

10;12

Динамика частоты излучения релятивистского магнетрона

© И.И. Винтизенко, Г.В. Мельников

Научно-исследовательский институт ядерной физики Томского
политехнического университета, Томск
E-mail: vintizenko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2010 г.

Анализируется поведение частоты СВЧ-излучения релятивистского магнетрона в течение импульса генерации, сравниваются результаты двух методов измерения частотных характеристик излучения.

Сильноточные релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы [1], как и их классические аналоги, имеют развитые колебательные системы и характеризуются набором собственных колебаний — мод с достаточно плотным частотным спектром. Переходы между конкурирующими видами колебаний в условиях нестационарности питающих полей являются наиболее сильным фактором спектральной и временной нестабильности процесса генерации и обуславливают низкое качество излучения. Еще одним мощным фактором нестабильности релятивистских магнетронов является радиальное расширение взрывоэмиссионного катодного плазменного слоя [2].

Для разделения видов колебаний по частоте и стабилизации основного рабочего вида колебаний в классических магнетронах используются методы, основанные на введении в резонансные системы дополнительных элементов в виде связок или высокодобротных резонаторов. Для релятивистских короткоимпульсных приборов эти приемы не являются эффективными. Так, аноды релятивистских магнетронов обычно имеют большую длину, и высокочастотные поля, изменяющиеся вдоль оси прибора по гиперболическому закону, быстро ослабевают. Влияние связок, располагаемых на торцах анодного блока, в этом случае будет ослаблено. Применение высокодобротных резонаторов в импульсном режиме ограничено их естественной инерционностью. Наконец, высокий уровень генерируемой мощности может привести к пробоям в связках и в узлах соединений с дополнительными резонаторами.

Результаты расчета и „холодных“ измерений

3 π /4-вид колебаний		π -вид колебаний	
$f_{3\pi/4}$, MHz	3224	f_{π} , MHz	3253
$\beta_{3\pi/4}$	0.484	β_{π}	0.366
$\beta_{3\pi/4}^{-1}$	0.29		
$f_{3\pi/4}$, MHz	3099	f_{π} , MHz	3181

В данной статье приведены результаты измерения текущей частоты излучения релятивистского магнетрона в течение импульса генерации, позволяющие оценить влияние указанных выше процессов (конкуренция мод, расширение катодной плазмы). В экспериментах использовался релятивистский магнетрон с замедляющей системой с восемью резонаторами и двумя выводами мощности из противоположных резонаторов. Этот прибор по сравнению с ранее исследованными шестирезонаторными магнетронами проектировался для повышения выходной мощности за счет более высокого электронного КПД. Однако при увеличении числа резонаторов анодного блока ухудшается разделение видов колебаний по напряжению возбуждения и по длинам волн. При расчете видов колебаний восьмirezонаторного анодного блока методами теории поля ставилась цель максимального разделения видов колебаний по напряжению возбуждения. Отметим, что при расчетах оказалось сложно обеспечить одновременно и хорошее разделение видов колебаний по длинам волн. В таблице приведены результаты расчета частот (f) и величин замедления волны (β) для рабочего π -вида и ближайшего к нему $3\pi/4$ -вида колебаний и его (-1) пространственной гармоники, а также результаты „холодных“ измерений (выделены курсивом). Как видно из таблицы, разделение видов колебаний для восьмirezонаторного анодного блока по величине замедления достаточно велико и равно $\beta_{\pi}/\beta_{3\pi/4} \approx 0.76$ и $\beta_{\pi}/\beta_{3\pi/4}^{-1} \approx 1.26$. В то же время расчетные и измеренные значения частот соседних видов колебаний близки, что затрудняет их идентификацию в эксперименте.

