

09;10

Исследование мощности СВЧ-генерации в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле

© Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов,
М.Ю. Морозов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2005 г.

Экспериментально и теоретически (с помощью численного моделирования в рамках одномерной теории) исследована мощность генерации в нерелятивистском пучке с виртуальным катодом, формирующимся в статическом тормозящем поле (низковольтном виркаторе). Экспериментально определены границы применимости одномерной теории.

PACS: 41.75.Fr, 84.30.Ng

Электронно-волновые системы, в которых в качестве активной среды используется электронный пучок с виртуальным катодом (ВК), представляют в настоящее время одним из перспективных источников СВЧ-излучения большого уровня мощности [1–4] и активно исследуются в связи с различными приложениями [5,6].

В наших работах [7–9] была предложена и исследована схема генератора на ВК, в котором использовался нерелятивистский интенсивный электронный пучок (т.е. пучок, микропервеанс которого составлял величину $p_\mu > 3 \mu\text{A}/V^{3/2}$ [10]). Для формирования в электронном потоке ВК использовалась схема с дополнительным торможением электронов, когда нестационарный колеблющийся ВК формировался за счет сильного торможения электронов в области дрейфа. В такой системе, получившей название низковольтного виркатора, возможна генерация СВЧ-сигналов (как одночастотных, так и широкополосных) при малых токах и плотностях электронного пучка [7], что делает возможным детальное экспериментальное исследование физических процессов в

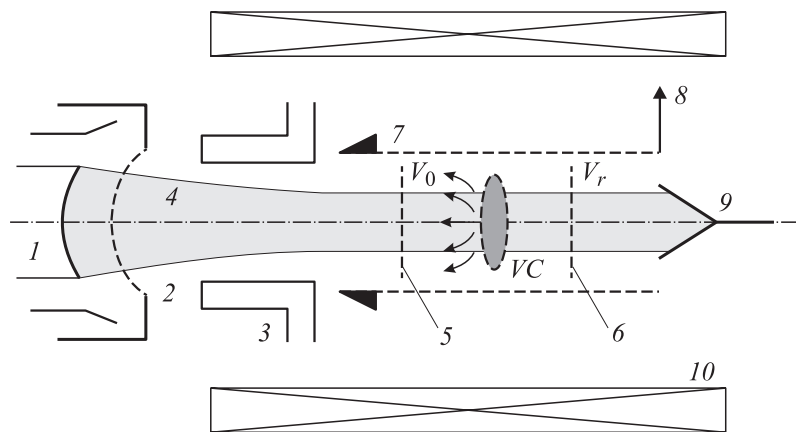


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию колебаний в нерелятивистском пучке с ВК в системе с дополнительным торможением электронов. Здесь 1 — термокатод, 2 — сетка электронной пушки, 3 — второй анод пушки, 4 — формируемый сходящийся электронный пучок, 5 — входная сетка диодного промежутка, 6 — выходная сетка, на которую подается тормозящий потенциал V_r , 7 — ОСЗС, 8 — вывод энергии, 9 — коллектор, 10 — соленоид.

пучке с ВК. Отметим, что подобная система с ВК при торможении электронного потока (низковольтный виркатор) представляет интерес в качестве управляемого источника широкополосных хаотических сигналов среднего уровня мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн [8].

В представленной работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование выходных энергетических характеристик низковольтного виркатора.

В качестве объекта экспериментальных исследований колебаний в пучке с ВК была выбрана диодная схема, в которой электронный пучок, формируемый электронно-оптической системой (ЭОС), инжектируется в систему, состоящую из двух сеточных электродов с тормозящим полем (см. рис. 1, на котором показана схема установки). Последнее создавалось за счет подачи отрицательного (относительно входной 5 (первой) сетки) потенциала V_r на входную 6 (вторую) сетку. ЭОС

формировала аксиально-симметричный сходящийся цилиндрический электронный пучок 4. Ускоряющее напряжение электронного пучка в экспериментах составляло 2.0 kV. Ток пучка на выходе ЭОС менялся в пределах $50 \div 100$ mA в зависимости от напряжения накала катода. Длина системы составляла $l = 70$ mm, радиус пучка был равен $r_b = 4$ mm.

