

09;10;12

Высокоэффективный узкополосный мазер на свободных электронах на основе брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки

© Н.Ю. Песков, Н.С. Гинзбург, А.А. Каминский,
А.К. Каминский, С.Н. Седых, А.П. Сергеев, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Поступило в Редакцию 22 января 1999 г.

Использование новой высокоселективной схемы брэгговского резонатора, имеющего скачок фазы гофрировки внутри пространства взаимодействия, позволило реализовать на базе ускорителя ЛИУ-3000 мазер на свободных электронах (МСЭ-генератор) на частоте 30.7 GHz с мощностью около 50 MW и рекордным для данного класса приборов КПД 35%.

1. Брэгговские резонаторы в виде отрезков волноводов со слабой гофрировкой боковых стенок были предложены в качестве электродинамических систем МСЭ в [1–3]. Их использование позволило успешно реализовать узкополосные генераторы миллиметрового диапазона длин волн [3–7]. В этих экспериментах применялась двухзеркальная схема: резонатор представлял собой два брэгговских рефлектора, разделенные участком регулярного волновода, в котором в основном происходило взаимодействие с электронным пучком. В частности, резонатор подобного типа был использован в МСЭ-генераторе, реализованном в совместных экспериментах ОИЯИ (Дубна) и ИПФ РАН (Н. Новгород) на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000. В этих же экспериментах на частоте 31 GHz в режиме с обратным ведущим полем получена выходная мощность 35 MW при КПД 26% [8,9], который превосходил уровень, достигнутый ранее в генераторах подобного типа [3–7]. В области оптимальных параметров реализовался одномодовый одночастотный режим генерации. Как следует из численного моделирования, этот режим устанавливался на нелинейной стадии в результате конкуренции нескольких продольных мод, попадавших в полосу эффективного

отражения брэгговских рефлекторов и возбуждавшихся на начальной стадии электронным пучком. При этом результаты моделирования и проведенных экспериментов показывают, что при изменении расстройки синхронизма (т.е. при изменении энергии или поступательной скорости частиц) возможно возбуждение различных продольных мод резонатора, частоты и добротности которых близки между собой. Это обстоятельство может рассматриваться как определенный недостаток реализованного генератора, поскольку ввиду практически неизбежной нестабильности в работе ускорителя и источников питания электронно-оптической системы МСЭ существует возможность перескоков частоты излучения как в течение одного импульса, так и от импульса к импульсу. В то же время для ряда приложений мощных миллиметровых генераторов необходимы жесткие требования на стабильность частоты излучения. Например, высокая стабильность наряду с высокой мощностью требуется для запитки высокоградиентных структур в ускорителях нового поколения [10].

Эта проблема может быть решена при использовании альтернативной схемы брэгговского резонатора, также рассмотренной в [1], а именно резонатора, составленного из двух гофрированных волноводов, когда в области сочленения имеет место скачок фазы гофрировки на π (рис. 1). В таком резонаторе существует собственная мода на частоте точного брэгговского резонанса, добротность которой значительно превосходит добротность остальных мод. Это обстоятельство существенно повышает селективные свойства такого резонатора по сравнению с традиционной двухзеркальной схемой. Высокая добротность основной моды резонатора позволяет сократить длину пространства взаимодействия, что привлекательно для увеличения КПД и снижения чувствительности к начальному разбросу параметров пучка. Теоретическому и экспериментальному исследованию МСЭ-генератора на основе брэгговского резонатора нового типа посвящена данная работа.

2. Условия реализации режима одномодовой одночастотной генерации исследовались предварительно путем численного моделирования процесса установления автоколебаний. В рамках пространственно-временного подхода для описания взаимодействия внутрибрэгговских структур использовался метод связанных (попутных и встречных) волн [11]. На рис. 2, а приведена зависимость электронного КПД от времени при умеренном превышении добротности резонатора над пороговым значением. Анализ частотного спектра показывает, что происходит возбуждение основной моды резонатора на частоте точного

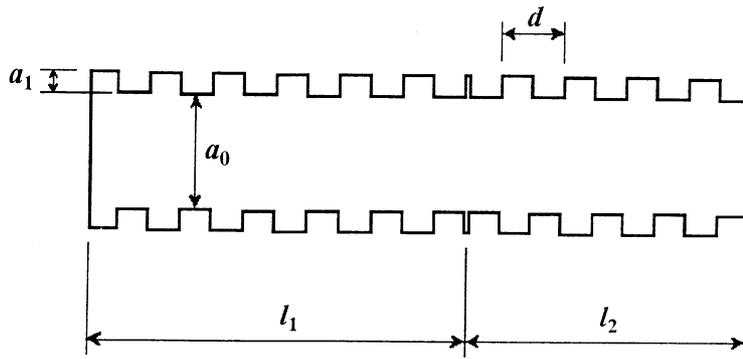


Рис. 1. Схема брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки.

