

МЕТОД ЗАЩИТЫ ПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

Р.В. Шаповал

(представил проф. А.М. Сотников)

Обеспечению помехоустойчивости приемных трактов различных радиоэлектронных систем в зависимости от типа, назначения последних, вида помех посвящено наибольшее число публикаций, в которых освещены различные подходы к решению этой задачи, основанные как на дальнейшем совершенствовании обработки принимаемой информации, так и на техническом совершенствовании самих приемных трактов. При воздействии мощных электромагнитных излучений для защиты входных цепей приемных трактов используют процесс создания короткого замыкания.

Введение. Считалось, что одним из эффективных методов защиты радиоэлектронной аппаратуры является создание и использование газового разряда. Устройства, реализующие этот метод, способны выдерживать огромные пробивные напряжения. Одно из известных устройств [1] содержит волновод, в котором установлен разрядник, соединенный с источником питания. Разрядник представляет собой вакуумно-герметичную резонансную структуру, заполненную газом при определенном давлении. При воздействии СВЧ поля низкого уровня мощности разряд отсутствует, и разрядник ведет себя как СВЧ фильтр (резонатор), пропуская низкого уровня сигнал в приемный тракт. При воздействии СВЧ электромагнитного поля высокого уровня мощности внутри разрядника возникает СВЧ газовый разряд, в результате чего входное сопротивление разрядника становится очень малым, а вносимое им затухание для проходящего через него мощного сигнала резко возрастает.

Основными процессами, управляющими СВЧ разрядом, являются ионизация за счет столкновения с молекулами газа электронов, обладающих высокой скоростью колебательного движения, и потери электронов в результате диффузии из разрядного объема, захвата (или прилипания к нейтральным молекулам) и рекомбинации. Если скорость образования электронов равна скорости их устранения, то устанавливается стационарное состояние; Но как только скорость образования электронов даже незначительно превышает скорость их потерь – плотность электронов резко растет и наступает пробой. Для уменьшения порогово-

го уровня падающей мощности (мощности зажигания), при котором в разряднике возникает СВЧ разряд, в нем используют вспомогательный тлеющий разряд на постоянном токе. Вспомогательный разряд действует непрерывно, создавая начальную концентрацию свободных электронов в газе, благодаря которой критическая ионизация происходит при меньших напряженностях СВЧ электромагнитного поля.

Однако такой метод защиты обладает рядом существенных недостатков, а именно: медленные переключательные процессы, происходящие в разряднике, большие энергозатраты на поддержание вспомогательного разряда и невозможность, регулировки по уровню защищаемой мощности. Кроме того, при значительном КСВ нагрузки и определенной фазе коэффициента отражения параметры разрядника меняются в 1,5 ... 2 раза [2]. Для регулировки по уровню защищаемой мощности необходимо менять давление и состав газа в разряднике, что для данного разрядника невозможно. Величина времени переключения разрядника сильно зависит от увеличения, отрицательных температур окружающей среды. Поглощение падающей мощности в дуге разряда приводит к нагреву разрядника и влияет на его долговечность. Наконец,, вспомогательный разряд требует дополнительных энергозатрат, а так как часть фидерной линии (волновода) перекрывается разрядником, то в результате увеличения отраженной мощности полезного сигнала коэффициент стоячей волны возрастает.

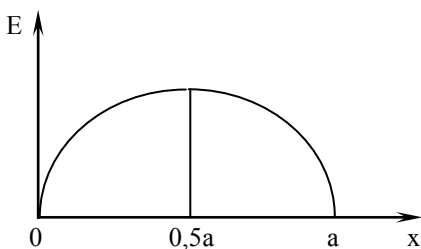


Рис. 1. Распределение электрического поля внутри волновода

Нами предлагается метод защиты входных цепей приемного тракта, который включает создание в волноводе неоднородности с изменяющейся проводимостью, причем неоднородность создается непрерывно с помощью радиоизотопного источника, а в области неоднородности создается попе-

речное постоянное магнитное поле. Как известно [3], внутри волновода за счет электрического поля электромагнитной волны, проходящей по волноводу, будет создаваться некоторая ионизация газа, находящегося внутри волновода с плотностью электронов, соответствующей распределению электрического поля внутри волновода (рис. 1).

