

УДК 621.396.6

И.А. Капура<sup>1</sup>, Б.В. Бакуменко<sup>2</sup><sup>1</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Показано, что известные устройства защиты РЭА, основанные на создании условий короткого замыкания, не могут в полной мере обеспечить защиту РЭА от воздействия мощных электромагнитных излучений. Решение задачи повышения степени защиты РЭА от импульсных помех невозможно без создания защитных устройств, основанных на использовании ВТСП. Разработаны основные тактико-технические требования к защитным устройствам РЭА.

**Ключевые слова:** высокотемпературная сверхпроводимость, защитные устройства, микрополосковая линия, полупроводниковый диод, вакуумные ЗУ.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Надежность и работоспособность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в значительной степени определяется чувствительностью к кратковременным перегрузкам, возникающим в результате переходных процессов. Основными источниками таких процессов являются различные устройства (индукторы, моторы, генераторы, реле и др.), разряды статического электричества и наведенные электромагнитные импульсы (ЭМИ) иной природы. Для предотвращения перегрузок в РЭА применяют специальные меры и различные технические и организационные мероприятия, снижающие и исключаящие влияние внешних помех и внутренних переходных процессов, а также различные защитные устройства (ЗУ) [1].

Вопросами создания и совершенствования ЗУ разработчикам радиоэлектронной аппаратуры приходится заниматься с начала ее появления и по настоящее время [2]. На протяжении десятилетий по мере совершенствования РЭА и источников большой мощности требования к защитным устройствам становились все более трудновыполнимыми.

Защитные устройства, защищающие вход приемника от собственного передатчика, могут управляться подачей на них управляющего сигнала, синхронизированного с сигналом передатчика. Защитные устройства, предназначенные для защиты РЭА от „чужих” сигналов, принято называть ограничителями, а ограничители, в которых для их работы не требуется подача питающих напряжений – автономными [3]. Реализация автономных ЗУ осложняется в сравнении с управляемыми ЗУ тем, что они должны срабатывать под действием мощного СВЧ сигнала, для чего требуется более тонкая (например, полупроводниковая) структура. Автономные ЗУ там, где возможно, используются вместо управляемых ЗУ, так как при этом повышается надежность защиты.

Несмотря на важность защитных устройств для функционирования весьма сложной аппаратуры, на протяжении всей истории развития, этому классу СВЧ устройств не уделялось достаточного внимания. Это проявилось, например, в объяснении физики процессов, происходящих в полупроводниковых ЗУ. Если по транзисторным усилителям написаны обстоятельные монографии, то по ЗУ лишь в последнее время начали появляться отдельные публикации дискуссионного характера [4], а до них анализ ЗУ проводился, в основном, с позиции метода эквивалентных схем.

**Целью данной работы** является анализ устройств для защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений (ЭМИ) ультракороткой длительности импульса.

### Основная часть

**Общие сведения о защитных устройствах.** Особый интерес представляют основные вехи развития защитных устройств, попытки выяснить, что сдерживает их развитие, а также обсудить перспективы их совершенствования. Среди множества СВЧ защитных устройств можно выделить три наиболее применяемых типа: газоразрядные, полупроводниковые ЗУ, а также их комбинации, и вакуумные ЗУ. Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных выше типов защитных устройств.

**Газоразрядные защитные устройства.** Впервые, в качестве защитного устройства, был использован газоразрядный прибор, выполненный в виде комбинации газового разрядника с объемным резонансным контуром и выдерживающий воздействия больших мощностей [3].

При воздействии на ЗУ низкого уровня мощности газ не ионизируется, коэффициент передачи мощности очень высок, и вся мощность проходит сквозь разрядник. При воздействии высокого уровня СВЧ мощности в разрядном промежутке за счет ионизации газа возникает разряд, параллельно линии

передачи мощности подключается очень большая проводимость, и протекающий в разряде ток закорачивает разрядный промежуток, в результате чего резонатор оказывается расстроен, и падающая СВЧ мощность отражается от него. Вследствие поглощения газа металлическими электродами давление внутри разрядника со временем может снизиться до такой величины, что прибор перестает выполнять свои защитные функции. Для того, чтобы увеличить общий объем газа и тем самым продлить жизнь прибора, к нему иногда присоединяют внешний резервуар. Газовые разрядники много раз совершенствовались.

Основным недостатком газоразрядных ЗУ является их малая скорость срабатывания. Для газоразрядных защитных устройств характерно противоречие между их временем срабатывания и допустимой падающей СВЧ мощностью. Лимитирующим является время восстановления, определяемое временем рассасывания плазмы газового разряда после окончания импульса воздействующего излучения. Другой недостаток – большое потребление мощности, обусловленное недостаточно высокой проводимостью газового разряда. Третий недостаток газоразрядных приборов заключается в том, что при возникновении разряда возникает выброс напряжения, обусловленный индуктивностью выводов, а также временем задержки между приложением переходного сигнала и началом лавинного пробоя промежутка. Энергия выброса может оказаться достаточной для остаточного повреждения чувствительного элемента приемника.

