

Устройства защиты входных цепей СВЧ-приемников на полупроводниковых диодах

Н.В. Шипунова, И.В. Кручинин, О.С. Орлов

ЗАО «НПП «Салют-25»
603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Ларина, 7

Проведена разработка и исследование устройств защиты для приемных модулей на полупроводниковых диодах. Электрические параметры разработанных устройств защиты создают реальные основы развития и совершенствования приемных модулей в диапазоне СВЧ.

Ключевые слова: сверхвысокие частоты (СВЧ), устройства защиты входных цепей приемников (ЗУ), ограничители квазистеристорные структуры, дрейфы диффузия носителей заряда.

Среди твердотельных устройств управления СВЧ-сигналами особое место занимают так называемые «самоуправляемые устройства» [1; 2; 5], коэффициент передачи которых изменяется не только при воздействии внешнего сигнала управления, но также при поступлении на вход устройства сигнала повышенной мощности СВЧ.

Устройства могут использоваться как в чисто пассивном, так и в квазиактивном режимах, когда часть выпрямленного СВЧ-сигнала изменяет входной импеданс и коэффициент передачи входных цепей приемного устройства.

Типичная зависимость $P_{вых}$ от $P_{вх}$ – выходная характеристика для таких устройств, она показана на рис. 1, а.

Характерно, что коэффициент передачи $K = P_{вых}/P_{вх}$ существенно зависит от уровня мощности на входе. Согласно рис. 1, а, уже при $P_{вх} =$

10 мВт потери пропускания возрастают существенно, как показано на участке «а».

Показанная на рис. 1, б выходная характеристика устройства блокирующего типа [2] отличается от обычной монотонной характеристики, имеет **N-образный характер**. В допороговой области $P_{вх}$ потери можно считать незначительными. Выпрямленный ток немного растет, а затем при $P_{вх} = P_{пороговое}$ возрастает скачком – более чем в 10 раз. Если сопротивление внешней цепи диода выбрано достаточно малым, мощность на участке стабилизации поддерживается практически постоянной.

I. Среди твердотельных устройств управления СВЧ-сигналами особое место занимают схемы защитных устройств – ЗУ, выполненные на полупроводниковых диодах [3].

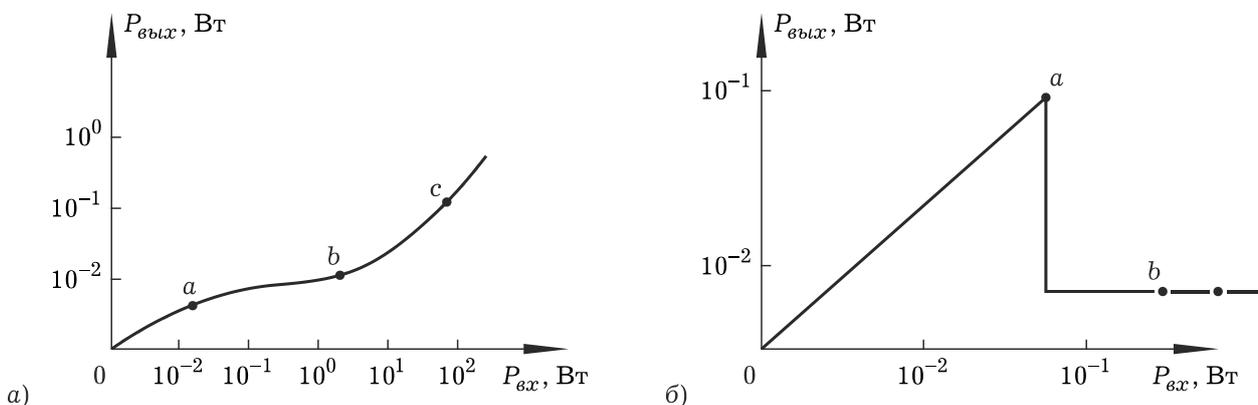


Рис. 1. Выходные характеристики $P_{вых} F(P_{вх})$ защитных устройств: а) обычного типа на ограничительных диодах; б) кусочно-ломаного типа

