

04;10;12

Влияние условий формирования на развитие колебаний пространственного заряда в длинноимпульсном релятивистском электронном пучке

© Л.Ю. Богданов, Г.Г. Соминский, А.Я. Фабировский

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 21 октября 1996 г. В окончательной редакции 31 марта 1997 г.)

Определены характеристики колебаний пространственного заряда длинноимпульсного релятивистского электронного пучка в диодах с магнитной изоляцией, отличающихся геометрией участка ускорения электронов и материалом взрывоэмиссионных катодов. Выявлена важная роль потока электронов с большими поперечными скоростями в развитии колебаний и выяснены закономерности формирования этого потока. Описаны возможные механизмы колебаний пространственного заряда, учитывающие взаимодействие потока электронов в ореоле пучка и основного потока электронов, развитие диокотронной неустойчивости в потоке электронов, эмиттированных внешней боковой поверхностью плазменного эмиттера, а также неустойчивость пространственного заряда "долгоживущих" электронов в канале транспортировки пучка.

Введение

Огромные и до сих пор далеко не исчерпанные возможности использования релятивистских электронных пучков (РЭП) в электронике и энергетике больших мощностей, поиск эффективных способов управления их характеристиками определяют постоянно существующий интерес к этому сложному объекту исследований. К сожалению, до сих пор часто не удается получить РЭП достаточно высокого качества. Препятствует этому, в частности, недостаток информации о закономерностях протекающих в них коллективных процессов.

Имеется большое количество публикаций, в которых анализируются закономерности формирования и транспортировки РЭП и их устойчивость (см., например, [1–7]). В теоретических исследованиях выявлены основные причины развития неустойчивостей, связанные с существованием градиентов скоростей и концентрации электронов в потоках. Механизм развития неустойчивостей под действием этих факторов имеет достаточно общий характер и проявляется не только в РЭП (см., например, [8,9]). Известные теоретические исследования выполнены для сильно идеализированных моделей пучков и большей частью в линейном приближении. Они успешно объясняют разрушение РЭП, однако не позволяют, как правило, определить амплитудно-частотные и пространственно-временные характеристики происходящих в них коллективных процессов.

В экспериментальных работах из-за трудностей диагностики сильноточных электронных потоков анализировались преимущественно либо весьма низкочастотные (≤ 100 МГц) либо уже существенно высокочастотные процессы (≥ 3000 МГц) (см., например, [2,10–13]). Лишь недавно благодаря использованию достаточно совершенной слабозмущающей методики исследования были получены сведения о характеристиках коллективных процессов в широкой полосе частот [14–18]. Бы-

ли измерены амплитудно-частотные и пространственно-временные характеристики колебаний в наименее исследованных ранее длинноимпульсных РЭП. Однако полученных данных оказалось недостаточно для однозначного определения их природы. В настоящей работе сообщается о новых результатах, позволяющих лучше понять механизмы коллективных процессов и их связь с особенностями формирования и транспортировки РЭП в широко используемых на практике диодах с магнитной изоляцией.

Результаты измерений и их обсуждение

Измерения выполнены на установке СЭР-1 [15,19] в экспериментальном приборе, сечение которого схематически показано на рис. 1. Электроны, эмиттированные кромочным взрывоэмиссионным катодом 1 диаметром D_c , ускорялись в зазоре L_{ca} между катодом и анодом 2 до энергии около 200 кэВ, далее дрейфовали в канале

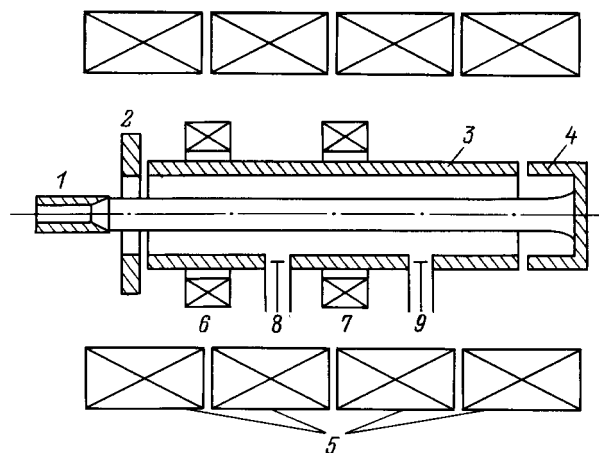


Рис. 1. Схема сечения экспериментального прибора.