После ЭОС электронный пучок с начальным разбросом электронов по скоростям попадает в сеточный зазор (диодный промежуток). Потенциал первой сетки V_0 равен потенциалу анода (ускоряющее напряжение), потенциал второй сетки $V_r = V_0 - \Delta V_r$ изменяется от значений $V_r/V_0 = 1$ ($\Delta V_r = 0$, отсутствие торможения) до $V_r/V_0 = 0$ ($\Delta V_r = V_0$, полное торможение электронного потока).

При увеличении тормозящей разности потенциалов ΔV_r между сетками диодного промежутка при некотором критическом значении $[\Delta V_r]_c$ в системе наблюдалось возникновение колеблющегося ВК [7], от которого часть электронов отражалась обратно к входной сетке. В результате в системе возникали хаотические колебания, вид и мощность которых существенно зависит от разности потенциалов ΔV_r между сетками диодного промежутка.

Для вывода мощности колебаний ВК использовался широкополосный отрезок спиральной замедляющей системы 7 (ОСЗС), нагруженный на поглощающую вставку и вывод энергии 8. Сопротивление связи ОСЗС составляло $K = 100 \Omega$, замедление $n \approx 10$.

Отработанный электронный пучок осаждался на коллекторе 9. Исследования проводились на разборной вакуумной установке при непрерывной откачке (при минимальном давлении остаточных газов 10^{-7} Torr).

На рис. 2, а (линия 1) показана экспериментальная зависимость интегральной мощности P колебаний от величины тормозящей разности потенциалов $\Delta V_r/V_0$ между сетками диодного промежутка. Электронный пучок фокусировался однородным ведущим магнитным полем $B = 200$ G, которое создавалось с помощью соленоида 10. При $\Delta V_r/V_0 < 0.2$ в пучке не регистрируются колебания ($P = 0$). С увеличением торможения электронов в потоке формируется ВК, однако, как видно из рис. 2, а, интегральная мощность колебаний в пучке с ВК мала. С увеличением $\Delta V_r/V_0$ мощность растет и при некотором оптимальном тормозящем потенциале достигает максимального значения $P \approx 150$ mW. Далее интегральная мощность генерируемых колебаний снова уменьшается. Отметим, что при малом торможении колебания

