

01;09

## ПОДАВЛЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С ОБРАТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

© Н.М.Рыскин

Двухлучевые аналоги лампы обратной волны (ЛОВ) привлекли внимание исследователей в 60-е годы, так как ожидалось, что сочетание традиционных для этих приборов механизмов взаимодействия с двухпоточковой неустойчивостью может привести к увеличению мощности и КПД (см. [1]). Наиболее последовательная линейная теория таких приборов была построена в работе [2], где было выяснено, что при достаточно больших значениях расстройки скоростей между потоками, оптимальных для двухпоточковой неустойчивости, эффективно взаимодействует с обратной электромагнитной волной (ЭМВ) лишь более медленный поток, а быстрый практически не оказывает влияния на пусковые условия генератора. Как следствие, пусковой ток возрастает почти в два раза по сравнению с однолучевым случаем. Этот результат объясняется различным характером группировки в ЛОВ и двухлучевом усилителе. Таким образом, двухлучевые ЛОВ-генераторы были признаны неперспективными, и работы в этом направлении прекратились.

Однако после того как в середине 70-х годов была обнаружена модуляционная неустойчивость (ее часто называют автомодуляцией) и переход к хаосу в ЛОВ при увеличении постоянного тока пучка [3,4], стало ясно, что оптимальные условия генерации определяются тем, до каких пределов можно увеличивать постоянный ток (или, вернее, параметр усиления Пирса  $S^3$ ), не достигая порога автомодуляции. Были предложены некоторые способы подавления модуляционной неустойчивости: за счет увеличения параметра пространственного заряда [5,6] и за счет использования связанных электродинамических систем [7]. Однако исходя из результатов работы [2], можно предложить другой способ подавления — за счет использования двухскоростного электронного потока. Ниже изложены результаты исследования этого способа, показывающие возможность увеличения мощности генерации в одночастотном режиме.

Численное моделирование процесса установления колебаний при взаимодействии двух электронных потоков, начальные скорости которых равны соответственно  $v_{01}$  и  $v_{02}$ , с обратной ЭВМ показало, что увеличение параметра расстройки скоростей

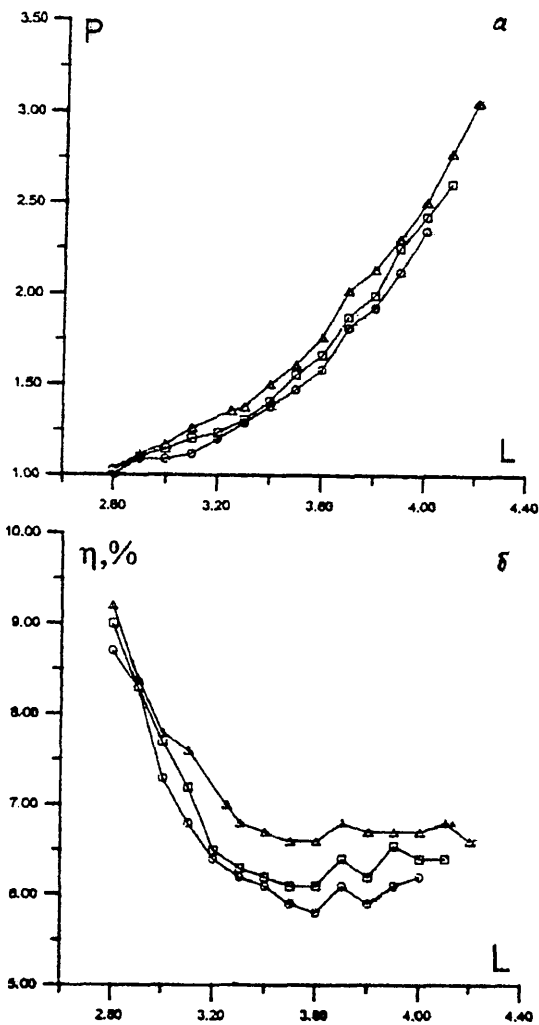
$$\Delta = \frac{v_{02} - v_{01}}{v_{01}}$$

действительно позволяет осуществить эффективное подавление модуляционной неустойчивости. В соответствии с результатами работы [2] скорость более медленного потока выбиралась равной фазовой скорости ЭВМ ( $v_{01} = v_{ph}$ ,  $v_{02} > v_{ph}$ ).

Поскольку необходимо не просто найти границы подавления неустойчивости, а определить мощность и КПД генерации в установившемся одночастотном режиме, в качестве критерия одночастотности было выбрано установление колебаний за определенный (не слишком большой) промежуток времени. Сначала при  $v_{01} = v_{02}$  определялось значение безразмерного параметра  $L = 2\pi C_1(1 + \delta)N$ , при котором одночастотный режим устанавливался за время  $\tau = \omega_{p1}t \approx 5000$ . Здесь введены следующие обозначения:  $C_1^3$  — параметр усиления Пирса для первого (синхронного с волной) потока [1],  $N$  — электрическая длина пространства взаимодействия,  $\delta = \rho_{02}/\rho_{01}$  — отношение невозмущенных плотностей заряда,  $\omega_{p1}$  — плазменная частота первого потока. Сопротивление связи полагалось одинаковым для обоих потоков. После этого увеличивалось значение  $C_1$  (а следовательно,  $L$ ) и одновременно увеличивалась скорость второго потока  $v_{02}$ , так чтобы установление колебаний вновь наступило при  $\tau \approx 500$ , и определялись выходная мощность и КПД. Затем вновь увеличивались  $C_1$  и  $v_{02}$  и так далее.

