

Некоторые особенности конструирования мощных выпрямительно- ограничительных диодов

для сетевых защитных устройств

Анна Саница

Александр Глухов

Станислав Скорняков

skorn-stas@yandex.ru

Абдулазиз Каримов

karimov@uzsci.net

Ахмад Рахматов

rakhmatov@oaofoton.uz

Введение

Для защиты электронного оборудования от перегрузок по напряжению при воздействии электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения практикуется применение так называемых TVS-диодов, а также полупроводниковых (кремниевых) ограничителей напряжения (ПОН). В России налажено производство ПОН, рассчитанных на напряжения пробоя до 400 В и рассеяние импульсной мощности до 10 кВт. В частности, существует несколько серий ПОН, рассчитанных на ограничение перенапряжений на уровне напряжений ограничения 7,5–500 В. Предельный уровень рассеиваемой импульсной мощности серийных ограничителей 10 кВт — ограничитель напряжения 2P486A с напряжением пробоя 400 В. Зарубежные производители выпускают TVS-диоды, рассчитанные на рассеяние импульсной мощности до 90 кВт.

Требуемое рабочее напряжение получают путем параллельной и последовательной коммутации диодов с соответствующими напряжениями пробоя. Допускается последовательное соединение любого числа однотипных ограничителей напряжения. Аналогичным образом достигается повышение мощности отдельных ПОН: арматура таких ограничителей содержит цепочки спаянных последовательно кристаллов — кремниевых *p-n*-структур [6–8]. Теплоотвод обеспечивается за счет спаянных с кристаллами дисков из металла с высокими теплоемкостью и теплопроводностью, обычно медных, покрытых серебром. Последовательным соединением кристаллов достигается также и другая цель — разработка ПОН с высоким (обычно выше 100 В) напряжением пробоя. В частности, по этому принципу разработана серия 1,5-кВт ПОН типа KP240 с $U_{\text{проб}}$ от 110 до 250 В [6], ограничители KC606AC (310 В), KC606BC (360 В), 2P236A (320 В), 5-кВт ПОН 2C901B (200 В), 2C903A (400 В), 10-кВт ПОН KP486A (400 В) [7].

При применении этих подходов необходимо учитывать определенные нюансы. Например, в патенте [10] представлено изобретение, технический результат которого — создание высоковольтного «сверхмощного» полупроводникового ограничителя напряжения. Согласно описанию, в предлагаемом полупроводниковом ограничителе напряжения высокие напряжения пробоя и рассеиваемой импульсной мощности

достигаются за счет формирования в кремнии серии последовательно соединенных *p-n*-переходов. Отвод выделяющегося в *p-n*-переходах тепла в момент воздействия электрического импульса осуществляется подложкой — радиатором, контактирующим с торцевыми областями *p-n*-переходов (рис. 1).

Однако такой прием является неэффективным. Изготовленный по принципу, предлагаемому в патенте [10], образец ПОН выдерживал допустимую импульсную мощность 1,5 кВт. При этом его габариты превосходили габариты традиционных [4, 6–9] 1,5-кВт ПОН более чем в два раза. Это обусловлено тем, что в конструкции, представленной в [10], упущен один момент, отмеченный ранее в работе [9]: выделяющийся в *p-n*-переходе при воздействии паразитного импульса мощный тепловой импульс необходимо мгновенно эффективно поглотить и рассеять. Поэтому кристаллы в типовой конструкции ПОН непосредственно контактируют с теплоотводящими дисками (радиаторами) из материала с хорошей теплопроводностью и теплоемкостью. В качестве таковых применяются, как правило, медь (покрытие серебро), иногда серебро или специальные композитные материалы, в частности композит меди с молибденом (сплав МД). В настоящее время известна разработка такого композита на основе меди, серебра и алмазной крошки.

