

09;12

Схема формирования высокочастотных импульсов переключаемым резонатором

© В.И. Иванников, Ю.Д. Черноусов, И.В. Шеболаев

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 29 ноября 1996 г.)

Рассмотрена схема формирования ВЧ импульсов, содержащая накопительный резонатор и переключаемое с антирезонансного на резонансный режим работы устройство вывода. Приведены соотношения для формы импульса, коэффициента усиления, КПД.

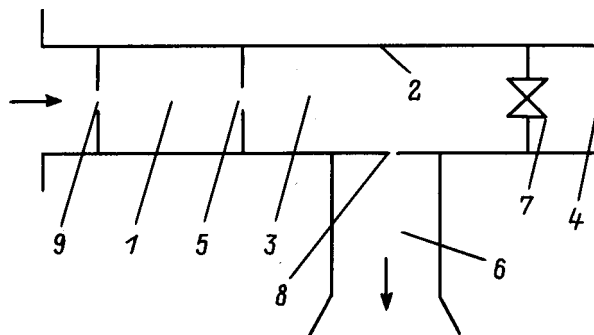
Экспериментальные исследования метода формирования ВЧ импульсов, заключающегося в накоплении ВЧ энергии в накопительном резонаторе и быстром выводе в волновод [1–4], показали на возможность получения мощных ВЧ импульсов наносекундного диапазона длительности при высоких КПД преобразования ВЧ энергии питающего генератора в энергию импульсов и коэффициенте усиления. Вывод осуществляется за счет быстрого изменения конфигурации связи резонатора с линией [2,3] либо изменением типа колебаний [4] с использованием управляющих элементов — различного рода разрядников. Время вывода определяется отношением электрической длины накопительного резонатора к групповой скорости волны и измеряется единицами наносекунд. Быстрые разрядники срабатывают за такое же время, поэтому значительная доля энергии рассеивается в них самих в течение переходного времени вывода. Кроме того, в известных схемах в режиме накопления управляющие элементы включены непосредственно в накопительный резонатор, поэтому значительны потери в них и велико электрическое напряжение, что затрудняет использование в качестве управляющих элементов полупроводниковых ключей как при низком, так и при высоком уровне мощности. По этим причинам, по-видимому, полупроводниковые ключи в схемах формирования ВЧ импульсов до настоящего времени не использовались.

В ряде случаев необходимо обеспечить вывод запасенной энергии в течение 100–500 периодов высокочастотного поля при высоком КПД преобразования сформировать последовательность ВЧ импульсов с высокой частотой повторения.

В работе [5] показано, что вывод ВЧ энергии из высокочастотного резонатора в линию возможен через другой резонатор. При этом время вывода определяется коэффициентом связи между резонаторами и может быть выбрано в приемлемых пределах с учетом быстродействия управляющих элементов. Кроме того, может быть значительно уменьшено высокочастотное напряжение на управляющем элементе, что дает возможность использования полупроводниковых ключей. В [5] рассмотрена высокочастотная схема, в которой ввод и вывод энергии осуществляется через проходной управляемый резонатор, что усложняет ее использование. В настоящей рабо-

те приведена схема, в которой вывод энергии может осуществляться независимо от накопления, описан процесс вывода и проведена оценка максимальных коэффициента усиления и КПД преобразования при заданном времени вывода.

Рассмотрим схему на рисунке, содержащую накопительный резонатор 1 и устройство вывода 3. Устройство вывода содержит отрезок прямоугольного волновода 2, ограниченный короткозамыкателем 4 и диафрагмой связи 5 с накопительным резонатором и волноводом вывода мощности 6. Длина отрезка волновода 2 составляет $5\lambda_B/4$. На расстоянии $\lambda_B/4$ от короткозамыкателя 4 установлен ВЧ ключ 7 — резонансная щелевая диафрагма, в середине щели которой помещен управляющий элемент — встречно включенные $P-I-N$ -диоды, и на расстоянии $\lambda_B/2$ от диафрагмы 7 в широкой стенке волновода 2 расположена диафрагма связи 8 волновода вывода 6. Накопительный резонатор связан с ВЧ генератором накачки диафрагмой связи 9.