транспортировки 3 (диаметром $D_t = 32$ мм и длиной $L_t = 1.2$ м) и осаждались на поверхности коллектора 4 в спадающем краевом магнитном поле системы соленоидов 5. Во всем пространстве транспортировки пучка, за исключением краевой области, создавалось приблизительно однородное магнитное поле $B_0 \approx 1$ Т. Отклонения от величины B_0 "на стыках" соленоидов были меньше 10%. В исследованных системах длительность импульсов тока I на коллектор и величина тока менялись соответственно в пределах $\sim 1.0 \dots 3.0 \mu\text{s}$ и $0.7 \dots 1.1$ кА.

Основное внимание в работе уделено выяснению влияния условий формирования пучка на характеристики развивающихся в нем колебаний пространственного заряда. Варьировались материал катода (нержавеющая сталь и углерод) и его диаметр (12 и 20 мм), а также в пределах от 12 до 27 мм расстояние L_{ca} между катодом и анодом. Кроме того, во всех исследованных системах испытано воздействие на колебания локальных неоднородностей магнитного поля, создаваемых дополнительными катушками 6 и 7, расположенными соответственно на расстояниях ~ 20 и ~ 60 см от катода. Катушки создавали неоднородности магнитного поля пробочной конфигурации, полуширина которых вдоль оси системы была ~ 10 см, а амплитуда в разных экспериментах составляла 30 или 60% от величины основного удерживающего пучок магнитного поля B_0 .

Характеристики колебаний определялись по разработанной в [15] методике с помощью зондов 8 и 9, установленных на расстояниях от катода соответственно ~ 40 и ~ 80 см. Зонды "сообщались" с пучком через малые (диаметром ~ 3 мм) отверстия в стенке канала транспортировки и фиксировали наведенные сигналы, связанные с движением сгустков пространственного заряда в пучке. Регистрировались "магнитные" спектры колебаний за времена $\sim 6 \dots 15$ нс, а также импульсные изменения протектированных зондовых сигналов.

Характеристики колебаний качественно подобны во всех исследованных системах. Изменения амплитуды A колебаний во времени t и в пространстве можно проследить, наблюдая протектированные сигналы зондов. На рис. 2 показаны типичные зависимости $A(t)$ зондов 8 и 9. Здесь же приведены изменения во времени тока I коллектора. Как показали выполненные нами ранее исследования [15], зонды связаны с ближней зоной канала транспортировки и надежно регистрируют колебания пространственного заряда РЭП до тех пор, пока плотная катодная плазма в процессе своего аксиального расширения не достигнет уровня входного отверстия в зондовую секцию.

Плазменные колебания практически не улавливаются зондом 9 в течение всего импульса тока пучка, но именно они определяют сигнал зонда 8 в интервалы времени, соответствующие спаду тока на коллектор. На переднем фронте импульса тока I можно выделить временные участки, для которых характерно нарастание колебаний пространственного заряда с удалением от катода. Их

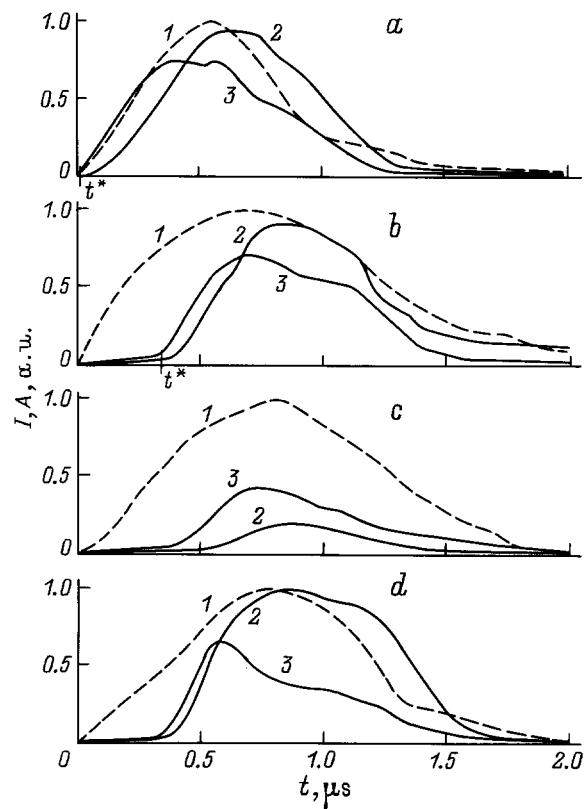


Рис. 2. Изменения во времени тока коллектора I (кривая 1) и амплитуды A протектированных сигналов с зондов 8 (кривая 2) и 9 (кривая 3) в системе формирования РЭП с графитовым катодом. a, b — характеристики получены при удержании РЭП в однородном магнитном поле $B_0 \approx 1$ Т; c, d — данные получены при введении локальных неоднородностей магнитного поля амплитудой $0.3 B_0$ соответственно с помощью катушек 6 и 7; a — $D_c = 20$ мм, $L_{ca} = 12$ мм; b, c, d — $D_c = 20$ мм, $L_{ca} = 27$ мм.

