

ЛИТЕРАТУРА

- Капица П. Л. Электроника больших мощностей. — М.: Изд. АН СССР, 1962.
- Завьялова Т. А., Уткин К. Г., Чепарухин В. В. О влиянии краевого электрического поля на траектории электронов в магнетронном диоде. — Труды ЛПИ, № 311, Физическая электроника, 1970, с. 159.
- Исследование условий формирования электронного потока в магнетроне в осевом направлении. / И. М. Блейвас, В. Г. Кандыбей, Л. Г. Некрасов, Р. А. Хомич. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, вып. 12(360), 1983, с. 37—40.
- Коллинз Дж. Магнетроны сантиметрового диапазона. — М.: Советское радио, 1950.
- Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. / Под ред. М. М. Федорова. — М.: Изд. иностр. лит., 1961.
- Бондарцов Г. И., Соминский Г. Г. Исследование аксиальных колебаний пространственного заряда в усилителе со скрещенными полями. — ЖТФ; 1975, т. 45, вып. 8, с. 1654.
- Бондарцов Г. И., Соминский Г. Г., Фридрихов С. А. Исследование аксиальных колебаний пространственного заряда в магнетронном диоде. — Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, вып. 19, с. 895.
- Исследование влияния аксиальных колебаний пространственного заряда на условия запуска магнетронных приборов с вторично-эмиссионными катодами. / Г. И. Бондарцов, Г. Г. Соминский, А. И. Андреев, С. А. Левчук. — Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Физические процессы в приборах М-типа, проблемы их теории и машинного проектирования». — Л.: ЛПИ, 1979, с. 30.
- Малюгин В. И., Соминский Г. Г. Об аксиальном распределении электронной бомбардировки катода в системах со скрещенными полями. — Труды ЛПИ, № 356, Физическая электроника, 1977, с. 64.
- Комплекс программ на БЭСМ-6 широкого класса задач статической электроники (КСИ-БЭСМ-6). / И. М. Блейвас, Б. И. Голубцов, В. П. Ильин и др. — Методы расчета электронно-оптических систем. Ч. II, Новосибирск: Вычислительный центр, 1973, с. 3—20.

Статья поступила 29 июля 1983 г.

УДК 621.385.632

А. П. Кузнецов

ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ СИГНАЛА В ЛБВ

Теоретически рассмотрен эффект подавления сигнала в ЛБВ на цепочках связанных резонаторов (ЦСР), отличный от эффекта Компфнера. Подавление имеет место вблизи высокочастотной границы полосы пропускания при точном синхронизме электронов с волной и обусловлено чисто реактивным взаимодействием, которое не сопровождается передачей энергии сигнала электронам. Эффект может быть использован для измерения модифицированного сопротивления связи ЦСР на частоте отсечки.

Для лампы бегущей волны (ЛБВ) хорошо известен эффект полного подавления сигнала [1], открытый Компфнером. Им же предложено использовать этот эффект для измерения фазовой скоро-

сти и сопротивления связи замедляющей системы — основных параметров, определяющих работу ЛБВ. В последнее время широкое распространение получили ЛБВ на ЦСР. Для таких ЛБВ большое значение имеет исследование эффектов вблизи границы полосы прозрачности (например, в связи со стабильностью на 2π -виде). В этом случае сопротивление связи резко возрастает и обычные уравнения теории ЛБВ [1] не годятся. В работе [2] для описания процессов, происходящих в ЛБВ вблизи отсечки, предложены уравнения

$$\mp \frac{d^2 F}{d\xi^2} + \Omega F = iI, \quad \left(\frac{d}{d\xi} - iB \right)^2 I = iF. \quad (1)$$

Здесь верхний знак соответствует высокочастотной границе полосы пропускания, нижний — низкочастотной; F и I — безразмерные амплитуды поля и тока; ξ — безразмерная координата; Ω — безразмерная отстройка частоты входного сигнала от границы полосы пропускания; B — параметр рассинхронизма. Связь этих величин с соответствующими размерными дается следующими соотношениями:

$$\xi = \beta_0 x, \quad F = \frac{E e^{i\beta_0 x}}{2V \varepsilon^2 \beta_0}, \quad I = \frac{J e^{i\beta_0 x}}{I_0}, \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{2(\omega - \omega_0)}{\varepsilon^2 |\omega''(\beta_0)| \beta_0^2}, \quad B = \frac{\beta_0 v_0 - \omega}{\varepsilon \beta_0 v_0}, \quad \varepsilon^4 = \frac{I_0 R_0}{2V},$$

где ω_0 и β_0 — частота отсечки и соответствующее ей волновое число; $v_0 = \sqrt{2eV/m}$ — скорость электронов; E и J — ВЧ поле и ток; I_0 — постоянная составляющая тока пучка; x — координата; R_0 — модифицированное сопротивление связи на частоте отсечки, выражающееся через обычное сопротивление связи K следующим образом:

$$R_0 = \lim_{\omega \rightarrow \omega_0} [K(\omega) \sqrt{2\omega''(\beta_0)(\omega - \omega_0)}] \frac{\beta_0}{\omega_0}. \quad (3)$$

В данной работе доказывается существование режима полного подавления сигнала вблизи высокочастотной границы полосы пропускания, принципиально отличного от эффекта Компфнера. Этот режим можно использовать для измерения модифицированного сопротивления связи R_0 — параметра, определяющего поведение ЛБВ вблизи границы полосы пропускания.

