

изменения поля, в которых нарушается адиабатичность продольного распределения амплитуды. В этом случае, в отличие от длительного взаимодействия типа ЛБВ, ЛОВ, генератора дифракционного излучения и т. д., вся картина группировки электронов в сгустки задается на межзачорных сетках или диафрагмах с отверстиями и в линейном приближении не зависит от присутствия и формы распределения амплитуды переменного поля в самих модулирующих зазорах.

Рассмотренная каскадная группировка электронов потока в переменном поле представляет, по-видимому, наибольший интерес в электронных устройствах миллиметровых и более коротких длин волн. В этих диапазонах уже затруднительна реализация классической клистронной электродинамической системы, в которой узкие модулирующие зазоры чередуются с областями дрейфа электронов, и более естественна структура поля противоположного характера: протяженные, в смысле большого значения угла пролета, участки пространства, заполненные переменным полем открытой резонансной структуры, чередуются с малыми областями фазовой модуляции электронного потока, создаваемыми достаточно тонкими металлическими или диэлектрическими диафрагмами, слабо возмущающими поле структуры в целом. Кроме того, такая организация электродинамической системы позволяет относительно просто использовать широкие или многолучевые электронные потоки и увеличить тем самым мощность выходного сигнала создаваемых электронных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гапонов А. В., Миллер М. А. //ЖЭТФ. 1958. 34, № 1. С. 242. [2] Миллер М. А. //Изв. вузов, Радиофизика. 1958, 1, № 3. С. 110. [3] Канавец В. И., Терехилов А. В. //Тез. докл. IV Всесоюз. семин. «Мощные генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках». М., 1984. С. 104. [4] Ермолаев М. В., Канавец В. И., Терехилов А. В., Черепенин В. А. //Радиотехн. и электроника. 1986. 31, № III. С. 2241. [5] Терехилов А. В. //Тез. докл. X Всесоюз. науч. конф. «Электроника СВЧ». Минск, 1983. Т. 1. С. 22. [6] Алексеев Ю. К., Костиенко А. И. //Изв. вузов, Радиофизика. 1986. 29, № 10. С. 1223. [7] Алексеев Ю. К., Афонин Д. Г., Костиенко А. И. //Тез. докл. X Всесоюз. науч. конф. «Электроника СВЧ». Минск, 1983. Т. 1. С. 219. [8] Костиенко А. И., Алексеев Ю. К., Афонин Д. Г. и др. Деп. ВИНТИ № 2933 от 01.06.83. М., 1983. [9] Алексеев Ю. К., Костиенко А. И. //Изв. вузов, Радиофизика. 1988. 31, № 1. С. 120. [10] Алексеев Ю. К., Костиенко А. И. //Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. № 6. С. 3; № 10. С. 15. [11] Алексеев Ю. К. //ЖТФ. 1991. 61, № 10. С. 19. [12] Соколов О. Н., Штыров А. И. //Радиотехн. и электроника. 1966. 11, № 6. С. 1092. [13] Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М., 1970. [14] Справочник по специальным функциям/Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М., 1979. С. 184. [15] Лопухин В. М. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. М., 1953. [16] Шевчик В. Н. Основы электроники СВЧ. М. 1959. [17] Алексеев Ю. К., Костиенко А. И. Деп. ВИНТИ № 2464 от 12.04.84. М., 1984. [18] Алексеев Ю. К., Негирев А. А., Романуша Е. И. Деп. ВИНТИ № 448 от 24.02.93. М., 1993.

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физика. Астрономия. 1994. Т. 35, № 4

УДК 621.385.6

### МОДЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СОГЛАСОВАННЫХ ВОЛНОВОДАХ

В. И. Канавец

Обсуждаются физика получения «горячих» мод колебаний согласованной на концах волноведущей электродинамической системы с потоком; проблемы реализации мод генератора на связанных волнах в областях частот, соответствующих кру-

тым участкам дисперсионных характеристик вблизи границ полос прозрачности; особенности модового состава генераторов на сверхразмерных волноводах и переход к электронным модам.

