новый механизм группировки в неоднородном поле в дополнение к известному кинематическому механизму (используемому в отражательных

клинотронах) и селекции неправильнофазных электронов вторичным эмиттером (используемой в магнетронах) позволяет значительно усилить группирующий эффект и повысить достижимую равновесную плотность тока. В рассмотренном примере моделирование с учетом влияния пространственного заряда показывает возможность получить плотность тока свыше 5 A/cm^2 при амплитуде вч напряжения не более 500 В. Отсутствие необходимости накала и внешнего магнитного поля позволяет создавать весьма компактные СВЧ модуляторы электронного пучка.

Список литературы

1. Vaughan J.R.M. Multipactor // IEEE Transactions on Electron Devices. 1988. Т. 35. № 7. — с. 1172-1180.
2. Mako F.M., Peter W.: 'A high-current micro-pulse electron gun'. Proc. Proceedings of International Conference on Particle Accelerators, 17-20 May 1993 1993 pp. 2702-2704
3. Mako F., Len L.K. Self-bunching micro-pulse guns for high-power RF generation. in Abstracts. International Vacuum Electronics Conference 2000 (Cat. No.00EX392). 2000.
4. Guharay S.K., Len L.K., Mako F. High-current micro-pulse electron guns and accelerator applications. in PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No.01CH37268). 2001.
5. Nation J.A., Schachter L., Mako F.M. и др. Advances in cold cathode physics and technology // Proceedings of the IEEE. 1999. Т. 87. № 5. — с. 865-889.
6. Riyopoulos S., Chernin D., Dialetis D. Effect of random secondary delay times and emission velocities in electron multipactors // IEEE Transactions on Electron Devices. 1997. Т. 44. № 3. — с. 489-497.
7. Галдецкий А.В. Аленотрон - новый класс вакуумных СВЧ-приборов на основе модуляции вторичной эмиссии // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2001. № 2. — с. 24-32.