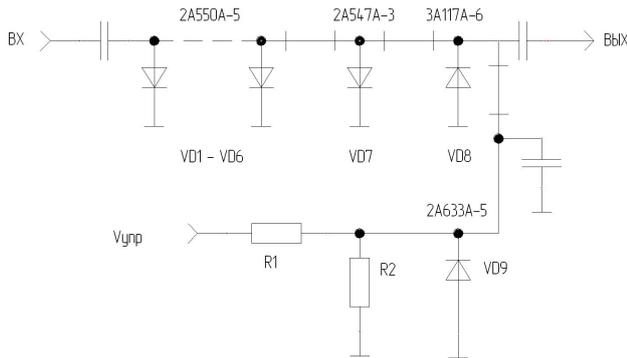


Рис. 2. Схема электрическая разработанного самоуправляемого ЗУ

Как показано на рис. 2, в разработанном нами устройстве [3] используется каскадное включение **p-i-n-диодов**, когда на входе включаются наиболее мощные диоды, а на выходе – диоды с повышенной скоростью переключения.

Диод VD9 типа 2A633A-5 вынесен за пределы СВЧ-тракта и предназначен для существенного улучшения времени восстановления ЗУ – после прекращения воздействия радиоимпульса.

По результатам разработки следует указать основные особенности устройства:

- повышение допустимой СВЧ-мощности на входе в квазинепрерывном и импульсных режимах примерно до $10^2 \div 10^3$ Вт средней;
- повышение скорости управления ЗУ, ориентировочно до $10^{-8} \div 10^{-6}$ с;
- повышение коэффициента передачи: потерь в режиме пропускания импульсного сигнала до уровня $0,5 \div 1,0$ дБ, и ослабления сигнала в закрытом режиме до величины более 40 дБ.

Параметры ЗУ в составе приемного модуля:

- диапазон частот 3 ГГц;
- потери в режиме слабого сигнала 0,6 дБ;
- мощность на входе ≈ 450 Вт в импульсе $Q = 20$, длительность импульса 150 мкс;
- запираение в режиме мощного сигнала более 40 дБ;
- времена переключения по переднему фронту менее 10^{-7} с, по заднему фронту импульса менее 10^{-6} с.

II. Значительный интерес представляют пассивные устройства, выполненные в виде одной «квазитристерной» структуры $p^+ - n - p - n^+$ -типа [4], показанной на рис. 3.

Такая структура выполнена в виде двух взаимодействующих **p-n-переходов с чередованием** типа проводимости. Одна из внутренних областей база **n-типа** h_2 , удельное сопротивление которой

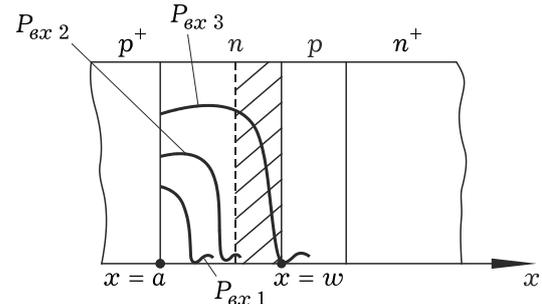


Рис. 3. Распределение неравновесных носителей заряда вдоль базы $p^+ - n - p - n^+$ структуры

значительно больше сопротивления третьей области **p-типа** h_3 , которая играет роль «антизапорной» структуры.

Как показано на рис. 3, переключение в проводящее состояние происходит в результате дрейфа неравновесных носителей заряда, когда их «полуволна» достигает внутреннего антизапорного слоя. Зависимости выпрямленного тока и мощности на выходе от значения P_{ex} показаны на рис. 4.

III. Проведем расчет импеданса тонкой структуры типа $p^+ - n - p - n^+$ в дрейфовом приближении. Представим поле в области базы как результат сложения высокочастотного поля E_{\sim} и поля инжектированного заряда E_{in} :

$$E(x) = E_{\sim} + E_{in}.$$

Исходное соотношение уравнения Максвелла, закон Кулона:

$$\operatorname{div} E_{in} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость свободного пространства; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала (для кремния $\epsilon = 12$); ρ – плотность пространственного заряда.