В настоящей работе приведены результаты по конструированию ПОН с рассеиваемой импульсной мощностью до 150 кВт. При этом в качестве технологической основы изготовления мощных ПОН выбран принцип тонкой базы [9]: чем тоньше относительно высокоомный базовый слой, тем меньше последовательное сопротивление и, соответственно, падение напряжения в базе, то есть выделение в базе греющей

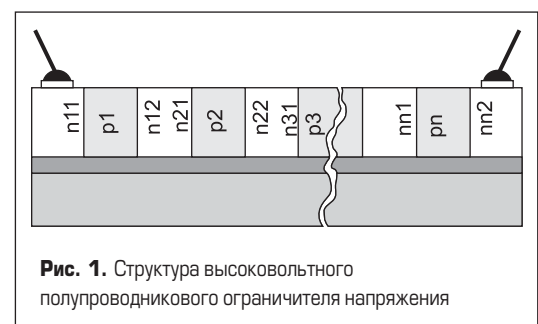
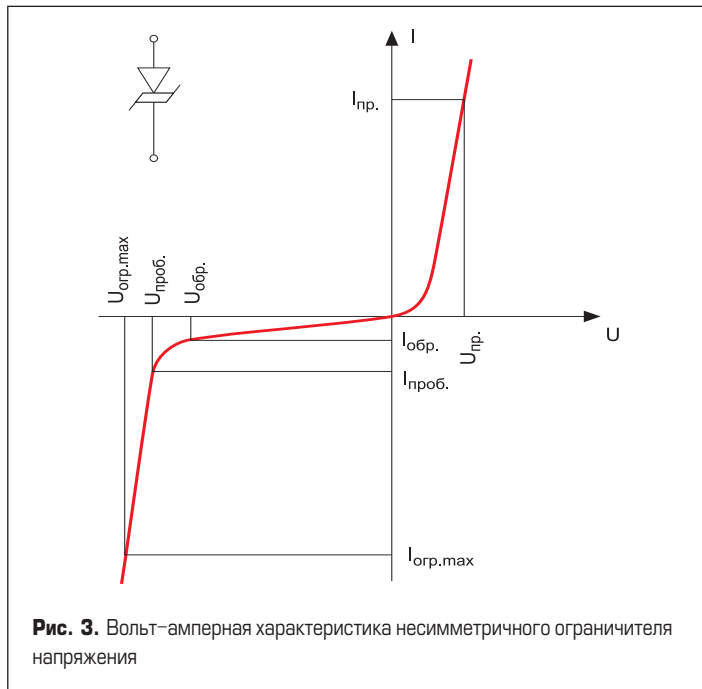
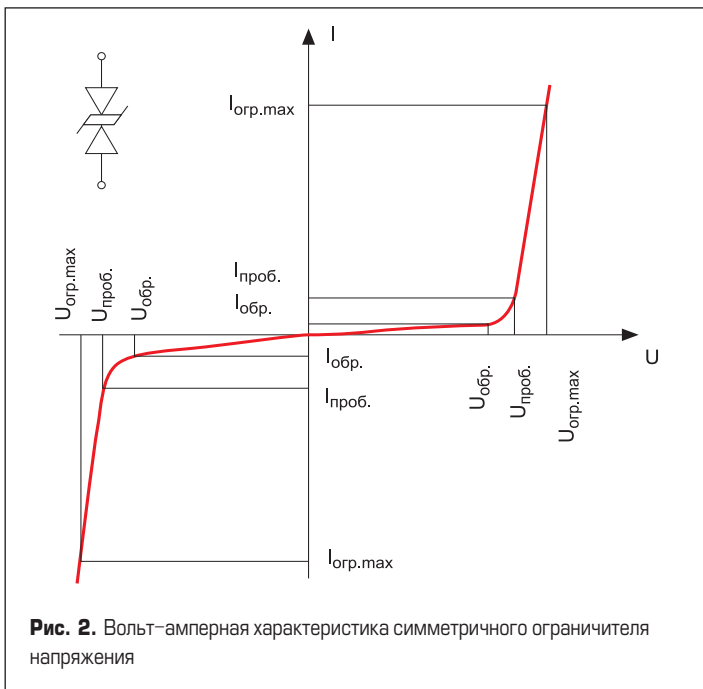


Рис. 1. Структура высоковольтного полупроводникового ограничителя напряжения



мощности. Особенно это ощутимо при воздействии коротких ($\tau_i < 1$ мс) импульсов, амплитуда тока которых может достигать сотен ампер. Поэтому в качестве исходного материала для разработки ОН с $U_{проб}$ выше 10 В предлагается использовать эпитаксиальные структуры $n-p^+$ -типа. Ограничение по нижнему пределу $U_{проб}$ таких структур связано с ограниченными возможностями современной технологии эпитаксиального наращивания.