брэгговского резонанса при практически полном отсутствии примеси "паразитных" мод даже в переходном режиме.

Следует отметить, что наряду с наиболее высокодобротной модой в спектре мод резонатора присутствуют, вообще говоря, дополнительные ("боковые" относительно брэгговской частоты) моды, частоты которых лежат вне полосы непрозрачности брэгговских структур. Данные моды представляют собой, по существу, моды отдельных сегментов, составляющих резонатор со сбоем фазы. При увеличении коэффициента связи волн на брэгговских структурах (т.е. увеличении глубины гофрировки) добротности этих мод увеличиваются, и, в конечном итоге, стартовые условия возбуждения для них также оказываются выполнены. В таком резонаторе в переходном режиме происходит возбуждение нескольких мод резонатора. Однако затем в нелинейном режиме при умеренном превышении добротности мод над порогом генерации в результате нелинейной конкуренции наиболее высокодобротная мода подавляет остальные и устанавливается стационарный режим генерации на этой моде (рис. 2, *b*). Важно отметить, что при оптимально подобранных параметрах установления стационарного режима генерация на основной моде имеет место при любых расстройках синхронизма в полосе самовозбуждения. При этом продольная структура поля в резонаторе оказывается более благоприятной для отбора энергии у электронного пучка (рис. 2, *b*), чем в случае двухзеркального резонатора, что приводит к увеличению КПД примерно в 1.5 раза.

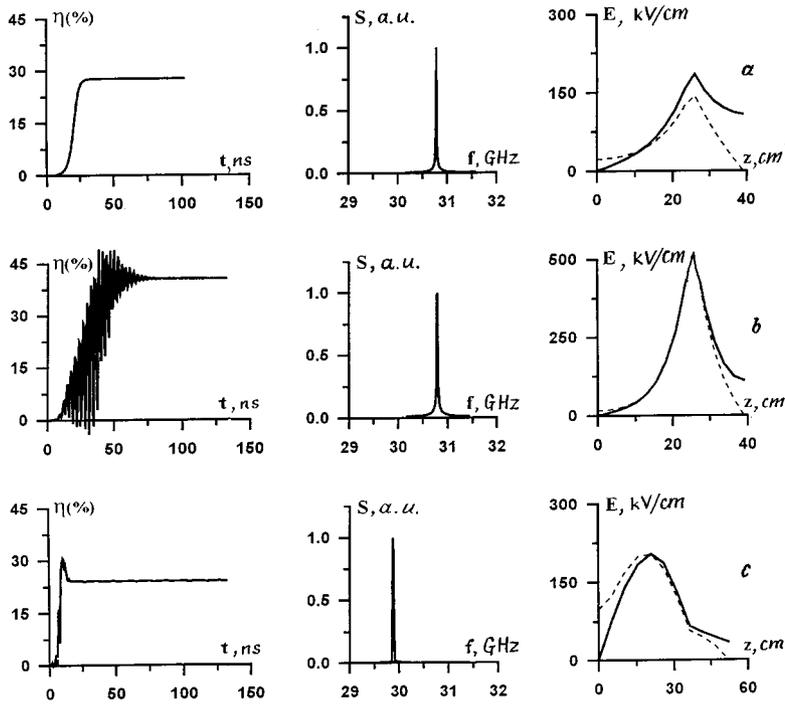


Рис. 2. Моделирование процесса установления автоколебаний в резонаторах со скачком фазы гофрировки различной геометрии. Зависимость КПД (η) от времени, а также спектр излучения (S) и продольная структура поля (E) парциальных волн (сплошная линия — попутная волна, штриховая — встречная волна) в стационарном режиме генерации: a — $l_1 = 26$ см, $l_2 = 13$ см, $a_1 = 0.4$ мм, $B_w = 0.1$ Т; b — $l_1 = 26$ см, $l_2 = 13$ см, $a_1 = 0.6$ мм, $B_w = 0.09$ Т; c — $l_1 = 39$ см, $l_2 = 13$ см, $a_1 = 0.6$ мм, $B_w = 0.12$ Т ($E_{beam} = 0.8$ МэВ, $I_{beam} = 170$ А, $B_0 = -0.2$ Т).