При открытом ВЧ ключе (на $P-I-N$ -диоды подано напряжение отрицательного смещения) осуществляется накопление ВЧ энергии в резонаторе 1. В отрезке волновода 2 устройства вывода 3 структура высокочастотного поля определяется короткозамыкателем 4, при этом для ВЧ волны выполняются условия антирезонанса, амплитуда волны в нем минимальна [6]. Для выбранной ориентации волновода при антирезонансе диафрагма связи 8 оказывается в области нулевого магнитного поля, поэтому ВЧ энергия в нагрузку 6 не поступает. При закрытом ВЧ ключе 7 (на $P-I-N$ -диодах положительное

смещение) в отрезке волновода 2, ограниченном диафрагмой связи 5 и ВЧ ключом 7 для ВЧ волны выполняются условия резонанса, ВЧ энергия переводится из резонатора 1 в резонатор 2 [5]. В волноводе вывода 6 формируется импульс ВЧ мощности. Таким образом, перевод системы из режима накопления в режим вывода ВЧ энергии осуществляется изменением с антирезонансного на резонансный режим работы устройства вывода 3.

Величина запасенной энергии в режиме накопления определяется соотношением [7]: $W_{1M} = 4k_1 Q_1 P_r / (1 + k_1)^2 \omega_0$, где k_1 — входной коэффициент связи, Q_1 — добротность накопительного резонатора с учетом потерь в устройстве вывода, ω_0 — его частота, P_r — мощность внешнего генератора. Если в момент подачи тока на диоды $t = 0$ генератор выключается (режим вывода), то для мощности выходного сигнала P_E при $(1 + k_2)/2Q_2 \gg (1 + k_1)/2Q_1$, $k_2 \gg 1$, $k_1 = 1$ для $t \geq 0$, следуя [8], можно получить соотношение

$$P_E = (4P_r Q_1 / \omega_0 \tau) (1 + \tau_0^2 / \pi^2 \tau^2) e^{-2t/\tau} \sin^2(\pi t / \tau_0), \quad (1)$$

где $\tau = 4Q_2 / \omega_0 k_2$ — постоянная времени спада амплитуды колебаний во втором резонаторе; $\tau_0 = 2\pi / \omega_0 k_c (1 - k_2^2 / 4Q_2^2 k_c^2)^{1/2}$ — полупериод обмена запасенной энергии между резонаторами; k_2, k_c — соответственно выходной и межрезонаторный коэффициенты связи; Q_2, ω_0 — добротность и частота второго резонатора.

Резонаторы обмениваются запасенной энергией с периодом $2\tau_0$, а в выходном волноводе формируется сигнал (1), представляющий собой последовательность колоколообразных импульсов с длительностью (по основанию) и периодом τ_0 с быстро убывающей амплитудой. При заданном τ_0 максимальное значение функции (1) возрастает при уменьшении времени спада τ (увеличении k_2, k_c). Полагая, что граничным условием справедливости принятого метода рассмотрения переходных процессов будет равенство $\tau = \tau_0$, находим граничные значения межрезонаторного и выходного коэффициентов связи $k_c = 2(\pi^2 + 1)^{1/2} / \omega_0 \tau_0$, $k_2 = 4Q_2 / \omega_0 \tau_0$. Выходная мощность максимальна в момент времени $t_0 \approx 0.4\tau_0$, при этом расчетный коэффициент усиления схемы по мощности $K = P_E(t_0) / P_r \approx 9.7$ dB.

Будем считать, что полезная доля энергии W_E выводится в течение только первого из импульсов длительностью τ_0 последовательности (1). Из (1) доля W_e выведенной энергии в течение времени τ_0 : $W_E \approx 0.86 P_r Q_1 / \omega_0$, т.е. КПД вывода энергии, запасенной в накопительном резонаторе, через промежуточный резонатор в волновод вывода составляет 86%.

