

Оценка стойкости диодов Wolfspeed SiC Шоттки к dV/dt

с помощью генератора импульсов на основе лавинного транзистора

Перевод:
Евгений Карташов

Андрей Лебедев

cree@macrogroup.ru

Появление более 10 лет назад коммерческих диодов Шоттки на основе карбида кремния (SiC Шоттки) позволило значительно улучшить характеристики таких устройств, как корректоры коэффициента мощности (PFC) и инверторы приводов. Этого удалось достичь благодаря отсутствию у SiC-приборов заряда обратного восстановления не основных носителей и соответствующему снижению уровня коммутационных потерь, свойственных традиционным PiN-диодам. Широкое распространение SiC-диодов Шоттки было несколько затруднено из-за проблем с надежностью, связанных с ограничениями по параметру dV/dt . В частности, приборы с низкой стойкостью к dV/dt оказались более подверженными отказам при воздействии больших пусковых токов.

Первоначальные исследования этой проблемы в отношении SiC-диодов Шоттки с напряжением 600 В выявили, что верхний предел dV/dt у них составляет 55–60 В/нс. Поскольку в этих опытах участвовали SiC-диоды, производимые не компанией Wolfspeed, то последующие исследования проводили специалисты Wolfspeed на собственных компонентах [1, 2]. Их анализ показал, что диоды Wolfspeed могут выдерживать скорость включения

75 В/нс и выключения 100 В/нс в течение более 100 тыс. циклов без разрушения. Конечным результатом этих и других исследований явилось требование для производителей элементной базы указывать стойкость к dV/dt в качестве критерия надежности SiC-диодов Шоттки.

В данной работе дано описание скоростного высоковольтного генератора импульсов, используемого для оценки стойкости карбидокремниевых диодов компании Wolfspeed к dV/dt . Поскольку диоды Wolfspeed не выходили из строя во время предварительного тестирования с использованием типовых параметров, для определения их предельных свойств необходимо разработать более быстродействующий генератор импульсов. Он должен быть в состоянии подвергать тестируемые приборы гораздо более высоким значениям dV/dt , чем наблюдаются при нормальной эксплуатации силовых преобразователей. В оригинальных экспериментах, выполняемых Wolfspeed, время переключения составляет примерно 5 нс. Генератор со временем переключения, приближающимся к 1 нс, может быть изготовлен с использованием доступных в настоящее время лавинных транзисторов и транзисторов Wolfspeed C2M SiC MOSFET. Разработка схемы и конструкции, а также измерение характеристик высокоскоростного генератора импульсов будут описаны вместе с оценкой стойкости к dV/dt SiC-диодов Шоттки с напряжением 600 и 1200 В.

Условия эксплуатации

Устойчивость к воздействию dV/dt является одним из требований, устанавливающих ограничение скорости переключения в режиме «жесткой» коммутации. В этом можно убедиться на примере корректора коэффициента мощности (PFC, рис. 1), где применение SiC-приборов становится все более популярным. Предельная скорость переключения MOSFET M1 ограничена максимальным значением dV/dt бустерного диода D1.

В данном примере потери включения M1 исследуются для двух вариантов диодов с лимитом