Увеличение длины сегментов, составляющих резонатор, приводит к дальнейшему увеличению добротностей "боковых" мод. В таком резонаторе при последовательном изменении расстройки синхронизма возможно установление стационарного режима как на основной наиболее высокодобротной моде, так и на "боковых" модах (рис. 2, c). Тем не менее частоты "боковых" мод и основной моды достаточно сильно

разделены друг с другом — разница их частот составляет половину ширины полосы непрозрачности брэгговских структур. Это в несколько раз больше, чем для случая двухзеркального резонатора, где несколько продольных мод резонатора оказывается внутри полосы непрозрачности. Таким образом, в резонатора со сбоем фазы требуется значительное изменение расстройки синхронизма для перестройки режима генерации с основной на "боковую" моду. Требования на стабильность работы системы питания МСЭ могут быть значительно снижены и являются легко реализуемыми на существующих экспериментальных установках.

3. Используемая в эксперименте электродинамическая система МСЭ представляла собой резонатор, состоящий из двух отрезков круглого волновода диаметром 22 mm с гофрировкой боковых стенок в форме меандра с периодом $d = 5.4 \text{ mm}$ и глубиной a_1 от 0.3 до 0.6 mm. В месте соединения этих структур реализовался скачок фазы гофрировки, равный π . Длина входного сегмента резонатора l_1 (расположенного со стороны катода) варьировалась от 20 до 40 см, выходного l_2 — от 10 до 20 см. В качестве рабочей была выбрана низшая мода $H_{1,1}$ круглого волновода. Оптимальные параметры резонатора были рассчитаны на преобразование указанной рабочей волны внутрибрэгговской структуры в волну обратной связи $E_{1,1}$, которое имело место в окрестности частоты 31 GHz. На рис. 3, *a, b* для резонаторов различной длины представлены расчетные зависимости, а также результаты "холодных" электродинамических измерений коэффициента отражения от частоты для брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки. При такой методике измерений собственным модам соответствуют минимумы коэффициентов отражения. Следует отметить, что при равенстве длин сегментов падающая волна отражается от них в противофазе, поэтому коэффициент отражения на частотах собственных мод в этом случае стремится к нулю (рис. 3, *a*). В случае большой разницы длин сегментов коэффициенты отражения от каждого из сегментов сильно отличаются друг от друга и суммарный коэффициент отражения от такого резонатора был достаточно близок к единице даже на частотах собственных мод (рис. 3, *b*). Этим объясняется трудность "холодных" измерений в резонаторах такой геометрии.

Для симметричного резонатора, как видно из рис. 3, *a*, ширина полосы непрозрачности, а следовательно, и значение коэффициента связи волн на брэгговской структуре $\sim 0.16 \text{ cm}^{-1}$ находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов. Измеренная частота наиболее высокочастотной моды равнялась 30.7 GHz, и небольшой сдвиг от

