

Высокочастотные и СВЧ p-i-n диоды

Владимир Резников,
Леонид Губырин

Тел. (095) 365-58-52
gub@optron.ru

Введение

Благодаря своей относительной простоте и большому числу замечательных свойств полупроводниковые p-i-n структуры уже с 50-х годов нашли широчайшее применение в конструкциях многих разновидностей полупроводниковых диодов, начиная от высоковольтных выпрямительных до фотодиодов и гетеролазеров.

Наиболее уверенно p-i-n-диоды заняли свою нишу в ВЧ- и СВЧ-диапазонах для управления уровнем и (или) фазой СВЧ-сигналов, коммутации ВЧ- и СВЧ-мощности в линиях передач, для защиты радиотехнической аппаратуры от случайных СВЧ-импульсов, для стабилизации СВЧ-мощности, а также в аттенюаторах ВЧ-диапазона.

В этих сферах p-i-n-диоды практически не имеют конкурентов, а из-за фактической невозможности их совмещения на чипе с другими элементами не вытесняются и интегральными схемами.

В отечественной практике p-i-n-диоды СВЧ-диапазона получили название переключательных и ограничительных (в зависимости от рода использования), в ВЧ-диапазоне их называют коммутационными и регулируемые резистивными (для аттенюаторов). В зарубежной практике в их названии сохранен конструктивно-технологический маркер «PIN-Diodes».

В последнее время из-за резкого расширения производства средств связи, и в частности носимых переговорных устройств специального назначения, наблюдается непрерывное увеличение спроса на p-i-n-диоды. По данным одного из ведущих зарубежных производителей, фирмы **HEWLETT PACKARD**, годовой прирост потребности в p-i-n-диодах в последние 5 лет достигает 17–33 %, а по отдельным типоминиалам и до 2-х раз. Подобная тенденция начинает наблюдаться и в нашей стране, причем характерно, что p-i-n-диоды находят все большее применение не только в аппаратуре специального назначения, но и в коммерческой.

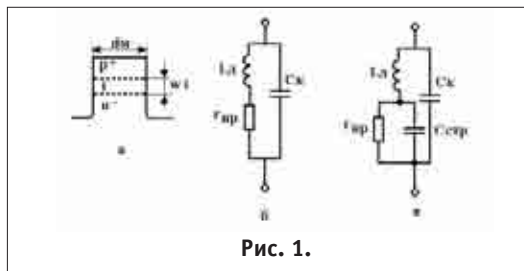


Рис. 1.

В связи с этим, заводом «ОПТРОН» был проведен комплекс конструкторско-технологических работ по совершенствованию p-i-n-диодов, повышению их качества и принципиальной модернизации ряда типов.

Краткие характеристики p-i-n-диола

Структура типичного p-i-n-диола (рис. 1, а) характеризуется тем, что между двумя сильно легированными областями очень низкого сопротивления n+ и p+ находится активная базовая i-область с высоким удельным сопротивлением (типично $\rho_i > 100$ омсм, и в ряде приборов вплоть до $\rho_i = 200\text{--}4000$ омсм) и относительно большим временем жизни (электронов и дырок) заряда $t_{эфф}$ (~0,1–1,0 мкс). Толщина базы лежит в пределах $w_i = 3\text{--}30$ мкм, диаметр меза-структур $\alpha_i = 0,05\text{--}2,0$ мм.

Специфические особенности p-i-n-структуры, существующие для работы диодов, заключаются в следующем:

1. При работе в прямом направлении на достаточном высоких частотах f , определяемых соотношением $2\pi f t_{эфф} \gg 1$ (1).

Диффузионная емкость p⁺i- и n⁺i-переходов полностью их шунтирует, таким образом эквивалентная схема сводится к рис. 1, б, где r_{np} — сопротивление базы, модулированное прямым током. Соотношение (1) может выполняться уже при частоте $f > 10\text{--}20$ МГц и заведомо справедливо на СВЧ.

2. При обратном смещении эквивалентная схема p-i-n-диола представляется в виде рис. 1, в, где $r_{обp}$ — сопротивление i-базы в немодулированном состоянии, равное

$$r_{обp} = \rho_i w_i / s_i \quad (2).$$

Реально $r_{обp} = 0,1\text{--}10$ кОм.

