

Лавинный диод

от ООО «Элемент-Преобразователь»

В статье показано основное преимущество использования лавинных диодов в электрических схемах с перенапряжением, дано объяснение механизма лавинного пробоя, требования к конструкции и технология изготовления лавинных диодов.

Роман Рыбак
Алевтина Коляда

marketing@element.zp.ua

ООО «Элемент-Преобразователь» расширил ряд лавинных диодов с жестким и гибким выводом на токи до 160 А и напряжение до 1800 В, освоив производство приборов ДЛ151-160 и ДЛ152-160. Аналоги этих приборов на территории Украины и России в настоящий момент не выпускаются.

Лавинные диоды используются в выпрямительных агрегатах для металлургической и химической промышленности, железнодорожного транспорта и в других электрических схемах, в которых наблюдается перенапряжение. Основное преимущество лавинных диодов перед силовыми выпрямительными диодами в том, что они не разрушаются при значительных перенапряжениях и после снятия напряжения восстанавливают свои параметры [1].

Электрические параметры и характеристики лавинного диода

Электрические параметры диодов представлены в таблице 1, габаритно-присоединительные размеры — на рис. 1.

Таблица 1. Электрические параметры лавинного диода

Наименование параметра	Значение (обозначение) параметра
Тип диода	ДЛ152-160, ДЛ151-160
Максимально допустимый средний прямой ток, А, при температуре корпуса 100 °С	160
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В, (класс)	800 (8); 1000 (10); 1100 (11); 1200 (12); 1300 (13); 1400 (14); 1500 (15); 1600 (16); 1800 (18)
Климатическое исполнение	У2, УХЛ2, Т2
Ударный прямой ток, кА	4,0
Ударная обратная рассеиваемая мощность, кВт, при (t _n =100 мкс)	12
Повторяющийся импульсный обратный ток, мА, не более (T _f = 150 °С)	20,0
Импульсное прямое напряжение, В, не более	1,35
Тепловое сопротивление переход-корпус, °С/Вт, не более	0,25
Температура перехода, °С: минимальное значение максимальное значение	-60 150
Температура хранения, °С: минимальное значение максимальное значение	-50 (-60 для исполнения УХЛ2; -10 для исполнения Т2) 50 (60 для исполнения Т2)

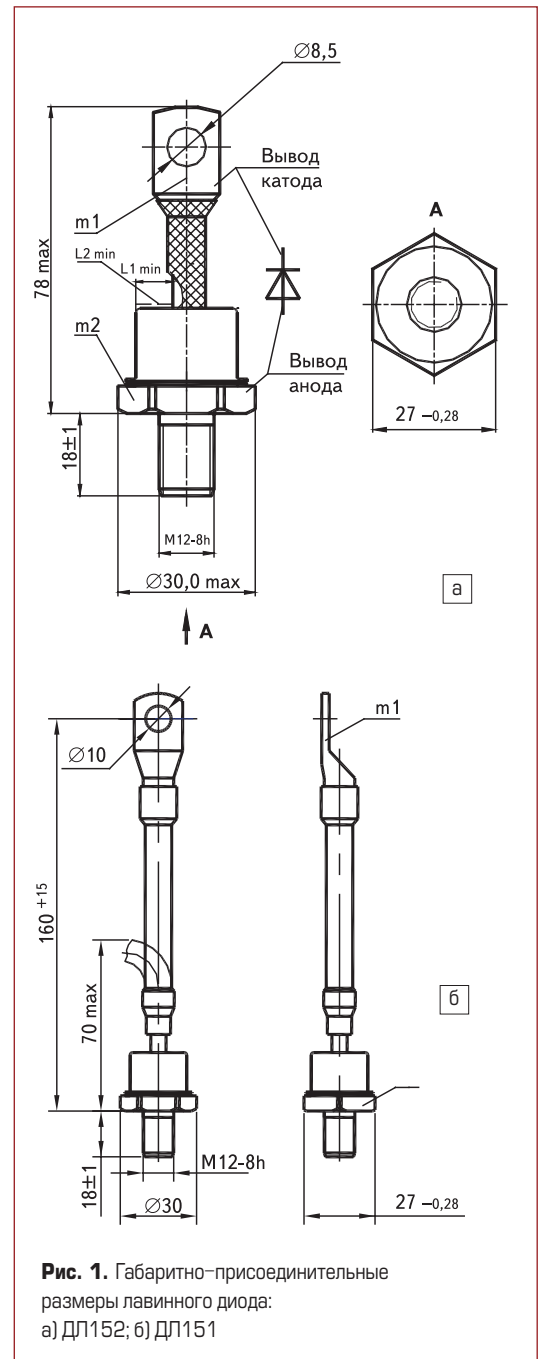


Рис. 1. Габаритно-присоединительные размеры лавинного диода: а) ДЛ152; б) ДЛ151

Механизм лавинного пробоя

Лавинные диоды могут выдерживать значительные напряжения в обратном направлении.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к *p-n*-переходу лавинного диода, напряженность электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) увеличивается и может достигнуть значений, при которых будет наблюдаться заметная ударная ионизация [2]. В ударной ионизации могут принимать участие носители как инжектированные в ОПЗ из базовых областей, так и генерированные в самой ОПЗ. Электроны и дырки образуют при ударной ионизации вторичные электронно-дырочные пары, которые умножаются в *p-n*-переходе. Количественной характеристикой этого процесса является коэффициент умножения носителей.

