

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЧ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Одной из насущных проблем, которые стоят перед службами управления воздушным движением, является продление ресурса и улучшение тактико-технических характеристик радиолокационных станций (РЛС), эксплуатируемых более 10 лет. Наиболее уязвимое звено старых РЛС – электровакуумные приборы СВЧ (лампы бегущей волны, магнетроны и клистроны). Они имеют ограниченный ресурс, большую стоимость и производились предприятиями военно-промышленного комплекса, в настоящее время не работающими. Полтавским предприятием "ЭЛСИС" на протяжении 8 лет успешно ведется работа по замене малошумящих ламп бегущей волны (ЛБВ), используемых во входных усилителях высокой частоты РЛС, малошумящими и сверхмалошумящими твердотельными усилителями.

Специфика работы РЛС выдвигает особые требования к малошумящему усилителю (МШУ) высокой частоты. Передатчик и приемник РЛС работают на один антенно-фидерный тракт. В зависимости от того или иного способа развязки передатчика и приемника на вход МШУ просачивается импульсная мощность от сотен до тысяч ватт. Электровакуумные МШУ в силу особенностей конструкции в состоянии рассеять эту мощность в виде тепла без изменения их электрических характеристик. Полупроводниковые же усилители очень чувствительны к подобного рода перегрузкам. Поэтому разработчикам предприятия "ЭЛСИС" пришлось решать практическую проблему защиты входа твердотельного усилителя от воздействия большой импульсной мощности СВЧ.

Способов ограничения мощности на входе МШУ, как следует из многочисленных литературных источников, существует несколько:

- 1) принудительное включение отражающего ключа на переключаемых  $p-i-n$  диодах, расположенных перед МШУ, на время зондирующего импульса РЛС (бланкирование);
- 2) автономное защитное устройство на ограничительных  $p-i-n$  диодах;
- 3) защитное устройство на ограничительных  $p-i-n$  диодах с активной подпиткой;
- 4) защитное устройство на ограничительных  $p-i-n$  диодах с пассивной подпиткой.

Остановимся подробнее на преимуществах и недостатках каждого из решений.

Построение защитного устройства с бланкированием позволяет использовать в нем мощные  $p-i-n$  диоды с низким быстродействием и с толстой базой (базой называют  $i$ -слой, расположенный между  $p$ - и  $n$ -областями полупроводника). Такие диоды имеют, как правило, большие значения обратных пробивных напряжений и рассеиваемых тепловых мощностей, что позволяет успешно выдерживать падающую СВЧ-мощность до десятков киловатт. Но такие защитные устройства имеют серьезный недостаток. При попадании в антенну РЛС мощной асинхронной помехи от расположенной рядом радиолокационной станции, работающей в том же диапазоне длин волн, твердотельный МШУ останется практически беззащитным.

Описанная ситуация с рядом стоящими РЛС является типичной для систем управления воздушным движением, где одновременно работают обзорный локатор, высотомер, диспетчерский локатор, вторичный локатор и система посадки. Поэтому описанный тип защитных устройств (с бланкированием) недопустимо использовать в МШУ, предназначенных для замены ЛБВ в РЛС.

Применение в защитных устройствах ограничительных  $p-i-n$  диодов позволяет отказаться от принудительного смещения, так как они способны автосмещаться падающей мощностью СВЧ. Развитие современных полупроводниковых технологий позволяет создавать ограничительные  $p-i-n$  диоды с малой емкостью перехода, что дает возможность добиться хорошего согласования на малом сигнале (когда ограничительный  $p-i-n$  диод закрыт) вплоть до частот 18–22 ГГц.

Как и в любой отрасли, в производстве ограничительных  $p-i-n$  диодов существуют конфликтные проблемы. Уменьшение толщины базы позволяет резко увеличить быстродействие диода и сдвигает граничную рабочую частоту (частота, при которой ограничительный  $p-i-n$  диод еще автосмещается) вверх. Но в то же время при уменьшении толщины базы увеличивается емкость  $p-i-n$  структуры и ухудшается малосигнальное согласование диода. Кроме того, при уменьшении толщины базы снижается обратное пробивное напряжение, определяющее максимальную импульсную мощность СВЧ, которую можно подать на защитное устройство. Поэтому ведущие производители СВЧ полупроводников выпускают целую гамму ограничительных  $p-i-n$  диодов с различными толщиной базы, емкостью структуры и пробивным напряжением. Но, тем не менее, не всегда выпускаемая номенклатура изделий может удовлетворить разработчиков при решении конкретной практической задачи. Например, созда-

ние устройства защиты МШУ, используемого взамен ЛБВ типа УВ-74 в широко распространенном в украинских системах управления воздушным движением обзорном локаторе П-37, потребовало изготовления «заказного» диода с параметрами, указанными разработчиками фирмы «ЭЛСИС».