В микроволновой электронике моды электронных генераторов чаще всего определяются резонаторными модами «холодных» (без пучка) электродинамических систем [1] и генерация сводится к индуцированному излучению потока электронов в полях этих мод. В важном для релятивистской электроники случае использования волноводующих систем резонаторные моды появляются из-за отражений распространяющихся волн от входного и выходного концов волновода. В этой связи отдельную группу генераторов составляют устройства на согласованных волноводах без отражений, например типа лампы обратной волны (ЛОВ). Генерация ЛОВ определяется механизмом интерференции, сопровождающим процессы в связанных волнах, а частота задается скоростью потока [2]. Далее будем рассматривать мощные релятивистские генераторы на гладких и периодических волноводах с «холодным» (без потока) и «горячим» (с потоком) согласованиями. При этом волновод может быть одномодовым или многомодовым (сверхразмерным).

Переход к согласованным волноводующим системам облегчает решение проблемы селекции мод, ибо «холодных» резонаторных мод нет и селекционируются только «горячие» моды, колебания активной связанной системы и электронные моды генераторов. Во всех этих процессах роль электронной среды принципиальна. Однако важны также и резонансные эффекты в волноводах на частотах вблизи границ полос прозрачности, когда групповая скорость оказывается малой, а сопротивление связи достаточно большим.

Сама возможность создания генераторов на сверхразмерных согласованных волноводующих системах тесно связана с резонансами у границ полос прозрачности и влиянием потока на резонансы: «горячим» сдвигом частот границ, электронной анизотропией, важной ролью медленной волны потока и другими эффектами.

Соответствующая электронная селекция для сильноточных устройств на сверхразмерных периодических волноводах была предложена в [3]. Она основана на использовании резонансных свойств периодических поверхностей и дополнительных эффектов, возникающих из-за направленного излучения релятивистских частиц.

В настоящее время реализовано много вариантов генераторов с излучением электронов в достаточно согласованных по входу или выходу сверхразмерных резонансных замедляющих системах [4], в их число входят: генератор типа ЛОВ-ЛБВ [5], релятивистский генератор поверхностной волны (ПВ) [6], мазер на циклотронном резонансе и аномальном эффекте Доплера [7], релятивистский генератор дифракционного излучения [8], ряд релятивистских многоволновых генераторов [9] и генераторов объемных волн (ОВ) [10]. В релятивистском генераторе поверхностной волны [6], например, согласование происходит с помощью плавного перехода от гребенчатой поверхности к гладкому волноводу, а затем к рупору большого диаметра.

В генераторах на согласованных волноводах колебательные моды «холодной» системы неустойчивы, принципиальна связь многих волн потока и поля, процесс существенно усложняется из-за взаимного влияния волновода и электронной среды [4, 9]. Трудности анализа привели к тому, что многие детали перехода от системы с многоволновой связью к системам с одномодовым самовозбуждением остались невы-

ясненными. Это касается, в частности, отличия мод генераторов от «горячих» и «холодных» мод волноводов, описания специфики мод связанной системы и электронных мод. Требуется специальная работа по классификации генераторов на согласованных волноводах для выяснения места таких устройств среди других электронных источников излучения.

## 1. Приближенное описание. «Горячие» моды колебаний

При общем анализе условий взаимодействия, согласования и отражения волн выделенных мод в гладких и периодических волноводах с положительной или отрицательной дисперсией можно использовать упрощенное эквивалентное представление системы в виде цепочек четырехполюсников с параллельно включенными емкостями ( $Y = i\omega C(\omega)$ ) или индуктивностями ( $Y = 1/i\omega L(\omega)$ ) (рис. 1, а). Сопротивление  $Z(\omega)$  часто представляется в виде контуров последовательного и параллельного типов, а также контуров сложного вида (рис. 1, б). Считается,

что продольное и поперечное взаимодействие потока и поля происходит в эквивалентных емкостных зазорах, включенных в различные ветви цепи. Методика позволяет учесть влияние потока на условия согласования и продольную структуру вихревых полей и тем самым рассмотреть переход от волн заданных мод согласованного волновода к «горячим» модам колебаний электродинамической системы.