амплитуда у зонда 9 достигает во всех исследованных системах значений $\sim 10^6$ В/м (т.е. $\sim 10\%$ от статического поля между пучком и стенкой канала транспортировки). Эти данные свидетельствуют об усилении волновых процессов на участке между зондами, о том, что сигналы удаленного от катода зонда во всяком случае в данном временном интервале определяются нарастающими волнами в пучке. Отсутствие данных о пространственном изменении амплитуды колебаний в ближней к катоду зоне затрудняет определение природы колебаний зонда 8. Его сигналы принципиально могут быть обусловлены не только усилением волн, распространяющихся вдоль пучка, но и колебательными процессами другого типа. Поэтому для выяснения закономерностей нарастания волн в пучке проанализируем особенности характеристик сигналов удаленного от катода зонда.

С увеличением тока пучка амплитуды сигналов зонда 9 нарастают во времени, причем скорость этого процесса сначала невелика, а затем после некоторого характерного для данной системы интервала времени $t = t^*$

Таблица 1.

Материал катода	Нержавеющая сталь	Углерод			
		12	27	12	27
D_c, mm	20	12	27	12	27
L_{ca}, mm	27	12	27	12	27
$t^*, \mu\text{s}$	0.5–0.6	0.2	0.4–0.5	0–0.1	0.3–0.4
$t_d, \mu\text{s}$	0.6	0.15	0.4	0.1	0.35

резко увеличивается (рис. 2). Величина t^* заметно меняется при изменении геометрии участка ускорения электронов или материала катода. В табл. 1 приведены характерные значения t^* для исследованных в работе систем формирования РЭП.

Меняется с течением времени и спектр колебаний зонда 9. В начальные моменты времени $t < t^*$ при малых амплитудах сигналов преобладают сравнительно низкочастотные колебания в полосе частот $100 \leq f \leq 300 \text{ MHz}$. В условиях же, когда реализуются достаточно большие амплитуды ($t > t^*$), в спектре выделяются дискретные пики в диапазоне более высоких частот приблизительно от 500 до 1500 MHz. Типичные спектры колебаний зонда 9 показаны на рис. 3.

Влияние локальных неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации на колебания пространственного заряда РЭП наблюдалось ранее в [16–18]. Измерения были выполнены в системе формирования РЭП с катодом из нержавеющей стали диаметром $D_c = 20 \text{ mm}$, установленным на расстоянии $L_{ca} = 27 \text{ mm}$ от входа в канал транспортировки. Полученные в настоящей работе данные позволяют обобщить выводы первых измерений на случаи разной геометрии участка ускорения электронов и разных материалов катода. Эффект воздействия зависит не только от величины неоднородности, но и от ее расположения в канале транспортировки. Увеличение магнитного поля на 30% вблизи катода (с помощью катушки 6) подавляет сигналы обоих зондов. Сигналы зонда 8 заметно уменьшаются в интервалы времени, когда они могут быть связаны с катодной плазмой. В области же зонда 9 четко отмечается падение интенсивности колебаний пространственного заряда РЭП. Уменьшение амплитуды колебаний здесь достигает 1.5...4 раз (рис. 2, c). Увеличение этой неоднородности магнитного поля до 60% от B_0 приводит к дополнительному снижению амплитуды колебаний зонда 9 в 2...4 раза. Введение неоднородностей такого типа с помощью удаленной от катода катушки 7 в отличие от описанного воздействия катушки 6 практически только ускоряет развитие колебаний, причем не только в прошедшем мимо нее пучке, но и у зонда 8 (рис. 2, d).

