

Импульсная стойкость кремниевых ограничителей напряжения

Для защиты РЭУ от перенапряжений используют различные схемные решения и, помимо плавких отключающих элементов, - специальные защитные приборы: газовые разрядники, металлооксидные варисторы и, приобретающие всё более широкое распространение, кремниевые ограничители напряжения (ОН).

Ограничитель напряжения – силовой прибор, к которому предъявляются специфические требования. В частности, в отличие от элементов защиты разового действия таких как, например, плавких предохранителей, ОН в большинстве применений должны обеспечивать длительную, в течение минимальной наработки эксплуатацию, рассеивая без существенного ущерба для себя сотни и тысячи паразитных импульсов значительной мощности. Для выполнения этого важного требования к ОН необходимо выполнение нескольких условий. Одно из них связано с принципами конструирования и технологии изготовления ОН. Другое – с правилами эксплуатации.

В отличие от стабилизаторов кристалл в конструкции ОН помещается между двумя массивными металлическими дисками. Диски предназначены для эффективного поглощения и рассеяния тепловой волны, источником которой является р-п-переход в момент воздействия импульса перегрузки. Соответственно диски изготавливаются из металлов с хорошей теплоёмкостью, теплопроводностью: Al, Ag, Cu. Чаще всего – из меди, покрытой серебром или никелем, что обеспечивает требуемые условия пайки кристалла к дискам.

Толщина теплораспределительных дисков должна быть соизмерима с длиной тепловой волны:

$$L = (k \cdot \tau_T / c \cdot \rho)^{0.5},$$

где k – теплопроводность кремния,

τ_T - тепловая постоянная времени ($\tau_T = R_T C$),

R_T – тепловое сопротивление,

C – теплоёмкость ($C = c \cdot \rho \cdot L \cdot A$),

c – удельная теплоёмкость,

ρ – плотность,

A – площадь поперечного сечения теплового потока..

Расчёт величины L для импульсов различной длительности даёт следующие результаты, табл.1:

Таблица 1 Зависимость длины распространения тепловой волны от длительности импульса

$\tau_{и}, \text{ мкс}$	10	100	1000	1000
				0
$L, \text{ мкм}$	31	95	310	950

Обычно в конструкции ОН применяют теплораспределительные диски толщиной ~ 0.5 мм. Тем более, что их тестирование проводится импульсами экспоненциальной формы с длительностью 1 мс.

Увеличение массы (толщины) дисков заметно повышает предельную импульсную мощность и импульсную наработку ограничителей напряжения. Так оценка критической мощности и импульсной наработки двадцативольтовых (Упроб) образцов 1.5 кВт-ных ограничителей напряжения с различной толщиной теплораспределительных дисков: 0.5 и 1.5 мм даёт следующее. Критическая импульсная мощность ($P_{и.кр.}$), то есть мощность, приводящая к деградации прибора, для образцов с “толстым” диском превышает критическую мощность образцов с “тонким” диском в среднем на 14 %. Импульсная наработка образцов с дисками толщиной 1.5 мм возрастает, по сравнению с образцами с толщиной дисков 0.5 мм, почти в пять раз: со 170 импульсов в среднем до 900. Исследование велось при импульсном токе 90А, то есть при токе, превышающем значение номинального предельно допустимого импульсного тока ($I_{и.д.}=54\text{А}$), что позволяет сократить длительность эксперимента. Очевидно, что этот приём (утолщение дисков) может использоваться при конструировании ограничителей напряжения с повышенной стойкостью к импульсным перегрузкам.

Вольтамперная характеристика ОН в области относительно небольших токов идентична ВАХ стабилитронов. В области значительных импульсных токов, характерных для ОН, имеет место существенное отклонение обратной ветви ВАХ ОН от вертикали. Это отклонение характеризуется так называемым коэффициентом перекрытия: $K = U_{огр.и.} / U_{проб}$.

Обычно для ОН значение параметра K не превышает величину 1.3, - кроме низковольтных ограничителей, то есть ограничителей с $U_{проб}$ менее 7 В, на смягчение ВАХ которых заметно влияет туннельная составляющая обратного тока. В свою очередь, чем больше величина K , то есть величина $U_{огр.и.}$, тем меньше для данной конструкции ОН предельно допустимый импульсный ток. Это же относится и к импульсной наработке.