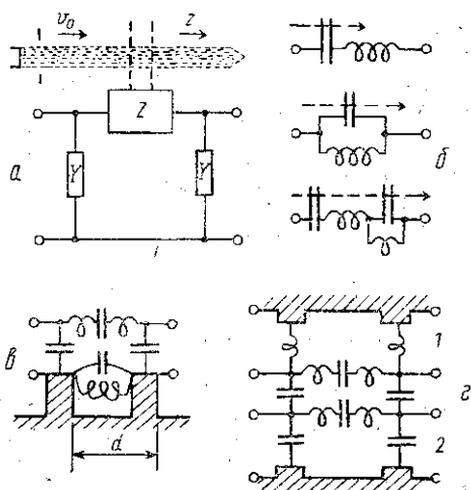


Рис. 1. Эквивалентные цепи: а — общая схема, б — схемы контуров, в — цепь для области частот «л»-вида системы с положительной дисперсией, г — две связанные линии с отрицательной (1) и положительной (2) дисперсиями для области частот «2л»-вида

В случае периодических волноводов эквивалентные цепи наиболее пригодны для описания поверхностного поля в области частот «л»-вида (рис. 1, в) или для получения данных о связи поверхностного и объемного полей на частотах «2л»-вида (рис. 1, г).

Если волновод имеет конечную длину, то предполагается выполнение условий идеального «холодного» согласования в рабочей области частот  $\Delta\omega$ : на входе  $Z_w(\omega) = Z_0(\omega)$  и на выходе  $Z_w(\omega) = Z_L(\omega)$ , где  $Z_w$  — волновое сопротивление. Для облегчения согласования область частот  $\Delta\omega$  берется на некотором удалении от граничных частот полос прозрачности. При конкретной реализации согласования рассматриваются плавные переходы и рупоры.

Предполагается, что в отрезках волноводов происходит длительное продольное или поперечное взаимодействие потока и поля. Энергия черпается из медленных волн потока, в том числе из медленной волны пространственного заряда, медленных циклотронных или синхронных волн. Считается, что отрицательный знак мощности медленной волны определяется отрицательной переносимой энергией при по-

ложительной групповой скорости  $v_g$ , равной средней продольной скорости потока  $v_0$  ( $v_g=v_0$ ) (см. рис. 1, а).

Для получения генерации и образования моды генератора необходима обратная связь. Она определяется отражениями волн от концов волновода из-за «горячего» рассогласования, а также внутренней обратной связью. В первом случае естественно говорить о получении «горячей» моды волновода с потоком, во втором — переходить к специальным задачам о моде в системе связанных волн при «холодном» и «горячем» согласовании. Иногда рассматривается комбинированная обратная связь. Последняя часто реализуется в областях частот вблизи границ полос прозрачности, соответствующих крутым участкам дисперсионных характеристик [4]. Работа на крутых участках как раз и соответствует учету резонансных свойств периодических поверхностей.

Далее детализируется физика перехода от связанных волн к модам генераторов при токах, близких к пусковым. При этом используются данные расчетов с помощью методик [4, 9].

## 2. Связь с медленной волной в областях тройных точек

Результаты расчетов позволяют выделить два варианта связи волн в областях частот, соответствующих крутым участкам дисперсионных кривых вблизи тройных точек («пл»-виды,  $n=0, 1, 2, \dots$ , рис. 2): при