Однако проводимость участка ионизации (плазмы) очень мала даже при прохождении мощной СВЧ электромагнитной волны ($n_{e0} \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$), что не приводит к замыканию электромагнитной волны на любом участке ионизи-

ванного газа. Радиоактивный источник приводит к созданию внутри волновода вспомогательной низкотемпературной слабоионизованной плазмы. Так как напряженность электрического поля (рис. 1) имеет максимальное значение в центре волновода, то в этом месте за счет ионизации газа электрическим полем и радиоизотопным источником будет максимальная начальная (вспомогательная) концентрация свободных электронов (подкритическая концентрация). Приходящий информационный сигнал не вызывает резкого увеличения проводимости плазмы, не вызывает замыкания (отражения) этого сигнала через участок ионизации, то есть информационный сигнал проходит по волноводу на входные цепи приемного тракта РЭС. При воздействии мощного СВЧ помехового сигнала внутри волновода в области расположения радиоизотопного источника будет создаваться плазма с высокой проводимостью (концентрация электронов становится выше критической), замыкая это электромагнитное излучение и не пропуская его во входные цепи приемного тракта РЭС, т.е. защищая радиоэлектронную аппаратуру от воздействия мощных импульсных СВЧ помех. После прекращения воздействия помехи проводимость плазмы резко уменьшается, и РЭС продолжает работать в нормальном режиме. Таким образом, чувствительность устройства для защиты входных цепей приемного тракта (порог срабатывания) будет зависеть от места расположения в волноводе радиоизотопного источника. Перемещая радиоизотопный источник, т.е. увеличивая или уменьшая интенсивность воздействия источника на газ внутри волновода (увеличивая или уменьшая концентрацию электронов внутри волновода), можно регулировать уровень защищаемой мощности. Для уменьшения времени срабатывания газового разряда (уменьшения коэффициента диффузии электронов) в области нахождения радиоизотопного источника необходимо создавать постоянное магнитное поле с помощью соленоида.

При исследовании СВЧ пробоя в воздухе [4] электромагнитными импульсами была обнаружена сильная зависимость пробойной величины электрической напряженности СВЧ поля от частоты повторения импульсов. При многократном повторении воздействующих импульсов СВЧ поля пробойное поле снижалось более чем в три раза по сравнению с воздействием одного импульса в области давлений воздуха $p < 10^{-1}$ Тор. В экспериментах, представленных в работе [5], наблюдалось влияние частоты повторения импульсов на СВЧ пробой при давлении $p > 25$ Тор. При этом пробойная напряженность СВЧ поля снижалась не более чем на 8%.

В работе [6] было показано существование влияния предионизации на пробой: установлено количественное соответствие расчетных и измеренных зависимостей пробойной напряженности СВЧ поля E_n от давления воздуха $p = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ Тор для случаев, отличающихся крайними режимами диффу-

зии электронов при пробое: свободной диффузии и амбиполярной диффузии при наличии предионизации стационарным тлеющим разрядом с $n_0 \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$. При этом пробойные поля уменьшались в несколько раз.

Пробой газа, в частности, воздуха в переменном электрическом поле $E_0 \sin \omega t$ (E_0 – амплитуда) можно описать уравнением кинетики электронной концентрации n_e :

$$n_e^{-1} \frac{dn_e}{dt} = v_i(E_0) - v_a - v_d \quad (1)$$

и его решением

$$n_e(t) = n_0 \exp \{ [v_i(E_0) - v_a - v_d] t \}, \quad (2)$$

где $v_i(E_0) = v_a (E_0/E_k)^{5,3}$; $E_k = 37p (1 + \omega^2/v_y^2)$ [В/см] – критическое поле; $v_y = 6 \cdot 10^9 p(\text{Тор})$; $v_a = 1,4 \cdot 10^5 p(\text{Тор})$; $v_d = -n_e^{-1} \nabla^2 (Dn_e)$ – частота диффузии, характеризующая скорость потерь электронов из области пробоя.

Согласно (1) для начала пробоя в стационарном СВЧ поле достаточно выполнить условие $v_i(E_0) - v_a - v_d \geq 0$.

