

Мощный быстродействующий ограничительный диод для защиты приёмных каналов ППМАФАР

Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В., Иващенко Н. Г.

Представлены результаты расчёта, изготовления и измерения параметров быстродействующего ограничительного диода на арсениде галлия для защиты приёмных каналов ППМАФАР от функционального поражения источниками несинхронных сигналов в S-диапазоне. Применение групповой технологии «интегрального теплоотвода» существенно снизило тепловое сопротивление диодов и соответственно увеличило рассеиваемую мощность. Получены образцы диодов, у которых при входной мощности более 80 Вт температура p-n перехода превышает температуру держателя диода на 70 К, что гарантирует высокую надёжность работы диодов.

Введение

В системах радиолокации, связи и навигации вход приёмного устройства должен быть защищён от воздействия синхронных и несинхронных помех, приводящих как к временной потере работоспособности, так и к выходу из строя входных устройств приёмного канала. Для защиты приёмника от несинхронных помех обычно используется защитное устройство (ЗУ), представляющее собой нелинейный элемент, импеданс которого изменяется в зависимости от амплитуды сигнала. Таковым чаще всего является полупроводниковый диод с pin-структурой, включённый параллельно СВЧ-тракту. При высоком уровне СВЧ сигнала во время положительной полуволны напряжения происходит инжекция электронов и дырок в i-область, что приводит к росту ёмкости диода и снижению его сопротивления. Чем выше уровень сигнала, тем в большей степени снижается импеданс диода. В результате происходит отражение входного сигнала от плоскости диода и уменьшение уровня мощности на выходе ЗУ. При повышении рабочей частоты сигнала для сохранения способности ограничительного диода изменять свой импеданс в зависимости от амплитуды сигнала требуется снижение толщины i-области с тем, чтобы время пролёта носителей тока через i-область было существенно меньше полупериода колебаний сигнала.

В данной работе рассматриваются вопросы теории, проектирования и изготовления быстродействующего ограничительного pin-диода на арсениде галлия для защиты приёмных каналов приёмно-передающего модуля активной фазированной решётки (ППМАФАР) от функционального поражения и других источников несинхронных СВЧ сигналов.

Теория

- В большинстве применений ЗУ должно обладать следующими характеристиками:
- малыми потерями при прохождении сигнала малой мощности;
 - высоким уровнем допустимой входной мощности;
 - высоким быстродействием;
 - высоким подавлением сигнала при большой входной мощности.

Малые потери при прохождении сигнала малой мощности достигаются ценой снижения ёмкости диода, которое приводит к сокращению площади структуры. Однако малая площадь диода находится в очевидном противоречии с требованием высокого уровня допустимой входной мощности. Для увеличения последней необходимо уменьшать

тепловое сопротивление диода, повышать рассеиваемую в нём мощность и соответственно увеличивать площадь диода. Существует несколько способов снижения теплового сопротивления. В настоящей работе использовался метод, основанный на технологии «интегрального теплоотвода».

Быстродействие ограничительного диода определяется двумя переходными процессами: переходом в состояние с низким импедансом после воздействия сигнала большой мощности и переходом в состояние с высоким импедансом после выключения сигнала большой мощности.

Заполнение носителями тока i -области – это дрейфовый процесс. Так как дрейфовая скорость носителей в арсениде галлия составляет примерно 10^7 см/сек, а толщина i -области не превосходит нескольких микрон, то время заполнения носителями i -области составляет несколько единиц на 10^{-11} сек. Очевидно, когда период колебаний сигнала большой мощности существенно больше чем 10^{-11} сек, время установления состояния с низким импедансом равно примерно периоду колебаний. Однако если период колебаний меньше чем 10^{-11} сек, то за время положительной полуволны напряжения i -область не успевает заполниться носителями тока, что и определяет верхнюю границу рабочего диапазона частот диода.

Переход в состояние с высоким импедансом после выключения сигнала большой мощности у ограничительного диода происходит без вытягивающего тока, как это имеет место у переключательного диода. В этом случае накопленный в i -области заряд $Q(t)$ убывает по экспоненциальному закону [1].