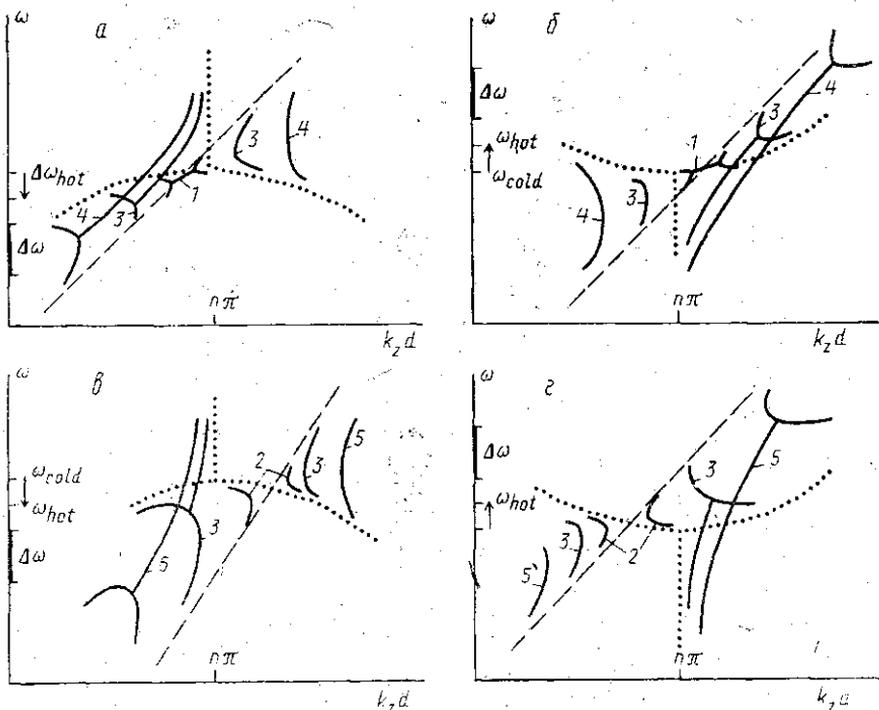


Рис. 2. Дисперсионные характеристики для систем с высокочастотной (а, б) и низкочастотной (б, в) границами полос прозрачности: точечная линия — для системы без потока, штриховая линия — для медленной волны; 1 — для слабой связи ЛБВ-типа, 2 — для слабой связи типа ЛОВ, 3 — для связи при конечных возмущениях, 4 — для режима ЛБВ-ЛОВ, 5 — для режима ЛОВ-ЛБВ

положительном значении второй производной частоты  $\omega$  по волновому числу  $k_z$  ( $d^2\omega/dk_z^2 \equiv \omega'' > 0$ ) и при отрицательном значении ( $\omega'' < 0$ ). В качестве базовых процессов будем рассматривать связи волн поля с медленными электронными волнами. Будем, в частности, иметь в виду, что слабая связь медленной волны потока и прямой волны поля характеризует режим усиления ЛБВ-типа. Слабая связь медленной и обратной волн отличается периодической взаимной перекачкой энергии с усилением (ЛОВ-режим). Для быстрых волн потока реализуются режимы двухволновой аperiodической и периодической связей без усиления.

Связь поля с медленной волной может реализоваться как для основной волны, так и для волн пространственных гармоник волноведущих систем с положительной и отрицательной дисперсиями. Волны могут быть объемными или поверхностными. Тройная точка может соответствовать границам основной или высших полос прозрачности. Считается, что поверхностные или объемные волны успевают установиться, при этом рабочая область частот обратной волны выбирается с учетом возможности многократных отражений волн от боковых стенок (почти поперечное распространение).

Заметим, что связь с медленной волной реализуется при значениях обобщенного параметра электронных волн  $\sigma = \Omega/(\omega C) \geq 1$ , где  $\Omega$  — характерная частота потока,  $C$  — параметр усиления в теории ЛБВ. В случае волн пространственного заряда  $\Omega = \omega_q$ , где  $\omega_q$  — плазменная частота, определяемая с учетом стенок волновода. В случае циклотронных волн  $\Omega = \omega_B$ , где  $\omega_B$  — циклотронная частота.

### 3. Генераторы при двухволновой связи. ЛОВ и резонансная ЛБВ

Колебания в согласованной электродинамической системе возникают из-за усиления поля под влиянием медленной волны потока. В системе с быстрой волной нет заметных колебаний. При двухволновом взаимодействии в ЛОВ колебания обусловлены интерференционным механизмом связи обратной волны поля и медленной волны потока. При условии синхронизма в области токов, равных пусковому, мода ЛОВ-генератора характеризуется продольными распределениями мощностей обратной волны ( $P < 0$ ) и медленной волны ( $P_e < 0$ ), показанными на рис. 3, а. Нулевое значение поля достигается в выходном сечении  $z=L$ . Направление распространения энергии представлено стрелками. В потоке и в волноводе потоки мощности имеют разные знаки, что свидетельствует о реализации внутренней обратной связи. Отличие «горячего» и «холодного» согласований приводит к появлению малой дополнительной стоячей волны, не показанной на рисунке.

