

09;12

Компрессор линейно-модулированных по частоте импульсов на основе кольцевого трехзеркального резонатора

© Ю.Ю. Данилов,¹ С.В. Кузиков,¹ В.Г. Павельев,² Ю.И. Кошуринов,² Д.Ю. Щегольков²¹ Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия² Нижегородский государственный университет,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: danilov@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 12 июля 2004 г.)

На частоте 34.27 НГц испытан на малом уровне мощности компрессор в виде трехзеркального резонатора, запитываемого волновым пучком посредством гофрировки одного из зеркал. При сжатии прямоугольного импульса с линейной частотной модуляцией получена четырехкратная по длительности компрессия с эффективностью $\approx 60\%$.

1. Для снижения стоимости линейных электронных ускорителей обычно прибегают к сжатию микроволнового импульса перед его вводом в ускорительную секцию [1,2]. Так, в компрессоре SLED [3–5] используется трансформация импульса со 180° -ным „скачком“ фазы при прохождении через резонансную структуру. Подобный метод реализован и в компрессоре на основе квазиоптического трехзеркального резонатора [6]. Однако полоса мощных микроволновых усилителей с ростом частоты, как правило, сужается и скорость внутриимпульсной фазовой модуляции их выходного сигнала оказывается все более ограниченной. Приходится искать способы компрессии импульсов с относительно плавной, в частности, линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [7,8].

2. Без учета потерь компрессор на основе безотражательного резонатора, запитываемого ЛЧМ импульсом, можно характеризовать тремя независимыми безразмерными параметрами: $\alpha = \pi\mu_0 T^2$, определяющим скорость изменения частоты; $\beta = 2\pi(f'_0 - f_g)T$, отвечающим за начальную отстройку частоты сигнала от резонанса; $\gamma = \pi f'_0 T / Q_{\text{ext}}$, характеризующим отношение длительности импульса к времени накопления энергии в резонаторе. Здесь приняты следующие обозначения: T и μ_0 — длительность и скорость изменения обычной частоты исходного импульса, f'_0 — действительная часть собственной частоты резонатора, f_g — начальная частота ЛЧМ импульса, Q_{ext} — внешняя добротность резонатора. Следуя [1], в качестве длительности рабочей части выходного импульса примем величину T/s , где $s > 1$ — заданный коэффициент сжатия, а под КПД будем подразумевать отношение энергии, содержащейся в интервале T/s , к энергии входного импульса. Положение этого интервала, а также параметры α , β и γ оптимизируются для получения максимального КПД. В нижеописанном проекте степень компрессии была выбрана равной 4, что близко к параметрам экспериментов с компрессором SLED [3] и компрессором VPM [4]. Численным методом, описанным в [8], было найдено,

что для $s = 4$ максимальный КПД, равный 65.9%, реализуется при $\alpha = 11.78$, $\beta = 8.61$, $\gamma = 2.11$.

3. Экспериментальный компрессор (рис. 1) был рассчитан на частоту 34.27 НГц и длительность рабочей части выходного импульса 22.5 нс. Такая длительность получается при масштабировании по частоте параметров компрессора SLED, предназначенного для 11.4 НГц [9].

Как и в работе [6], резонатор компрессора был образован тремя зеркалами (рис. 1). Одно из зеркал было загофрировано с таким расчетом, чтобы при свободных колебаниях рабочей моды циркулирующий волновой поток частично рассеивался только в (-1) -й дифракционный максимум, причем рассеянный луч лежал бы в плоскости циркуляции внутрирезонаторного потока. Обращение излучаемого потока соответствует, согласно принципу взаимности, оптимальному возбуждению резонатора падающим волновым потоком.

