

# Преимущества, особенности применения и проблема выбора кремниевых защитных элементов для высокоскоростных интерфейсов

Владимир РЕНТЮК

Статья посвящена проблеме выбора и применения кремниевых полупроводниковых защитных устройств и их преимуществам для защиты современных высокоскоростных интерфейсов.

## Введение

Правильный выбор внешнего (так называемого off chip, то есть буквально — расположенного вне кристалла микросхемы) ограничителя бросков напряжения, или TVS (*англ.* TVS — Transient Voltage Suppressor), в современных условиях далеко не так прост, как это было прежде. Его назначение — ограничение опасного напряжения переходных процессов или ограждение от внешних воздействий и дальнейшее восстановление после прекращения такого воздействия функций и работоспособности защищаемой аппаратуры. Часто подобные устройства называют супрессорами, что и отражено в их аббревиатуре TVS. Однако супрессор достаточно общее понятие, охватывающее не только ограничители напряжения, выполненные на лавинном пробое полупроводникового перехода, но и решения, предназначенные для погло-

щения энергии, реализованные с использованием других технологий, например многослойные варисторы или газовые разрядники. В статье будут рассмотрены кремниевые полупроводниковые защитные устройства.

Проблема применения устройств, защищающих от бросков напряжения, заключается в том, что сегодня существует тенденция, направленная не только на уменьшение размеров самих интегральных микросхем (ИМС), но и на увеличение их интеграции (рис. 1) согласно современной интерпретации известного закона Мура. Здесь и далее, кроме оговоренных особо, используются иллюстрации и ряд положений из публикации [1]. Повышение интеграции приводит к тому, что у нынешних ИМС все больше увеличивается число входов (портов), которые естественно и достаточно часто подвергаются внешним воздействиям и требуют той или иной защиты. На этом про-

блемы не ограничиваются. Поскольку для современных устройств как массового, так и специального назначения характерна все большая миниатюризация и расширение функциональных возможностей, то плотность их компоновки постоянно возрастает, что, в свою очередь, требует установки в них подавляющих возможные выбросы напряжения защитных элементов все меньших габаритов. Одновременно повышается спрос на большую пропускную способность интерфейсов, о чем свидетельствуют изменения в таких трех популярных технологиях, как Ethernet, HDMI и USB (рис. 2). Все сказанное, вместе взятое, очерчивает границы проблемы, связанной с особенностями выбора устройств для ограничения недопустимых напряжений, и одним из наиболее перспективных направлений здесь становятся кремниевые полупроводниковые защитные элементы. Но перед выбором конкретного

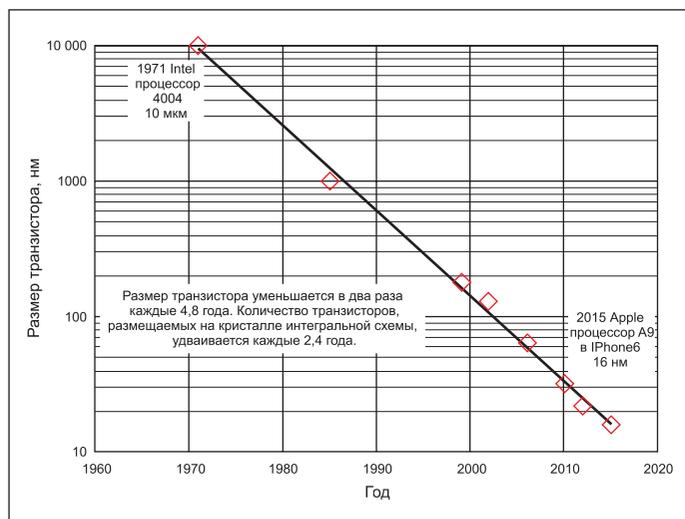


Рис. 1. Технологические тенденции развития полупроводниковой микроэлектроники

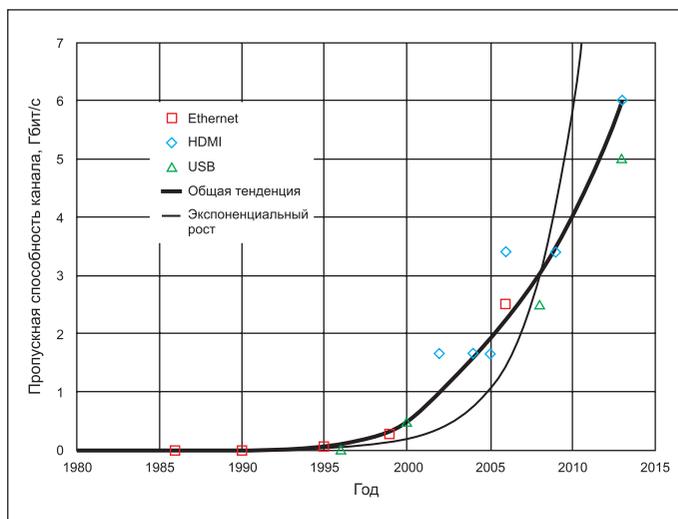


Рис. 2. Тенденции увеличения пропускной способности канала

защитного элемента следует определиться не только с уровнями внешних воздействий, но и с параметрами, характеризующими то, как это устройство взаимодействует и связано и с внешним миром, и с окружающей его средой.

## Проблемы выбора

Если рассматривать основные доступные сегодня защитные элементы, то можно выделить их четыре основных типа, представленных в таблице [2].