В ЛБВ-генераторе обратная связь определяется только отличием «холодного» и «горячего» согласований. На типичных зависимостях мощностей прямой волны поля и медленной волны потока от продольной координаты появляются периодические пульсации (рис. 3, б). Будем считать их малыми, тогда нуль поля приходится на входное сечение волновода ( $z \approx 0$ ).

Следует отметить, что при взаимодействии потока и поля в областях частот на крутых участках дисперсионных кривых максимальное «горячее» рассогласование наблюдается на частотах «горячих» границ полос, где «горячее» волновое сопротивление наиболее сильно отличается от «холодного» [4].

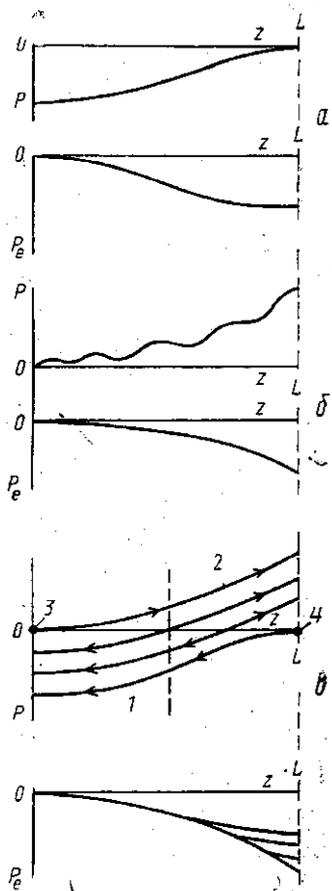


Рис. 3. Зависимости мощности волны поля  $P$  и медленной волны потока  $P_e$  от координаты  $z$  для режимов ЛОВ (а), ЛБВ (б), комбинированных режимов (в): ЛОВ-ЛБВ (1) и ЛБВ-ЛОВ (2); 3 и 4 — точки нуля поля соответственно для режимов ЛБВ и ЛОВ

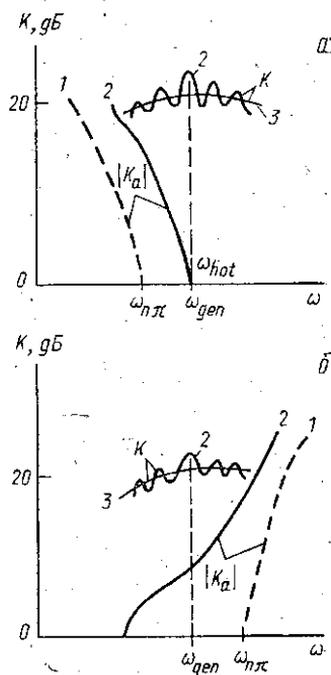


Рис. 4. Зависимости коэффициентов усиления  $K$  и затухания  $|K_a|$  от частоты для секций волноводов с высокочастотной (а) и низкочастотной (б) границами полос прозрачности: 1 — без потока, 2 — с потоком, 3 — при «горячем» согласовании

#### 4. Связь типа ЛОВ-ЛБВ и ЛБВ-ЛОВ при «горячем» согласовании

Пусть медленная и быстрая волны потока достаточно разделены, а рабочая область «горячего» согласования (с помощью плавных переходов для потока и поля) находится на некотором удалении от тройной точки границы полосы. В системе нет отражений и реализуется трехволновая связь медленной волны потока с двумя волнами поля: прямой и обратной. Главную роль в трехволновой связи играют механизмы связи ЛБВ и ЛОВ. На зависимостях мощности волн поля от координаты нуля поля приходится на промежуточную область волновода (см. рис. 3, в). Если точка нуля находится на начальном участке этой области, то преобладает взаимодействие типа ЛБВ, на большом протяжении поток мощности поля положителен, получаем режим ЛБВ-ЛОВ. Если нуль попадает на выходной участок, то отрицательный поток мощности поля больше, совершается переход к режиму ЛОВ-ЛБВ.