В импульсном СВЧ поле условие пробоя оказывается более жестким, так как за время длительности импульса τ_p концентрация электронов должна достигать некоторого условного уровня, например, критического, для заданной частоты поля: $n_{cr} = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$ ($n_{cr} = 1,24 \cdot 10^{10} f^2$) [6]:

$$v_{ii}(E_0) - v_a - v_d \geq \tau_p^{-1} \ln (n_{cr}/n_{e0}). \quad (3)$$

Из (3) следует, что при увеличении уровня остаточной ионизации n_{e0} , связанной с увеличением частоты следования СВЧ импульсов, между которыми плазма не успевает полностью распасться, импульсный пробой требует меньшей частоты ионизации v_i и соответствующего пробойного поля E_p . Однако этот эффект снижения пробойного поля при увеличении частоты следования импульсов безусловно играет свою роль, но им нельзя объяснить снижения амплитуды пробойного поля более чем в 1,5 раза. Это значит, что существует зависимость от n_{e0} либо самой частоты ионизации v_i , либо частоты диффузии v_d . Частотой прилипания v_a при давлениях воздуха $p < 10^{-1}$ Тор можно пренебречь. Поэтому наиболее вероятными причинами дополнительного снижения амплитуды пробойного СВЧ поля представляются зависимость от n_{e0} частоты ионизации v_i и коэффициента диффузии электронов D и соответствующей частоты $v_d = 4D/r_E^2$ (расширение из области пробоя радиуса r_E). Эта зависимость резко проявляется в области концентраций $10^5 \leq n_{e0} \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$, соответствующей переходу диффузии от свободной (одночастичной) к амбиполярной (плазменной).

Однако не следует исключать из рассмотрения и альтернативную воз-

возможность снижения пробойного поля с ростом частоты следования импульсов за счет увеличения скорости ионизации v_i . Рост v_i может быть вызван, например, снижением среднего потенциала ионизации воздуха из-за накопления в повторяющемся импульсном СВЧ разряде долгоживущих метастабильных атомов или молекул азота и кислорода с высокими уровнями возбуждения, а также за счет образования химических соединений компонентов воздуха с пониженным потенциалом ионизации, например, закись азота NO. Как было показано в выражении (2), частота ионизации v_i зависит от амплитуды E_0 , частоты ω переменного электрического поля и концентрации молекул воздуха N_m . Эта зависимость представлена на рис. 2 в зависимости от E_0/E_K [3].

При $E_0 = E_K$ частота ионизации сравнивается с частотой прилипания v_a , при $E_0 > E_K$ $v_i > v_a$ и наступает пробой. При изменении E_0/E_K от 1,3 до 3 можно использовать эмпирическую формулу

$$v_i / v_a \approx (E_0 / E_K)^{5,3}, \quad (4)$$

хорошо сочетающейся с теоретической кривой (рис. 2), где эмпирическая зависимость (4) показана штриховой линией. При $E_0/E_K > 4$ рост v_i быстро ослабевает, а при $E_0/E_K < 10^2$ частота ионизации достигает максимума и начинает медленно спадать. Причина падения заключается в уменьшении полного сечения ионизации при высоких энергиях электрона $\epsilon > 10^2 \dots 10^3$ эВ.

Определим оптимальные условия ионизации, когда при заданной энергии СВЧ импульса число возникающих в газе ионов максимально. В условиях оптимума наибольшая доля энергии СВЧ импульса идет на образование электрон-ионных пар. Учитывая, что плотность энергии импульса W пропорциональна его длительности τ_p и квадрату амплитуды поля E_0^2 , причем длительность τ_p при заданном изменении концентрации ионов обратна частоте ионизации $v_i(E_0)$, находим, что

$$W \sim \frac{E_0^2}{v_i(E_0)}.$$

На рис. 3 показана необходимая для ионизации энергия импульса в

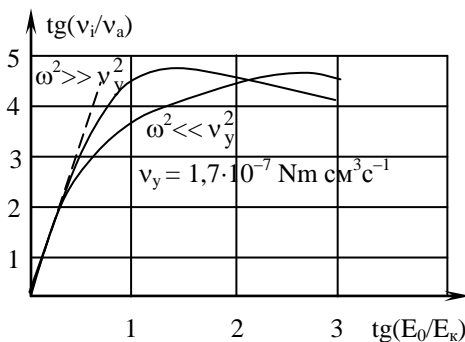


Рис. 2. Частота ионизации в воздухе в зависимости от амплитуды переменного электрического поля E_0 (v_y – характерная частота соударений электрона)

зависимости от его амплитуды E_0 при $\omega^2 \gg v_y^2$ [3].