Итак, для выбора оптимального защитного элемента сначала необходимо определиться с особенностями того, что нужно защищать. Для этого разделим проблему на две основные и выполним оценку требований на системном уровне и на уровне устройства. То есть установим, что надо учитывать с точки зрения системы, и то, какие проблемы могут создать сами устройства защиты.

## Системные требования

### Возможные уровни воздействия на незащищенные входы

Первая проблема, с которой приходится сталкиваться при выборе элемента защиты и которую необходимо учитывать при выборе ограничительного защитного диода, — уровень входного сигнала, подлежащего ограничению. Здесь требуется небольшое пояснение. Защита входов электронной аппаратуры связана с обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС). Это подразумевает не только ограничение собственного излучения промышленных радиопомех непосредственно самим электронным устройством, но и обеспечение его устойчивости к внешним воздействиям электромагнитных помех (ЭМП). Данные характеристики обязательны, а выполнение регламентов по ЭМС подтверждается сертификационными испытаниями. Как правило, здесь имеются в виду импульсные ЭМП самой различной природы. Это могут быть помехи от сторонней аппаратуры (импульсные наводки), разряды статического электричества или электрические помехи природного происхождения, например наведенное напряжение от близких ударов молнии. Для оценки воздействия ЭМП используются разные модели, причем воздействующий импульс может вводиться в соединительные кабели или генерироваться в виде воздействующего электромагнитного поля. Наиболее распространенная модель для оценки влияния разряда электростатического электричества при прикосновении человека — модель человеческого тела (Human Body Model, HBM), подразумевающая имитацию подобного воздействия. Существует еще механическая модель (Machine Model, MM), модель заряженного устройства (Charged-Device Model, CDM) и ряд других моделей, в том числе мо-

Таблица. Сравнительный анализ защитных ограничителей напряжения

Параметр	Газовые разрядники	Защитные тиристоры (на примере SIDACtor)	Варисторы	Обычные TVS-диоды	Специальные TVS-диоды
Уровень пиковых токов	высокий	средний	высокий	средний	средний
Минимальное напряжение включения, В	75	8	6	6	~3
Точность напряжения включения	низкая	высокая	низкая	высокая	высокая
Эффективность ограничения выбросов напряжения	средняя	высокая	средняя	высокая	высокая
Типовая емкость, пФ	~1,5	~30	~1400	~100	0,2
Соотношение «пиковый ток/габариты»	низкое	среднее	высокое	среднее	высокое
Время срабатывания	большое	среднее	большое	малое	сверхмалое

дель импульса линии передачи (Transmission Line Pulsing, TLP). Проблема заключается в том, что все модели не коррелированы. Устройство может выдержать испытания по одной модели и не выдержать по другой. Подробно о моделях и проблемах, возникающих при испытаниях на ЭМС, а также особенностях их проведения для коммерческой электронной аппаратуры и для специального оборудования написано в публикациях [3, 4].

Что касается модели импульса линии передачи, то для оценки защищенности от разряда статического электричества, или ESD (а это самое распространенное воздействие), по сравнению с другими моделями она имеет немало преимуществ. Как уже было сказано, из-за отсутствия корреляции возможна ситуация, когда устройство сможет работать при высоком уровне ESD и будет повреждаться при более низком, поскольку здесь важную роль играет не только уровень, но и длительность негативного воздействия, то есть энергия. Поэтому существует ряд ограничений при использовании моделей для исследования выносливости оборудования (встроенных в него ИМС) к воздействию ESD. Применение этих моделей дает неполную картину того, как ведет себя защищаемое устройство под влиянием ESD. Форма входного сигнала HBM и других моделей достаточно сложна, соответственно, сложна и форма выходного импульса. Вследствие этого классические модели напоминают некий «черный ящик». Важно лишь то, выдерживает разработанное устройство данный уровень воздействия или нет. И здесь нас ожидает подводный камень — при исследовании на устойчивость к таким воздействиям на этапах НИОКР устройства могут быть повреждены прежде, чем удастся выяснить, какие меры понадобятся для нейтрализации потенциально возможных негативных воздействий.

В данном случае на помощь придет именно модель импульса линии передачи, которая позволяет получить ряд важных характеристик без риска повреждения испытываемого устройства. Технология TLP основана на заряде длинного, свободного кабеля до предельно определенного уровня напряжения и его разряде на испытываемое устройство. Разряд кабеля эмулирует событие электростатического разряда, а реакция устройства может контролироваться рефлектометром как функция времени, через отражение им-

пульса. Одним из основных преимуществ применения TLP-модели при исследовании устройств на выполнение требований в части ЭМС является возможность получения вольт-амперных характеристик защитных элементов [1].

Хотя мы и надеемся, что уровень воздействующего импульса будет известен на основе использования модели человеческого тела (HBM) или более удобной, не повреждающей устройство модели импульса линии передачи (TLP), зачастую это бывает далеко не так и ведет к определенным компромиссам. Если вероятное воздействие заранее точно неизвестно и не может быть измерено, то в этом случае следует выполнить его разумную аналитическую оценку, скоррелировав ряд факторов и проведя анализ рисков.