Коэффициенты k_1, k_2 измеряются со стороны входа и выхода на резонансной частоте ω_0 при сильно отстроенном соответственно втором и первом резонаторах. Значение k_c измеряется по раздвоению резонансных частот ω_2, ω_1 амплитудно-частотной характеристики системы связанных резонаторов, каждый из которых

настроен на частоту ω_0 при сильной отстройке другого $k_c = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$.

Экспериментальная проверка осуществлялась в десятисантиметровом диапазоне длин волн при $P_r \approx 0.1$ W на макете с параметрами $Q_1 \approx 7.5 \cdot 10^3$, $Q_2 \approx 3 \cdot 10^3$, $\tau_0 \approx 80 \cdot 10^{-9}$ s, $k_1 = 1$, $k_2 \approx 8$, $k_c \approx 0.005$. Использовались $P-I-N$ -диоды КА-509. Форма генерируемых ВЧ импульсов колоколообразная, близка к виду функции (1) и в течение времени $t = \tau_0$ мало отличается от приведенной ранее [5]; длительность по основанию около 80 ns. Поскольку при этом 86% запасенной энергии излучается в волновод вывода, то обратной перекачки практически не происходит и на этом процесс вывода заканчивается. На макете получен коэффициент усиления по мощности $K \approx 9$ dB амплитуда второго импульса последовательности (1) меньше первого примерно на 12 dB (расчетное значение около 10 dB). Причина расхождения в том, что в эксперименте ВЧ генератор работал в непрерывном режиме и при обратной перекачке ВЧ энергии из резонатора вывода накопительный резонатор возбуждался двумя сигналами в противофазе. Это приводило к уменьшению по сравнению с расчетной амплитуды второго импульса. Частота повторения импульсов составляла 50 kHz.

Приведенные оценки и экспериментальные результаты показывают на возможность создания системы с разделенными функциями, в которой накопление ВЧ энергии осуществляется в высокодобротном резонаторе, а вывод — через переключаемое с антирезонансного на резонансный режим работы устройство вывода. При этом в режиме накопления для ВЧ волны в устройстве вывода выполняются условия антирезонанса, амплитуда волны a_{2s} в нем минимальна и определяется соотношением [6] $a_{2s} = a_1 T_1 / 2$, где a_1 — амплитуда волны в накопительном резонаторе, T_1 — коэффициент передачи межрезонаторной диафрагмы связи 5. Можно показать, что если резонаторы выполнены из отрезков волноводов, то $T_1 = \pi k_c (n_1 n_2)^{1/2} / 2q_1 q_2$, где q_1, q_2 — отношение длины волны в свободном пространстве к длине волны в соответствующем волноводе; n_1, n_2 — длины резонаторов, измеренные в единицах полуволн. В нашем случае $n_1 = n_2 = 2$, $q_1 = q_2 \approx 0.69$, поэтому $T_1 \approx 3.3 k_c$. Максимальный уровень импульсной мощности формируемых данной схемой сигналов будет определяться амплитудой стоячей волны антирезонанса $2a_{2s} = a_1 T_1$. Поскольку $T_1 \ll 1$, то высокочастотное напряжение на управляющем элементе ВЧ ключа значительно меньше, чем для обычных схем [1–4], где оно определяется непосредственно волной в накопительном резонаторе a_1 . Это позволяет использовать полупроводниковые элементы в схемах формирования и усиления ВЧ импульсов. Максимальная частота повторения определяется временем восстановления $P-I-N$ -диодов и при относительно невысоком уровне мощности может быть доведена до единиц МГц. Отметим, что рассмотренная схема при $k_2 = 0$ пригодна для создания полей высокой напряженности в резонаторе вывода и может быть применена для ускорения заряженных частиц.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности, М.: Энергоатомиздат, 1984, 112 с.
- [2] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2465–2467.
- [3] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 8. С. 138–146.
- [4] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 24. С. 1529–1533.
- [5] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 194–197.
- [6] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.
- [7] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ВАНТ. Сер. ЯФИ (ТиЭ). 1989. Вып. 6(6). С. 55–58.
- [8] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 5. С. 162–167.