Характеристики частоты излучения релятивистского магнетрона исследовались на линейном индукционном ускорителе ЛИУ 04/6 при напряжении 300–400 кВ, токе 3–4 кА и длительности импульса напряжения 180 нс. Комплекс аппаратуры для измерения параметров СВЧ-импульсов включал: калиброванные ламповые СВЧ-детекторы 10-см диапазона длин волн, перестраиваемый режекторный фильтр с полосой

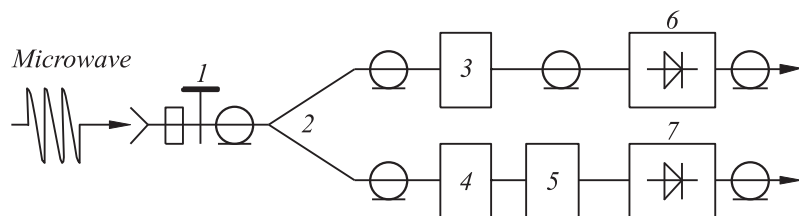


Рис. 1. Функциональная схема измерителя частотного состава: 1 — КВП; 2 — тройник; 3, 4 — фиксированный аттенюатор; 5 — запредельный аттенюатор; 6, 7 — детекторная головка.

пропускания 30–40 МГц на уровне -3 dB, а также измеритель частотного состава мощных СВЧ-импульсов наносекундной длительности, разработанный в НИИ ЯФ.

Измеритель частотного состава СВЧ-импульсов [3] применяется вместе с цифровым осциллографом с полосой пропускания 350–500 МГц и любым, совместимым с ним компьютером. Функциональная схема измерителя приведена на рис. 1. Измеритель состоит из коаксиально-волноводного перехода (КВП) 1 с сечением волновода 72×34 мм, коаксиального согласованного широкополосного тройника 2, двух широкополосных фиксированных аттенюаторов, „запредельного“ аттенюатора и двух широкополосных коаксиальных детекторных головок с полупроводниковыми СВЧ-диодами. СВЧ-мощность поступает на антенну и далее через согласованный тройник 2 распространяется по двум измерительным каналам. В одном из каналов, называемом „линейным“, после фиксированного аттенюатора установлена коаксиальная детекторная головка с полупроводниковым СВЧ-диодом. Во втором канале, называемом „нелинейным“, между фиксированным аттенюатором и коаксиальной детекторной головкой, которая подобна головке в „линейном“ канале, установлен „запредельный“ аттенюатор, величина ослабления которого изменяется с частотой по определенному закону. Детектированные сигналы с двух измерительных каналов поступают на разные каналы осциллографа. Для обоих каналов имеются калибровочные кривые зависимости уровня выходного напряжения от СВЧ-мощности на входе измерителя спектра при различных частотах СВЧ-сигнала.

Для определения частоты и импульсной мощности СВЧ-сигнала в какой-либо момент времени измеряется напряжение с „линейного“ U_L

и „нелинейного“ U_N каналов. Используя калибровочные кривые каналов, строятся две зависимости. Для „линейного“ канала строится зависимость P_L от частоты при напряжении $U = U_L$; для „нелинейного“ канала — зависимость P_N от частоты при напряжении $U = U_N$. Точка пересечения этих кривых дает значение частоты и мощности в заданный момент времени. Чтобы определить значение частот в течение всего СВЧ-импульса, необходимо проделать для каждой оцифрованной временной точки сигнала описанную процедуру.

Эксперименты с релятивистским магнетроном выполнялись в широком диапазоне магнитных полей 0.2–0.55 Т. При этом было обнаружено возбуждение колебаний: $3\pi/4$ -вида с частотой ~ 3040 МГц при магнитных полях 0.4–0.5 Т с максимумом при 0.45 Т и π -вида с частотой ~ 3150 МГц при магнитных полях 0.45–0.55 Т с максимумом при 0.52 Т. В последнем случае максимальная мощность с двух выводов релятивистского магнетрона составляла ~ 330 МВт при напряжении на катоде 380–400 кВ и полном токе 3.5–3.6 кА. Характерные импульсы напряжения, тока и сигналы СВЧ-детекторов измерителя частотного состава для магнитного поля 0.52 Т показаны на рис. 2. Изменение частоты излучения релятивистского магнетрона и импульс СВЧ-мощности после математической обработки осциллограмм сигналов СВЧ-детекторов измерителя частотного состава при возбуждении π -вида колебаний релятивистского магнетрона показаны на рис. 3. Расчет частоты и мощности излучения магнетрона проводился по описанной выше методике с помощью программирования в среде интегрированной математической системы Mathcad для каждой оцифрованной точки осциллограмм. По результатам расчета в этой же системе строятся график зависимости частоты излучения от времени и импульс мощности.