### Символьная скорость

Второй проблемой, которую нужно учитывать для правильного выбора рассматриваемых защитных элементов для защиты интерфейсов в конкретной цифровой системе, является символьная скорость, то есть скорость передачи данных, измеряемая в символах с секунду, или бодах. Она обязательно должна быть известна, поскольку не всегда совпадает с привычной битовой скоростью. Для сложных технологий модуляции количество битов на символ может быть намного больше единицы. А в некоторых простых решениях модуляции количество битов на символ может быть меньше единицы. Как правило, полоса пропускания канала связи, требуемая для цифрового сигнала, составляет от половины символьной скорости до ее полного значения. Например, если для цифрового протокола нужна символьная скорость символов  $5 \times 10^9$  символов/с, тогда в зависимости от шума канала и ряда других факторов аналоговая ширина полосы составляет 2,5–5 ГГц [1].

### Системная защита: общий уровень требований

Требования к защите на уровне системы должны быть известны и понятны. Существует огромная разница между зарядом, накопленным на теле человека, который ходит по ковру со смартфоном в руках, и воздушным кабелем 10-Гбит Ethernet с наведенным на нем напряжением электромагнитного импульса от близкого удара молнии. Поэтому исходя из различий конкретного

оборудования для всех вероятных условий его эксплуатации и связанных с ними электростатических разрядов и угроз перенапряжения в результате внешнего воздействия разработаны стандарты [3, 4], которые облегчают задачу выбора соответствующего защитного устройства или схемы защиты. Такие стандарты и требования должны быть четко детерминированы еще до начала НИОКР по конкретному оборудованию и использоваться вместе со спецификациями защитных устройств. Все это в целом необходимо для определения достаточности организации защиты в первую очередь на системном уровне данного оборудования, предназначенного для использования в определенных условиях окружающей среды.

### Требования на уровне устройства

#### Выбор оптимальной технологии

Если обратиться к приведенной таблице, то можно увидеть, что для низких уровней напряжения выбор ограничен варисторами и полупроводниковыми диодами, например TVS-диодами. Если рассматривать первый вариант, который используется и рекомендуется для целого ряда приложений [5], то следует обратить внимание на два важных фактора. Для того чтобы их понять и оценить, кратко рассмотрим, что представляют собой современные многослойные варисторы (Multilayer varistor, MLV).

MLV изготавливаются путем спекания керамики, которая представляет собой структуру из токопроводящих зерен окиси цинка (ZnO), окруженных электрически изолированными барьерами, что и позволяет создать характерную для варисторов вольт-амперную характеристику (ВАХ). MLV изготавливаются смешиванием специально подготовленного керамического порошка с органическим связующим веществом, литьем полученной суспензии и формированием с максимальной высокой точностью тонких слоев. Далее следует осаждение металла и формирование на керамических слоях токопроводящих электродов. Затем слои складываются в пакеты с образованием многослойной структуры с необходимым числом слоев. Металлические электроды расположены так, что их окончания последовательно чередуются от одного конца слоя варистора к другому. После цикла спекания/обжига устройство становится монолитным блоком и благодаря своей структуре и свойствам обеспечивает равномерное рассеивание энергии в небольшом объеме. Количество последовательных точек контакта между электродами варистора определяет пробивное напряжение самого устройства. Для высоковольтных приложений, таких как, например, защита от бросков наведенного напряжения, используемая на линии питания напряжения переменного тока, требуется относительно большое число возможных последовательных точек контакта токопроводящих

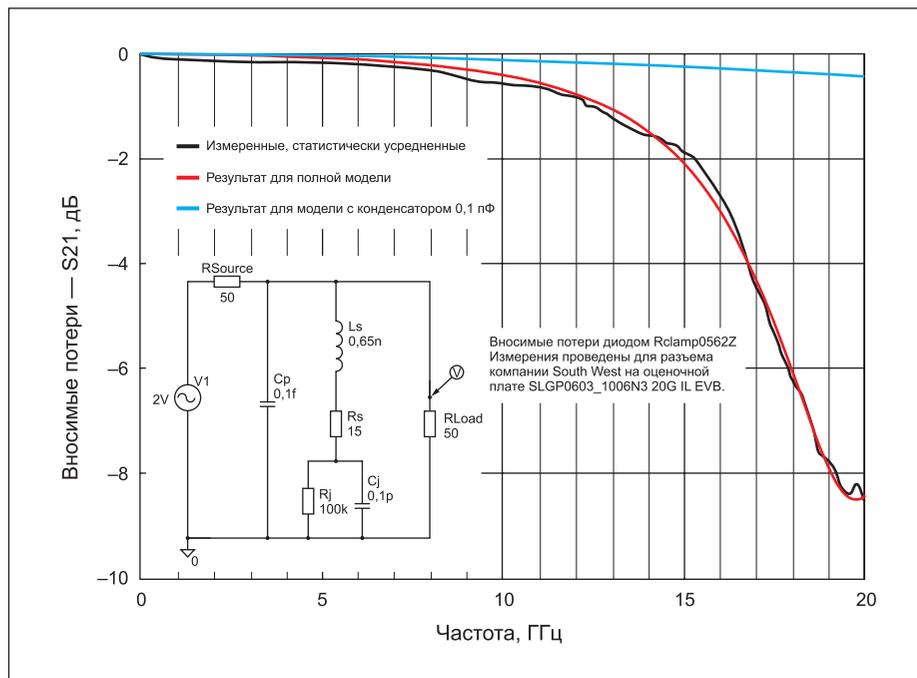


Рис. 3. Сравнения в части вносимых потерь: упрощенная модель с учетом лишь емкости защитного элемента, полная модель и реальное устройство