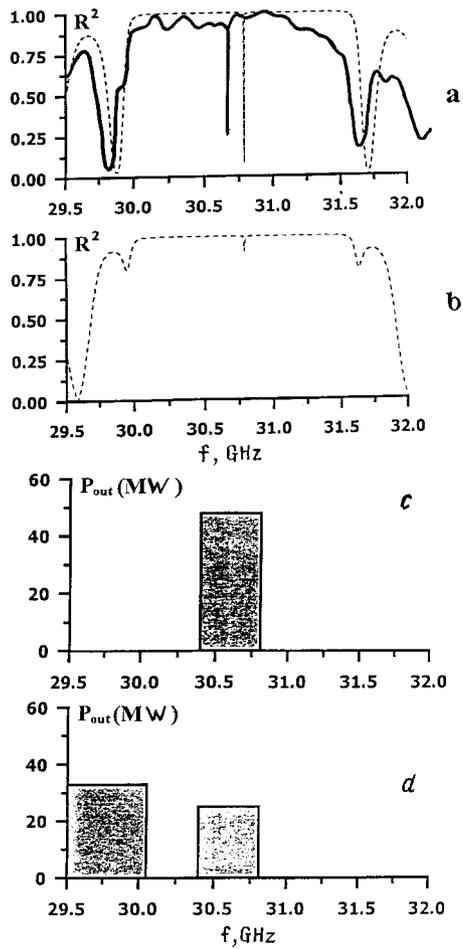


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения R от частоты для резонаторов различной геометрии (сплошная линия — результат “холодных” электродинамических измерений, пунктир — расчетные значения): a — $l_1 = l_2 = 21.6$ см и b — $l_1 = 26$ см, $l_2 = 13$ см ($a_1 = 0.6$ мм). Штриховкой на рис. c и d обозначены частотные интервалы, в которые попадала зарегистрированная частота излучения в МСЭ с резонаторами различной геометрии, высота заштрихованных областей соответствует максимальной мощности излучения: c — $l_1 = 26$ см, $l_2 = 13$ см; d — $l_1 = 39$ см, $l_2 = 13$ см ($a_1 = 0.6$ мм).

расчетного значения может быть объяснен отличием периода изготовленной структуры от расчетного значения. Для несимметричного резонатора, параметры которого приведены на рис. 3, *b* (в котором фактически в горячем эксперименте получена максимальная мощность генерации), расчетное значение добротности основной моды на частоте точного брэгговского резонанса при известном коэффициенте связи волн составляло 1300.

4. Экспериментальное исследование МСЭ проводилось на линейном индукционном ускорителе ЛИУ-3000 (ОИЯИ, Дубна), формировавшем электронный пучок с энергией частиц 0.8 MeV, током до 200 А и длительностью импульса 200 ns при частоте следования импульсов до 1 Hz. Рабочая поперечная скорость $\beta_{\perp} \approx 0.2$ сообщалась частицам в спиральном вигглере с периодом 6 см, имеющем адиабатически плавное включение на первых 6 периодах. Вигглер располагался внутри соленоида. Амплитуда поперечного поля B_{\perp} на оси варьировалась от 0 до 0.3 Т, ведущее магнитное поле B_0 регулировалось до 0.7 Т. Ток на выходе ускорителя и на выходе генератора регистрировался с помощью индукционных и резистивных датчиков и в различных режимах работы составлял 150 ÷ 200 А. Измерения мощности излучения проводились с помощью калиброванных кристаллических детекторов, точность измерения мощности, включая точность калибровки, составляла ~ 20%. Спектр излучения измерялся с использованием набора запредельных волноводных фильтров с шагом по диаметру 0.1 mm, позволяющих определять частоту в диапазоне 26–40 GHz с точностью 1.5–2%.

В качестве рабочего режима МСЭ был выбран режим с обратным ведущим магнитным полем (обозначенный далее знаком "–") [12,13], в котором данное поле ориентировано таким образом, что направление циклотронного вращения электронов противоположно их вращению в поле спирального вигглера. Преимуществом работы МСЭ в указанном режиме является высокое качество формирования винтового электронного пучка, низкая чувствительность к начальному разбросу параметров пучка и, как следствие, возможность достижения высокого КПД [9,14]. Это подтверждается и результатами предшествующих экспериментальных исследований усилительных [12,13] и генераторных [8,9] схем МСЭ, где максимальная эффективность получена в указанном режиме.

В настоящем эксперименте на входе МСЭ наблюдалось циркулярно-поляризованное излучение, структура которого соответствовала возбуждению рабочей волны $H_{1,1}$. Длительность СВЧ-импульса составляла

100–150 ns. В соответствии с расчетом максимальная мощность излучения получена в окрестности частоты 31 GHz. Настройка на оптимальный режим генерации осуществлялась изменением полей вигглера и соленоида, приводившим к изменению поступательной скорости частиц. Параметры резонатора варьировались подбором глубины гофрировки, длинами брэгговских структур (сегментов), а также соотношением длин этих сегментов.

