

#### **1.3.4.3 Концепция гибридных диодов**

Концепция гибридных диодов была открыта в 1991 [295] [296]. Она основана на параллельном подключении диода с мягким восстановлением и РТ – диода с малым падением напряжения, но жесткими параметрами восстановления, как показано на рис.1.37.

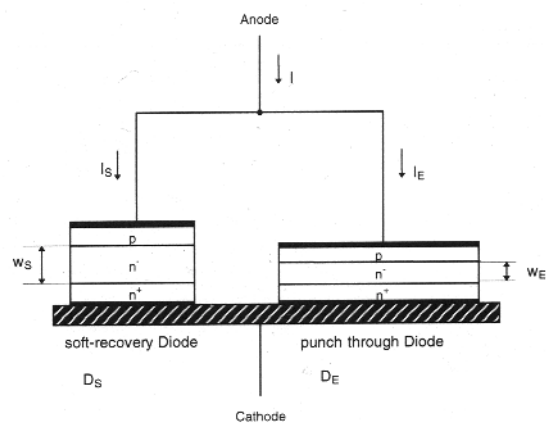


Рис.1.37 Структура гибридного диода

Принцип работы показан на рис.1.38. Основная часть тока в открытом состоянии проводится жестким диодом  $D_E$ . Остаток — диодом  $D_S$ . Ток  $I_S$  проходит через диод  $D_S$  и первый пересекает ноль, достигая своего максимального обратного значения в момент  $t_1$ . В этот момент через диод  $D_E$  все еще протекает прямой ток. При этом рп – переход диода  $D_S$  свободен от носителей заряда. Теперь диод  $D_E$  переключается с нарастающей  $dI/dt$ . Суммарный ток все еще определяется внешней цепью.

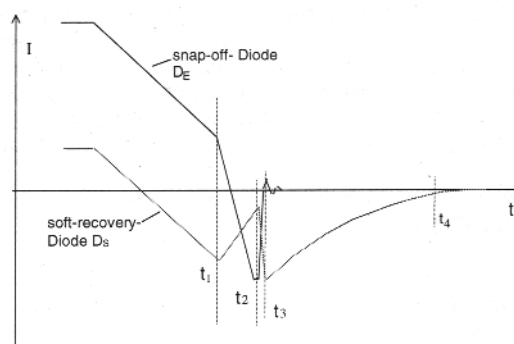


Рис.1.38 Протекание тока через составляющие гибридного диода

В момент  $t_2$  рп – переход диода  $D_E$  свободен от носителей заряда. В период между  $t_2$  и  $t_3$  обратный ток  $D_E$  будет резко падать. Это вызовет соответствующее нарастание тока в  $D_S$ , который полностью не освободился от носителей в этот момент. Общий обратный ток не будет резко снижаться. Следовательно, не будет перенапряжения. Плотность носителей заряда в диоде  $D_S$  уменьшится в период между  $t_3$  и  $t_4$ . Такая структура будет мягкой.

Для получения эффективной функции обратного диода,  $D_S$  должен получить достаточный заряд даже после падения обратного тока  $D_E$ . Для этого мягкий диод  $D_S$  должен принять на себя 10 – 25 % прямого тока. Следовательно, прямое напряжение должно быть отрегулировано.

Первые модули, содержащие гибридные диоды, поступили в продажу в начале 1996г. Они в основном применялись как обратные диоды в коммутирующих цепях с 100 В или 200 В – MOSFET ключами. В них эпитаксиальный диод на 400 В использовался в качестве

жесткого диода  $D_E$ . В качестве мягкого диода  $D_S$  использовался улучшенный CAL – диод. Плотность основного рекомбинационного центра в нем поддерживалась на низком уровне, в результате чего падение напряжения было около 1,1 В при  $150 \text{ А/см}^2$ .

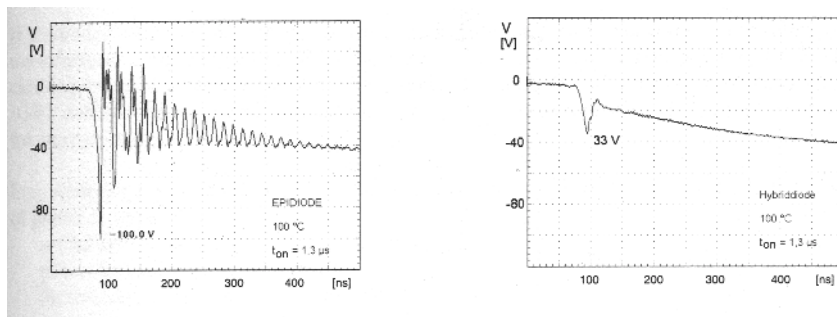


Рис.1.39 Характеристика напряжения в 350 А, 100 В модуле, слева: с эпитаксиальными диодами, справа: с гибридным диодом

Рис.1.39 показывает напряжение включения MOSFET. Диаграмма слева показывает напряжение обратного диода, состоящего из 7 параллельных эпитаксиальных диодов. Диаграмма справа показывает напряжение при замене одного из 7 эпитаксиальных диодов диодом с мягким восстановлением  $D_S$ . Пик напряжения будет падать от 100 В до 33 В, паразитные колебания исчезнут. С похожим обратным диодом MOSFET можно включить с большей  $dI/dt$ . Если время включения MOSFET уменьшилось с 1.3 мкс до 0.3 мкс при уменьшении сопротивления затвора, характеристика напряжения будет также приемлема. Общие потери в схеме снизятся до 48 % (= сумме линейных и потерь при коммутации всех компонентов).

