

09

О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ

© И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 20 октября 1997 г.

Предложена и реализована новая схема релятивистской ЛОВ с симметричной волной TM_{01} , позволившая значительно — в 2–3 раза — увеличить эффективность генерации мощных импульсов излучения трехсантиметрового диапазона в низких магнитных полях.

Одним из возможных применений релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ) является ее использование в качестве источника мощных СВЧ-импульсов в наносекундной радиолокации [1]. Эффективная генерация достигается в условиях сильного магнитного поля, требуемого для формирования и транспортировки сильноточного электронного пучка. Поэтому импульсно-периодический режим осуществлялся до сих пор с помощью сверхпроводящих соленоидов. Учитывая дороговизну и трудоемкость их обслуживания, представлялась важной задача снижения магнитного поля до уровня, реализуемого в постоянных магнитах, при условии сохранения КПД генерации ЛОВ порядка 20–30% [2].

В традиционной схеме релятивистской ЛОВ используется низшая аксиально-симметричная мода TM_{01} , а средний диаметр гофрированной замедляющей структуры (ЗС) близок к длине волны. В таких поперечных размерах ЗС относительно легко обеспечивается селекция волн и одночастотный режим генерации. Однако при снижении магнитного поля важную роль приобретают эффекты, связанные с поперечным движением электронов. Так называемое циклотронное поглощение встречной электромагнитной волны и нарушение стартовых условий генерации происходит вблизи циклотронного резонанса $\omega_B = \omega + k_{\parallel} v_{\parallel}$ [3,4]. Здесь v_{\parallel} — продольная скорость электронов, k_{\parallel} — продольное волновое число, $\omega = 2\pi c/\lambda$, $\omega_B = eB/mc\gamma$ — циклотронная частота. Для диапазона длин волн $\lambda \approx 3$ см и энергий $\gamma \approx 2$ точному резонансу соответствует $B_R \approx 1.2$ Т. Снижение КПД наблюдается в очень широкой области магнитных полей ($\Delta B/B_R \sim 1$), что характерно для релятивистской

электроники, так как отношение параметра силовой группировки, ответственной за поперечную раскачку электронов, к параметру инерционной группировки пропорционально $I_b^{1/6} \gamma^{1/2} \beta_{\parallel} \lambda / r_0 Z^{1/3}$ [4], где I_b — ток пучка, $\beta_{\parallel} = v_{\parallel}/c$, r_0 — средний радиус ЗС, Z — сопротивление связи с пространственной гармоникой. В приведенной записи опущен фактор, описывающий радиальную структуру волны, — рассматривается волна TM_{01} . В малых полях с индукцией (0.4–0.8) Т структура электронного пучка содержит фракцию частиц с высокой поперечной скоростью: $\beta_{\perp}^{\max} \approx E_{\perp} / \gamma B$ [5] (E_{\perp} — напряженность электрического поля вблизи катода). Это приводит к дополнительным эффектам, снижающим КПД, и наиболее существенный из них — дисперсия продольных скоростей электронов. Появляется также возможность резонансного поглощения вблизи второй гармоники циклотронной частоты. Из анализа перечисленных процессов следует вывод о необходимости увеличения радиусов катода (r_k), ЗС, а также использования максимально возможных значений связи — Z . Если увеличение r_k не обеспечивает в достаточной мере улучшения качества электронного пучка, то для дополнительного снижения разброса скоростей целесообразно применить декомпрессию в плавном спадающем от катода к ЗС магнитном поле [6].

Таким образом, в связи с увеличением поперечных размеров, ключевой становится проблема селективного возбуждения рабочей волны. Роль селектирующего элемента в предложенной схеме ЛОВ с волной TM_{01} играет резонансный рефлектор [7], используемый для отражения встречной волны вместо запредельного волновода — фильтра низких частот — с радиусом $r < \nu_{01} \lambda / 2\pi$ ($\nu_{01} = 2.405$). Эквивалентная электрическая схема, поясняющая механизм отражения волны TM_{01} от специального резонатора, представляет собой простейший вариант полосового заградительного фильтра — параллельного резонансного контура, встроенного в разрыв передающей линии. Геометрия резонатора образована аксиально-симметричной канавкой с радиусом b и шириной L , к которой примыкают согласованные на краях волноводы с радиусом a . Хотя в эксперименте были использованы скругленные переходы с радиусом кривизны $\approx (b - a)/2$, для простоты можно считать профиль канавки прямоугольным. В диапазоне длин волн $\nu_{02}/b < 2\pi/\lambda < \nu_{02}/a$, где $\nu_{02} = 5.52$, реализуется условие существования хотя бы одного колебания запертой моды TM_{02} . Частоты собственных колебаний в отсутствие потерь могут быть найдены аналогично, как и в известной задаче квантовой механики о нахожде-

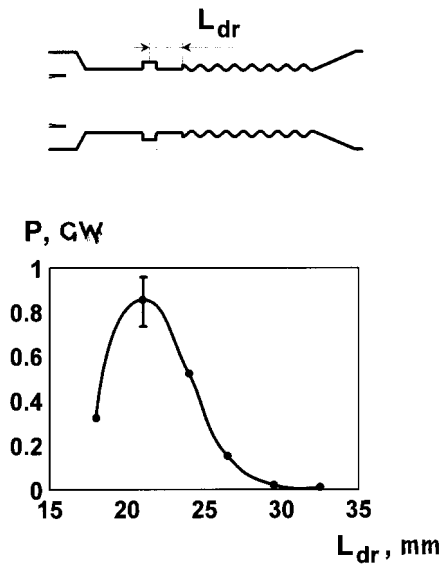


Рис. 1. Схема релятивистской ЛОВ с резонансным рефлектором и экспериментальная зависимость генерируемой мощности от положения рефлектора.

