

ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ СВЧ ИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

Высокая добротность сверхпроводящих резонаторов (СПР), достигающая значений $\sim 10^7 - 10^{11}$ [1], позволяет использовать их как накопители электромагнитной энергии. В зависимости от рабочей температуры ($T \sim 1,5-4,2$ К) и сверхпроводящего материала (Pb, Nb, Nb_3Sn) в СПР могут быть достигнуты плотности электромагнитной энергии от 0,6 до нескольких десятков Дж/дм³ [2]. При обеспечении быстрого ($t \sim 10^{-6} - 10^{-8}$ с) вывода накопленной энергии можно получить импульсные СВЧ сигналы большой амплитуды (сотни кВт – десятки МВт). В [3] был достигнут коэффициент умножения мощности $K = P_g / P_n \sim 10^4$ (P_g – пиковая мощность выходного импульса, P_n – мощность генератора накачки), в [4] – предельное значение $P_g \sim 150$ кВт при длительности импульса 2 мкс.

Формирователи импульсов на основе СПР-накопителей имеют очень большую перспективу в плане получения СВЧ импульсов наносекундной длительности с пиковой мощностью от сотен МВт до единиц ГВт, которые, в свою очередь, могут послужить основой перспективных РЛС и средств РЭБ.

Целью данной работы является анализ возможных методов формирования мощных СВЧ импульсов с использованием СПР, определение основных направлений создания таких устройств.

Реализация формирователей импульсов на основе СПР-накопителей предполагает решение целого ряда задач, связанных с работой СПР при повышенных уровнях СВЧ мощности, обеспечением быстрого переключения СВЧ энергии из СПР в нагрузку, обеспечением работы линий передачи при больших значениях амплитуд выходного сигнала, согласованием высокостабильного генератора накачки с СПР в процессе накопления и излучения СВЧ энергии и других.

Многие из отмеченных вопросов в постановочном плане рассмотрены в работе [5], однако проблема обеспечения быстрого и с малыми вносимыми потерями переключения СВЧ энергии из СПР в нагрузку остается важнейшей. Предлагается ее решать различными способами: быстрой перестройкой частоты СПР под частоту настройки внешнего выходного устройства, изменением вида колебаний в СПР, быстрой перестройкой внешнего резонатора, сильно связанного с СПР на резонансной частоте, использованием коммутирующих устройств интерференционного типа на основе волноводных тройников [5].

Последний способ является наиболее проработанным в экспериментальном плане. Энергия из резонатора выводится за счет быстрого изменения связи с выходной нагрузкой. Для этого используется волноводный тройник, к симметричным плечам которого подключены СПР и короткозамыкатель с плазменным или электронным разрядником перед ним на расстоянии $n\lambda_g / 4$, где $n = 1, 3, 5, \dots$, а к третьему плечу подключена нагрузка. При выключенном разряднике энергия в третье плечо не ответвляется и резонатор совместно с частью тройника и разрядником функционирует как накопитель энергии. Включение разрядника приводит к перемещению плоскости короткого замыкания к месту его расположения, за счет этого появляется сильная связь с нагрузкой через третье плечо. На резонансной рабочей частоте такой переключатель может иметь при достаточно точном изготовлении и настройке тройника ослабление 30-40 дБ, если изготовлен из обычного металла, и ~ 120 дБ, если из сверхпроводящего [5].

Одним из основных условий работоспособности такого устройства является равенство коэффициента отражения волны от разрядника величине, близкой к единице.

Зажженный разрядник можно рассматривать как проводящий штырь в волноводе. При этом коэффициент отражения будет описываться соотношением [6]

$$\Gamma = -Z_c(\lambda_g / a\lambda) \cdot I \cdot \sin(\pi D / a), \quad (1)$$

где

$$I = \frac{\sin[\pi(D+r)/a]}{(Z_c/4\pi\lambda\sigma)^{1/2}/r + (\lambda_g/a\lambda)\sin(\pi D/a) - \sin[\pi(D+r)/a]}, \quad (2)$$

D – координата штыря в волноводе (если штырь в центре, то $D = a/2$); σ – проводимость материала штыря; r – радиус штыря; $Z_c = 377 \text{ Ом}$; λ_g – длина волны в волноводе; λ – длина волны в свободном пространстве; a – размер широкой стенки волновода.

На рис.1 приведены графики зависимости коэффициента отражения от радиуса проводящего штыря, вычисленной по (1) и (2) при $\lambda = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $a = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $D = a/2$, $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ (кривая 1), а также измеренной экспериментально для стального ($\sigma \sim 10^7 \text{ См/м}$) штыря (кривая 2). Видно, что уже при $r \sim 1 \text{ мм}$ величина коэффициента отражения близка к единице для теоретической кривой, хотя ход экспериментальной кривой убеждает, что достижение $\Gamma \sim 1$ при таких размерах штыря не простая задача. Анализ соотношений (1) и (2) показывает, что зависимость $\Gamma(\sigma)$ должна быть достаточно сильной (при $\sigma \cong 1 \cdot 10^{-1}$; 10 См/м при $r = 1 \text{ мм}$ – $\Gamma \approx 0,188$; $0,699$ соответственно).