Поведение частоты релятивистского магнетрона в течение импульса может быть объяснено следующим образом. В начале импульса питания возбуждение релятивистского магнетрона происходит при высоких напряжениях (рис. 2) на $3\pi/4$ -вида колебаний с частотой около 3040 МГц, имеющего малое замедление электромагнитной волны (первый пологий участок на рис. 3). За счет увеличения анодного тока напряжение между катодом и анодом снижается, и начинают выполняться условия для возбуждения π -вида колебаний с частотой ~ 3140 МГц (второй пологий участок на рис. 3), имеющего при установленном магнитном поле более низкое напряжение возбуждения. В конце импульса скорость изменения частоты достигает 20 МГц/нс и определяется плазменными эффектами, а именно увеличением диаметра прикатодного плазменного

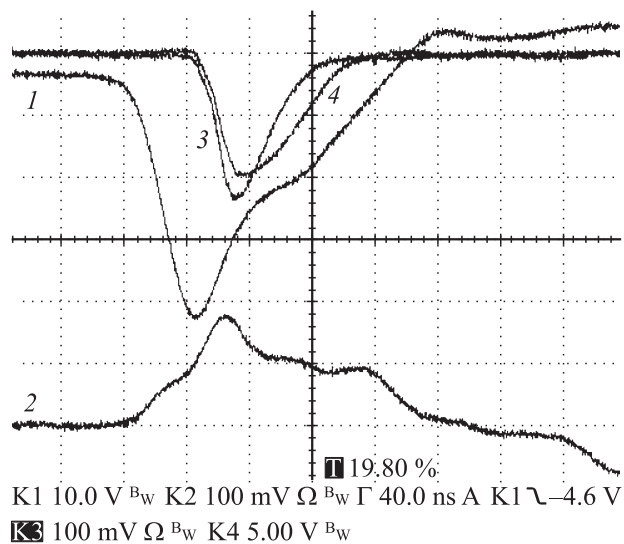


Рис. 2. Синхронизованные осциллограммы: 1 — напряжения, 2 — тока, 3 — сигнал детектора „линейного канала“, 4 — „нелинейного“ канала.

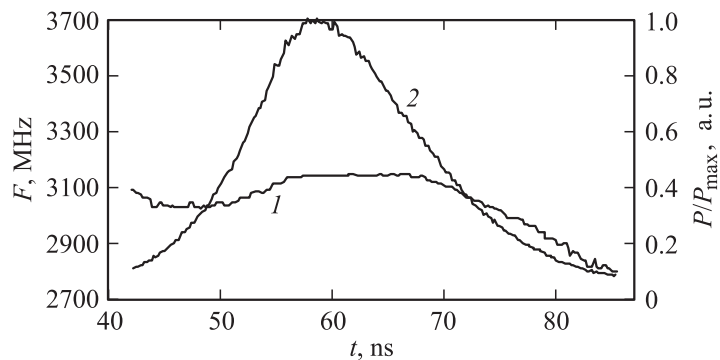


Рис. 3. Изменение частоты излучения релятивистского магнетрона (1), форма импульса СВЧ-мощности (2).

слоя. Увеличение диаметра слоя эквивалентно увеличению катод-анодной емкости, что вызывает изменение частоты в соответствии с формулой:

$$f_n = f_0 / \sqrt{1 + \frac{C'}{2C(1 - \cos(2\pi n/N))}}, \quad (1)$$

где C — эквивалентная емкость одиночного резонатора, C' — сосредоточенная емкость между одним сегментом и катодом, f_0 — резонансная частота одиночного резонатора, n — номер вида колебаний, N — число резонаторов [4]. Из этих данных можно оценить скорость радиального движения катодной плазмы в магнетронном диоде, составившую 4–5 см/μs. Полученные результаты хорошо соответствуют данным работы [4], в которой использовалась другая методика оценки.

Длительность генерации релятивистского магнетрона с постоянной частотой излучения ~ 20 ns соответствует максимуму мощности. Для этого интервала времени можно предполагать стабильность внешней границы катодного плазменного слоя, поскольку радиальное расширение внешней границы плазмы вызывается развитием центробежной неустойчивости [5]. После подачи импульса напряжения гидродинамическое расширение катодных плазменных струй, образованных отдельными эмиссионными центрами, приводит к образованию однородного плазменного слоя вокруг катода. Этот слой неустойчив по отношению к развитию центробежной неустойчивости, так как частицы плазмы испытывают дрейф в азимутальном направлении (электроны и ионы дрейфуют в разных направлениях с различными скоростями). Наличие мощных СВЧ-полей анодного блока релятивистского магнетрона ускоряет процесс развития центробежной неустойчивости, усиливая азимутальную неоднородность прикатодного электронного слоя.