Полагаем, что напряженность поля на физической границе $p^+ - n$ -перехода при $x = 0$ равна нулю.

$$E|_{x=0} = E_{in} + E_{\sim} = 0, \quad (2)$$

так как в противном случае инжекция на **p-n-переходе** была бы неограниченной.

Глубина проникновения инжектированных носителей заряда определяется величиной L_{\sim} , которая в случае дрейфового переноса пропорциональна напряженности поля.

Заметим, в общем случае имеют место оба механизма переноса носителей заряда: дрейф и диффузия. Однако при напряженности поля

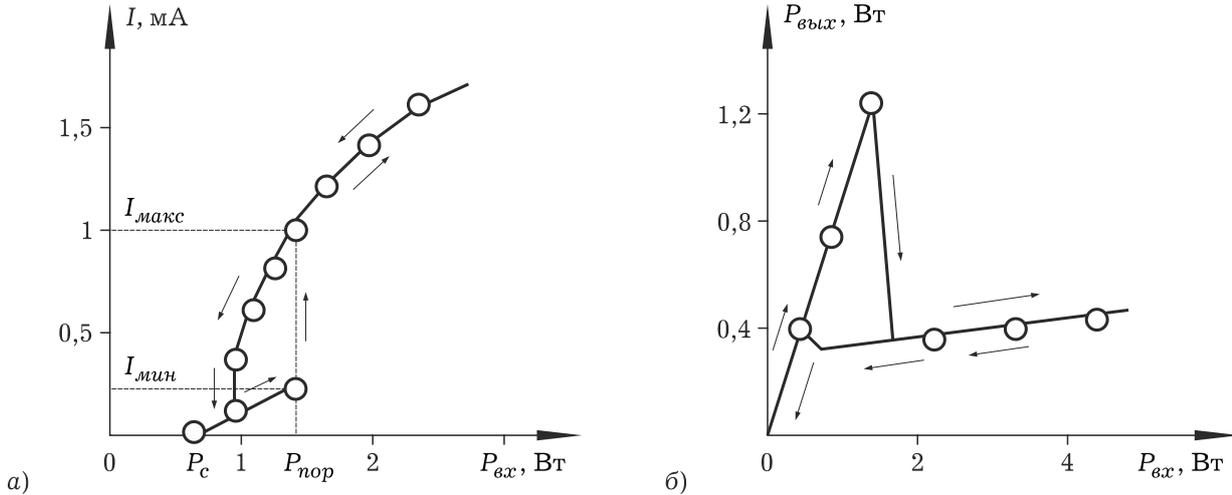


Рис. 4. Зависимости от входной мощности P_{ex} : а) выпрямленного тока I , мА; б) выходной мощности, $P_{вых}$ для многослойной $p^+ - n - p - n^+$ -структуры

порядка 10^4 В/см (мощность на выходе $\sim 1,0$ Вт) преобладает дрейфовая составляющая тока. При использовании теоремы Шокли-Рамо интегрированные (1) с учетом (2) для области $x < L_{\sim}$ дает результат:

$$i = \frac{S}{W} \int_0^w \rho u dx, \tag{3}$$

где u – скорость носителей заряда; S – площадь структуры; W – толщина базы.

При нахождении величины скорости u полагаем, что рассеяние носителей заряда на колебаниях решетки является квазиупругим, т.е. при столкновении с решеткой потерями энергии можно пренебречь. Импеданс структур находится в виде отношения напряжения к току [6]; при этом полагаем:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \tag{4}$$

$$Z = \frac{\int_0^w E dx}{i}. \tag{5}$$

Напряженность поля в области базы E связано с СВЧ-мощностью соотношением $(EW)^2 = PZ_0$, где Z_0 – волновое сопротивление тракта, из которого получаем:

$$Z = A \left(W - \frac{L_{\omega}}{2} \right) \sqrt[3]{\frac{W^2}{L_{\omega} i}}, \tag{6}$$

где A – постоянная величина; L_{ω} – дрейфовая длина на высокой частоте $\omega = 2\pi f$.

Согласно (6), наведенный ток в структуре

$$i = A \frac{L_{\omega}^{1/2}}{W} (PZ_0)^{3/4},$$

где

$$A = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \left(\frac{q}{m} \right)^{1/2} S$$

– постоянная величина.