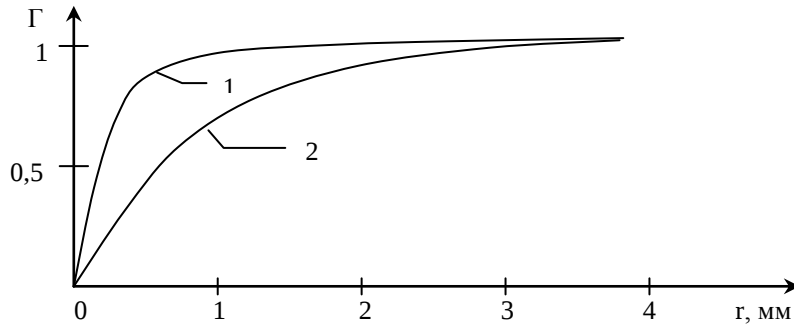


Рис.1

Из проведенных оценок следует, что для эффективной работы разрядника необходимо обеспечить при малом диаметре плазменного или электронного столба его высокую проводимость.

Ионизированный газ может быть описан с помощью относительной диэлектрической проницаемости ε и удельной объемной проводимости σ [7]:

$$\varepsilon = 1 - \omega_0^2 / (\omega^2 + \nu_{эф}^2), \quad (3)$$

$$\sigma = \omega_0^2 \cdot \nu_{эф} \cdot \varepsilon_0 / (\omega^2 + \nu_{эф}^2), \quad (4)$$

где $\omega_0 = \sqrt{n \cdot e^2 \cdot 4\pi / m\varepsilon_0}$ – плазменная частота; n – концентрация электронов в плазме; ω – частота внешнего воздействия; $\nu_{эф}$ – эффективная частота столкновений частиц; e , m – заряд и масса электрона; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При $\nu_{эф} = \omega$ величина σ достигает максимального значения

$$\sigma_{\max} = (\omega\varepsilon_0/2) \left(\omega_0^2 / \omega^2 \right). \quad (5)$$

При $\omega_0 = \omega$ и $n_{кр} = \omega_0^2 m\varepsilon_0 / 4\pi e^2 = 1,24 \cdot 10^{10} \text{ ф}^2 \text{ (ГГц) см}^{-3}$, выражения для ε и σ могут быть записаны следующим образом [8]:

$$\varepsilon = 1 - (n/n_{кр}) \left(1 + \nu_{эф}^2 / \omega^2 \right)^{-1}, \quad (3a)$$

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \left(n/n_{kp} \right) \left(v_{\phi} / \omega \right) \left(1 + v_{\phi}^2 / \omega^2 \right)^{-1}. \quad (4a)$$

При $n \geq n_{kp}$ и $\omega \approx v_{\phi}$ величина ε переходит через нулевое значение и может становиться отрицательной. При этом будет происходить отражение волны от плазмы и затухание поля, как в за-пределном волноводе. При расположении плазмы в волноводе условие отсечки достигается при $\varepsilon = (\lambda / \lambda_{kp})^2$. Сочетание отрицательной величины ε с обеспечением по возможности большей величины σ приводит к эффективному отражению волны от плазменного столба. Допустим, что на частоте 10 ГГц в прямоугольном волноводе стандартного сечения существует плазменный разряд. Тогда $\varepsilon = (\lambda / \lambda_{kp})^2 = 0,425$; $n_{kp} = 1,24 \cdot 10^{10} \text{ ф}^2 (\text{ГГц}) \text{ см}^{-3} = 1,24 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При $v_{\phi} = \omega$ $n = 1,15 n_{kp} = 1,43 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Концентрация молекул в газе при нормальном давлении и $T = 273 \text{ К}$ - $N = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Минимальные значения напряженности пробойного электрического поля для газообразного гелия (в нашем случае разрядник может работать только на газообразном гелии, так как все остальные газы при 4,2 К вымораживаются) достигаются при давлениях порядка нескольких тор [9]. Учитывая $P_1 V / T_1 = P_2 V / T_2$ (P , V , T – давление, объем, температура), получим $N \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что заведомо больше значения n , необходимого для эффективной работы разрядника.

В то же время при создании таких низкотемпературных разрядников возникают сложности, связанные с неизбежным рассеиванием части мощности сигнала в плазме и излучением ее в окружающие элементы конструкции и охлаждающую среду.