На рис. 4 приведен спектр излучения релятивистского магнетрона, построенный по результатам измерений с использованием режекторного фильтра (а), а также полученный после математической обработки сигналов измерителя частотного состава, зафиксированных за одно измерение (б). При этом можно отметить хорошее соответствие экспериментальных результатов. Однако применение режекторного фильтра требует многократных измерений желательных повторяющихся сигналов. Этот способ не обеспечивает достаточной точности измерения и позволяет оценивать только центральную частоту в импульсе без учета ее изменения за время импульса. Кроме того, характер переходного

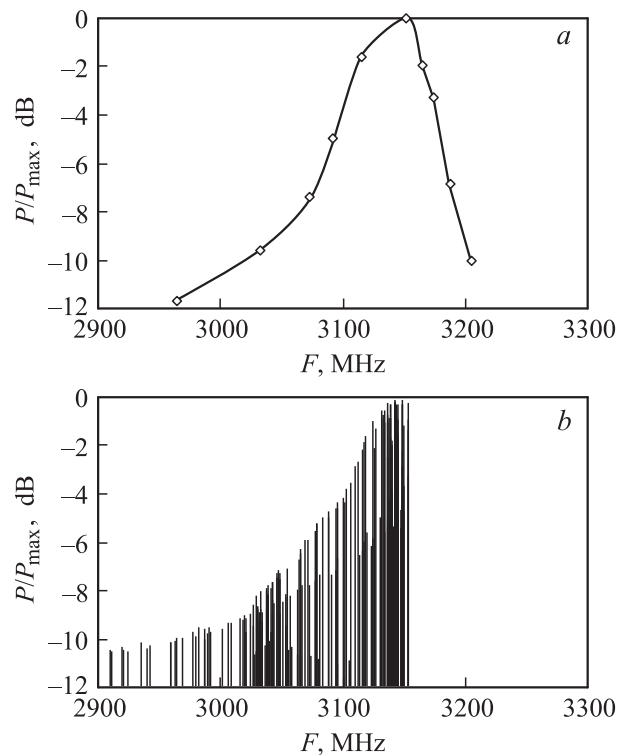


Рис. 4. Сравнение результатов измерения спектра излучения релятивистского магнетрона с использованием режекторного фильтра (*a*) и измерителя частотного состава (*b*).

процесса в режекторном фильтре определяется отстройкой несущей частоты радиоимпульса от резонансной частоты фильтра. При близости этих частот процесс установления имеет аperiodический характер, а при достаточно большой отстройке возникают биения, при этом амплитуда биений становится сопоставимой с амплитудой импульса, что ограничивает точность измерения на краях спектра. В этом отношении использование частотного измерителя значительно удобнее и позволяет получать экспериментальные результаты, недоступные другими методами. Например, измерение гетеродинным способом для выделения промежуточной частоты требует наличия относительно „длинных“

импульсов, кроме того, необходим перестраиваемый гетеродин, и остается проблема определения „зеркальной“ частоты. Разработанный измеритель частотного состава позволяет обойти эти трудности.

В результате экспериментов с использованием измерителя частотного состава впервые измерена динамика частоты СВЧ-излучения релятивистского магнетрона в течение импульса генерации. Характерен малый интервал времени поддержания стабильной частоты в течение импульса (~ 20 ns), за пределами которого частота изменяется со скоростью ~ 20 MHz/ns. Существенное влияние на это оказывают возбуждение соседнего вида колебаний на фронте импульса и плазменные явления в пространстве взаимодействия прибора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-00555-а.

Список литературы

- [1] Винтизенко И.И., Новиков С.С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 432 с.
- [2] Глейзер И.З., Диденко А.Н., Сулакшин А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 1. С. 44–49.
- [3] Бабичев Д.А., Шиян В.П., Мельников Г.В. // ПТЭ. 2003. № 3. С. 93–96.
- [4] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. школа, 1972. 375 с.
- [5] Бугаев С.П., Ким А.А., Кошелев В.И., Хряпов П.А. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 6. С. 1287–1291.