Особенностью этого локатора является переключение антенно-фидерного тракта с приема на передачу при помощи двух газонаполненных разрядников, установленных на широкой и узкой стенках волновода. Мощность передатчика П-37 достигает 900-1000 кВт в импульсе в 10-сантиметровом диапазоне длин волн. На вход МШУ (после разрядников) во время прохождения зондирующего импульса воздействует импульс сложной формы, обусловленной ограниченным быстродействием разрядников. Передний фронт воздействующего импульса имеет скорость нарастания СВЧ энергии такую же, как и у магнетрона, так как газ в разрядниках поджигается с конечной скоростью. Фактически на входное устройство малошумящего усилителя поступает 40-50% мощности передатчика на протяжении от 0,1–0,15 мкс (время срабатывания разрядников). После поджига разрядников на вход МШУ воздействует мощность 400–1000 Вт на протяжении 0,9–1,2 мкс (длительность зондирующего импульса). Сигнал такой сложной формы и большой энергетики выдвигает к ограничительным  $p-i-n$  диодам крайне противоречивые требования. Диоды должны иметь тонкую базу (для того, чтобы эффективно отпираться автосмещением при воздействии крутого переднего фронта импульса передатчика), и одновременно с этим большое обратное пробивное напряжение (для того, чтобы выдержать воздействие энергопика в сотни киловатт).

Имеющаяся номенклатура ограничительных  $p-i-n$  диодов отечественных и зарубежных производителей не удовлетворяла выдвинутым требованиям. В результате был создан диод, успешно работающий в МШУ и выдерживающий экстремальные режимы эксплуатации даже с разбитым разрядником, чего не выдерживала ЛБВ.

Одним из путей продвижения защитных устройств, работающих с большими уровнями мощности, в область высоких частот является организация активной подпитки ограничительных  $p-i-n$  диодов. Этот способ позволяет использовать на высоких частотах диоды с относительно толстой базой, не работающие в этом диапазоне частот в режиме автосмещения. Реализуется он следующим образом.

В тракте перед  $p-i-n$  диодом устанавливается детекторный диод, нагрузкой которого будет являться сам  $p-i-n$  диод. При этом выпрямленное детектором напряжение приводит к протеканию тока через  $p-i-n$  диод и, следовательно, к росту вносимого им ослабления высокочастотной мощности.

Разумеется, в случае применения детектора ограничение СВЧ мощности будет определяться уже не только (а при малых мощностях и не столько) непосредственным ее воздействием на диод, но и чувствительностью детектора и величиной тока, которую он обеспечивает в нагрузке – переключаемом  $p-i-n$  диоде.

Использование детектора способствует также уменьшению инерционности данной схемы. При подаче выпрямленного напряжения с детектора на  $p-i-n$  диод последний открывается быстрее, чем при непосредственном воздействии СВЧ-мощности. Однако быстродействия  $p-i-n$  диода все же иногда бывает недостаточно, если ограничитель используется в качестве устройства защиты приемника, когда мощность поступает в виде импульсов. При этом за время переключения  $p-i-n$  диода часть мощности высокого уровня просачивается в тракт, что обычно крайне нежелательно. Для того, чтобы уменьшить просачивающуюся мощность, т.е. повысить скорость срабатывания ограничителя, а заодно и увеличить общую развязку, вслед за  $p-i-n$  диодом в тракт помещается более быстродействующий варакторный диод. В широкополосных устройствах он обычно отстоит от  $p-i-n$  диода на четверть длины волны для средней частоты рабочего диапазона частот.

Конструкция ограничителя, содержащего детектор,  $p-i-n$  диод и варактор, показана на рис. 1. Это устройство может использоваться для защиты приемника, а также в балансном антенном переключателе, и способно работать при уровнях мощности в импульсе до 1 кВт в трехсантиметровом диапазоне волн. Полоса пропускания ограничителя более 500 МГц, максимальное ослабление превышает 60 дБ, начальные потери порядка 1 дБ.

Применение детекторов в схемах ограничителей на диодах, как было отмечено, ускоряет их отпирание, однако не решает другой важной проблемы – ускорения процесса рассасывания накопленного заряда после окончания импульса СВЧ-мощности. Действительно, практически отсутствует путь для протекания обратного тока диода, следст-