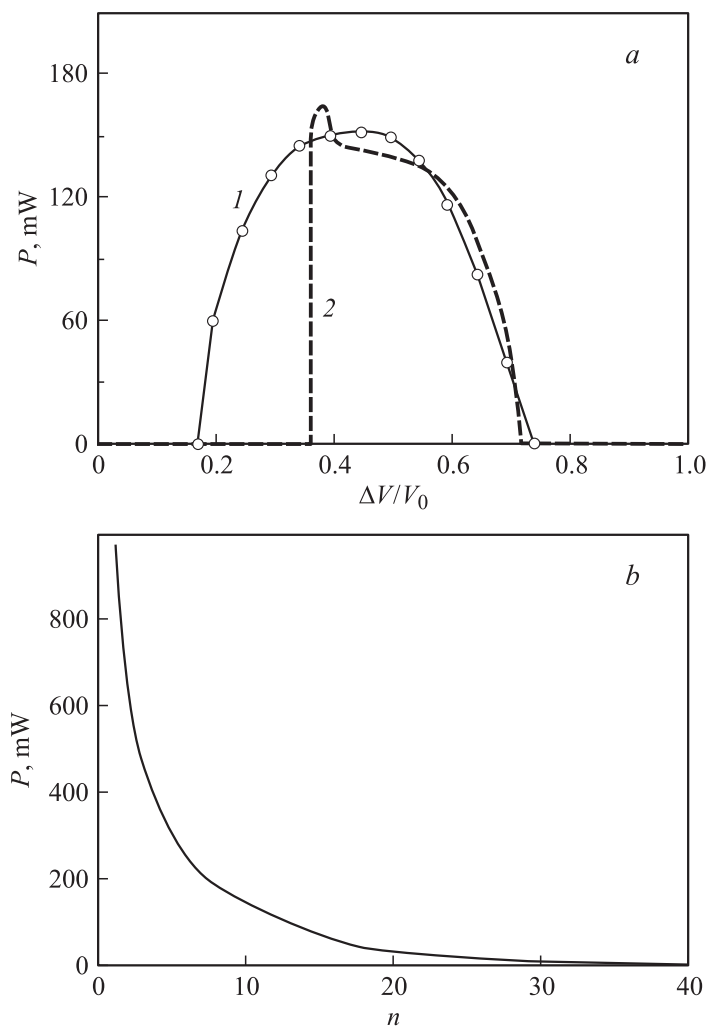


Рис. 2. Зависимость мощности генерации электромагнитных колебаний, снимаемых с выхода ОСЗС, от *a* — тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0$ (сплошная линия 1 — эксперимент; штриховая линия 2 — численный расчет по нелинейной нестационарной теории, формула (2)); *b* — замедления n волны в линии передачи (результаты численного моделирования при тормозящем потенциале $\Delta V_r/V_0 = 0.5$).

ВК близки к регулярным, и спектр генерируемого излучения является дискретным. С дальнейшим увеличением торможения электронов в системе возникают широкополосные хаотические колебания [7]. При значительном торможении пучка ($\Delta V_r/V_0 > 0.75$) генерация исчезает.

Моделирование нелинейных нестационарных процессов в пучке заряженных частиц с ВК проводилось в рамках одномерной модели пролетного промежутка с тормозящим полем, используя метод крупных частиц [11,12]. Для нахождения полей пространственного заряда решалось уравнение Пуассона в одном измерении. В этом случае движение электронов пучка предполагалось одномерным, что, очевидно, выполняется не во всех режимах рассматриваемого генератора с ВК. Используемая численная схема подробно описана применительно к исследуемой системе в работе [7].

Для теоретического исследования мощности генерации ОСЗС, используемый в качестве вывода энергии СВЧ колебаний, следуя [13,14], представлялся в виде эквивалентной длинной линии, состоящей из последовательно соединенных индуктивностей L [H/m] и шунтирующих емкостей C [F/m]. Если считать, что электронный пучок движется параллельно длинной линии в непосредственной близости от нее, так что все силовые линии, соответствующие отдельным частям заряда $q(x)$ пучка, заканчиваются на длинной линии и начинаются при одном и том же значении продольной координаты x , то заряд пучка $q(x)$ может рассматриваться как индуцированный в длинной линии. Тогда ОСЗС описывается телеграфными уравнениями, дополненными слагаемым, описывающим возбуждение электромагнитных волн пучком:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{1}{C} \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (1)$$

Обратным влиянием возбуждаемого поля ОСЗС на динамику заряда пренебрегаем, т. е. рассматриваем приближение заданного тока. Последнее предположение справедливо, если электронный поток не находится в синхронизме с бегущей электромагнитной волной в длинной линии.

Телеграфные уравнения (1) решались численно в предположении согласования линии передачи на левом $x = 0$ и правом $x = l$ концах ОСЗС. Распределение величины заряда пучка $q(t, x)$, возбуждающего электромагнитные волны в линии передачи, бралось из решения задачи методом частиц (которое подробно описано в работах [7,9]).

Колебания в пучке с ВК далеки от гармонических, поэтому выходная мощность системы определяется следующим выражением:

$$P = \frac{1}{TK} \int_0^T U^2(t, x = l) dt, \quad (2)$$

где интеграл означает усреднение во времени мгновенной мощности $P_m(t) = U^2(t, l)/K$ на правом конце (выходе) линии передачи, l — длина линии передачи.

На рис. 2, *a* (штриховая линия 2) показана рассчитанная в рамках нелинейной нестационарной теории зависимость мощности выходного электромагнитного поля от величины тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0$. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей показывает их хорошее качественное и количественное соответствие при больших величинах тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0 > 0.4$. При таких значениях тормозящего потенциала используемая нестационарная одномерная теория оказывается справедливой, т.е. динамика пучка при больших величинах тормозящего потенциала и фокусирующего магнитного поля близка к одномерной.