3. При прямом смещении вследствие двойной инжекции, дырок из p⁺-области и электронов из n⁺-области вся база «заливается» носителями и в эквивалентной схеме рис. 1, в, выполняется

$$r_{np} \sim w_i / s_i - 1 / \tau_{эфф} I_{np} \quad (3).$$

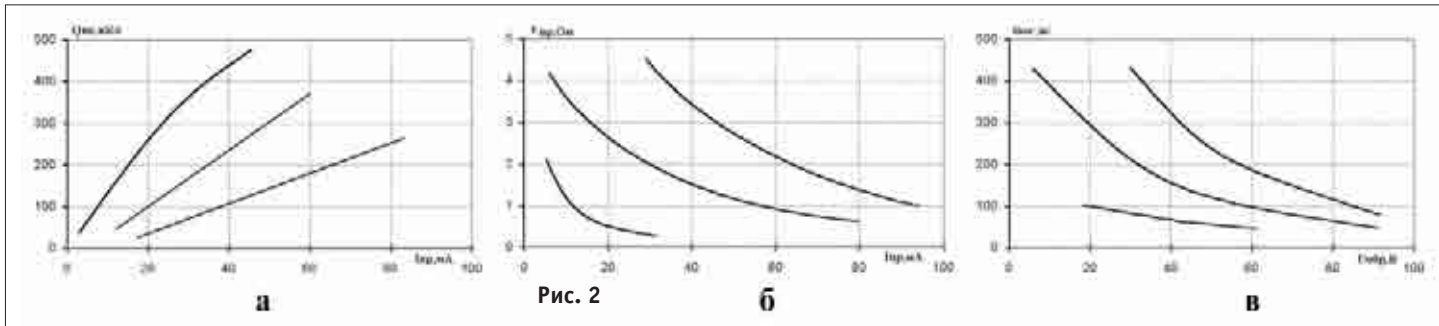
Значения r_{np} в номинальном режиме близки к величине ~ 1 Ом; при изменении прямого тока величина r_{np} может изменяться в широких пределах по закону, близкому к

$$r_{np} \sim 1 / I_{np} \quad (4).$$

4. Пробой p-i-n-структуры при отсутствии поверхностных утечек определяется соотношением

$$U_{проб} = E_{кр} W_i(s) \quad (5),$$

где $E_{кр}$ — критическое поле, обычно принимается $E_{кр} = 2 \times 10^5$ В/см. Таким образом,



$$U_{проб} = 20W(\text{мкм}) \quad (5a)$$

5. При протекании прямого тока величина накопленного заряда в базе определяется соотношением

$$Q_{нк} = I_{пр} \tau_{эфф} \quad (6)$$

поэтому величина $t_{эфф}$ определяется расчетно по паспортному значению $Q_{нк}$.

6. При резком переключении с прямого направления на обратное вначале протекает фаза рассасывания накопленного заряда, длительность которой равна

$$t_{ас} = Q_{нк} / I_{рас} = \tau_{эфф} I_{пр} / I_{рас} \quad (7)$$

где $I_{рас}$ — обратный ток рассасывания; длительность второй фазы — восстановления обратного сопротивления — определяется дрейфовым процессом под действием поля в базе по порядку величина близка к

$$t_{вост} = W / \mu_{рл} U_{обр} \quad (8)$$

Таким образом, при работе в диапазоне СВЧ и отчасти ВЧ рpn-диод (без учета паразитных параметров C_k и L_k) представляет собой линейный резистор, сопротивление которого при прямом смещении $r_{пр}$ значительно меньше, чем при обратном $r_{обр}$, при этом $r_{пр}$ зависит от прямого тока.

Рpn-диоды, предлагаемые заводом «ОПТРОН»

Завод производит все перечисленные виды рpn-диодов СВЧ- и ВЧ-диапазонов. Параметры переключательных диодов представлены в табл. 1, ограничительных — в табл. 2.

На рис.2 представлены некоторые типовые зависимости параметров от режимов измерения и эксплуатации (как видим, они вполне удовлетворительно подтверждают теоретические соотношения (4,6,7)).

Диоды предназначены для сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов; переключательные применяются в переключательных устройствах, модуляторах, фазовращателях, аттенуаторах; ограничительные — в устройствах ограничения и управления мощностью, защиты входных приемников и для тех же целей в составе герметизированных гибридных схем.

Одна из характерных особенностей современного интереса к СВЧ рpn-диодам — это резкое увеличение спроса на бескорпусные приборы. Отметим, что завод «ОПТРОН» предлагает четыре основных разновидности бескорпусных приборов: в виде кристалла с контактными площадками без выводов; с гибкими ленточными выводами; на цилиндрическом металлическом держателе — теплоотводе и на керамическом держателе типа «кроватька».

Накопленным заводом производственным опытом, цикл технологических работ по совершенствованию эпитаксии и сборочных процес-

Таблица 1.