Мощность, излучаемая плазмой, при этом [10]:

$$P = A \cdot T_e \cdot \Delta \omega / 2\pi, \quad (6)$$

где $A = 1 - |\Gamma|^2 - |T|^2$; Γ – коэффициент отражения волны от волновода с плазмой; T – коэффициент передачи волны через элемент с плазмой; $T_e \approx m \bar{v}^2 / k$ – температура электронного газа; $\bar{v} \approx 10^6 \text{ м/с}$ – средняя скорость электронов; k – постоянная Больцмана; $\Delta \omega$ – полоса частот.

Величина A может быть определена из следующего соотношения [10]:

$$A = \frac{2\xi \left(n/n_{kp} \right) \left(v_{\phi} / \omega \right)}{1 + v_{\phi}^2 / \omega^2 + 2\xi \left(n/n_{kp} \right) \left(v_{\phi} / \omega \right) + \xi^2 \left(n^2 / n_{kp}^2 \right)}, \quad (7)$$

где $\xi = (2\lambda_g / a) (\pi r / \lambda)^2$; r – радиус баллона плазменного разрядника.

Потери, вносимые плазменным столбом с диаметром 2 мм, при концентрации заряженных частиц $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ составляют 0,1 дБ, а при $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигают 7 дБ.

Плазменный разрядник может быть управляем как внешним напряжением, так и от сформированного импульса СВЧ. При этом началом разряда будет достижение в системе “СПР–переключатель” напряженностей электрических полей, достаточных для пробоя газа в разрядной трубке. Однако система с самозапуском не всегда будет оптимальной, так как разряд может произойти до накопления максимальной энергии.

Главным условием работы разрядника в рассматриваемом переключающем устройстве является то, что он должен работать при низких температурах и иметь малые вносимые потери в выключенном состоянии (в режиме накопления энергии). Это предполагает высокую устойчивость к термоциклам, использование материалов с чрезвычайно малыми электрическими потерями, герметизацию, эффективную электромагнитную развязку между системой накопления энергии и устройством управления разрядом.

Выполнение переключателя на основе разрядника с электронным пучком [3, 5] также связано с преодолением ряда технических сложностей, обусловленных необходимостью введения электронного пучка в герметичное низкотемпературное сверхпроводящее устройство, сбором отработанных

электронов, снятием тепловыделения, тщательной фокусировкой для уменьшения числа рассеянных электронов, электрической развязкой высоковольтных управляющих устройств от СВЧ тракта. В случае использования автоэлектронной эмиссии необходимо также решать проблему теплоотвода от катодного острия, сбора отработанных электронов, теплоотвода от анода, самопроизвольного срабатывания разрядника при достижении критических значений электрических полей и т.п.

В то же время, по быстродействию и возможности сопряжения с криогенными сверхпроводящими устройствами переключатели на основе плазменных и электронных разрядников являются, по-видимому, наиболее перспективными при формировании мощных СВЧ импульсов.

Существенным недостатком переключателей на волноводных тройниках является то, что, во-первых, к тройнику предъявляются очень жесткие требования по точности его изготовления и симметричности, включая введение дополнительных устройств для его настройки, а, во-вторых, элементы переключающего устройства постоянно находятся в объеме, где происходит накопление энергии. Это ведет к снижению величины накапливаемой энергии, нестабильности генерируемой частоты за счет нестабильности во времени параметров разрядника, необходимости иметь малые потери в переключающем устройстве для обеспечения высокой добротности СПР, совместно с подключенными к нему цепями, в режиме накопления энергии. В результате снижается коэффициент умножения мощности, пропорциональный отношению добротностей в режиме накопления и в режиме разряда.

В связи с этим представляется целесообразным поиск других технических решений криогенных переключателей, при которых хотя бы часть нежелательных эффектов была бы устранена или ослаблена.

Одним из таких решений является использование свойств запердельных волноводов, в частности круглого сечения, подключение которых к СПР-накопителю не вносит значительных искажений и потерь в процессе накопления энергии (при достаточно малом диаметре волновода), а вывод энергии через них может быть осуществлен формированием с помощью плазменного разряда или электронного потока центрального проводника и трансформацией за счет этого на время вывода энергии запердельного участка круглого волновода в коаксиальный. Это позволяет вынести переключатель за пределы СПР-накопителя. Такое устройство, к тому же, при длительности излучаемых импульсов $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ с не будет, в силу своей широкополосности, вносить дополнительных искажений в форму импульсов, что возможно при использовании волноводов.