Обнаруженное влияние неоднородностей магнитного поля находит объяснение, если предположить, что их создание приводит к отражению части электронов потока, оказывающей сильное влияние на характеристики регистрируемых колебаний. Учитывая адиабатическое

изменение магнитного поля вблизи дополнительных катушек 6 и 7, для определения условий отражения можно воспользоваться выражением адиабатического инварианта и записать

$$V_{\perp 0}/V_{\parallel 0} \geq (B_0/\Delta B)^{1/2}, \quad (1)$$

где $V_{\perp 0}$ и $V_{\parallel 0}$ — соответственно поперечная и продольная составляющие скорости электронов, подлетающих к магнитной пробке; ΔB — амплитуда изменения магнитного поля.

Так как воздействие неоднородностей магнитного поля становится ощутимым при $B_0/\Delta B = 3$, из (1) следует, что отражены должны быть электроны с поперечными скоростями $V_{\perp 0} \geq 1.7V_{\parallel 0}$. Такие скорости могут быть приобретены выходящими из катодной плазмы электронами при движении в поперечном магнитном электрическом поле $E_{\perp} \sim 10^8 \text{ V/m}$. Чтобы определить условия возникновения электронов со столь большими поперечными скоростями, были проведены оценки полей у поверхности плазменного эмиттера при разных его размерах и аксиальных положениях с учетом неодно-

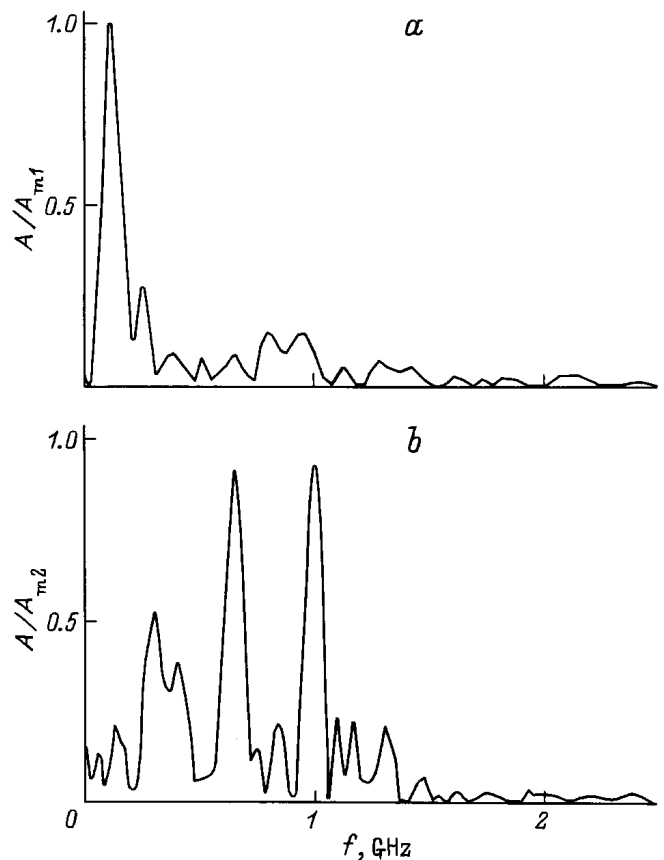


Рис. 3. Типичные спектры сигналов с зонда 9, полученные в однородном магнитном поле $B_0 \cong 1 \text{ T}$ в системе формирования РЭП с графитовым катодом. $D_c = 20 \text{ mm}$, $L_{ca} = 27 \text{ mm}$; $t, \mu\text{s}$: a — 0.3 ($t < t^*$), b — 0.6 ($t > t^*$); A_{m1} и A_{m2} — максимальные значения амплитуды A регистрируемых спектров; $A_{m2}/A_{m1} \cong 15$.

Таблица 2.

Материал катода	$V_{p\perp}$, cm/s	$V_{p\parallel}$, cm/s
Нержавеющая сталь	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$
Углерод	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$

родностей его поверхности.¹ Оценки показали, что поля E_{\perp} необходимой напряженности могут возникать у неоднородностей внешней боковой границы плазмы вблизи входа в канал транспортировки, т.е. с запаздыванием относительно начала импульса тока, которое определяется расстоянием до этой области и скоростью расширения катодной плазмы. Полученные данные позволили рассчитать время запаздывания t_d для исследованных систем (табл. 1). В расчетах предполагалось, что усиление поля на неоднородностях плазменного эмиттера одинаково для всех систем и равно 5. Использованные же значения поперечной ($V_{p\perp}$) и продольной ($V_{p\parallel}$) скоростей движения плазмы для катодов из нержавеющей стали и из углерода приведены в табл. 2.