Симметричные и несимметричные полупроводниковые ограничители напряжения

Отличительной особенностью защиты цепей питания переменного тока от цепей постоянного тока является необходимость использования устройств защиты с симметричной ВАХ (рис. 2).

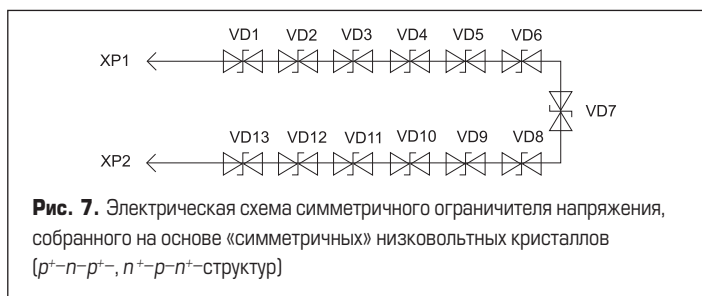
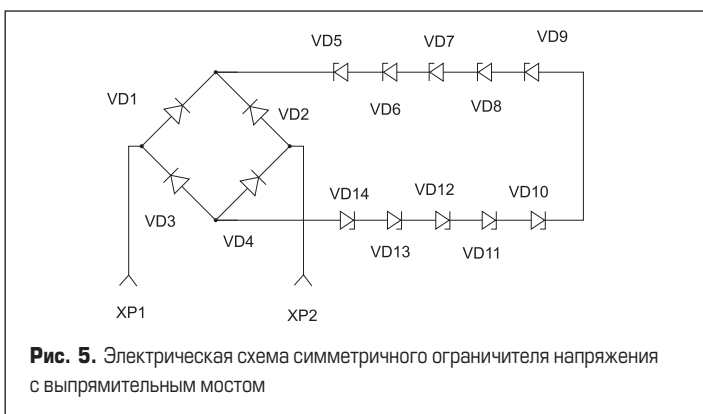
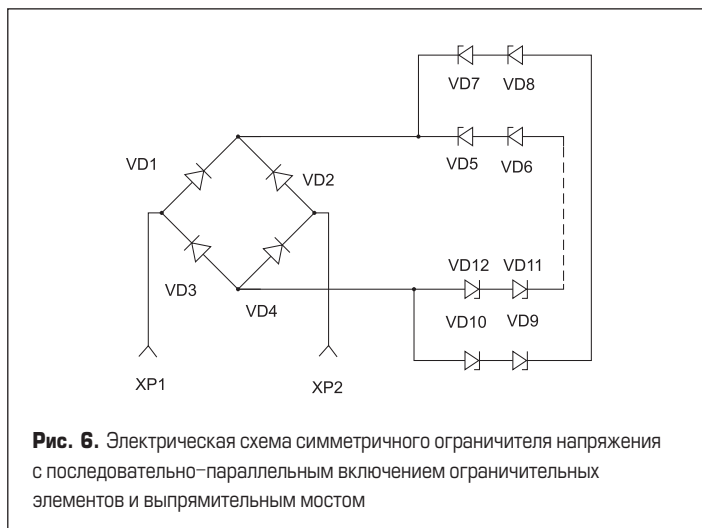
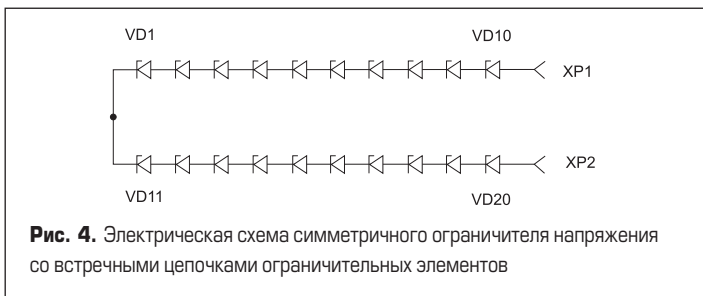
Если в случае несимметричных ПОН (рис. 3) выходом из положения является принцип последовательного соединения кристаллов, то в случае мощных высоковольтных симметричных ПОН (рис. 2) обеспечить симметричность ВАХ ПОН общепринятым способом организации

встречного включения $p-n$ -структур кристаллов (рис. 4), т. е. удвоения их количества, представляется крайне затруднительным.