Гибридные диоды имеют особые преимущества при напряжениях до 600 В. В этом диапазоне можно использовать диоды с минимальной  $w_B$ , если они интегрированы как часть гибридного диода. С другой стороны, гибридные диоды не имеют больших преимуществ при больших напряжениях, так как различия в  $w_B$  между мягкими CAL – диодами и PT – диодами не значительно.

### 1.3.5 Последовательное и параллельное соединение мощных быстрых диодов

#### 1.3.5.1 Последовательное соединение

При последовательном соединении необходимо обращать внимание на симметричность цепей по отношению к обратному напряжению и к динамическому обратному напряжению.

По отношению к статическому обратному напряжению, отличия в токах утечки, возникающие при изготовлении диодов, вызовут лавинный процесс в диоде с наименьшим током утечки. При хорошей лавинной стабильности можно не подключать резисторы. Однако, если компоненты на напряжение  $> 1200 \text{ В}$  подключены последовательно, на практике лучше подключить параллельно резистор. Его сопротивление рассчитывается таким образом, чтобы распределение напряжения всегда зависело от резистора.

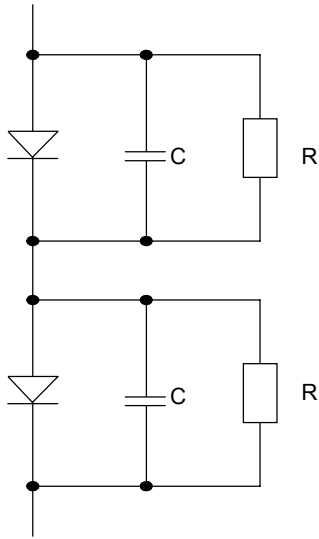


Рис.1.40 RC – цепь для последовательного включения быстрых диодов

Если предполагается, что ток утечки не зависит от напряжения и если пренебречь отклонением сопротивлений резисторов, простым способом расчета сопротивления для последовательного соединения  $n$  - диодов и при определенном обратном напряжении  $V_r$  будет [297]:

$$R < \frac{nV_r - V_m}{(n-1) \cdot \Delta I_r} \quad (1.15)$$

$V_m$  – максимальное последовательное напряжение,  $\Delta I_r$  – максимальный разброс тока утечки в диоде, зависящий от максимальной рабочей температуры. Согласно [297], его можно найти с большой уверенностью из

$$\Delta I_r = 0.85 I_{m1} \quad (1.16)$$

где  $I_{m1}$  определяется производителем. Согласно этому выражению ток, проходящий через резистор, примерно в шесть раз больше тока утечки диода.

Рассматривая существующие выражения, важно рассчитать сопротивление для современных обратных диодов, чтобы через резистор проходил ток в три раза больше максимального тока утечки диода. Конечно же, необходимо учитывать потери тепла в самом резисторе.

Динамическое распределение напряжения может существенно отличаться от статического. Если  $p_n$  – переход одного диода освободиться от свободных зарядов раньше, чем у любого другого диода, то этот диод примет на себя напряжение раньше. Если пренебречь отклонением емкостей конденсаторов, простым способом расчета емкости для последовательного соединения  $n$  - диодов и при определенном обратном напряжении  $V_r$  будет:

$$C > \frac{(n-1) \cdot \Delta Q_{RR}}{n \cdot V_r - V_m} \quad (1.17)$$

$\Delta Q_{RR}$  – максимальный разброс сохраненного заряда в диодах. Для любого случая его можно получить из:

$$\Delta Q_{RR} = 0.3 Q_{RR} \quad (1.18)$$

если все используемые диоды взяты из одной партии.  $Q_{RR}$  определяется производителем. Сохраненный в конденсаторе заряд поддерживается в дополнение к сохраненному заряду, возникающему при выключении обратного диода, его также может использовать IGBT при включении. Учитывая эти основные правила, заряд должен быть в два раза больше сохраненного заряда в одном диоде.

Обратные диоды обычно не подключают последовательно из-за следующих дополнительных источников рассеивания мощности:

- n-кратное диффузное напряжение на pn- переходе,
- потери мощности в параллельном резисторе,
- возросший сохраненный заряд, который попадает на IGBT,
- большое число компонентов RC цепи.

Это выполняется, если есть обратные диоды для требуемого диапазона напряжений.

Последовательное включение может быть исключительным, если потери в открытом состоянии не так важны и если имеет значение малое время переключения и малый сохраняемый заряд, что типично для диодов для малых напряжений.

### 1.3.5.2 Параллельное включение

При параллельном включении не требуются дополнительные RC – цепи. При этом важно, чтобы различия в падениях напряжений были минимальными.

Решающим параметром для параллельного включения является температурная зависимость падения напряжения. Если падение напряжения уменьшается при возрастании температуры, температурная зависимость будет отрицательной, только одно преимущество которой состоит в балансе потери мощности. Если падение напряжения растет при возрастании температуры, температурная зависимость будет положительной.

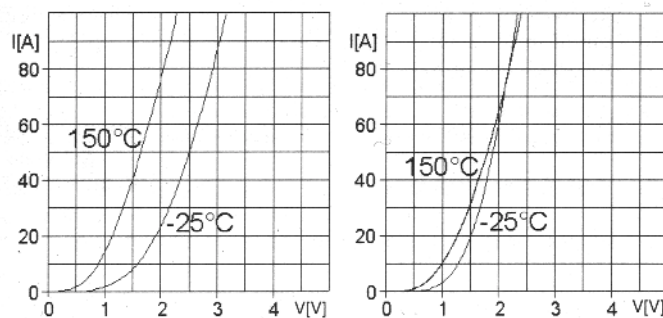


Рис.1.41 Температурная зависимость падения напряжения для различных типов диодов  
Слева: отрицательная температурная зависимость