Оставим в уравнениях (1) верхний знак и положим параметр рассинхронизма B равным нулю. В этом случае подстановка $e^{-iK\xi}$ приводит к биквадратному дисперсионному уравнению

$$\Omega = -K^2 + 1/K^2, \quad (4)$$

так что можно получить распределение поля и тока по длине прибора в аналитической форме:

$$I = C_1 \sin ax + C_2 \cos ax + C_3 \operatorname{sh} bx + C_4 \operatorname{ch} bx, \quad (5)$$

$$F = i[a^2 C_1 \sin ax + C_2 a^2 \cos ax - C_3 b^2 \operatorname{sh} bx - C_4 b^2 \operatorname{ch} bx],$$

где C_i — константы, зависящие от граничных условий, $a^2 = \sqrt{\Omega^2/4 + 1} - \Omega/2$, $b^2 = \sqrt{\Omega^2/4 + 1} + \Omega/2$.

Пусть высокочастотный сигнал поступает на вход пространства взаимодействия ($\xi=0$). Пучок на входе полагаем невозмущенным:

$$I(0) = 0, I'(0) = 0. \quad (6)$$

На выходе прибора поле и его производная связаны за счет граничного условия на нагрузке:

$$F'(l) = i\alpha F(l), \quad (7)$$

где α — коэффициент, определяемый конструкцией вывода энергии. Поскольку мы ищем режим полного подавления входного сигнала, то необходимо, чтобы поле равнялось нулю на выходе прибора. Согласно (7) требуется обращение в нуль и производной поля:

$$F(l) = 0, F'(l) = 0. \quad (8)$$

Можно показать, что распределения поля и тока (5) удовлетворяют граничным условиям (6), (8) тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\cos al \operatorname{ch} bl - \frac{\Omega}{2} \sin al \operatorname{sh} bl + \frac{\Omega^2}{2} + 1 = 0. \quad (9)$$

Совместно с $B=0$ оно и представляет собой условие полного подавления. Уравнение (9) дает в неявной форме зависимость безразмерной длины l от безразмерной частоты Ω . Эта зависимость показана на рис. 1 (кривая $\alpha=0$).

Сделаем несколько замечаний о физической сущности рассматриваемого эффекта подавления.

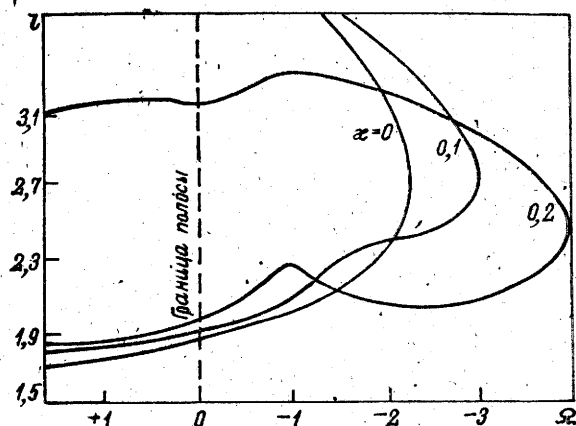


Рис. 1. Зависимость безразмерной длины реактивного подавления от безразмерной частоты сигнала при различных значениях параметра пространственного заряда.

Несложно показать, что все коэффициенты C_i в соотношениях (5) являются действительными величинами. Тогда из (5) следует, что поле и ток сдвинуты по фазе точно на $\pi/2$ в любой точке прибора. Соответственно равна нулю активная мощность взаимодействия пучка и поля. В то же время пучок и поле интенсивно взаимодействуют: ток нарастает по длине прибора, хотя на входе он равен

нулю, и пучок не модулирован. Таким образом, взаимодействие носит чисто реактивный характер. Мощность, поступающая в систему, приводит к группировке пучка, а затем переизлучается пучком обратно из системы, так что суммарный поток мощности оказывается равным нулю. Этот своеобразный механизм подавления отличен от компрессионного, когда подавление происходит за счет перекачки активной мощности из поля в пучок. Мы предлагаем назвать его реактивным подавлением.

Для облегчения экспериментальных поисков и идентификации реактивного подавления на рис. 2 приведена кривая реальных размерных токов и напряжений подавления, рассчитанная для лампы М4040 [3] без учета пространственного заряда и диссипации*. Эти кривые имеют две характерных особенности. Во-первых, реактивное подавление исчезает для частот, отстоящих более чем на 63 МГц от частоты отсечки внутри полосы пропускания. Во-вторых, напряжение, отвечающее режиму подавления, практически постоянно и равно 10,6 кВ, что соответствует синхронизму пучка с волной на частоте отсечки. В каждом конкретном случае цифры будут, разумеется, иными, но качественно эти особенности сохраняются.