Максимальная мощность излучения 48 ± 5 MW была получена на частоте 30.7 GHz с использованием резонатора, составленного из сегментов длиной 26 и 13 см. Рабочий ток был равен 170 А, что соответствовало КПД генерации около 35%. Значения полей вигглера и соленоида составляли $B_0 = -0.21$ Т, $B_w = 0.12$ Т. Результаты измерения спектра излучения при указанных параметрах резонатора приведены на рис. 3, с. Заштрихованная область соответствует частотному интервалу между двумя соседними (по отсекаемым частотам) фильтрами, в который попадала частота излучения. Сравнение с результатами холодных измерений спектра мод (рис. 3, а, б) позволяет интерпретировать измеренный спектр как реализацию одномодового одночастотного режима генерации. Дополнительным подтверждением одномодовости полученного режима генерации является отсутствие низкочастотной модуляции выходного сигнала, соответствующей биениям мод, которая ранее наблюдалась в многочастотных режимах генерации в МСЭ с двухзеркальными брэгговскими резонаторами [9]. В то же время достаточно большая разница частот основной и "боковых" мод резонатора (около 2%) позволяла в эксперименте различать генерацию на этих частотах имеющимся набором волноводных фильтров. В предшествующих экспериментах с двухзеркальными брэгговскими резонаторами измерение спектра излучения подобным методом было затруднено [8]. Следует отметить, что в соответствии с результатами моделирования (рис. 2, а, б) при оптимальных параметрах резонатора во всей области изменения полей B_0 и B_w (т.е. во всей области изменения расстроек синхронизма) в полосе самовозбуждения резонатора генерация наблюдалась на основной моде.

При смещении положения скачка фазы к середине резонатора (т.е. использовании сегментов равной длины) имело место уменьшение выходной мощности. Это объясняется тем, что в случае симметричного расположения брэгговских структур потоки СВЧ-энергии в обе стороны резонатора равны [1]. Нарушение симметрии резонатора путем смещения положения скачка фазы в сторону коллектора позволяет

осуществить практически однонаправленный вывод излучения (ср. с рис. 2, *a, b*).

Следует отметить, что при увеличении длины входного сегмента резонатора до 39 см в соответствии с результатами моделирования наблюдалось раздельное возбуждение "боковых" мод. Результаты измерения мощности и частоты выходного излучения в диапазоне 29–32 GHz приведены на рис. 3, *d*. Перестройка частоты генерации производилась путем изменения полей B_0 и B_w , т. е. подбором расстройки синхронизма, оптимальной для возбуждения каждой из мод (ср. с рис. 2, *c*). Значения полей, при которых наблюдалось излучение на "боковой" моде с частотой 29.9 GHz, составляли $B_0 = -0.18$ Т, $B_w = 0.11$ Т.

5. Таким образом, в описанных выше экспериментах впервые продемонстрированы работоспособность брэгговского резонатора со скачком фазы и перспективность использования подобных резонаторов в МСЭ-генераторах. Исследованы различные конфигурации резонатора. Параметры МСЭ, при которых наблюдалась генерация, и измеренные значения КПД с хорошей точностью соответствуют величинам, полученным при численном моделировании процесса возбуждения. При оптимальных параметрах резонатора на частоте 30.7 GHz получена выходная мощность около 50 MW при КПД 35%, рекордном для данного класса приборов. Спектр излучения соответствовал возбуждению наиболее высокочастотной моды.

Авторы признательны Н.Ф. Ковалеву, М.И. Петелину и Г.Г. Денисову за полезные обсуждения.

Работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 97–02–16643 и № 97–02–17379).

Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Резников М.Г. Резонатор. Авт. свидетельство № 720592 // Бюл. изобр. 1980. № 9.
- [2] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 21. С. 1320.
- [3] Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. // IEEE J. of Quant. Electr. 1983. V. QE-19. P. 282.
- [4] Wang M., Wang Z., Chen J., Lu Z., Zhang L. // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1991. V. A304. P. 116.

- [5] *Mima K., Akiba T., Imasaki K., Ohigashi N., Tsunawaki Y., Taguchi T., Kuruma S., Nakai S., Yamanaka C.* // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1991. V. A304. P. 93.
- [6] *Chu T.S., Hartmann F., Danly B.G., Temkin R.J.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. N 15. P. 2391.
- [7] *Zambon P., Witteman W.J., van der Slot P.J.M.* // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1994. V. A341. P. 88.
- [8] *Богаченков В.А., Гинзбург Н.С., Каминский А.А., Каминский А.К., Песков Н.Ю., Сараницев В.П., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 22. С. 44.
- [9] *Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1998. V. 26. N 3. P. 536.
- [10] *Sessler A.M.* // Laser Acceleration of Particles. AIP Conf. Proc. 1982. P. 154.
- [11] *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Robb G.R.M., Phelps A.D.R.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1996. V. 24. N 3. P. 770.
- [12] *Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B.* // Particle Accelerators. 1990. V. 33. P. 189.
- [13] *Conde M.E., Bekefi G.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 3082.
- [14] *Peskov N.Yu., Samsonov S.V., Ginzburg N.S., Bratman V.L.* // Nuclear Instr. and Meth. on Phys. Res. A. 1998. V. A407. P. 107.