зерен. В отличие от них приложения с использованием низких рабочих напряжений для установления пробивного напряжения требуют цепочку, состоящую лишь из нескольких токопроводящих зерен окиси цинка. И вот здесь, как говорится, зарыта собака. Для малых напряжений срабатывания выполнить такие элементы чрезвычайно сложно, особенно если учитывать требуемые при этом допуски на напряжение срабатывания, напряжение удержания (о важности учета которого мы поговорим далее) и габаритные размеры. Вот почему в данном случае предпочтительными элементами становятся полупроводниковые устройства, свободные от перечисленных выше недостатков или позволяющие нейтрализовать их, причем немаловажную роль здесь играет еще один фактор — вносимые потери.

#### Вносимые потери

Как известно, любое устройство, добавленное в канал связи, приведет к дополнительным потерям сигнала в этом канале. Такие потери вызваны паразитными характеристиками добавленного в канал передачи сигнала устройства. Зачастую здесь рассматривается и учитывается только емкость добавленного устройства, но заметное влияние оказывает и его паразитная индуктивность, которую при высоких скоростях передачи уже нельзя сбрасывать со счетов. Это связано с тем, что для подобных устройств применяются элементы защиты с малой собственной емкостью и на первый план выходит уже их паразитная индуктивность. На рис. 3 дано сравнение между реальным измерением ограничивающего броски напряжения пер-

спективного TVS-диода Rclamp0562Z, разработанного компанией Semtech для защиты высокоскоростных линий (data sheet появится в доступе этой осенью), с его полной моделью, а также с моделью, в которой как основа использовалась только емкость его полупроводникового перехода. Как можно видеть, разница между поведением реального устройства и его упрощенной емкостной модели значительно превышает приемлемые в общем случае отклонения в 1 дБ.

#### Преимущества кремниевых TVS-диодов

Уже много лет кремниевые TVS-диоды играют роль защитных устройств, однако часто их путают (а это в корне не верно) со стабилитронами, которые также используются как защитные элементы. Что же такое TVS-диоды?

TVS-диоды представляют собой твердотельные устройства, выполненные на базе PN-перехода сложной структуры [7], и специально разработаны для защиты чувствительных полупроводников от разрушающего воздействия переходных процессов и наведенных напряжений (рис. 4). Электрические характеристики устройства определяются такими факторами, как площадь перехода, концентрация легирующих добавок и удельное сопротивление подложки. Уровень поглощаемой мощности и импульс тока TVS-диода пропорциональны площади его перехода, а потому для поглощения высоких переходных токов TVS-диоды сознательно сконструированы с большими поперечными сечениями. Так что хотя ВАХ TVS-диода (рис. 5) имеет схожесть с характеристикой стабилитрона, первые специально созданы

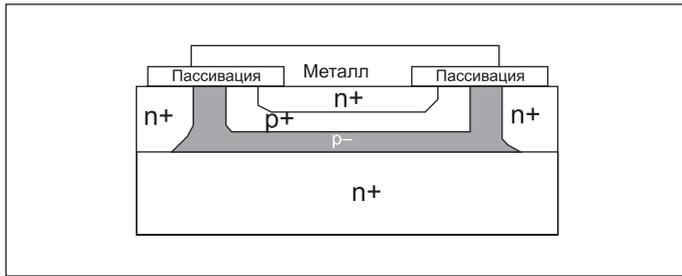


Рис. 4. Структура низковольтного TVS-диода

с учетом их предназначения — подавление бросков напряжения — и имеют неярко выраженный участок с отрицательным сопротивлением [7]. Последнее не всегда упоминается в технической литературе, а об особенностях поведения и использования защитных приборов с такой ВАХ речь пойдет далее. В отличие от TVS-диодов стабилизаторы спроектированы и предназначены для стабилизации напряжения, а не для поглощения относительно больших порций энергии и не имеют участка ВАХ с отрицательным сопротивлением.

TVS-диоды служат в качестве элементов параллельной защиты. В нормальных рабочих условиях диод TVS создает высокий импеданс защищенной цепи. В идеальном случае устройство ведет себя как разомкнутая цепь, хотя здесь присутствует небольшой ток утечки. Когда нормальное рабочее напряжение защищаемого контура превышено, лавинный процесс полупроводникового перехода TVS-диода обеспечивает низкоомный путь для тока переходного процесса. В результате опасное напряжение ограничивается и порождаемый им ток отводится от чувствительных к таким воздействиям компонентов и шунтируется TVS-диодом. После прекращения перегрузки устройство снова переходит в состояние высокого импеданса. TVS-диоды разработаны таким образом, что их характеристики не будут ухудшаться до тех пор, пока устройство действует в заданных их конструкцией пределах.

Одной из основных характеристик TVS-диода является время его реакции. Лавинный пробой теоретически происходит в пределах пикосекунд, так что этот параметр очень сложно измерить. Поэтому TVS-диоды характеризуют как реагирующие «почти мгновенно». Тем не менее необходимо учитывать, что время отклика TVS-диода зависит и от индуктивности выводов и проводников печатной платы, о чем также пойдет речь ниже.