Однако при малых величинах тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0$ ситуация изменяется. Экспериментальная зависимость на рис. 2, *a* показывает, что в области $\Delta V_r/V_0 < 0.4$ мощность генерации плавно уменьшается, обращаясь в ноль при торможении $\Delta V_r/V_0 \approx 0.18$. Таким образом, колебания в пучке с ВК с ростом торможения возникают мягко, область генерации соответствует тормозящим потенциалам $\Delta V_r/V_0 \in [0.18, 0.72]$. В численном моделировании наблюдается резкий срыв генерации при $\Delta V_r/V_0 \approx 0.38$, что не согласуется с экспериментальными данными. Соответственно численно определяемая область генерации колебаний ВК уменьшается.

Проведенный анализ позволяет предположить, что причиной несоответствия теории и эксперимента при малых тормозящих потенциалах является отсутствие учета двумерного движения электронов в пространстве взаимодействия. В этом случае при малых тормозящих потенциалах в области ВК динамика пучка оказывается принципиально двумерной, наблюдается значительное токооседание на замедляющую систему и предложенная одномерная модель оказывается не применимой [7].

Рассмотрим теперь кратко вопрос о наиболее эффективных параметрах линии передачи, при которых выводимая из области ВК мощность СВЧ-колебаний максимальна. С одной стороны, для увеличения выходной мощности необходимо обеспечить увеличение сопротивления связи K пучка с полем линии передачи. Однако возможности по значительному увеличению K малы, и экспериментально полученное значение $K = 100 \Omega$ близко к максимальному. Другой возможностью является изменение фазовой скорости v_{ph} волны в линии передачи. Соответствующая рассчитанная зависимость мощности от замедления волны $n = v_{ph}/c$ (c — скорость света) показана на рис. 2, *b*. Из него видно, что мощность генерации растет с уменьшением замедления n , достигая при малых n величины $P \approx 0.6 \div 0.8$ W. Последнее можно объяснить, учитывая, что в генераторе на ВК, в отличие от приборов с длительным взаимодействием (ЛБВ, ЛОВ и т.д.), не выполняется условие синхронизма волны с электронным потоком, заключающееся в близости фазовой скорости электромагнитной волны и скорости электронов пучка [14]. Более того, такой синхронизм принципиально невозможен, учитывая значительное изменение скорости электронов в тормозящем поле ВК от величины v_0 (определяемой ускоряющим напряжением $V_0 = 2$ kV) до нулевых значений в области остановки и поворота частиц (в области ВК). Следует, однако, отметить, что уменьшение замедления невозможно без одновременного уменьшения сопротивления связи [15], поэтому можно ожидать наличие некоторой оптимальной конструкции вывода энергии, при которой выходная мощность будет максимальна.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, профессору Д.И. Трубецкову за интерес к данной работе, обсуждения и полезные критические замечания.

Работа поддержана РФФИ (№ 05-02-16286, 05-02-08030), а также ФНП „Династия“.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Рациков В.И. // Физика плазмы. 1992. В. 18. С. 1182.
- [2] Alyokhin V.D., Dubinov A.E., Selemir V.D., Shamro O.A., Stepanov N.V., Vatrugin V.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22 (5). P. 954.

- [3] *Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П.* // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37 (3). С. 385.
- [4] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [5] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47 (6). С. 575.
- [6] *Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д.* // УФН. 2002. Т. 172 (11). С. 1225–1246.
- [7] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31 (11). С. 1009–1025.
- [8] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69 (12). С. 1724.
- [9] *Калинин Ю.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 25–34.
- [10] *Алимовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- [11] *Рошаль А.С.* Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
- [12] *Birdsall C.K., Langdon A.V.* Plasma physics, via computer simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.
- [13] *Morey I.J., Birdsall C.K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18 (3). P. 482.
- [14] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
- [15] *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. Ч. I и II. М.: Высш. шк., 1972.