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t/\tau_{эфф}), \quad (1)$$

Q_0 – первоначальный заряд, $\tau_{эфф}$ – эффективное время жизни носителей заряда.

Время переключения $t_{пер}$ зависит от допустимого значения остаточного заряда $Q_{ост}$, которое определяет величину сопротивления диода на СВЧ. Величина $t_{пер}$ равна

$$t_{пер} = \tau_{эфф} \ln(Q_0/Q_{ост}). \quad (2)$$

У кремниевых ограничительных диодов $\tau_{эфф}$ составляет 80 нсек, а время $t_{пер}$ достигает нескольких десятых микросекунды.

Диоды на арсениде галлия имеют существенное преимущество, а именно малое $t_{пер}$, что обусловлено тем, что $\tau_{эфф}$ в арсениде галлия на порядок меньше, чем в кремнии.

Одним из недостатков арсенида галлия является заметно более низкая теплопроводность. Это обстоятельство осложняет задачу разработки диодов большой мощности.

В данной работе применялся метод, основанный на технологии «интегрального теплоотвода», на котором располагается матрица диодных структур.

Технология, конструкция и расчёт параметров ограничительного диода на арсениде галлия

Для изготовления ограничительного диода использовались многослойные эпитаксиальные структуры арсенида галлия типа $n^+n^-p^+-GaAlAs-p^{++}$ -подложка, где толщины слоёв W_{n^+} и W_{p^+} равны 0,4 мкм, концентрации примесей $N_a = 10^{19}$ см $^{-3}$ и $N_d = 4 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, нелегированный рабочий слой имел $W_{n^-} = 1,5$ мкм и $N_d = 10^{14}$ см $^{-3}$. Промежуточный слой GaAlAs выполнял роль «стопорного» при химическом травлении арсенида галлия (рис. 1). С помощью стандартных методов фотолитографии ограничивались размеры рабочей области диода.

Диодные структуры формировались в процессах вакуумного напыления металлов, ионно-химического травления, прецизионного химического травления арсенида галлия и гальванического осаждения металлов. Омические контакты к p^+ и n^+ -областям создавались напылением многокомпозиционных систем Pt-Ti-TiN-Ti-Au и

AuGe-Ti-TiN-Ti-Au соответственно с последующим отжигом в вакууме.

“Интегральный теплоотвод” представляет собой двухслойную пластину из гальванически осаждённых металлов с высокой теплопроводностью. На поверхности теплоотвода располагаются диоды, представляющие собой островки арсенида галлия высотой 2-2,5 мкм. Малая толщина материала с низкой теплопроводностью позволяет согласно проведённым расчётам значительно увеличить допустимую рассеиваемую мощность.

Во избежание возможных при сборке закороток на поверхность готовых структур наносится защитное покрытие.

Окончательный вид диодной структуры показан на рис. 2.

GaAs	n^{++}	$N_D = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
GaAs	n^-	$N_D < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
GaAs	p^+	$N_A = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
AlGaAs нелегированный		
GaAs	p^+	$N_A = (1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Рис. 1

Многослойная эпитаксиальная структура арсенида галлия для ограничительного диода

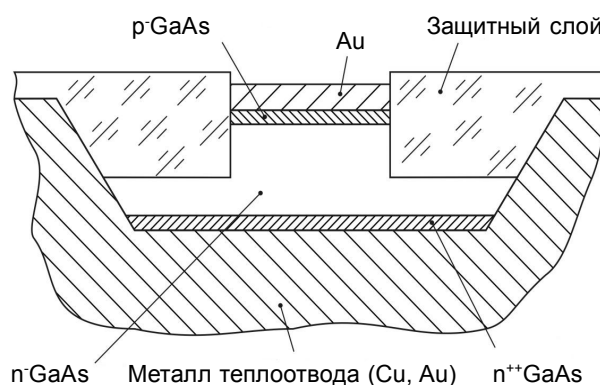


Рис. 2

Разрез p-i-n структуры ограничительного диода на арсениде галлия

Толщины и концентрации примесей в диоде определялись параметрами эпитаксиальных слоёв за исключением подложки и стопорного слоя GaAlAs, которые удалялись травлением. Толщина гальванического теплоотвода составляла: золота 20 мкм и меди 30-50 мкм. Диаметр перехода – 100 мкм.