#### **Полупроводниковые защитные устройства.**

Полупроводниковые ЗУ, благодаря их высокой надежности и быстродействию, получили наибольшие возможности для совершенствования. Идея использования переменного импеданса полупроводникового диода для создания управляющих СВЧ защитных устройств возникла более 45 лет назад [5]. Уменьшение импеданса ограничительного диода, происходящее при превышении порогового значения амплитуды СВЧ напряжения, приводит к отражению и частичному поглощению падающей волны, что предотвращает прохождение мощности, превышающей примерно 30–100 мВт. Роль и значение управляющих устройств в технике СВЧ за последние годы неуклонно повышаются. Резкий рост требований, предъявляемых к параметрам и характеристикам СВЧ систем, задача освоения миллиметрового диапазона длин волн, постоянно нарастающая тенденция к миниатюризации и интегрализации аппаратуры заставляет критически оценивать имеющиеся возможности и перспективы развития этого класса приборов и устройств твердотельной электроники.

В первую очередь это относится к созданию рациональных электродинамических систем, в которых свойства полупроводниковой структуры используется наиболее полно. Чаще всего приходится иметь дело с волноводными ЗУ, так как малошумящий усилитель в волноводном исполнении выигры-

вает перед коаксиальным (или полосковым) малошумящим усилителем, прежде всего фильтрующими свойствами самого волноводного тракта. Кроме того, сам волноводный тракт как волноведущая структура менее восприимчив к воздействию большой СВЧ мощности и имеет меньшие потери, чем коаксиальный, и тем более, чем полосковый.

Для построения полупроводникового ЗУ волновод имеет еще одно преимущество: в нем относительно легко можно разместить ансамбль из многих полупроводниковых структур, что позволяет пропорционально снизить электрическую нагрузку, приходящуюся на каждую из них, и увеличить допустимую входную СВЧ мощность.

За три последних десятилетия возник целый ряд оригинальных решений, в которых использовались параллельное, последовательное и параллельно-последовательное включение нескольких диодных структур по СВЧ току в поперечном и продольном сечении волновода [4, 6–11].

Однако, наряду с бесспорными достоинствами многодиодных ЗУ, им присущи принципиальные недостатки, которые не только не преодолимы к настоящему времени, но и преодоление которых, в принципе, проблематично.

Во-первых, трудно выполнить размещение в волноводе очень большого числа диодов с одинаково хорошим теплоотводом. Из-за этого какие-то группы диодов будут находиться в худших условиях и эффективность увеличения их числа уменьшится.

Во-вторых, при любых комбинациях включения диодов выход из строя одного из них приводит к неравномерному распределению поглощенной СВЧ мощности остальными диодами и тем самым запускает лавинообразный процесс разрушения всего ЗУ.

В-третьих, причиной выхода из строя одного из многих диодов является не идентичность параметров диодов, в особенности, если они не изготовлены в едином технологическом цикле, наподобие большого матричного кристалла.

В-четвертых, недостатком полупроводниковых ограничителей всех видов является большая междуэлектродная емкость, что ограничивает их применение в цепях высокой частоты. Для его устранения последовательно с этими приборами включают малоемкостные импульсные диоды. Но применение последних совместно с ограничительными диодами снижает быстродействие подобного защитного устройства примерно в  $10^3$  раз.

**Вакуумные защитные устройства.** Проанализируем вакуумные защитные устройства. Идея их появления продиктована необходимостью создать сверхбыстродействующие ЗУ, способные реагировать на сверхмощные импульсные воздействия с наносекундными фронтами импульса [12]. Первые вакуумные ЗУ появились в 60-х годах и получили название «защитные устройства на основе вторично-электронного резонанса» (ВЭР). Принцип действия этих устройств заключается в том, что в СВЧ резона-

торе, откачанном до глубокого вакуума и содержащем в области СВЧ поля источник электронов со вторичной эмиссией, под воздействием внешнего СВЧ поля возникает электронный поток. Этот поток нарастает, если коэффициент вторичной эмиссии больше единицы и если выполняется условие равенства времени пролета электронов между электродами резонатора полупериоду колебаний СВЧ поля. При этом резонатор расстраивается, и основная часть СВЧ мощности отражается от резонатора. Последние попытки усовершенствования ВЭР ЗУ относятся к 70-м годам. При бесспорном их достоинстве – высоком быстродействии (менее 15нс в 3-см диапазоне длин волн) им свойственны недостатки, которые оказались слишком трудно преодолимыми – узкополосность, большое потребление СВЧ мощности, нагрев резонаторов и трудность поддержания вторичной эмиссии при большой плотности СВЧ тока.