нии уровней энергии в прямоугольной потенциальной яме конечной глубины [8]. Собственное колебание является единственным, если выполняется условие $\nu_{02}L(1 - a^2/b^2)^{1/2} < 2a$. Наличие дифракционных и омических потерь приводит к сдвигу резонансной частоты вниз. Поскольку коэффициент связи собственного колебания с бегущей волной TM_{01} является функцией высоты ступеньки, величину дифракционной добротности можно выбрать малой по сравнению с омической: $Q_d \ll Q_0$. В случае медных стенок и частоты 10 GHz — $Q_0 \sim 10^4$. Тогда, в соответствии с [9], коэффициент отражения на резонансной частоте близок к единице: $R \approx 1 - Q_d/Q_0$.

В эксперименте использовалась геометрия рефлектора, обеспечивающая достаточное перекрытие генерируемого спектра ($Q_d \approx 10$). Принципиально важно, что даже при относительно низкой добротности из-за отличия в распределении поля по радиусу z компонента электрического поля в центральной плоскости рефлектора (на радиусе $\approx 0.7b$) почти на порядок превосходит амплитуду (-1) -й пространственной гармоники

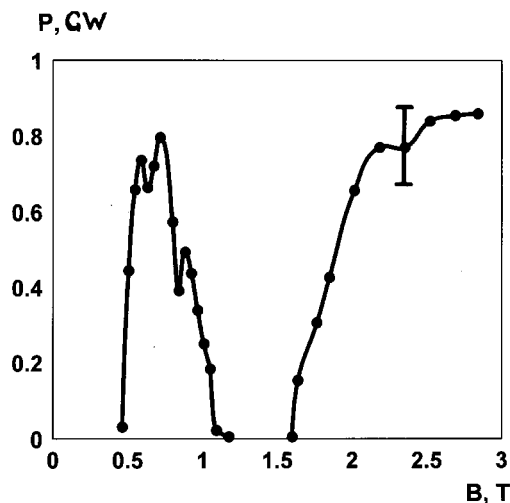


Рис. 2. Зависимость мощности микроволнового излучения от величины магнитного поля.

в ЗС. Таким образом, рефлектор выполняет одновременно функцию модулирующего зазора. Глубина модуляции электронов по скорости может быть весьма существенной, поэтому важно обеспечить оптимальное положение рефлектора относительно первой гофры ЗС. Выбор этого расстояния (L_{dr} на рис. 1) оказывает влияние на развитие группировки пучка, и в то же время он не может быть произвольным, поскольку определяет разность фаз между модулирующим полем и пространственной гармоникой в начале ЗС. Численный анализ линейной краевой задачи ЛОВ с предварительной модуляцией электронов в δ -зазоре показал, что стартовый ток генератора при благоприятной фазировке полей снижается почти в 2 раза (глубина модуляции задавалась исходя из условий реального эксперимента).

Эксперименты были выполнены с использованием импульсного соленоида и электронного ускорителя "СИНУС-6К". Максимальная амплитуда ускоряющего напряжения могла достигать 600 кВ при токе электронного пучка 5.5 кА. Длительность импульсов тока — 18 нс. Как и ожидалось, полученная в эксперименте зависимость импульсной мощности от расстояния между рефлектором и началом ЗС (рис. 1) имеет

четко выраженный оптимум. Максимальная мощность микроволнового излучения составила 0.8 GW, что соответствует КПД 24%. Значение эффективности генерации в магнитном поле 0.7 Т практически такое же, как и в большом магнитном поле (рис. 2). Длительность импульсов — около 10 ns. При использовании декомпрессии электронного пучка с фиксированным превышением поля на катоде — в 1.4 раза — над полем в ЗС произошло расширение зоны генерации в сторону слабых полей, что проявилось в смещении левой границы приблизительно на 20%.

Таким образом, первые же эксперименты по реализации умеренно сверхразмерной ЛОВ с резонансным рефлектором показали возможность значительного увеличения эффективности генерации в слабых магнитных полях. Такое поле уже можно обеспечить с помощью постоянного магнита.

Работа была частично поддержана исследовательским центром GEC-Marconi Research (UK).

Список литературы

- [1] Бункин Б.В., Гапонов-Грехов А.В., Ельчанинов А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 9. С. 61–65.
- [2] Коровин С.Д., Ростов В.В., Сморгонский А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. В. 10. С. 1278.
- [3] Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Варганов В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 9. С. 533–536.
- [4] Гунина Н.И., Коровин С.Д., Ростов В.В. // Тез. докл. 6 Всес. симп. по сильноточной электронике. Томск, 1986. Т. 3. С. 23–25.
- [5] Коровин С.Д., Пегель И.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 4. С. 139–145.
- [6] Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kolganov L.G. et al. // Abstr. of III Int. Workshop "Strong Microwaves in plasmas". N. Novgorod, Russia, 1996. P. S19.
- [7] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 4. P. 745–752.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Теоретическая физика. Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974. С. 752.
- [9] King A.P., Marcatili E.A. // Bell System Tech. J. 1956. V. 35. P. 899–907.