Обычные TVS-диоды доступны в широком диапазоне рабочих напряжений. Традиционные напряжения для дискретных устройств варьируются в пределах 5–440 В. Однако недавние нововведения в технологии TVS позволили получить такие устройства, которые работают в диапазоне напряжений от 2,8 и 3,3 В, как, например, серия SLV компании Semtech. Кроме этой компании, низковольтные устройства, предназначенные для защиты высокоскоростных интерфейсов, предлагают компании Toshiba (3,3 и 5 В) и Littelfuse (5 В).

Быстрое время отклика диодов и низкое напряжение ограничения делают TVS-диоды практически идеальными для использования в качестве защиты для полупроводников и других чувствительных компонентов на уровне платы. Их области применения распространяются на интерфейсы и сигнальные линии, микропроцессоры и MOS-память, линии электропитания переменного тока и телекоммуникационное оборудование.

Однако зачастую мы имеем дело не с одним, а с несколькими TVS-диодами в сборке и, кроме того, в ней содержится от одного до нескольких диодов, отводящих (уводящих) импульс перенапряжения. Емкость типовых одиночных TVS-устройств обычного исполнения может составлять сотни и более пикофард. Здесь нет какой-либо типовой величины, как и обычных возможностей для ее уменьшения. Хотя современные технологии позволяют ограничить типовое значение емкости TVS-диода до 0,2 пФ, что способствует минимизации искажения сигналов высокоскоростных интерфейсов.

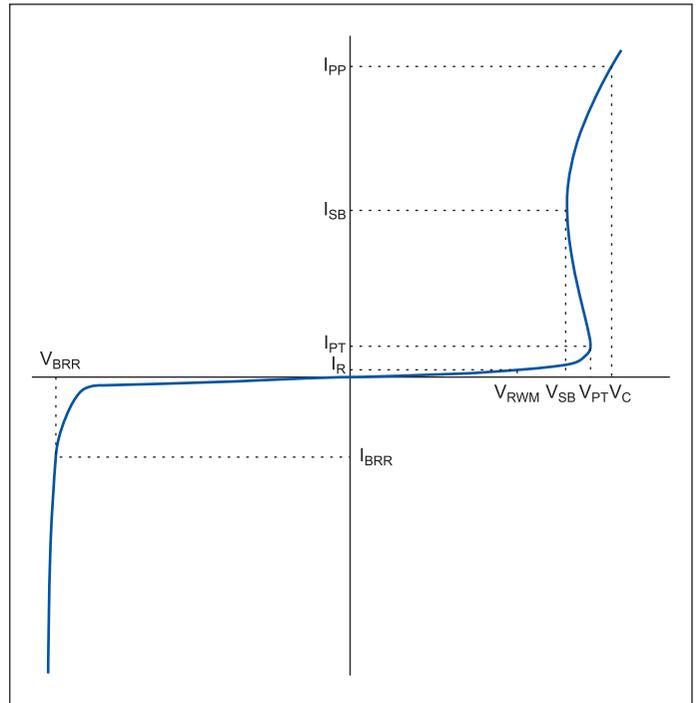


Рис. 5. ВАХ TVS-диода

TLP-характеристика устройства защиты от бросков напряжения, возникающих вследствие переходных процессов и внешних воздействий, должна отличаться очень малым током утечки при максимальном напряжении порта ( $V_{RWM}$ ). При этом уровень ограничения напряжения для защиты в соответствии с требованиями человека-машинной модели (НММ) должен быть ниже, чем выбранный вариант внутренней защиты микросхемы, выполненный, как правило, по требованиям модели человеческого тела (НВМ). Интересующие нас уровни напряжения, обеспечивающие отказоустойчивость, показаны на рис. 6. Однако с увеличением частоты и уменьшением необходимого порога ограничения, характерного для современных микросхем, удовлетворить требования сразу обоих критериев стало крайне сложно, особенно если учитывать потери, вносимые элементами защиты, их размеры и стоимость.