В настоящее время ВЭР вытеснены сравнительно новыми вакуумными ЗУ, получившими название циклотронных защитных устройств [13].

Принцип действия циклотронного ЗУ заключается в следующем.

Ленточный электронный поток, формируемый электронной пушкой, проходит через входной резонатор, разделительную секцию, выходной резонатор и оседает в коллекторе. В каждом из резонаторов выполнен протяженный емкостной зазор. При приложении продольного магнитного поля  $B_0$  и малом СВЧ сигнале (или отсутствии его) создаются условия для прохождения ленточного электронного потока и передачи СВЧ сигнала из входного резонатора в выходной. Начиная с порогового СВЧ сигнала и далее при его увеличении, электронный поток отклоняется и оседает в емкостном зазоре входного резонатора. При этом входной резонатор оказывается рассогласованным и большая часть входной СВЧ мощности (до 90%) отражается от него. Предстоит преодолеть традиционные недостатки для резонансных вакуумных устройств, в которых используется магнитное поле – узкополосность и большой вес.

Таким образом, несмотря на многообразие методов и средств защиты РЭА от воздействия мощных импульсных электромагнитных излучений, задача эффективной защиты РЭА до сих пор не решена. Представляет большой интерес исследовать защитные устройства, основанные на использовании высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) 2-го рода, работающих при температуре жидкого азота (77...100К).

**Микрополосковые защитные устройства на основе ВТСП.** Развитие современной радиоаппаратуры идет по пути микроминиатюризации. За последние годы резко возрос уровень требований, предъявляемых к мобильности радиотехнических устройств, что, в первую очередь, привело к необходимости улучшения массогабаритных характеристик аппаратуры. Соответственно росту требований повысился интерес к возможности применения в радиоэлектронной аппаратуре микрополосковых

линий передач в качестве защитных устройств. К достоинствам последних следует отнести их относительную простоту в конструктивном отношении, надежность, малую стоимость, возможность автоматизированного производства. Применение микрополосковых ЗУ целесообразно и полностью оправдано при изготовлении отдельных элементов и даже целых узлов, однако они имеют и ряд недостатков. Наиболее существенный из них – это большие потери (особенно в диапазоне сантиметровых волн) по сравнению с волноводными и коаксиальными линиями передачи. Одним из способов решения этой проблемы является применение высокотемпературных сверхпроводников при изготовлении защитных устройств. [14]. В работе [15] отмечается, что последние исследования в области ВТСП фундаментально изменили перспективы применения сверхпроводниковой электроники и обусловили использование этих материалов в различных сферах. Особо отмечается тот факт, что время срабатывания защитного устройства на основе ВТСП менее 1нс. Авторы рассматривают новые возможности применения сверхпроводниковых материалов с точки зрения электродинамики.

Исходя из вышеизложенного, выработаем основные требования к защитным устройствам РЭА.

Правильность выбора и применения защитных устройств для различных радиосистем является одним из важнейших условий, обеспечивающих требуемые технические и эксплуатационные характеристики аппаратуры, ее надежность, а также надежность самих защитных устройств в условиях наличия различного рода перенапряжений в цепях радиоэлектронной аппаратуры. В связи с этим выбираемые для любого радиосредства защитные устройства должны удовлетворять следующим общим требованиям:

- 1) технические характеристики и параметры ЗУ при отсутствии переходных процессов не должны влиять на характеристики функциональных блоков и устройств, в которых они используются;
- 2) уровень напряжения переходного процесса в точках подключения защитного устройства во время действия импульса должен быть максимально близким к нормальному уровню напряжения, действующему до перегрузки;
- 3) надежность защитного устройства должна быть выше надежности блоков и устройств, которые нуждаются в защите;
- 4) быстродействие защитных устройств должно быть максимально возможным, чтобы обеспечить качественную защиту при больших скоростях изменения напряжения переходных процессов;
- 5) габариты и вес защитных устройств должны быть значительно меньше габаритов и веса защищаемой аппаратуры;
- 6) параметры и характеристики защитных устройств должны соответствовать требованиям по устойчивости к воздействию механических, клима-

тических факторов, предъявляемых к аппаратуре, и иметь гарантийную наработку не менее, заданного ресурса на данную аппаратуру;

7) необходимость создания защитных устройств, выдерживающих воздействие импульсной СВЧ мощности, доходящей до единиц киловатт, и непрерывной СВЧ мощности – до нескольких сотен ватт;

8) защитные устройства должны потреблять минимальную энергию.