в

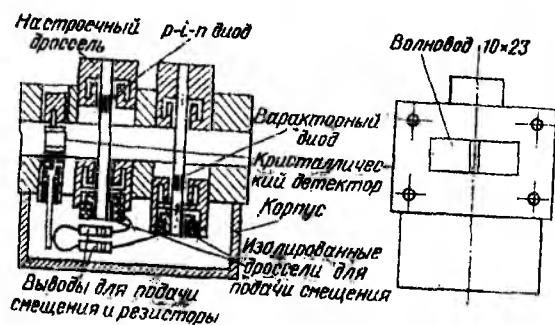


Рис. 1

вие чего рассасывание накопленного заряда происходит главным образом за счет рекомбинации в базе, т. е. довольно медленно. Для создания цепи протекания обратного тока параллельно  $p-i-n$  диоду можно включить сопротивление, как показано на рис. 2, а. Еще больший эффект достигается, если вместо сопротивления включить индуктивность (рис. 2, б). В индуктивности накапливается энергия во время протекания через диод прямого тока. Когда смещение, создаваемое детектором, исчезает, пропадает и магнитное поле, в результате чего на зажимах индуктивности возникает электродвижущая сила обратного знака, способствующая эффективному рассасыванию заряда, накопленного в базе диода.

Если уровень падающей мощности слишком велик для детектора, его можно подключить через направленный ответвитель. Сигнал, вырабатываемый диодом усиливается быстродействующим видеоусилителем и используется для принудительного отпираания ограничительных  $p-i-n$  диодов. Подобные защитные устройства обладают существенными недостатками. Во-первых, видеоусилитель резко ограничивает быстродействие защитного устройства в целом. При этом на вход МШУ просачивается довольно мощный энергопик, способный вывести его из строя. Во-вторых, элементарное отсутствие электропитания делает МШУ с таким защитным устройством уязвимым перед воздействием СВЧ-импульсов от работающих рядом РЛС.

С появлением на рынке высокоэффективных арсенид-галлиевых детекторных диодов с барьером Шоттки указанные проблемы были решены разработчиками предприятия "ЭЛСИС" в защитных устройствах с пассивной подпиткой. В защитных устройствах такого типа датчик СВЧ-энергии (детекторный или смесительный диод) встраивается в одну из последних ступеней ограничения как ограничитель. При этом в начальный момент воздействия радиоимпульса на него поступает почти вся СВЧ-энергия, так как первые ступени ограничителя, выполненные на ограничительных  $p-i-n$  диодах, заперты. Выработанный датчиком ток подается на первые ступени ограничения и приоткрывает их, резко облегчая переход ограничительных  $p-i-n$  диодов в режим автосмещения. После того, как ограничительные  $p-i-n$  диоды открылись, они снижают поступающую на датчик мощность, предохраняя его от выхода из строя. Такой способ подпитки ограничительных  $p-i-n$  диодов позволяет использовать мощные приборы с толстой базой на частотах до 12 ГГц.

Номенклатура серийных изделий предприятия "ЭЛСИС" содержит МШУ как взамен устаревших ЛБВ, так и для комплектования современных локаторов украинского и зарубежного производства в диапазоне рабочих частот от 10 МГц до 18 ГГц. Так, для одного из новых трехкоординатных локаторов производства Запорожского казенного завода "Искра" был создан МШУ в 10-сантиметровом диапазоне длин волн с уникальными параметрами. Коэффициент шума МШУ со встроенным защитным устройством составляет в нормальных условиях 1,6–1,7 дБ, а при температуре корпуса плюс 65° С – 1,9–2,0 дБ. При этом на вход МШУ допускается подача импульсов СВЧ мощностью до 500 Вт, длительностью до 50 мкс при скважности 100. Коэффициент усиления МШУ поддерживается постоянным в рабочем диапазоне температур (минус 50° С – плюс 65° С) с точностью  $\pm 1,5$  дБ, что позволяет эффективно использовать систему подавления боковых лепестков. Этот прибор в сочетании с новейшими алгоритмами цифровой обработки отклика, примененными в новом радаре, позволил создать предприятию "Искра" локатор, успешно конкурирующий на мировой рынке с лучшими образцами подобной техники.

Касаясь вопроса замены устаревших ЛБВ изделиями предприятия "ЭЛСИС", следует отметить следующее. Твердотельные усилители имеют значительно меньший коэффициент шума, что положительно сказывается на тактико-технических характеристиках старых РЛС. Срок службы ЛБВ ограничен сроком службы катода и с уменьшением эмиссии наблюдается постепенное увеличение коэффициента шума. Твердотельные МШУ имеют ресурс в 5–10 раз больше и на протяжении всего срока эксплуатации коэффициент шума не изменяется. Отсутствие каких бы то ни было регулировок упрощает эксплуатацию приемных устройств РЛС. Снижается и энергопотребление.

Фирма "Украэрорух" (содержатель и эксплуатационник системы управления воздушным движением в Украине) эксплуатирует на обзорных локаторах изделия предприятия "ЭЛСИС" в течение уже 7 лет. За это время некоторые МШУ наработали более 20000 часов.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Полтавское предприятие "ЭЛСИС"

Поступила в редколлегия 29.10.2001