Итак, изменение импеданса на СВЧ может происходить как за счет изменения тока проводимости по закону $i^{-1/3}$, так и за счет дрейфа неравновесных носителей заряда.

При распространении этих носителей до области внутреннего р-п-перехода $W \approx Lw/2$, проводимость структуры скачкообразно возрастает, что и продемонстрировано на рис. 4.

При малых уровнях мощности СВЧ-проводимость практически равна нулю. Далее импеданс структуры уменьшается скачком за счет СВЧ-инжекции, т.е. при увеличении концентрации неравновесных носителей по действием СВЧ-поля и при достижении ими внутреннего запертого перехода ($W \approx Lw/2$) имеет место резкий скачок проводимости.

IV. При проектировании структуры, толщина внутренней высокоомной области h_2 выбирается с учетом значений пороговой мощности и диапазона частот. Концентрация примеси в области $h_3 - 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ устанавливается равной или несколько большей концентрации неравновесных носителей в проводящем состоянии для снижения остаточного сопротивления структуры.

Исследованные структуры изготавливались на основе эпитаксиальной технологии методом сублимации кремния в вакууме. Кремний КЭ-100-250 с концентрацией $n = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Концентрация основных носителей в базе $h_2 - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Протяженность $h_2 \approx 4$ мкм, $h_3 \approx 8$ мкм. Эмиттер и коллектор с концентрацией носителей заряда 10^{19} см^{-3} .

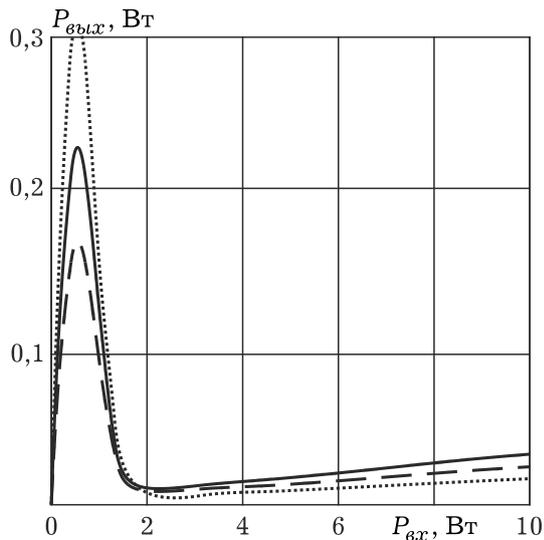


Рис. 5. Ограничительные характеристики многослойной структуры в диапазоне частот 37 ГГц

V. Динамические характеристики устройства восьми-миллиметрового диапазона волн показаны на рис. 5 [5].

Заключение

Предлагаемые структуры и управляющие устройства на их основе могут найти применение в приемной СВЧ РЭА широкого функционального назначения и в различных диапазонах частот.

The protector devices for UHF set with pin-diodes

N.W. Shipunova, Y.W. Kruzinin, O.S. Orlov

The computed and measured characteristics a protector devices for UHF-set are presented. In these devices have been used pin-diodes with different base, also «similar-teristor». The analyzed and measured results has proven to be an efficient tool in design on microwave devices.

Keywords: protection devices, similar-teristor, limiter, diffusia, dreif.

Список литературы

1. Самоуправляемые полупроводниковые устройства диапазона СВЧ / О.С. Орлов [и др.] // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. 1979. Вып. 4. С. 262–275.
2. Лебедев И.В., Семенча М.В. Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ-мощности // Радиотехника. 2001. № 2. С. 75–83.
3. Кручинин И.В., Орлов О.С., Шипунова Н.В. Твердотельные устройства для ограничения СВЧ-мощности // Материалы XIII отраслевого координационного семинара по СВЧ-технике. ФГУП НПП «Салют». Нижний Новгород, 2003. С. 78–81.
4. Авторское свидетельство № 091672 от 27.09.1983. Орлов О.С.
5. Бабунько С.А., Орлов О.С. Комплексная миниатюризация СВЧ-приборов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 61–71.
6. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов [и др.]. М.: Радио и связь, 2005. 744 с.