## 5. Влияние потока на связь волн при «холодном» согласовании

Типичное изменение дисперсионных характеристик под влиянием потока при синхронизме медленной электронной волны с обратной волной поля показано на рис. 2, в, г. Точка синхронизма при слабой связи соответствует режиму ЛОВ. По мере увеличения связи в системе с высокочастотной «холодной» границей полосы прозрачности ( $\omega'' < 0$ , рис. 2, в) наблюдается низкочастотный сдвиг тройной точки «горячей» границы ( $\omega_{\text{hot}} < \omega_{\text{cold}}$ ). В области меньших частот эта точка переходит в тройную точку на границе области усиления ЛБВ. В системе реализуется режим ЛОВ-ЛБВ. Минимальный пусковой ток генерации достигается вблизи частоты «горячей» границы ( $\omega_{\text{gen}} \approx \omega_{\text{hot}}$ ), которая находится при расчетах мощностей потока и поля в системе. На этой частоте потоки мощности меняют свой знак, что соответствует возникновению в системе взаимного перехода распространяющихся и увлекаемых полей.

«Горячий» сдвиг низкочастотной границы полосы ( $\omega'' > 0$ ) показан на рис. 2, г. Вначале наблюдается высокочастотный сдвиг «горячей» границы. Далее режим ЛОВ переходит в режим взаимодействия типа ЛБВ. Генерация наблюдается в режиме ЛОВ-ЛБВ и, как правило, для области частот «горячей» границы полосы.

Если медленная волна потока находится в синхронизме с прямой волной поля, то при конечной связи этих волн в системе с  $\omega'' < 0$  наблюдается низкочастотный «горячий» сдвиг границы полосы, а при  $\omega'' > 0$  — высокочастотный (см. рис. 2, а, б). При достаточно большой связи в режимах ЛОВ-ЛБВ и ЛБВ-ЛОВ совершается переход к кривым, во многом аналогичным показанным на рис. 2, в, г.

Характерные частотные зависимости коэффициента усиления  $K$  для систем с низкочастотной и высокочастотной границами представлены на рис. 4, а, б. Гладкие кривые с одним максимумом показывают усиление в режиме одной возрастающей волны при идеальном «горячем» согласовании [4]. Переход к условиям «холодного» согласования приводит к пульсациям кривых усиления. Максимум усиления приходится на частоту «горячей» границы. Увеличение тока пучка увеличивает пульсацию. В точке максимума усиления достигается режим самовозбуждения генерации.

## 6. Мода генератора объемной волны при гибридной связи

Взаимодействие поверхностного поля и объемных волн высших типов, распространяющихся почти под прямым углом к оси системы, описывается с помощью связанных линий [11] (см. рис. 1, в) и характеризуется дисперсионными кривыми гибридных мод для области частот « $2\pi$ »-вида (рис. 5). Взаимодействие используется в релятивистском генераторе дифракционного излучения (РГДИ) [8, 9], где волновод согласуется путем плавных переходов, а открытый резонатор является неустойчивым. Участок кривой, примыкающий к « $2\pi$ »-виду, относится к значению тройной точки  $\omega'' > 0$ . Две другие тройные точки соответствуют границам дополнительных областей непрозрачности, для которых  $\omega'' < 0$ .

Предположим, что медленная волна потока находится в синхронизме с гибридной модой в области частот прямой волны (см. рис. 5). При малой связи реализуется режим ЛБВ. По мере увеличения связи, например путем приближения потока к поверхности волновода, область комплексного корня расширяется и возникает единое решение, пока-

занное на рис. 5 сплошными линиями. Оно относится к сложному режиму ЛБВ-ЛОВ, выполняющемуся одновременно для поверхностного и объемного полей. Преимущественный поток мощности полей на-

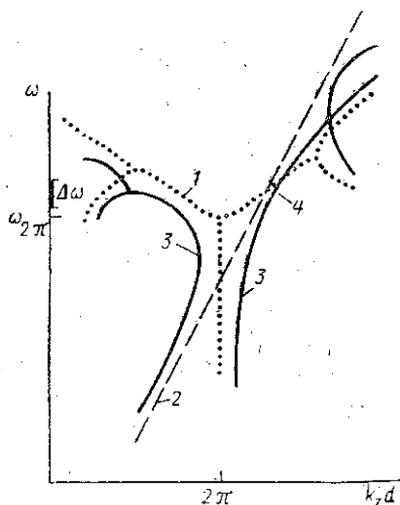


Рис. 5. Дисперсионные характеристики для гибридной связи волн потока и поля в области частот «2л»-вида: 1 — для гибридной моды без потока, 2 — для медленной волны потока, 3 — для связанной системы с потоком, 4 — для области комбинированного режима связи в РГДИ