При использовании диода в устройстве защиты важнейшие его параметры (потери в режиме малого сигнала и допустимая входная мощность в режиме большого сигнала) определяются конструктивно-технологическими параметрами диода: сопротивлением потерь R_s и тепловым сопротивлением R_t .

Сопротивление R_s состоит из трёх основных составляющих: сопротивлений контактов к p^+ и n^+ -слоям и сопротивления в золотом теплоотводе R_{Au} . Сопротивления p^+ и n^+ -слоёв ничтожно малы из-за высокой концентрации примесей в них. Отжиг омических контактов [2, 3] позволяет получить переходные сопротивления $\rho_{n^+} = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ и $\rho_{p^+} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Примем площадь рабочего перехода равной 10^{-4} см^2 , тогда сопротивление потерь в контактах составит: $R_{sp^+} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$ и $R_{sn^+} = 10^{-2} \text{ Ом}$. При расчёте сопротивления потерь в золоте учтём, что $\rho_{Au} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и толщина скин-слоя в S-диапазоне частот равна $\sigma = 1,7 \text{ мкм}$:

$$R_{Au} = \rho_{Au} / \sigma \ln(a/d) / 2\pi, \quad (3)$$

где a - ширина «кристалла» из золотого теплоотвода, равная 600 мкм, d - диаметр перехода, равный 100 мкм. Подставляя эти значения в формулу (3), получим $R_{sAu} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$. В результате суммарное сопротивление диода $R_s = 8,8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$.

Расчёт теплового сопротивления производился по методу тепловых эквивалентов [4].

В итоге получено для диода с диаметром 100 мкм тепловое сопротивление равное $19,6^{\circ} / \text{Вт}$. Аналогичный расчёт для двух включённых параллельно диодов с диаметром 80 мкм даёт $R_t = 13^{\circ} / \text{Вт}$.

Результаты измерений параметров ограничительного диода

Для экспериментального исследования параметров диода он монтировался в измерительную оснастку. Измерения проводились на стенде, блок-схема которого представлена на рис. 3.

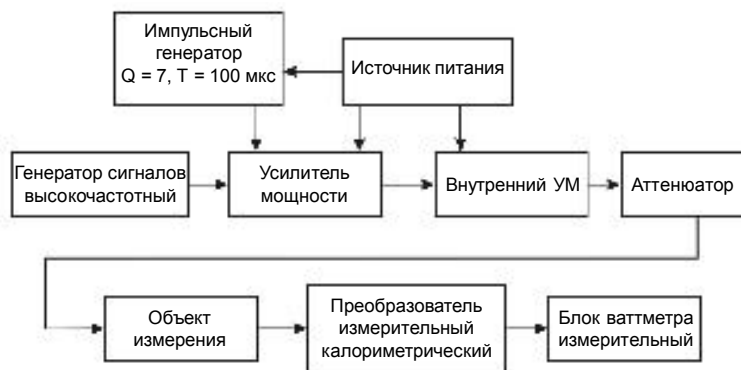


Рис. 3
Блок-схема стенда
для измерения приборов

Для определения сопротивления R_s измерялся на малом сигнале коэффициент передачи $L = P_n(I) / P_{вх}$ в зависимости от прямого тока I , где P_n – мощность в нагрузке, $P_{вх}$ – входная мощность, под которой понимается номинальная мощность источника СВЧ сигнала. Общее сопротивление диода

$$R_d = R_s + R_{пр}(I) = 25 \times L^{0.5},$$

где $R_{пр}(I)$ – сопротивление диода при прямом токе I .

Типичные результаты приведены в таблице 1.