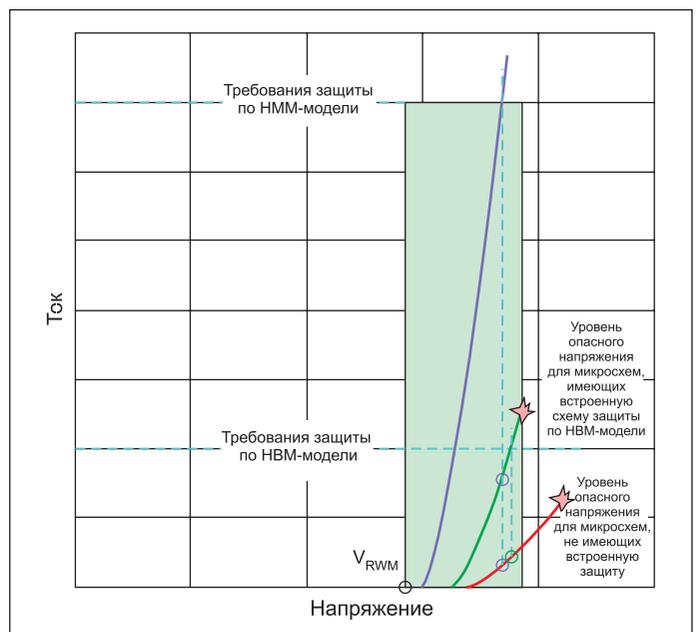


Рис. 6. Защита путем ограничения напряжения с использованием TVS-диода

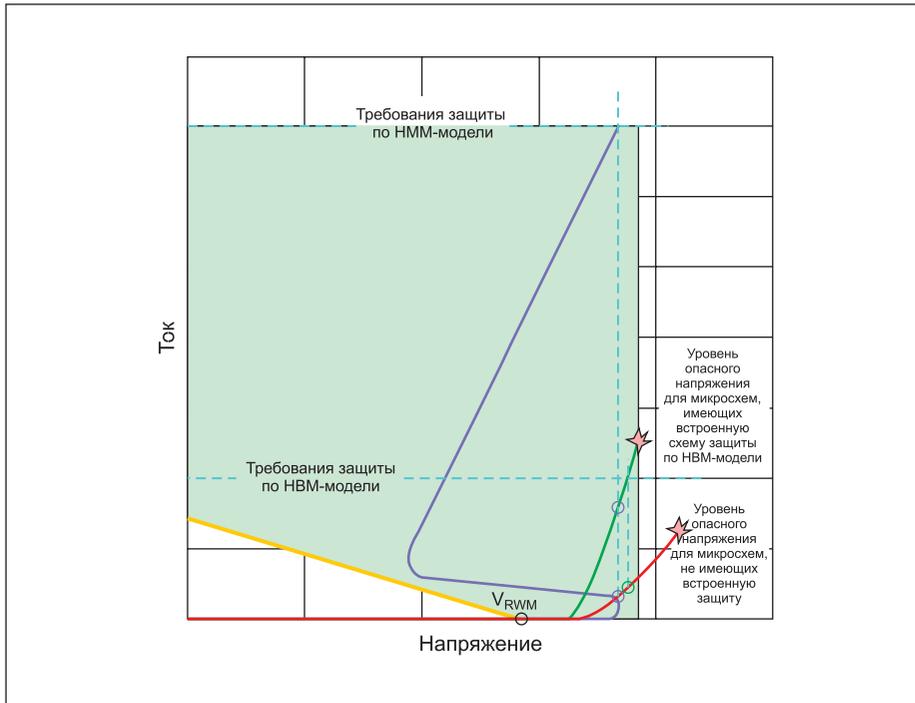


Рис. 7. Защита с использованием Snap-Back-ограничителя с петлевой характеристикой

### Использование устройств с петлевой вольт-амперной характеристикой

Устройства с двумя пороговыми напряжениями — напряжением срабатывания и напряжением фиксации, или удержания. В англоязычной широко используемой терминологии такие устройства называются Snap-Back Device, а сам режим — Snap-Back. Участок вольт-амперной характеристики (ВАХ) с отрицательным дифференциальным сопротивлением неустойчив, поэтому устройство переходит в иное устойчивое состояние с меньшим напряжением удержания и начинает работать в низкоомной Snap-Back-области. После смещения в низкоомную область ВАХ транзистор начинает проводить большую часть тока, не допуская его в защищаемое устройство. Примером устройства с неярко выраженным Snap-Back-эффектом может быть специально разработанный TVS-диод, о чем говорилось выше, и биполярный транзистор с расширенной зоной пробоя коллектор-эмиттер. Из положительных сторон таких устройств следует отметить, что на характерных для них уровнях защиты, которые находятся в рабочем диапазоне 1,5–4 В, они обладают низкой емкостью, что позволяет использовать их для защиты высокоскоростных интерфейсов.

Устройства с более выраженным Snap-Back обычно представляют собой 4-слойную структуру управляемого кремниевого диода — PNP SCR. Описанные структуры могут использоваться и в интегральном исполнении, но для рассматриваемого нами внешнего устройства защиты доступно го-

раздо большее «окно» (рис. 7), что имеет ряд положительных моментов, но и не свободно от недостатков.

### Предотвращение нежелательной фиксации элементов защиты после срабатывания

Основная проблема при использовании элементов защиты с эффектом Snap-Back — предотвращение их нежелательной фиксации после срабатывания, препятствующей возврату элементов в исходное непроводящее состояние, называемое защелкиванием. Такое нежелательное явление может произойти, если защитное устройство входит

в зону удержания, а при этом в защищаемую им линию поступает ток, достаточный для удержания устройства во включенном, токопроводящем состоянии. Как правило, это происходит из-за наличия подтягивающих резисторов на сигнальной линии.

На рис. 8 приведена иллюстрация данной проблемы. Красная линия — это нагрузочная кривая резистора R1 относительно точки  $V_A$ , то есть напряжение в точке, где подключены резистор и защитное устройство. Зеленая линия — кривая, описывающая поведение защитного устройства. Здесь имеются три точки, где эти графики совпадают: первая точка лежит чуть ниже 5 В до включения защитного устройства и является нормальной максимальной рабочей точкой; вторая точка находится около 2,8 В и является неустойчивой, поскольку полное сопротивление защитного устройства отрицательно; конечная точка, находящаяся чуть ниже 1 В, представляет собой точку защелки.

Когда в результате переходного процесса или внешней наводки происходит недопустимое повышение напряжения, через защитное устройство будет протекать относительно большой ток, при завершении воздействия ток через защитное устройство падает до тех пор, пока не достигнет точки защелки и зафиксируется на этом уровне. Следствием будет фиксация напряжения на входе защищаемого устройства, и оно не станет реагировать на нормальные сигналы. Единственный способ выйти из состояния защелки — кратковременно понизить напряжение в точке  $V_A$  или выключить и повторно включить питание устройства или системы защиты, что недопустимо.