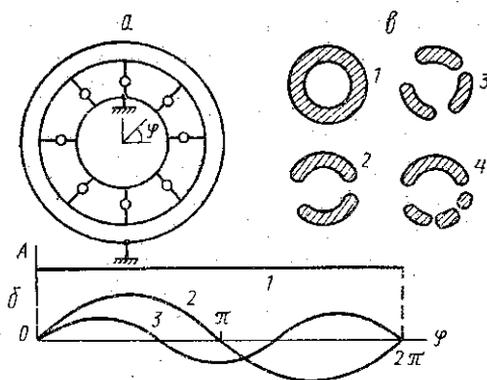


Рис. 6. Эквивалентная кольцевая активная линия: а — схема линии, б — зависимость амплитуды поля от угла  $\phi$ , в — диаграммы излучения для  $N=0$  (1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4, неоднородная линия)

правлен по движению потока и способствует выводу энергии излучения наружу. Механизм обратной связи ЛОВ-типа реализуется для объемного и поверхностного полей. «Горячие» границы полос прозрачности смещаются от точки синхронизма, что способствует согласованию волноведущих систем и улучшает условия селекций мод. Все эти особенности связанной системы приводят к формированию комбинированной моды РГДИ (режимы ЛБВ-ЛОВ-ПВ-ОВ) и к достижению больших мощностей излучения в миллиметровом диапазоне длин волн [9].

## 7. Моды сверхразмерного генератора поверхностной волны

При большом диаметре периодического волновода ( $D_B \gg \lambda$ ) в случае взаимодействия потока с поверхностным полем возможно появление несимметричных мод генерации высшего типа. Их можно определить, если использовать представление генератора на сверхразмерном волноводе в виде активной кольцевой линии.

Взаимодействие потока и поверхностного поля во многом связано с механизмами ЛОВ-ЛБВ или ЛБВ-ЛОВ. Важно также направленное излучение релятивистских сгустков. Генерация, как показывает теория и эксперимент [9], может реализоваться в пределах продольной активной полоски с поперечными размерами порядка длины волны. Систему многих генерирующих полосок, связанных между собой в данном угловом (тангенциальном) направлении, допустимо рассматривать в качестве распределенной активной линии, замкнутой в кольцо (рис. 6, а).

Если кольцевая линия однородна, то в ней в зависимости от тока и других параметров устанавливаются угловые распределения поля, характеризующиеся номерами моды  $N$  ( $N=0, 1, 2, \dots$ ). В развернутом виде они показаны для нескольких мод ( $N=0, 2, 3, 4$ ) на рис. 6, б. Низшей моде ( $N=0$ ) соответствует наименьший пусковой ток, постоянный уровень амплитуды колебаний, аксиально-симметричное поле и диаграмма излучения генератора. Высшим модам линии ( $N=2, 3, 4$ ) соответствуют диаграммы излучения в виде двух, трех и четырех отдельных дуг (рис. 6, в).

Если поток и электродинамическая система неоднородны в поперечном направлении, то дуги на диаграмме излучения становятся неодинаковыми, симметрия нарушается (рис. 6, в).

Рассматриваемый пример показывает механизм перехода режима многоволнового взаимодействия в согласованных волноводах парциальных систем в режим одномодовой генерации сверхразмерной системы. На квантовом языке в предельном случае малых флуктуаций следует говорить о переходе от многоквантового (по числу волн) процесса связи к одноквантовому когерентному излучению генератора со сложной структурой вихревого поля.