На рис. 4 приведена зависимость сопротивления R_d от обратной величины прямого тока I^{-1} . Как и следовало ожидать, точки легли на прямую, которая отсекает на оси ординат величину R_s . Она оказалась равной $0,325 \text{ Ом}$ и включает наряду с сопротивлением диода потери в измерительной оснастке.

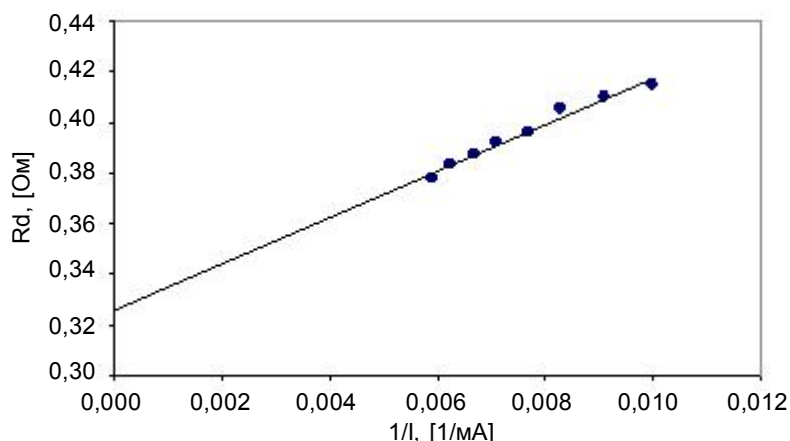


Рис. 4
Зависимость сопротивления R_d от обратной величины прямого тока

На большом сигнале исследовались 3 образца в диапазоне мощностей от 10,1 до 80,64 Вт и были прерваны из-за перегрева оснастки. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1
Зависимость общего сопротивления диода R_d от прямого тока диода

i(mA)	L(dB)	Rd(Ohm)
1	-14,8	4,58
2	-19,6	2,62
3	-22,05	1,97
5	-25,44	1,34
10	-28,3	0,96
20	-31,2	0,69
30	-32,7	0,58
50	-34,1	0,49
100	-35,6	0,415
110	-35,7	0,41
120	-35,8	0,405
130	-36	0,396
140	-36,1	0,392
150	-36,2	0,387
160	-36,3	0,383
170	-36,4	0,378

Таблица 2
Зависимость коэффициента передачи L от входной мощности $P_{вх}$

Входная мощность	Коэффициент передачи		
	L(dB)		
$P_{вх}$ (Вт)	диод1	диод2	диод3
10,1	-19,8	-21	-20,8
12,7	-20,8	-21,9	-21,3
16	-21,7	-21,9	-21,7
20,16	-22,5	-23,2	-22,9
25,4	-23,4	-23,5	-23,2
32	-24,3	-24,5	-24,3
40,3	-25,4	-25,3	-25,5
50,8	-26,4	-26,4	-27
64,01	-27,2	-27,2	-27,3
80,64	-33,2	-33,4	-33

Оценим температуру диода 3 при $P_{вх} = 80$ Вт. Мощность, выделяющаяся в диоде $P_d = 2P_{вх} L^{0.5}$, равна 3,6 Вт, так что при $R_t = 19,6^\circ/\text{Вт}$ перегрев активной области диода достигает 70 К.

Заключение

Разработана групповая технология “интегрального теплоотвода” для изготовления ограничительных диодов. Получены образцы с допустимой входной мощностью более 80 Вт при умеренной температуре p-n перехода, которая гарантирует высокую надёжность их работы. Время переключения составляет 2-3 нс.

Литература

1. В. А. Шпирт, А. А. Вербельский. Время восстановления ограничительного диода и методы его определения. - Полупроводниковые приборы и их применение. / Сборник статей под ред. Федотова Я. А. - М.: Советское радио, 1970, вып. 23, с. 192.
2. Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В. Низкоомный омический контакт к n-GaAs. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2007, вып. 1, с. 82-85.
3. Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В. Низкоомный омический контакт к p-GaAs. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2008, вып. 2, с. 58-61.
4. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчёт тепловых параметров полупроводниковых приборов. - М.: Радио и связь, 1983.