Так как импульсный ток через ОН может достигать сотен ампер, крутизна обратной ветви импульсной ВАХ ОН определяется не только видом ВАХ, то есть динамическим сопротивлением р-п-перехода, но и, в значительной степени, падением напряжения на базе, то есть сопротивлением и толщиной базы:

$$U_{огр.и.} = I_{и.} (R_{д} + \rho_{б} \frac{W_{б}}{S_{p-n}} + R_{к} + R_{в}),$$

$U_{огр.и.}$ – импульсное напряжение ограничения,

$I_{и.}$ – импульсный ток,

$R_{д}$ – динамическое сопротивление,

$R_{к}, R_{в}$ – сопротивления контактов, выводов,

$\rho_{б}$ – удельное сопротивление базы,

$W_{б}$ – толщина базы,

S_{p-n} – площадь p-p-перехода.

Поэтому одним из принципов конструирования и технологии изготовления кристалла ОН следует считать принцип “тонкой” базы: чем тоньше относительно высокоомный базовый слой, тем меньше последовательное сопротивление и, соответственно, падение напряжения на базе, то есть выделение на базе греющей мощности. Особенно это ощутимо при воздействии предельных по мощности коротких ($\tau_{и} \leq 100$ мкс) импульсов, характеризующихся в предельно допустимых режимах амплитудными значениями импульсного тока до нескольких килоампер.

На представлены возможные варианты конструкции кристалла ОН.

Наилучшим образом основным требованиям к кристаллу ОН, в частности к выполнению принципа тонкой базы, отвечает эпитаксиальный вариант. Однако для кристаллов с $U_{проб}$ менее ~ 10 В эпитаксиальный метод становится практически неуправляемым. Получить удовлетворительный выход годных толстослойных сильнолегированных эпитаксиальных структур не удаётся даже на современных установках эпитаксиального наращивания.

Квазиэпитаксиальный вариант, основанный на соединении кремниевых пластин разного типа проводимости методом капиллярного втягивания алюминия с последующей прогонкой алюминия через слой p-кремния, также неудовлетворителен из-за низкого выхода годных, чрезмерной трудоёмкости и относительно большого расхода базового материала – кремния.

Более широкое распространение в производстве ОН получил диффузионный способ формирования p-p-структур ограничителей напряжения. Недостаток этого способа изготовления кристаллов ОН – относительно большая величина базы. Однако анализ экспериментальных данных для диффузионных и эпитаксиальных структур с одним и тем же типом проводимости базы (p-тип) и идентичными значениями $U_{проб}$ свидетельствуют о существенном превышении базовых сопротивлений эпитаксиальных структур (ЭС) над базовыми сопротивлениями диффузионных структур (ДС). В частности, соотношение удельных сопротивлений ЭС и ДС для $U_{проб} \sim 100$ В выглядит следующим образом: 1.5 : 0.3, то есть отличается в ~ 5 раз! Причина – более плавное распределение легирующей примеси (меньший градиент) в диффузионном p-p-переходе, чем в эпитаксиальном. Относительно резкий эпитаксиальный p-p-переход глубиной ~ 20 мкм кристалла ОН формируется в режиме кратковременного (~ 60 мин) низкотемпературного ($\sim 1160^\circ\text{C}$) процесса. Диффузионные p-p-структуры ОН формируются при температурах порядка

1200 – 1250°С в течение 24 – 60ч. Таким образом требование к толщине базового слоя диффузионных структур может быть существенно мягче, чем в случае эпитаксиальных структур.

Анализ классических зависимостей удельного сопротивления p - и p -Si от концентрации основных легирующих примесей, – фосфора и бора соответственно [1], приводит к выводу о существенном различии удельных сопротивлений базового слоя p - n -структур, изготавливаемых на p - и p -Si, с равными значениями $U_{проб}$. Эксперименты вполне подтверждают это заключение. Например, удельные сопротивления p - и p -Si для кристаллов с $U_{проб}$ 40 В отличаются ровно в два раза. Для более высоковольтных структур это различие значимо ещё более. Таким образом принцип низкоомной базы p - n -структур ОН лучше всего выполняется для кремния p -типа проводимости.