Рабочая мода резонатора имела электрическое поле, перпендикулярное плоскости циркуляции потока (обстоятельство, благоприятствующее электропрочности при работе на высоких уровнях мощности). Два зеркала имели прямоугольную форму и эллиптический параболоидный профиль рабочей поверхности, третье, также прямоугольное, зеркало в нулевом приближении считалось плоским; при этом структура поля рассчитывалась методом Фокса-Ли [10]. Синусоидальная гофрировка „наносилась“ на плоское зеркало согласно расчету по методу интегрального уравнения [11]. Центры зеркал резонатора составляли вершины равнобедренного треугольника. Параметры резонатора следующие: поперечные размеры параболоидных зеркал 227 мм (в плоскости рис. 1), 150 мм (в перпендикулярной ей плоскости); радиусы кривизны параболоидных зеркал 5313.7 мм (в плоскости рис. 1), 796.5 мм (в перпендикулярной ей плоскости); поперечные размеры гофрированного зеркала 224 мм (в плоскости рис. 1), 110 мм (в перпендикулярной ей плоскости); период гофра 6.79 мм; амплитуда гофра 0.9 мм; расстояние между центрами параболоидных зеркал 270.38 мм; рас-

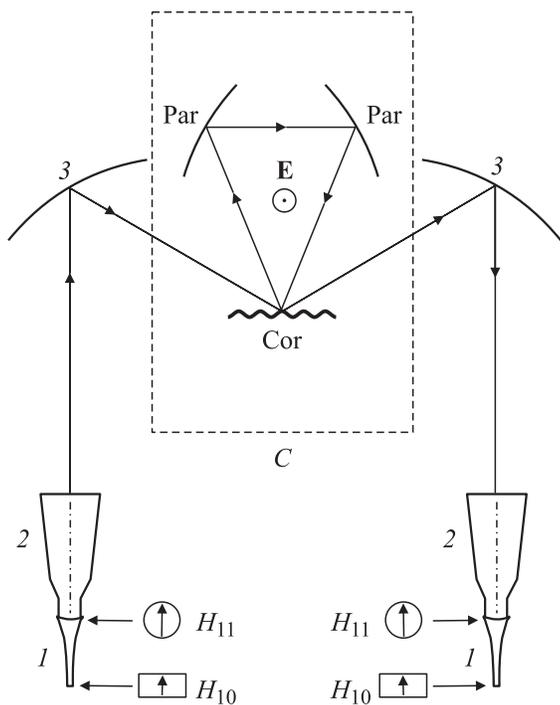


Рис. 1. Схема компрессора с системой ввода-вывода. *C* — резонатор, *cor* — плоское гофрированное зеркало, *par* — параболическое зеркало.

стояние между центрами плоского и параболического зеркал 320 мм; рабочая частота (экспериментальные данные) 34.27 GHz; нагруженная добротность (экспериментальные данные) 4200; собственная добротность (экспериментальные данные) 72 000.

Система ввода энергии в резонатор рассчитывалась исходя из условия согласования структур собственной моды резонатора (мода TEM_{00n}) и записывающего пучка на гофрированном зеркале. Система ввода включала в себя (рис. 1): 1 — переход прямоугольного волновода с рабочей волной H_{10} к круглому волноводу с волной H_{11} ; 2 — рупор, преобразующий волну H_{11} в гауссов пучок и состоящий из конически расширяющихся отрезков круглого волновода [12]; 3 — фокусирующее зеркало специального профиля. Вывод энергии из компрессора производился с помощью системы, идентичной системе ввода (рис. 1).

4. Схема экспериментальной установки для измерения параметров компрессии на низком уровне мощности (рис. 2) включала в себя: 1 — генератор на диоде Ганна с встроенным варикапом; 2 — генератор видеоимпульсов регулируемой формы для управления частотой генератора 1 путем подачи напряжения на варикап; 3 — источник постоянного напряжения смещения; 4 — электрически управляемый формирователь огибающей микроволновых импульсов; 5 — генератор импульсов для формирования огибающей 4; 6 — прецизионный аттенюатор; 7 — компрессор; 8 — детектор; 9 — осциллограф.

Необходимая скорость перестройки частоты исходного импульса достигалась за счет задания соответствующей скорости возрастания напряжения в управляющем импульсе генератора 2. Поиск оптимальной средней частоты импульса производился варьированием постоянной составляющей напряжения источника 3.