## 8. Учет распределенных потерь. Переход к электронным модам

В сверхразмерных волноводах при релятивистских энергиях частиц дополнительное излучение энергии наблюдается непосредственно из внутренних областей устройства за счет антенного механизма направленного излучения [9]. В рамках приближенного описания дополнительные потери учитываются путем введения добавочных сопротивлений и элементов связи в ветви эквивалентных цепей. Это справедливо в тех случаях, когда дополнительное излучение не меняет существенно условия взаимодействия, обратную связь и согласование.

В случае длинных систем с распределенными потерями общий характер процессов не меняется. Хотя исчезает вырождение (нет тройных точек), ход невырожденных дисперсионных кривых остается близким к ходу кривых в системе без потерь [4], сохраняются резонансы, «горячий» сдвиг границы полосы и т. д.

В коротких секциях механизмы связи при распределенных потерях действуют, как правило, в области основных критических частот («0», «л», «2л», ... -виды колебаний) для поверхностных и гибридных мод.

По мере роста распределенных потерь совершается переход к предельному случаю сильных потерь на излучение, когда структуры полей генераторов почти полностью определяются электронным потоком. Эти режимы характеризуются формированием электронных мод источников излучения. Примером служит образование моды генерирующего авторезонансного синхротронного мазера с трубчатым потоком в полностью поглощающем волноводе [9].

Электронные моды генератора могут формироваться и в системе, состоящей из коротких секций сверхразмерного периодического волновода, возбуждаемого релятивистским трубчатым потоком с достаточно большой энергией частиц. При больших энергиях продольные и поперечные структуры волн поля и потока не устанавливаются, процессы связи нарушаются и характеристики электронных мод генераторов во многом определяются потоком, резонансами у поверхности и направленным излучением частиц.

## Заключение

В работе рассмотрен специфический класс электронных генераторов на согласованных волноводах, процессы в которых определяются преимущественно связями многих волн потока и поля, а также существенным влиянием электронной среды на свойства волноводов. Соответствующий механизм многоволновой генерации занимает промежуточное место между механизмами генерации на «холодных» и электронных модах. Образование мод определяется главным образом эффектами усиления и внутренней обратной связи типа ЛОВ-ЛБВ или ЛБВ-ЛОВ, а также различием условий «горячего» и «холодного» согласований.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М., 1973. [2] Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М., 1963. [3] Канавец В. И. // IV Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. Ч. 2. Томск, 1982. С. 140. [4] Канавец В. И., Мозговой Ю. Д., Слепков А. И. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. М., 1993. [5] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др. // ЖТФ. 1980. 50, № III. С. 2381. [6] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др. // ЖТФ. 1981. 51, № 8. С. 1727. [7] Галузо С. Ю., Канавец В. И., Слепков А. И. и др. // ЖТФ. 1982. 52, № 8. С. 1681. [8] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др. // Письма в ЖТФ. 1981. 7, № 10. С. 587. [9] Бугаев С. П., Канавец В. И., Кошелев В. И., Черепенин В. А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск, 1991. [10] Бугаев С. П., Канавец В. И. и др. // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках. М. 1987. С. 106. [11] Канавец В. И. // Колебательные явления в потоках заряженных частиц. Л., 1978. С. 11.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4

УДК 621.385.6

### ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА НА ЧАСТОТЕ ГРАНИЦЫ ПОЛОСЫ ПРОЗРАЧНОСТИ

В. И. Канавец, А. С. Нифанов, А. И. Слепков

Методами линейной многомодовой и нелинейной нестационарной теорий рассмотрены особенности самосогласованного взаимодействия поверхностного поля сверхразмерного периодического волновода и релятивистского сильноточного трубчатого потока электронов. Найдены продольная и поперечная структуры электромагнитного поля, эффективность и спектр генерации.

### Введение

При синхронизме электронного потока и электромагнитного поля на частотах вблизи границы полосы прозрачности улучшается энергообмен между потоком и полем. Возрастает усиление, а стартовые токи, соответствующие началу генерации, достигают минимальных значений. Эта особенность процессов используется для электронной селекции мод в релятивистских генераторах на сверхразмерных периодических волноводах [1—4]. Однако влияние потока в механизме селекции недостаточно изучено. Это относится, в частности, к влиянию потока на «горячий» сдвиг границы полосы прозрачности [2] и условия синхронизма. Электронная среда смещает точку синхронизма потока и по-