И чем выше требуется обеспечить $U_{проб}$ ПОН и чем больше его рассеиваемая мощность, тем сложнее технологически это сделать. При конструировании ПОН такого рода симметричность ВАХ обеспечивается с помощью специализированной мостовой схемы из четырех выпрямительных диодов (рис. 5).

Увеличение мощности конструкции ПОН с симметричной ВАХ можно получить, используя способ последовательно-параллельного включения ограничительных элементов (рис. 6).

Симметричность ВАХ конструкции ПОН можно обеспечить также за счет использования кристаллов с симметричными p^+-n-p^+ -, n^+-p-n^+ -структурами ограничительных элементов. В этом случае электрическая схема сборки выглядит так, как показано на рис. 7.



Однако в этом случае не представляется возможным обеспечить «принцип тонкой базы» за счет используемых обычно $n-p^+$ -эпитаксиальных структур с толщиной базы порядка 20 мкм. На практике для диффузионных p^+-n-p^+ -, n^+-p-n^+ -структур толщину базы даже менее ~200 мкм обеспечить если не невозможно, то крайне сложно.

Конструирование мощных выпрямительно-ограничительных диодов

На основании приведенного выше анализа известной информации разработаны конструкции мощных ПОН с напряжениями пробоя 33–500 В и импульсными мощностями 50–150 кВт в виде многокристалльных модулей, симметричность ВАХ которых обеспечивается за счет мостовых схем.

Выпрямительные мосты собирались на основе четырех нестандартных (экспериментальных) мощных выпрямительных диодов, рассчитанных на импульсный ток (импульс экспоненциальной формы с параметрами 10/1000 мкс) в прямом направлении до 2000 А.

Выпрямительные диоды для «мостовой» схемы разработаны на основе высокоомного кремния n -типа проводимости марки КЭФ40. Напряжение пробоя таких диодов ~600 В, что обеспечивает надежное функционирование «мостовой» схемы для разработанного семейства ПОН с $U_{проб}$ 33–500 В, предназначенных для защиты РЭА в сетях постоянного и переменного тока с напряжением до 230 В.

Для монтажа в конструкции ПОН используется арматура выпрямительных диодов, изготавливаемая тем же образом, что и арматуры защитных элементов: кристалл паяется между двумя серебрянными медными теплоотрастительными дисками и выводами.

В сборках экспериментальных образцов ПОН применялись кристаллы с напряжением пробоя ~33 В, рассчитанные на рассеяние ~5,0 кВт импульсной мощности каждый. В качестве теплоотводящих дисков (радиаторов) использовались медные диски толщиной 400 мкм, покрытые слоем гальванического серебра толщиной ~5 мкм. Кристаллы и теплоотводящие диски собирали (пайка припоем марки ПСр2.5) в виде многокристалльных ограничительных элементов, из которых затем набирались ограничительные цепочки с нужным $U_{проб}$.

Монтаж ПОН производился из ограничительных элементов и мостовой схемы на двухвыводной керамической плате прямоугольной формы (рис. 8).

Платы помещались в прямоугольные пластмассовые корпуса. Герметизация плат в корпусах производилась компаундом марки КПТД-1/3Т-15,0 (К7), широко применяемым в электротехнической промышленности.

Таблица. Сравнение экспериментальных образцов мощных ПОН с зарубежным аналогом 60KS200С

Параметры	ПОН	60KS200С
Напряжение пробоя $U_{проб}$, В, при тестовом токе 1мА	243–297	200–225
Импульсное напряжение ограничения $U_{огр,и}$, В, при $\tau_{и} = 10/1000$ мкс	400	335
Импульсный ток ограничения $I_{огр,и}$, А, при $\tau_{и} = 10/1000$ мкс	370	180
Постоянное обратное напряжение $U_{обр}$, В	220	180
Коэффициент ограничения ($U_{огр}/U_{проб,мах}$) $K_{огр}$	1,34	1,48
Импульсная мощность $P_{имп}$, кВт, при $\tau_{и} = 10/1000$ мкс	150	60
Вес, г	30	50
Габариты (Ш×Д×В), мм	32×32×11	57×35×13