Однако нежелательного эффекта защелки можно избежать при правильном проектировании системы защиты. Все, что нужно сделать, — не допустить формирования второй и третьей точек пересечения.

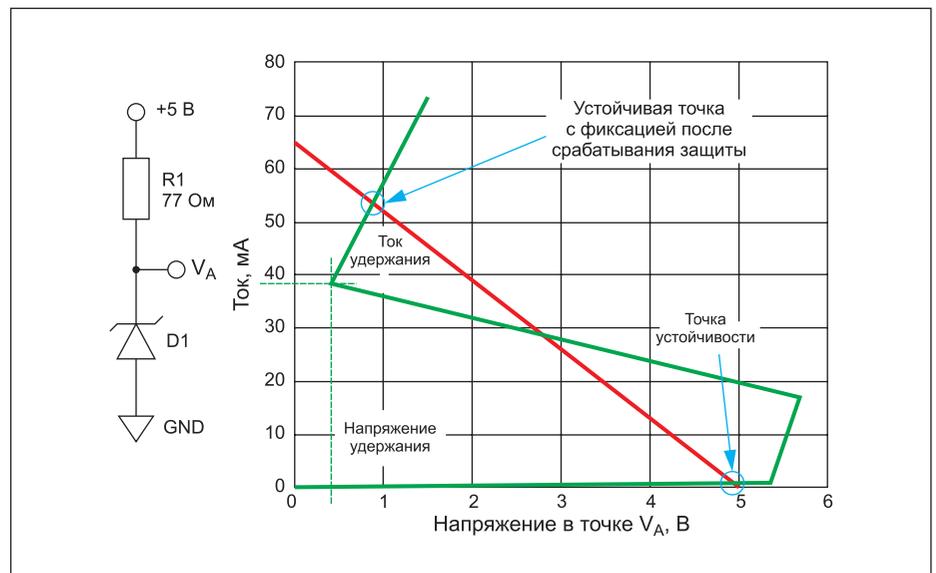


Рис. 8. Иллюстрация режима Snap-Back с фиксацией

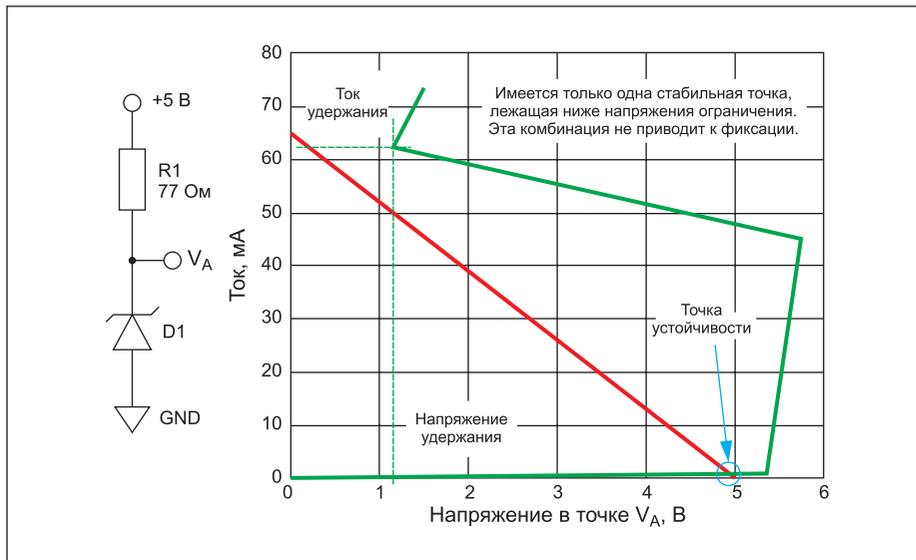


Рис. 9. Иллюстрация режима Snap-Back без нежелательной фиксации

Это достигается выбором либо подтягивающего резистора, либо устройства защиты с подходящим током и напряжением удержания. Пример такого решения приведен на рис. 9.

Впрочем, здесь необходимо учитывать, что чем больше разница между напряжением ограничения и рабочим напряжением — тем хуже. Например, если рабочее напряжение защитного элемента равно 5 В, то напряжение ограничения может превысить 9 В, что недопустимо для большинства чувствительных микросхем. Здесь, как говорится, нужен глаз да глаз.

## Дополнительные условия

### Разводка печатной платы

Если разводка печатной платы не оптимальна, то даже самое лучшее в мире защитное устройство не сможет выполнить свою работу должным образом. Рекомендации

по правильной компоновке печатных плат предусматривают следующее:

1. Защита на входе системы, то есть, как правило, защитное устройство должно быть размещено максимально близко к разъему, на который может воздействовать переходный процесс.
2. Для того чтобы избежать бросков напряжения из-за влияния паразитной индуктивности, необходимо использовать четырехпроводное подключение, так называемое подключение по схеме Кельвина (рис. 10).
3. Минимизация любых соединений. Следует избегать прохождения каких-либо не имеющих отношения к защите проводников вблизи защитного элемента. Необходимо предельно аккуратно организовать заземление, что требуется для правильного обеспечения пути возвратных токов. Максимально сократить все петли,