### Выводы

В результате проведенного анализа существующих современных методов и технических средств защиты РЭА от воздействия мощных импульсных электромагнитных излучений показано:

– известные устройства защиты, основанные на создании условий короткого замыкания и отражения электромагнитной энергии с помощью газоразрядных, полупроводниковых защитных устройств, а также их комбинации, и вакуумных защитных устройств, не могут в полной мере обеспечить защиту РЭА от воздействия мощных электромагнитных излучений;

– решение задачи повышения степени защиты радиоэлектронной аппаратуры от импульсных помех невозможно без создания надежных и эффективных устройств, основанных на использовании высокотемпературных сверхпроводников, способных отражать и поглощать импульсные электромагнитные излучения, мешающие работе радиоаппаратуры;

– анализ возможностей использования различных защитных устройств РЭА позволил разработать основные тактико-технические требования к защитным устройствам радиоаппаратуры от воздействия мощных излучений ультракороткой длительности импульса.

### Список литературы

1. Алыбин В.Г. Проблемы создания СВЧ защитных устройств для радиолокации и связи / В.Г. Алыбин // 12 th Int. Crutean Conference «Microwave Telecomm – nicootion Technology», 9-13-September, 2002. – P. 15-21.

2. Резонансные разрядники антенных переключателей / Д.Я. Ашкенази и др.; под ред. И.В. Лебедева. – М.: Сов. радио, 1976. – 274 с.

3. Ропий А.И. Сверхвысокочастотные защитные устройства / А.И. Ропий, А.М. Старик, К.К. Шутов. – М.: Радио и связь, 1993. – 128 с.

4. Антипин И.И. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / И.И. Антипин, В.А. Годовицын // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37.

5. Meek I.M. Journ / I.M. Meek // Inst. Electr. Eng. – 1946. – V. 93. – P. 97.

6. Лебедев И.В. Полупроводниковые диоды, в СВЧ управляющих устройствах. / И.В. Лебедев, А.С. Шнитников // Изв. ВУЗ. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 5-12.

7. Полупроводниковые диоды для управления СВЧ мощностью / Л.С. Либерман и др. // Радиотехника. – 1972. – Т. 27, № 5. – С. 9-24.

8. А.с. 1042110, МКИ НО1Р 1/15 / А.В. Кириллов, Е.В. Карчевский. – 1982.

9. А.с. № 506297. Устройство сложения мощностей СВЧ приборов / И.В. Лебедев, В.Г. Алыбин. – 1977. – БИ. № 27.

10. Лебедев И.В. Резонансная решетка и ее применение для создания СВЧ устройств / И.В. Лебедев, В.Г. Алыбин // Изв. ВУЗ, Радиоэлектроника. – 1978. – Т. 21, № 10. – С. 24-31.

11. Rucken C.T. Senes-Connected CaAsSi I MPAT-diodes chips / C.T. Rucken, I.W. Wamoss // Electron. Letters. – 1977. – V. 13. – P. 331-332.

12. Forrez M. Duplexing and switcfing with multipactor discharge / M. Forrez, C. Milazzo // Proceeding of IRV. – 1962. – № 4. – P. 442-451.

13. Комплексируемые усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский и др. // 11 Межд. конф. СВЧ техника. – Севастополь, 2001. – С. 190-191.

14. Емельянов В. Микроволновые СВЧ компоненты на основе высокотемпературных сверхпроводников / В. Емельянов // Компоненты и технологии. – 2001. – № 6. – С. 37-41.

15. Гусева Л. Высокотемпературные сверхпроводники. Перспективы использования в СВЧ компонентах / Л. Гусева // Электроника. – 1999. – № 2. – С. 51-54.

Поступила в редколлегию 7.09.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ВІД ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

І.А. Капура, Б.В. Бакуменко

Показано, що відомі пристрої захисту РЕА, засновані на створенні умов короткого замикання, не можуть повною мірою забезпечити захист РЕА від впливу потужних електромагнітних випромінювань. Рішення завдання підвищення ступеня захисту РЕА від імпульсних перекидок неможливо без створення захисних пристроїв, заснованих на використанні ВТНП. Розроблено основні тактико-технічні вимоги до захисних пристроїв РЕА.

**Ключові слова:** високотемпературна надпровідність, захисні пристрої, мікрополоскова лінія, напівпровідниковий діод, вакуумні ЗП.

### ANALYSIS OF METHODS AND FACILITIES OF DEFENCE OF RADIO ELECTRONIC APPARATUS FROM INFLUENCE OF POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS

I.A. Kapura, B.V. Bakumenko

It is rotined that the known devices of defence of REA, based on conditioning short circuit, can not to a full degree provide protecting of REA from influence of powerful electromagnetic radiations. The decision of task of increase of degree of defence of REA from impulsive hindrances is impossible without creation of protective devices, based on the use of VTSP. The basic tak-tiko-tekhnicheskie requirements are developed to the protective devices of REA.

**Keywords:** high temperature superconductivity, protective devices, microstrip line, semiconductor diodes, vacuum ZU.