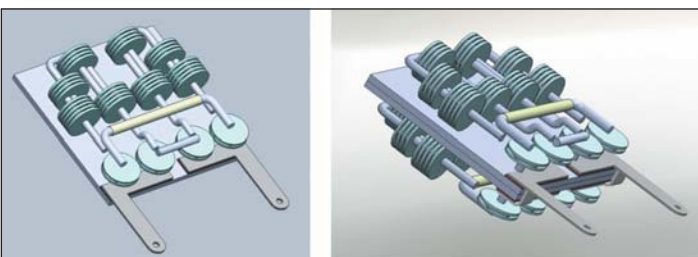


Рис. 8. Платы модулей полупроводниковых ограничителей напряжения

Экспериментальные образцы ПОН изготавливались как в соответствии с электрической схемой рис. 4 (мощность ПОН до 100 кВт), так и в соответствии со схемой рис. 5 — мощность ПОН свыше 100 кВт. Следует отметить, что, в отличие от конструкций ПОН относительно небольшой мощности, для которых в случае параллельного их соединения требуется точное согласование величин их напряжений пробоя (не более 20 мВ) [1], в разработанной конструкции мощного ПОН с последовательно-параллельным включением ограничительных $p-n$ -структур (рис. 5) необходимое значение предельной импульсной мощности достигнуто при величине рассогласования $U_{проб}$ цепочек порядка 5–7 В.

В качестве ближайшего аналога разработанным мощным ПОН можно рассматривать 60-кВт ПОН (TransZorb) типа 60KS200С фирмы General Semiconductor Industries [11]. Результаты сопоставления основных параметров (характеристик) ПОН 60KS200С и одного из экспериментальных образцов мощных ПОН, близких по напряжению пробоя, представлены в таблице.

Таким образом, видно, что разработанные ПОН превосходят зарубежные аналоги по одному из важнейших параметров ограничителей напряжения — коэффициенту ограничения и, даже при меньших габаритах и массе, по мощности рассеяния импульсов перенапряжения.

Заключение

На основе анализа принципов конструирования и результатов исследования экспериментальных образцов мощных кремниевых ограничителей напряжения показана возможность разработки и производства ПОН с рассеиваемой импульсной мощностью ($\tau_{ф}/\tau_{и} = 10/1000$ мкс) до 100–150 кВт. Причем в основу конструкций мощных ПОН с симметричной ВАХ положены электрические схемы с последовательным и последовательно-параллельным включением ограничительных элементов и выпрямительным мостом.

Литература

1. Кадуков А. TVS-диоды — полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях // Компоненты и технологии. 2001. № 1.
2. Кондратьев Б., Попов В. Ограничители для защиты радиоэлектронной аппаратуры от перенапряжения: Обзор. М.: ЦНИИ «Электроника». Сер. Зарубежная электронная техника. 1983. № 2(260).
3. Скорняков С., Рахматов А. Ограничители напряжения для электронных автоматических телефонных станций // Электронная промышленность. 1991. № 1.
4. Скорняков С., Павлов В., Рахматов А. Кремниевые ограничители напряжения — эффективные элементы защиты радиоэлектронных устройств // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
5. Полупроводниковые приборы. Руководство по применению. ОСТ 11336.907.0-79.
6. Научно-технический отчет по ОКР «НОЖ-2». Разработка базовой технологии создания многофункциональных сетевых защитных устройств на основе модулей полупроводниковых ограничителей напряжения высокой импульсной мощности до 150 кВт и специализированных микросхем. 2012.
7. Научно-технический отчет по ОКР «Неофит». Разработка и освоение малогабаритных ограничителей напряжения категории качества «ВП» — по типу ограничителей напряжения 1,5ОН18А, 10ОН400А аА0.336.640ТУ. 2010.
8. Пат. на изобретение № 2245592 от 27.01.2005 (РФ). Ограничитель напряжения с увеличенной мощностью / Ч. Л. Радд, А. Ф. Муратов, В. А. Потапчук, А. М. Умаров.
9. Павлов В., Рахматов А., Скорняков С. Условия обеспечения длительной надежной работы ограничителей напряжения // Силовая электроника. 2008. № 4.
10. Пат. на изобретение №2318271 от 27.02.2008 (РФ). Высоковольтный полупроводниковый ограничитель напряжения (варианты) / Г. Бадалян, Д. Григорян, Р. Татевосян.
11. Semiconductors general catalog. Sanken Electric Co., Ltd. 2012.