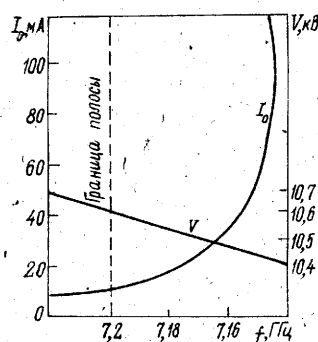


Рис. 2. Зависимость от частоты тока и напряжения пучка, обеспечивающих реактивное подавление в конкретной ЛБВ.

Отметим, что численное решение уравнений (1) с граничными условиями (6), (8) обнаруживает также и другую ветвь подавления, плавно переходящую в компрессионное при удалении от границы полосы. Обычно на эту ветвь и обращают внимание в численных расчетах и экспериментах. Ветвь реактивного подавления, насколько нам известно, до сих пор ускользала от внимания. Одна из вероятных причин этого — малая протяженность этой ветви по частоте.

Эффект реактивного подавления можно использовать для измерения модифицированного сопротивления связи R_0 , определяющего работу ЛБВ вблизи отсечки. Для этого достаточно измерить ток I_0 и напряжение подавления V_0 точно на частоте отсечки. Используя формулы (2) и результаты расчетов, легко получаем

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0} \frac{0,0159}{N^2}, \quad (10)$$

где N — число ячеек в системе.

* Методика расчета обычного сопротивления связи известна [4]. Модифицированное сопротивление связи было рассчитано по формуле (3) при помощи этой методики и оказалось, как и следовало ожидать, конечным и равным 3,63 Ом.

При учете пространственного заряда вместо второго уравнения системы (1) следует пользоваться уравнением

$$\left(\frac{d}{d\xi} - iB\right)^2 I + \Omega_p^2 I = iF, \quad (11)$$

где $\Omega_p = \omega_p / \varepsilon_0 v_0$; ω_p — частота плазменных колебаний электронов в пучке. Условие $B=0$ при этом сохраняется, а уравнение для определения I выглядит следующим образом:

$$\cos al \operatorname{ch} bl - \frac{\Omega - \Omega_p^2}{2\sqrt{1 + \Omega\Omega_p^2}} \sin al \operatorname{sh} bl + \frac{(\Omega + \Omega_p^2)^2}{2} + 1 = 0, \quad (12)$$

где a^2 и b^2 — корни уравнения $x^2 - 2\left(\frac{\Omega - \Omega_p^2}{4} + 1 + \Omega\Omega_p^2\right)^{1/2} x + 1 + \Omega\Omega_p^2 = 0$.

На рис. 1 сплошными линиями показаны результаты расчетов, выполненных с помощью фор-

мулы (12). В качестве параметра используется величина $\kappa = \Omega_p^2 / l^2$, удобная в том отношении, что она не зависит от тока.

В заключение выражаю благодарность В. Л. Фишеру и Л. В. Булгаковой за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецков Д. И., Шевчик В. Н. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. — М.: Советское радио, 1970.
2. Кузнецов А. П., Кузнецов С. П. О характере неустойчивости в ЛБВ вблизи границы полосы пропускания. — Известия вузов. Сер. Радиофизика, 1980, № 9, с. 1104—1112.
3. Collier R. J., Helm G. D., Laico J. P., Striny R. M. The Ground Station High Power Traveling-Wave Tube. — Bell Syst. Techn. J. 1963, vol. 42, No 7, pp. 1829—1861.
4. Фишер В. Л., Гаврилов М. В. Методика расчета «холодных» параметров замедляющих систем типа цепочек связанных резонаторов. — Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника, 1981, № 11, с. 13—17.

Статья поступила 22 марта 1983 г.,
после переработки — 18 октября 1983 г.

ДЕПОНИРОВАННЫЕ РУКОПИСИ

УДК 621.385.632 : 621.372.412

КАНАВЕЦ В. И., МОЗГОВОЙ Ю. Д., СЛЕПКОВ А. И. Исследование самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ на связанных резонаторах.

На основе разработанного метода анализа усиления и самовозбуждения колебаний в мощных ЛБВ проведено исследование режимов возникновения изрезанности АЧХ, появления регенеративного усиления и самовозбуждения колебаний в односекционной ЛБВ на связанных резонаторах. Показано, что в мощных ЛБВ обратные связи вызывают существенную изрезанность АЧХ и появление резких пиков в зависимостях коэффициента усиления от частоты.

Решение характеристического уравнения с учетом граничных условий относительно комплексной частоты для частного случая трехволновой связи в точке синхронизма вдали от границ полосы прозрачности позволило определить частоты возбуждаемых волн и стартовую длину замедляющей системы для возникновения самовозбуждения колебаний в связанной системе.

Проведенные матричным методом с учетом граничных условий численные расчеты процессов усиления и самовозбуждения колебаний показали, что увеличение тока пучка приводит к резкому нарастанию максимумов усиления и появлению областей регенеративного усиления и самовозбуждения колебаний.

Полный текст хранится в фондах ЦНИИ «Электроника», Р-3811.