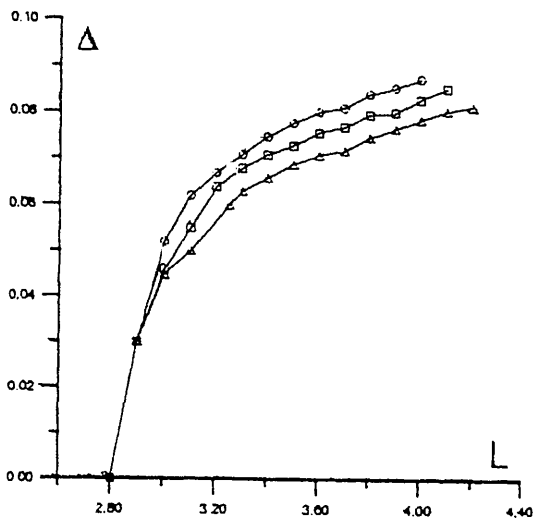
Разумеется, такой способ подавления модуляционной неустойчивости имеет предел, превысив который уже нельзя достичь установления одночастотных колебаний. Например, при бесконечно малом пространственном заряде в однолучевой ЛОВ модуляционная неустойчивость наступает при  $L = L_m \approx 2.9$ . Следовательно, в двухлучевой системе при  $\delta = 1$  неустойчивость нельзя подавить, если  $L > L_m\sqrt{2} \approx 3.81$ . С ростом пространственного заряда предельное значение  $L$  несколько увеличивается.

Результаты моделирования при равных плотностях заряда ( $\delta = 1$ ) приведены на рисунке в виде зависимостей мощности, КПД и  $\Delta$ , при котором установление колебаний происходит за время  $\tau \approx 5000$ , от  $L$  при различных значениях параметра  $Q_1(4Q_1C_1 = (\omega_{p1}/\omega C_1)^2$  — параметр пространственного заряда для первого потока [1]). Нетрудно видеть,



Зависимости выходной мощности в относительных единицах (а), КПД (б) и  $\Delta$ , при котором происходит подавление автомодуляции (в), от параметра  $L$  при  $\delta = 1.0$ ,  $N = 10.0$ ,  $Q_1 = 2.0$  (кружки), 4.0 (квадраты) и 6.0 (треугольники).

что  $Q_1$  не зависит от тока пучка. Моделирование проводилось при небольших значениях  $Q_1$ , чтобы исключить возможность подавления автомодуляции пространственным зарядом. За единицу мощности было принято значение для односкоростного потока при  $Q_1 = 2.0$ . Видно, что эффект подавления модуляционной неустойчивости наблюдается при достаточно небольших  $\Delta$ , значительно меньших,



Продолжение рисунка.

чем оптимальные для двухпоточковой неустойчивости [2]. Расчеты показывают, что подавление неустойчивости позволяет повысить мощность генерации в 2–3 раза при одновременном падении КПД на 2–3%. С ростом пространственного заряда этот эффект усиливается.

Исследование подавления автомодуляции при  $\delta \neq 1$  показало, что при  $\delta < 1$  возможности подавления автомодуляции ухудшаются — уменьшаются максимальное значение  $L$ , при котором можно добиться подавления, и максимальная выходная мощность. Это, очевидно, объясняется тем, что при  $\delta < 1$  уменьшается доля электронов, несинхронных с волной, а следовательно, снижаются возможности управления процессом взаимодействия. При  $\delta$ , незначительно превышающих единицу, можно добиться некоторого увеличения мощности (оптимальное значение  $\delta \approx 1.2$ ), хотя максимальное  $L$  по-прежнему уменьшается. Однако при дальнейшем увеличении  $\delta$  максимальная мощность резко падает.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что использование двухскоростного электронного потока позволяет осуществить эффективное подавление модуляционной неустойчивости и добиться существенного увеличения выходной мощности в одночастотном режиме по сравнению с обычной (однолучевой) ЛОВ при одновременном незначительном снижении КПД.

## Список литературы

- [1] *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио, 1970.
- [2] *Викулов И.К., Тагер А.С.* // Радиотехника и электроника. 1962. Т. 7. № 5. С. 826–837.
- [3] *Безручко Б.П., Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П.* // Лекции по электронике СВЧ (4-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 5. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. С. 236–267.
- [4] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037–1052.
- [5] *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 5. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1980. С. 25–77.
- [6] *Балахирев В.А., Островский А.О., Ткач Ю.В.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 2. С. 158–163.
- [7] *Исаев В.А., Фишер В.Л., Четвериков А.П.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (7-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 2. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. С. 3–11.

Поступило в Редакцию  
5 мая 1996 г.