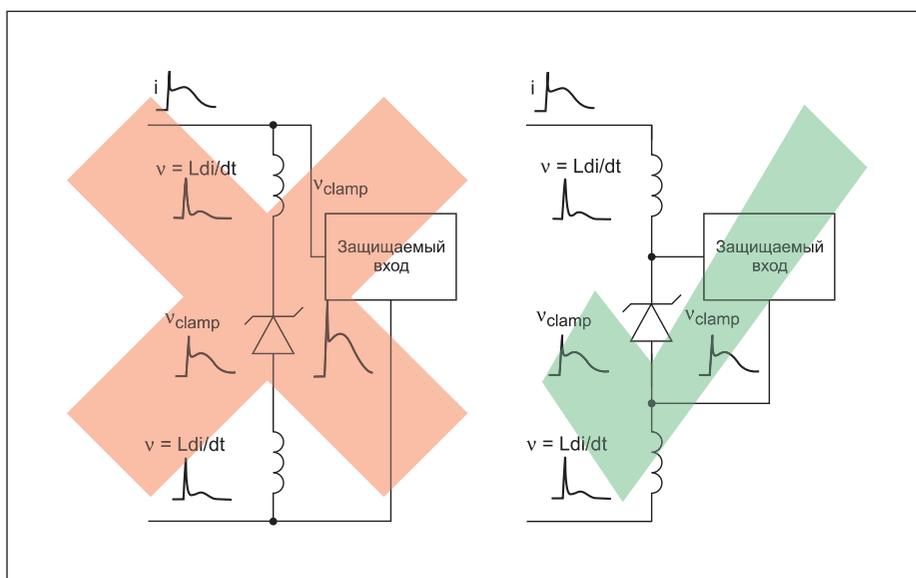


Рис. 10. Минимизация влияния паразитной индуктивности

чтобы свести к минимуму паразитные излучения и индуктивности, что полезно в любом случае, а не только для организации защиты входа высокоскоростного интерфейса.

### Особенности использования многоканальных защитных устройств

В последнее время все более популярными становятся элементы защиты в виде многоканальных устройств, размещенных в одном миниатюрном корпусе, которые обычно адаптируются для нужд конкретного приложения (рис. 11). Хотя эти корпусированные устройства превышают по габаритам однокомпонентные решения и обычно отличаются более высокой индуктивностью, чем эквивалентное им дискретное решение, но они выгодны с экономической точки зрения. Поскольку правильно выбранный защитный элемент в штатном режиме не оказывает заметного воздействия на линии связи, то при включении его через диодную развязку один TVS-диод можно использовать для независимой защиты сразу нескольких линий. Развязывающие диоды, отводящие импульс перенапряжения, дополнительно применяются для уменьшения влияния емкости защитного элемента, а в мостовой конфигурации позволяют однонаправленному TVS-диоду симметрично ограничивать двухполярные выбросы напряжения.

Но все же, если по тем или иным причинам принято решение использовать такой многоканальный элемент, надо обязательно убедиться, что внесенная дополнительная индуктивность не окажется пагубной для предполагаемого приложения. Здесь будут полезны кривые вносимых потерь, приведенные в техническом описании такого устройства защиты. Нужно сделать все, чтобы при включении в цепь элементов защиты в сигнальных линиях не возникали отражения и поддерживалась целостность сигнала.

## Заключение

Используя комплексный подход, относительно просто выбрать оптимальное защитное устройство для приложения. В большинстве случаев рассматриваемые высокоскоростные интерфейсы современных

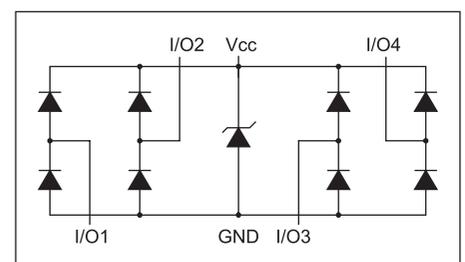


Рис. 11. Примеры четырехканального устройства на базе общего TVS-диода

приложений достаточно хорошо известны, и производители устройств защиты в состоянии предложить множество вариантов, уже адаптированных под конкретные интерфейсы. Но сначала специалистам необходимо использовать свои знания о системе и определить подробные требования к защите. Это будет хорошей отправной точкой для выбора оптимального устройства защиты для конкретного приложения. ■

## Литература

1. Rose Dave R. Choosing and Using Silicon Protection Devices. [www.interferencetechnology.com/choosing-using-silicon-protection-devices/](http://www.interferencetechnology.com/choosing-using-silicon-protection-devices/)
2. Гавриков В. Полупроводниковая защита: обзор основных серий TVS-диодов от Littelfuse // Новости электроники. 2014. № 12.
3. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
4. Петит Г. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения. Краткий обзор // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
5. Leath C. Optimizing IoT device performance 2017 Power Systems Corporation [www.powersystemdesign.com/articles/optimizing-iot-device-performance/40/11336](http://www.powersystemdesign.com/articles/optimizing-iot-device-performance/40/11336)
6. Гавриков В. USB, HDMI, Ethernet: низкоемкостные ESD-сборки для защиты высокоскоростных интерфейсов // Новости электроники. 2016. № 6.
7. EPD Transient Voltage Suppressors for Low Voltage. Application Note SI96-06, Revision 11/2001. Semtech Corporation. [www.semtech.com/images/datasheet/si96-06.pdf](http://www.semtech.com/images/datasheet/si96-06.pdf)