Следует также стремиться к формированию p - n -перехода на максимально возможной глубине. Вероятный основной механизм деградации ОН при воздействии мощных импульсов тока связан с накоплением механических напряжений в области спаия кристалла с диском, возникающих под действием тепловой волны, распространяющейся из области p - n -перехода. Температура на p - n -переходе при воздействии мощных импульсов может достигать значений, существенно превышающих температуру плавления припоя [2]. Для предельных по мощности импульсов возможно плавление припоя даже несмотря на кратковременность воздействия. Расчет температуры собственной проводимости базы (критической температуры p - n -перехода): $T_k = 1000 / (0,87 + 0,39 \cdot \lg U_{проб})$ [2], дает следующие значения для ограничителей напряжения соответственно с $U_{проб}$ 30, 15, 6,8 В: $T_{p-n} = 691, 753, 837^\circ\text{C}$. Это значительно выше предельной температуры p - n -перехода при воздействии на прибор статической мощности: 175-200°С.

Таким образом в процессе импульсных воздействий припой подвергается циклическим воздействиям нагрев – охлаждение и в области спаия, таким образом, накапливаются механические напряжения. Достигая некоторой критической величины, эти напряжения воздействуют на кристаллическую решетку прилегающего к спаю кремния и, в результате, приводят к деградации (необратимое изменение параметров, тепловой пробой) относительно неглубоких p - n -переходов. И это воздействие будет тем значительнее, чем ближе p - n -переход к поверхности кристалла. Для силовых диодов идеальным считается расположение p - n -перехода в середине кристалла [3].

Другое условие обеспечения импульсной стойкости ОН – выполнение определённых правил их эксплуатации.

Несмотря на то, что ОН конструируются в расчёте на некоторый запас предельно допустимой импульсной мощности, эксплуатация их в этом режиме крайне нежелательна. В любом случае импульсная наработка ОН в предельном режиме характеризуется незначительным количеством импульсов. Тем более неправомерна гарантия в технических условиях на ОН на возможность воздействия какого либо числа импульсов на уровне предельно допустимой мощности, так как это может провоцировать потребителей применять их в этом режиме. Тем более что “Руководством по применению полупроводниковых

приборов” ОСТ 11.336.907.0-79 настоятельно рекомендуется для обеспечения эксплуатационной надёжности полупроводниковых приборов не превышать уровень 0.7 – 0.8 от предельно допустимых режимов, в частности по такому параметру, как предельно допустимая мощность. Именно этим принципом руководствуются на практике известные нам потребители ПОН, снижая допустимый уровень импульсных воздействий даже до значений 0.3 – 0.5 от предельно допустимой мощности. В частности, исследование фактической импульсной наработки 1.5 кВт-ных ОН при воздействии импульсов на уровне 0.8 $P_{\text{имп. макс}}$ гарантирует импульсную наработку не менее 800 импульсов, снижение импульсного тока до уровня 0.5 $P_{\text{имп. макс}}$ гарантирует надёжность для $\sim 10^4$ импульсов перегрузки.

При необходимости гарантированного применения ПОН на уровне, скажем, Р_{имп} 1.5 кВт, то есть на уровне предельно допустимой импульсной мощности 1.5 кВт-ных ОН, с импульсной наработкой $500 \div 10^6$ и более импульсов потребителю необходимо просто воспользоваться трёх - или пяти - киловаттными аналогичными по напряжению пробоя ограничителями напряжения.

Литература

1. Irvin J.C. Resistivity of Bulk Silicon and of Diffused Layers in Silicon.//Bell Syst. Thech. J., №37, p.711, 1958.
2. Блихер А. Физика тиристорov. Л. Энергоиздат, 1981.
3. Лаев С.А. Исследование лавинного пробоя кремниевых р-п- и р-п-р-структур в широком диапазоне напряжений и токов и разработка мощных ограничителей напряжения и стабилитронов.- Диссертация. М., 1973 г.

Реферат

Рассмотрены технические условия обеспечения импульсной стойкости кремниевых ограничителей напряжения – полупроводниковых приборов эффективной защиты РЭА от импульсов перенапряжения многократного действия. Показано, что повышению импульсной стойкости ОН способствуют определённые принципы их конструирования и выполнение определённых правил эксплуатации. В частности, выполнение принципа “тонкой низкоомной базы” и применение ОН на уровне не более половины предельно допустимой импульсной мощности.