В сильных электрических полях, превышающих 10^4 В/см, носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристалла и рождения новых электронно-дырочных пар, вследствие чего наступает лавинный пробой *p-n*-перехода.

Высоковольтные *p-n*-переходы имеют лавинный пробой при оптимальном сочетании конструкции и технологии их производства.

Известно, что лавинный пробой *p-n*-переходов носит микроплазменный характер [1].

При детальном исследовании лавинного пробоя было установлено, что ток пробоя формируется вдоль серии хаотично расположенных каналов проводимости, пронизывающих *p-n*-переход и называемых микроплазмами. Причинами микроплазм являются всякого рода несовершенства и нарушения кристаллической решетки и включения, на которых электрическое поле превышает среднее значение, характерное для объемного заряда всего *p-n*-перехода.

В области лавинного пробоя вольт-амперная характеристика $U(I)$ выпрямительного элемента описывается следующей зависимостью:

$$U(I) = U_{\text{проб}}(I_0) (1 + \beta_T \Delta T) + \int_{I_0}^I \frac{dU}{dI} dI,$$

где $U_{\text{проб}}(I_0)$ — напряжение загиба вольт-амперной характеристики (напряжение, при котором появляются первые микроплазмы); I_0 — ток, соответствующий напряжению $U_{\text{проб}}$; $\Delta T = T_2 - T_1$ — перегрев *p-n*-перехода за счет протекания обратного тока I ; β_T — температурный коэффициент пробивного напряжения.

Величина $(dU/dI) = R_g$ представляет собой динамическое сопротивление *p-n*-структуры в области лавинного пробоя. Величина R_g определяется сопротивлениями микроплазм и их количеством. Число микроплазм растет с увеличением обратного напряжения, обратного тока. Зависимость динамического сопротивления лавинных диодов от обратного тока описывается формулой $IR_g = A$. Величина $A = 4 \dots 10$ для *p-n*-переходов с $U_{\text{проб}} = 400 \dots 1000$ В. Величина A характеризует степень однородности лавинного пробоя.

Изотермическая вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода в области лавинного пробоя описывается выражением:

$$I = I_0 \times e^{\frac{U(I) - U_{\text{проб}}(I_0)}{A}};$$

Величина R_g при больших обратных токах стремится к некоторому насыщению.

Требования к конструкции технологии изготовления

В процессе разработки лавинных диодов выработаны требования к качеству исходного материала, технологической обработке и элементам конструкции, позволяющие максимально снизить внесение механических напряжений в кремний:

- Ограничение плотности дислокаций вплоть до $\text{Ng} \leq 10^2 \text{ см}^{-2}$ при их равномерном распределении по площади. Это относится к дислокациям, возникающим в дислокационном исходном кремнии особенно большого диаметра (60 мм и выше), в процессе изготовления приборов.
- Исключение свирл-дефектов, дефектов упаковки.
- Ограничение содержания O_2 и C в кремнии, преобразующихся в сложные комплексы Si-O и Si-C .
- Уменьшение примесной атмосферы, особенно примесей тяжелых и щелочных металлов на дислокациях и других кристаллических дефектах кремния.

Особо следует отметить отрицательное воздействие на ВАХ приборов «звездных» дефектов. Эти дефекты чаще возникают в процессе изготовления приборов и ухудшают ВАХ вплоть до потери *p-n*-переходом запирающих свойств.

Детальное изучение этих дефектов позволяет предположить, что это микротрещины, образовавшиеся в напряженном кремнии в процессе термической обработки. При определенном сочетании геометрических размеров элементов при термообработке могут возникнуть упругие деформации в структуре кремния вплоть до перехода их в пластическую деформацию (микротрещины). Эти механические напряжения в микроструктуре проявляются «звездами» и служат центрами локального пробоя *p-n*-перехода и разрушения кремния.

Однородность удельного сопротивления кремния является важным условием изготовления лавинных диодов.

Таким образом, для создания лавинных *p-n*-переходов необходимо:

1. Использование качественного кремния, характеризующегося отсутствием структурных дефектов (дислокаций, свирл-дефектов и других дефектов кристаллической решетки) или, по крайней мере, ограниченной плотностью равномерно расположенных дислокаций; минимальным содержанием примесных атомов O_2 , C и других элементов; минимальным разбросом удельного сопротивления.
2. Технологическая обработка при создании *p-n*-переходов не должна вносить значительных повреждений кристаллической решетки кремния, максимально ограничить диффузию тяжелых и щелочных металлов, а также не должна создавать примесные атмосферы и включения, генерировать локальные области дислокаций и упругих напряжений.
3. Конструкция диода должна исключить возникновение значительных механических напряжений в кремнии.
4. Геометрические размеры структуры и фаски должны исключить смыкание ОПЗ с приконтактной областью.
5. Геометрия фаски, травление и защита ее должны исключить поверхностный пробой *p-n*-перехода, то есть обеспечить более низкую напряженность электрического поля на поверхности фаски, чем в объеме кремния.

Выводы

Использование лавинного диода в выпрямительных агрегатах позволяет увеличить надежность электрических схем и дает возможность уменьшить мощность используемого диода, так как защитную роль от пробоя будет играть лавинный ток, а не дополнительный запас по обратному напряжению силового диода.

Литература

1. Грехов И. В., Сереев Ю. И. Лавинный пробой *p-n*-перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980.
2. Кюрегян А. С. Об ударной ионизации в полупроводниках в сильных электрических полях. ФТП, 1976.