На рис.2 показана структурная схема генератора СВЧ импульсов. Особенностью устройства является то, что переключатель 3 выполнен на основе коаксиальной линии, часть внутреннего проводника которой представляет собой газовый разрядник 7. Накопление энергии в СПР 2 происходит с помощью генератора СВЧ 1. Для генерации мощного СВЧ импульса в коаксиальную линию 5, соединенную с нагрузкой 4, подается импульсный ВЧ сигнал от генератора импульсов 9, который поджигает плазменный разряд в Г-образном отрезке, соединенным с внутренним проводником коаксиальной линии и представляющим собой полость, заполненную газообразным гелием. Для исключения попадания мощного СВЧ импульса на вход импульсного генератора 9 между ним и коаксиальной линией включается развязывающий СВЧ дроссель 8. Ввиду невысокой электрической прочности коаксиальных линий по сравнению с волноводами, пространство между внутренним и внешним проводниками заполняется диэлектриком с высоким значением пробивного напряжения. В режиме накопления, когда разрядник выключен, часть коаксиальной линии, примыкающая к СПР, представляет запердельный круглый волновод и за счет этого переключатель развязан с СПР и не вносит в него дополнительные потери. Поджиг разряда приводит к трансформации этого участка линии в коаксиальную линию передачи со связью с резонатором с помощью петли. При этом плоскость петли устанавливается перпендикулярно плоскости магнитных силовых линий в максимуме магнитного поля и в минимуме электрических полей СПР, что позволяет избежать самопроизвольного включения разрядника.

Некоторым недостатком описанного устройства является необходимость в генераторе импульсных сигналов для управления газовым разрядником.

С учетом того, что для накопления энергии в СПР требуется некоторое время, определяемое величиной его добротности, количество импульсов, которое можно будет получить от генератора СВЧ импульсов с СПР, будет ≤ 100 в секунду. В этом случае для управления переключателем возможно использование и электромеханических устройств. На рис.3 показана структурная схема устройства, в котором используется механизм возвратно-поступательного перемещения 6 внутреннего проводника 4 коаксиальной линии 3, который заканчивается диэлектрической ампулой 8, запол-

ненной газообразным гелием. Связь с нагрузкой 9 осуществляется с помощью петли связи 7, а развязка механизма перемещения 6 с передающей линией – дросселем 5. В данном устройстве подключение нагрузки происходит в момент введения разрядника в поле, напряженность которого будет достаточна для его поджига. При этом крутизна переднего фронта импульса будет определяться только временем срабатывания разрядника, и лишь начало его – механизмом возвратно-поступательного движения.

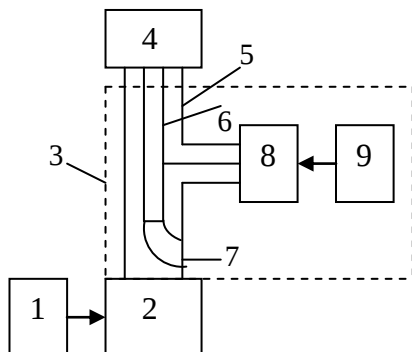


Рис.2

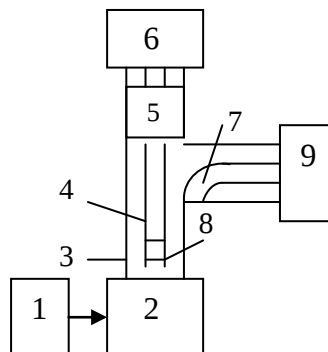


Рис.3

Однако необходимость решения проблем, связанных с низкими температурами, внешним управлением процессом излучения, электрической прочностью выводящих линий передачи и других, отмеченных выше, тем не менее остается актуальной.

Подводя итоги данного рассмотрения, можно отметить, что разработка формирователей мощных СВЧ импульсов, в которых в качестве базового элемента используется СПР-накопитель, имеет перспективу за счет возможности достижения больших значений коэффициентов умножения мощности (до 10^6). Важнейшей задачей при этом является разработка криогенного переключателя, который может быть создан с помощью использования свойств запердельных волноводов и плазменных или электронных разрядников.

Список литературы: 1. Менде Ф.Ф., Спицын А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. К.: Наук. думка. 1985. 240с. 2. Бондаренко И.Н. Накопление электромагнитной энергии в сверхпроводящем резонаторе // 36. наук. прайц. Харків: ХВУ. 2000. Вип. 2(28). С.24-30. 3. Bix D.G., Scalapino D.J. Microwave energy compression using a high intensity electron beam switch. // J. Appl. Phys. 1980. V.51, N 7. P.3629-3631. 4. Alvarez R.A., Bix D.G. et al. Generation of high-power microwave pulses using a spherical superconducting cavity and interference-type switch. // IEEE Trans. on Magn. 1981. V.17, N 1. P.935-938. 5. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112с. 6. Левин Л. Теория волноводов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 312с. 7. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 416с. 8. Резонансные разрядники антенных переключателей / Под ред. И.В.Лебедева. М.: Сов. радио. 1976. 248с. 9. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 212с. 10. Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 328с.