5. На рис. 3 представлены огибающие исходного (прямоугольного) и сжатого импульсов мощности. Для входного импульса длительностью 90 ns экспериментальный коэффициент усиления мощности (произведе-

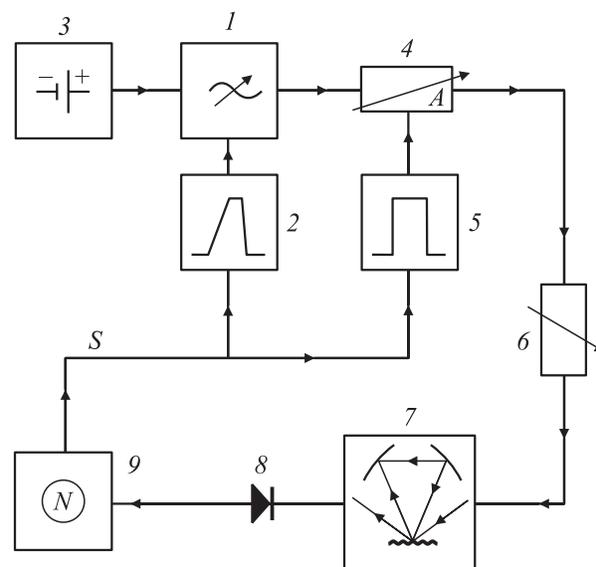


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. *S* — синхронизация.

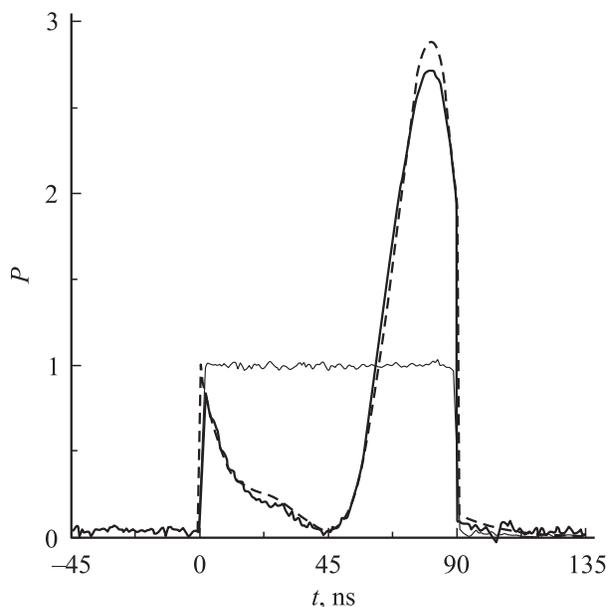


Рис. 3. Огибающие входного и выходного импульсов. Сплошные кривые — эксперимент, штриховая — теория с учетом собственных потерь резонатора.

ние степени компрессии (4) и КПД) составил ≈ 2.4 , а КПД, $\approx 60\%$, оказался на 6% меньше теоретического. Заметим, что один из способов повышения эффективности компрессии ЛЧМ импульсов состоит в применении цепочек резонаторов [8].

Авторы благодарят М.И. Петелина за постоянный интерес к работе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-17107).

Список литературы

- [1] *Wilson P.B.* // Application of High Power Microwaves / Ed. A.V. Gaponov-Grekhov & V. Granatstein. Boston & London: Artech House, 1994. P. 229–317.
- [2] *Лебедев А.Н., Перельштейн Э.А.* // Релятивистская высокочастотная электроника / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1990. Вып. 6. С. 217–255.
- [3] *Farcas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B.* // Proc. 9th Conf. on High Energy Accelerator. SLAC, Stanford (CA, USA), 1974. P. 576–582.
- [4] *Balakin V.E., Syrachev I.V.* // Proc. of III European Particle Accelerator Conf. Berlin, 1992. P. 1173–1175.
- [5] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Павельев В.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 6. С. 59–64.
- [6] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Павельев В.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 19. С. 5–10.
- [7] *Petelin M.I., Tai M.L.* // Proc. AIP Conf. 1995. N 337. P. 303–310.
- [8] *Данилов Ю.Ю., Тай М.Л.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 4. С. 99–101.
- [9] *Wilson P.B.* // SLAC-PUB-7449. 1997. April.
- [10] *Фокс А., Ли Т.* // Лазеры / Пер. с англ. под ред. М.Е. Жаботинского, Т.А. Шмаонова. М.: ИЛ, 1963. С. 325–362.
- [11] *Denisov G.G., Kuzikov S.V.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1997. Vol. 18. N 3. P. 733–644.
- [12] *Denisov G.G., Kuzikov S.V.* // Conf. Digest of 20th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Orlando, 1995. P. 297–298.