Тип прибора	Корпус	Пробивное напряжение, В	Рассеиваемая мощность P, Вт	Общая емкость Сд, пФ	Накопленный заряд Qнк/Iпр Нк/мА	Прямое сопротивление гпр/Iпр Ом/мА
2(К)507А, Б	КД105	500 300	5	0,8-1,2	200/100	1,5/100
2(К)509А, Б	КД105	200	2	0,9-1,2 0,7-1,0	25/25	1,5/100
2(К)515А	КД105	100	0,5	0,4-0,7	15/25	2,5/25
2(К)520А, Б	КД105	800 600	4	0,4-1,0	300/100	2/100 3/100
2(К)537А, Б	КД-16-1	600 300	20	3	400-1000/100 200-1500/100	0,5/100 1,0/100
2(К)536А-5,6 Б-5,6	Б/к	300	1	0,08-0,16 0,12-0,21	150/10	1,5/100
2(К)541А-5,6 Б-5,6	Б/к	300	0,5	0,15-0,22 0,18-0,25	60-150/100	3,0/100
2(К)543А-5,6 Б-5,6	Б/к	100	0,5	0,12-0,19 0,15-0,22	0,5-3/5	1,5/5
2(К)546А-5,6 Б-5,6	Б/к	300	0,5	0,12-0,2	50-200/100	1,5/5
2(К)554А-5,6 Б-5,6	Б/к	500 150	0,5	0,025-0,08	-	2,0/100

СВЧ-переключательные рpn-диоды

Таблица 2.

Тип прибора	Корпус	Пробивное напряжение, В	Рассеиваемая мощность P, Вт	Общая емкость Сд, пФ	Накопленный заряд Qнк/Iпр Нк/мА	Прямое сопротивление гпр/Iпр Ом/мА
2(К)A534А, Б	КД-102	30-110 40-110	0,25 0,15	0,4-0,65 0,35-0,5	0,22-1,0/10	0,9-1,8/10 1,15-2,5/10
2(К)A522А-2, Б-2	Б/К	70 100	0,3	0,35-0,75 0,1-1,0	1,50	1,8/100 2,0/100
2(К)A550А-5	Б/К	100-180	5	0,2-0,6	0,3-1,0/20	0,6-1,0/100

СВЧ-ограничительные рpn-диоды

сов позволяет по специальным соглашениям изготавливать приборы с параметрами, превосходящими, указанными в таблицах 1 и 2. В ряде случаев, напротив, задаваемые на тот или иной прибор параметры оказываются неопределенно завышенными или условия применения не требуют их двухстороннего ограничения. В этих случаях возможна, также по дополнительному соглашению, поставка приборов по сниженным ценам.

Таблица 3.

Тип прибора	Корпус	Пробивное напряжение, В	Общая емкость Сд, пФ	Накопленный заряд Qнк/Iпр Нк/мА	Прямое сопротивление гпр/Iпр Ом/мА
2Д420А	КД4	24	1,5	-	1,0/10
КД407А	КД4	24	1,5	-	1,0/10
2Д420А/* КД407А,Б,В	КД2	24-100	1,3-1,5	-	1,3-1,5/10
2(К)Д413А, Б	КД1	30	0,7	2/20	30-60/2 40-80/2
КД417А	КД1	24	0,4	-	25/2

ВЧ-переключательные рpn-диоды

*Примечание: заказы по телефону 369-38-36

Для ВЧ-диапазона завод выпускает коммутационные рpn-диоды: КД407А, 2Д420А и регулируемые резистивные типов 2Д(К)Д413А, Б и КД417А для применения в аттенуаторах радиоприемников и селекторов телевизионных каналов.

Приборы выпускаются в стеклянных корпусах с аксиальными выводами типа КД4 и КД1 (миниатюрный). Диапазон рабочих частот от 10 до 300 МГц, основные параметры приборов приведены в табл. 3. Графики рис. 3 свидетельствуют о том, что для использования в аттенуаторах могут отбираться приборы с очень широким динамическим диапазоном

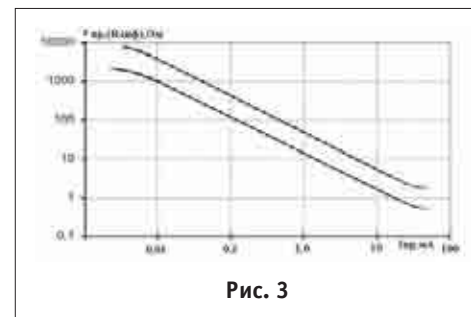


Рис. 3

(до четырех порядков изменения $r_{пр}$).

В целях повышения качества коммутационных рpn-диодов разработан модернизированный аналог диодов КД407А/2Д420А в корпусе КД2. Эти приборы отличаются высокой температурной стабильностью параметров, повышенным обратным напряжением и могут поставляться по более низким ценам.