Они выбраны в соответствии с существующими литературными данными о движении катодной плазмы вблизи катода [7].

Сравнение расчетных значений t_d с измеренным экспериментально запаздыванием t^* резкого нарастания сигналов зонда 9 показывает, что для всех исследованных систем эти времена близки по величине. Это подтверждает, как нам кажется, важную роль электронов с большими поперечными скоростями в развитии конвективной неустойчивости, определяющей, как уже указывалось выше, вид характеристик $A(t)$ в удаленной от катода области канала транспортировки. Такие электроны, судя по приведенным выше оценкам, присутствуют только в ореоле РЭП. Ранее в работе [20] было обнаружено влияние потока электронов в ореоле РЭП на расширение стенки кольцевого пучка в магнитном поле. Авторы [20] высказали предположение, что наблюдаемое явление связано с развитием неустойчивости, однако не конкретизировали ее механизма. Полученные нами данные позволяют определить наиболее вероятные черты этого механизма.

Ток электронов с большими поперечными скоростями мал по сравнению с током пучка. Трудно предположить поэтому, что наблюдаемые в эксперименте интенсивные колебания связаны с процессами лишь в периферии пучка. Возможной причиной возникновения колебаний нам представляется развитие двухпоточковой неустойчивости [8,9], обусловленной взаимодействием электронов периферии пучка с наибольшими поперечными (соответственно минимальными продольными $V_{\parallel\min}$) скоростями

¹ В оценках использованы результаты выполненных В.А. Солнцевым и А.Н. Родионовым (МИЭМ) численных расчетов распределения полей вблизи плазменного эмиттера, а также имеющаяся в литературе [2] информация о неоднородностях его поверхности. Расчеты проведены без учета полей пространственного заряда эмиттированных электронов и в предположении бесконечной проводимости плазменного эмиттера.

и электронов с торца плазменного эмиттера с максимальными продольными скоростями $V_{\parallel\max}$. Наиболее эффективным такое взаимодействие должно быть при синхронизме быстрой волны пространственного заряда в первом потоке с медленной волной пространственного заряда во втором. В этом случае, приравнивая фазовые скорости волн, легко получить выражение для частоты f возникающих в результате развития неустойчивости колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{V_{\parallel\min}\omega_{p\max} + V_{\parallel\max}\omega_{p\min}}{V_{\parallel\max} - V_{\parallel\min}}, \quad (2)$$

где $\omega_{p\max}$ и $\omega_{p\min}$ — соответственно редуцированные плазменные частоты потоков со скоростями $V_{\parallel\max}$ и $V_{\parallel\min}$.

Проведенные расчеты, в которых для определения редуцированных плазменных частот использованы полученные нами ранее данные о характеристиках распределения пространственного заряда в РЭП [16–18], дают значения $f \sim 500 \dots 700$ MHz, приблизительно соответствующие наиболее интенсивным колебаниям, наблюдавшимся в экспериментах.

Рассмотренная двухпоточковая модель объясняет не только диапазон частот наблюдаемых колебаний, но и существенно разное воздействие на их характеристики неоднородностей магнитного поля, создаваемых на разных участках канала транспортировки. Усиление колебаний при включении удаленной от катода катушки 7 может быть связано, например, с тем, что в этом случае существенное влияние начинает оказывать взаимодействие потока электронов, движущихся от катода, с отраженными от пробки электронами. Аналогично взаимодействие при включении катушки 6 может быть неэффективным из-за существенно меньшей длины участка между катодом и ближней катушкой.

Наблюдавшиеся в работе колебания пространственного заряда частично могут быть обусловлены не только описанным механизмом двухпоточкового взаимодействия. Из альтернативных хотелось бы отметить механизм, связанный с развитием диокотронной неустойчивости в потоке электронов, эмиттированных с боковой поверхности плазменного эмиттера. При этом в ореоле РЭП должны возникать вращающиеся в азимутальном направлении неоднородности пространственного заряда. Частоты таких колебаний f_m магнетронного типа должны увеличиваться с ростом дрейфовой скорости электронов $V_d = E_{\perp}/B_0$ над поверхностью плазменного эмиттера и номером вида колебаний $n_m = 1, 2, 3, \dots$ ($f_m \sim n_m \times V_d$). В канале транспортировки при разности потенциалов $\Delta U = 200$ kV, $B_0 = 1$ Т и $n_m = 1$ для них характерна частота $f_m \sim 600$ MHz.