Минимальная величина энергии импульса W_m , как видно из рис. 3, достигается при

$$E_0 = E_{0m} \approx (6 \dots 8)E_K. \quad (5)$$

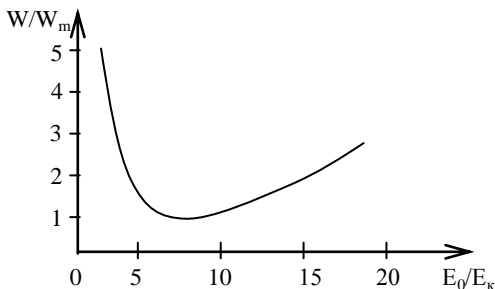


Рис. 3. Энергия импульса для ионизации в зависимости от его амплитуды E_0

Первое значение E_{0m} соответствует низкочастотному ($\omega^2 \ll v_y^2$), второе – высокочастотному ($\omega^2 \gg v_y^2$) пределу. Само значение $W_m \sim (\omega^2 + v_y^2)/v_y$ изменением v_y нарастает и при низких ($\omega^2 < v_y^2$), и при вы-

соких ($\omega^2 > v_y^2$) частотах. Оно минимально при

$$\omega \approx v_y. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) определяют частоту и мощность переменного электрического поля, при которых ионизация в воздухе оптимальна. Эти выражения справедливы при достаточно высоком давлении плазмы, когда диффузия несущественна.

В заключение следует отметить, что если частота повторения СВЧ импульсов будет небольшая, то за время паузы между импульсами за счет рекомбинации, диффузии и прилипания резко упадет проводимость плазмы, а это значит, что пробойное СВЧ поле возрастет и на вход приемного тракта пройдет сигнал мощностью, превышающей пороговый уровень. Это, в свою очередь, приведет к выходу из строя элементов приемника. Поэтому создание вспомогательной (дополнительной) ионизации воздуха во всех случаях будет приводить к снижению пробивной напряженности СВЧ поля, т.е. к созданию защиты входных цепей приемного тракта РЭС.

Выводы. Таким образом, использование предлагаемого метода защиты приемного тракта радиоэлектронных систем приводит к следующим преимуществам по сравнению с существующими методами:

1. Время переключательных процессов на два порядка меньше, чем у газоразрядных защитных устройств, и одного порядка со временем переключения полупроводниковых приборов ($< 10^{-8}$ с).

2. Энергозатраты на создание процесса короткого замыкания (неоднородности с изменяющейся проводимостью) значительно меньше энер-

гозатрат, используемых в газоразрядных защитных устройствах и в защитных устройствах на полупроводниковых приборах.

3. Предлагаемое защитное устройство выдерживает воздействие импульсной СВЧ мощности, сравнимой с допустимой мощностью для газоразрядных защитных устройств (сотни кВт), и на два-три порядка превышает допустимую мощность для полупроводниковых ЗУ.

4. Технические характеристики и параметры предлагаемого защитного устройства не влияют на характеристики функциональных блоков и устройств защищаемой системы при отсутствии помехового сигнала, в то время как и газоразрядные, и полупроводниковые ЗУ вносят значительные потери полезного сигнала, так как они включаются непосредственно внутри волноводов, образуя дополнительные неоднородности, приводящие к увеличению отраженной мощности и увеличению коэффициента стоячей волны.

5. Параметры и характеристики предлагаемого ЗУ хорошо согласуются с требованиями по устойчивости к воздействию механических, климатических факторов, предъявляемых к аппаратуре, в то время, как и газоразрядные, и полупроводниковые ЗУ очень критичны к температурным воздействиям, к изменению параметров источников питания.

6. Предлагаемое ЗУ приемных трактов радиоэлектронных систем позволяет регулировать уровень защищаемой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клич С.М. Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. – М.: Сов. радио, 1973. – С. 41 – 61.
2. Лебедев И.В., Шитников А.С. Исследование параметров газового разрядника / Известия ВУЗов. – М.: Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 5 – 12.
3. Гуревич А.В. Ионизированный слой в газе (в атмосфере) // Успехи физических наук. – 1980. – Т. 132, Вып. 4. – С. 685 – 690.
4. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизированных газах. – М.: Мир, 1967. – 460 с.
5. Gould L., Roberts L.W. Appl. Phys., 1956. – V. 27. – P. 1162.
6. Карфидов Д.М., Лукина Н.А., Сергейчев К.Ф. О влиянии преионизаций на пробой / Физика плазмы. – 1981. – № 7. – С. 312.

Поступила 22.09.2004

ШАПОВАЛ Роман Владимирович, зам. начальника кафедры ХИ ВВС. В 1992 году окончил ХВВКИУРВ им. Крылова, в 2000 году – факультет подготовки командно-штабного и руководящего инженерного состава ХВУ. Область научных интересов –

защита приемных трактов радиоэлектронных систем.