Азимутальные колебания возможны и в пространственном заряде электронов, удерживаемых в своеобразной ловушке между катодом и магнитной пробкой. Учитывая, что перепад потенциала между пучком и стенкой канала транспортировки имеет значение $\Delta U \sim 50$ kV, частоты азимутальных колебаний пространственного заряда в данном случае должны иметь

значения $f_i \sim n_i \cdot 150$ МГц, где $n_i = 1, 2, 3, \dots$ — номер вида колебаний в ловушке. Развитие колебаний такого типа принципиально возможно и в условиях, когда отсутствуют неоднородности магнитного поля, приводящие к отражениям электронов. Как отмечается, например, в [21], возможны накопление и длительное удержание пространственного заряда в канале транспортировки РЭП также из-за отражения части электронов пучка от коллектора и переотражения их затем электрическим полем у катода.

Относительную роль рассмотренных типов колебаний трудно оценить на основе имеющихся экспериментальных данных и сделанных оценок. Реальной представляется ситуация, в которой коллективные процессы в РЭП носят трехмерный характер, одновременно существуют разные типы колебательных движений и при малом изменении характеристик пучка или канала его транспортировки происходит перекачка энергии из одной степени колебательного движения в другую подобно тому, как это наблюдалось ранее в системах магнетронного типа с учетом аксиального движения электронов [22–24].

Заключение

Подводя итоги, отметим важнейшие ее результаты.

Определены амплитудно-частотные характеристики колебаний пространственного заряда РЭП в диодах с магнитной изоляцией, отличающихся геометрией участка ускорения электронов и материалом взрывоэмиссионных катодов.

Выявлена важная роль потока электронов с большими поперечными скоростями в развитии колебаний и выяснены закономерности формирования этого потока.

Описаны возможные механизмы колебаний пространственного заряда, учитывающие взаимодействие потока электронов в ореоле пучка и основного потока электронов, развитие диокотронной неустойчивости в потоке электронов, эмиттированных внешней боковой поверхностью плазменного эмиттера, а также неустойчивость пространственного заряда "долгоживущих" электронов в канале транспортировки РЭП.

Авторы выражают благодарность В.А. Солнцеву и А.Н. Родионову (МИЭМ) за предоставленные результаты расчетов, использованные при анализе электрических полей у катода.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980. 165 с.
- [2] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука, 1991. 296 с.
- [3] Иванов В.С., Кременцов С.И., Райзер М.Д. и др. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 4. С. 784–789.
- [4] Нечаев В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. Вып. 9. С. 1067–1074.
- [5] Овсянникова О.Б., Каменец Ф.Ф., Лейман В.Г. // РИЭ. 1984. Т. 29. № 10. С. 1985–1993.
- [6] Еремеев А.И., Кабанов В.С., Стрелков П.С. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 958–964.
- [7] Розанов Н.Е. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 11. С. 151–157.
- [8] Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на СВЧ. Саратов: Изд-во СГУ, 1962. 335 с.
- [9] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
- [10] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В. и др. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 110–111.
- [11] Бугаев С.П., Дейчули М.П., Канавец В.И. и др. // РИЭ. 1984. № 3. С. 557–560.
- [12] Жерлицин А.Г., Мельников Г.В., Фоменко Г.П. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 546–548.
- [13] Пушкарев С.С., Бондаренко В.А., Гадецкий Н.П. и др. // ПТЭ. 1989. № 9. С. 31–33.
- [14] Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Соминский Г.Г. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1991. С. 102–119.
- [15] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 12. С. 77–84.
- [16] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике (10-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 2. Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1996. С. 3–34.
- [17] Bogdanov L.Yu., Sominski G.G. // Proc. of 11th Intern. Conf. "BEAMS'96". Prague, 1996. Vol. 1. P. 319–322.
- [18] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г., Фабировский А.Я. // ЖТФ. 1997. Т.67. Вып. 8. С. 84–88.
- [19] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1989. С. 28–47.
- [20] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 12. С. 100–104.
- [21] Зайцев Н.И., Кораблев Г.С., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 5. С. 918–924.
- [22] Соминский Г.Г. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 4. С. 181–185.
- [23] Соминский Г.Г. // Лекции по электронике СВЧ (4-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 3. Саратов: Изд-во СГУ, 1978. С. 119–138.
- [24] Левчук С.А., Соминский Г.Г., Воскресенский С.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 13. С. 1194–1197.