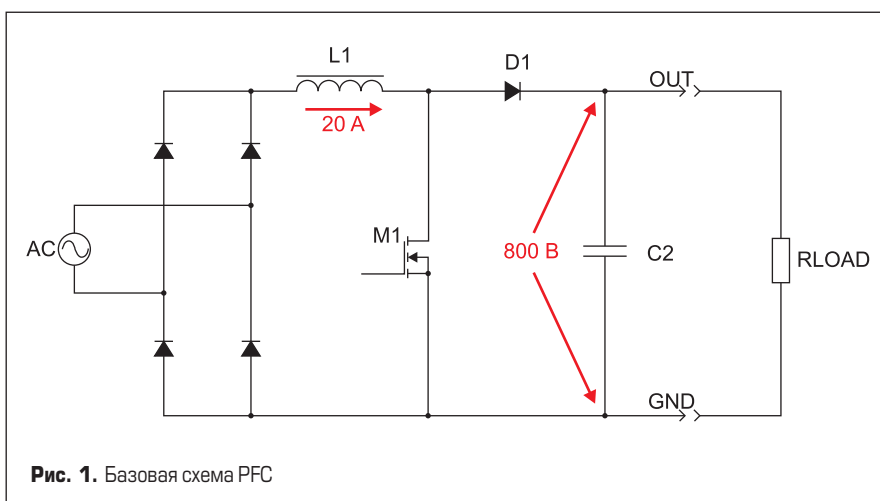


Рис. 1. Базовая схема PFC

dV/dt на уровне 50 и 100 В/нс. Первый этап анализа предполагает использование идеальных компонентов (без учета паразитных параметров) и идеального линейного режима коммутации. Рассмотрим следующее исходное состояние: транзистор M1 выключен, ток 20 А протекает через дроссель L1, что приводит к открыванию диода D1 и прохождению тока в нагрузку RLOAD. Напряжение на конденсаторе C2 составляет 800 В. Когда MOSFET M1 включается, D1 мгновенно оказывается обратно смещенным, а относящееся к нему ограничение dV/dt (50 В/нс или 100 В/нс) задает максимальную скорость нарастания напряжения «сток-исток» (V_{DS}) dV/dt силового транзистора.

Эпоры напряжения «сток-исток» V_{DS} и тока стока I_D MOSFET показаны на рис. 2 для двух значений dV/dt (этот параметр имеет отрицательное значение, поскольку напряжение падает). Предполагается, что время спада тока одинаково для обоих случаев. Мгновенная мощность силового транзистора ($p = I \times V$) и энергия переключения ($E = \int P \times dt$) рассчитаны на основе полученных данных, результаты представлены на рис. 3.

Пиковая мгновенная мощность равна для обоих рассматриваемых случаев, она также одинакова в ходе нарастания тока в процессе коммутации ($t = 5-10$ нс). Однако время, которое требуется для того, чтобы мощность упала до нулевого уровня для случая 50 В/нс, оказывается в два раза больше. Энергия переключения E_{sw} при нарастании тока (от 5 до 10 нс) одинакова для обоих случаев. Основное отличие величины E_{sw} наблюдается во время спада напряжения (>10 нс). Энергия переключения для варианта 50 В/нс в этом же временном интервале в два раза выше, чем при $dV/dt = 100$ В/нс.

Очевидно, что такая разница оказывает сильное влияние на общее значение энергии динамических потерь. Величина E_{sw_tot} для случая 50 В/нс составляет 168 мкДж по сравнению с 104 мкДж, т. е. на 61,5% больше, чем при $dV/dt = 100$ В/нс. Отметим, что коммутационные потери определяются как произведение частоты на энергию переключения. Существенная разница значений E_{sw} для этих двух случаев иллюстрирует необходимость обеспечения максимальной стойкости к dV/dt для минимизации коммутационных потерь, повышения эффективности системы и даже возможности работы на более высоких частотах.

Генератор импульсов с последовательно включенными лавинными транзисторами

Оценка стойкости к dV/dt требует формирования очень быстрых высоковольтных импульсов. Для этого используются разнообразные приборы, например генераторы на основе реле, увлажненных ртути [3], и лавинных транзисторов [4-12]. Ртутные реле исторически использовались для создания экстремально быстрых фронтов. К сожалению, для формирования высоковольтных импульсов, необходимых для данных исследований, требуется разработка реле специальной конструкции. Вторым широко используемым подходом связан с применением биполярного транзистора (BJT) в лавинном режиме. Это происходит, когда напряжение «коллектор-эмиттер» превышает предельное значение V_{CEO} и транзистор переходит в состояние вторичного пробоя.

При ограничении времени перехода транзистора в режим вторичного пробоя он может быть использован как очень быстрый высоковольтный ключ с низким уровнем джиттера. Этот способ подходит для тестирования стойкости мощных SiC-приборов к dV/dt , однако характеристики и надежность обычных биполярных транзисторов не гарантируют их продолжительную работу в таком режиме. Существуют так называемые лавинные BJT-приборы, специально разработанные для использования в состоянии вторичного пробоя. Генераторы на основе лавинных транзисторов широко используются для управления ячейками Поккельса, фотохронографами, лазерами и пр. Они являются отличным выбором и для настоящих исследований.

Для формирования высоковольтных импульсов лавинные транзисторы соединяются последовательно. Такая же схема была реализована и в данной работе. Характеристики генератора импульсов, показанного на рис. 4, оценивались на активной

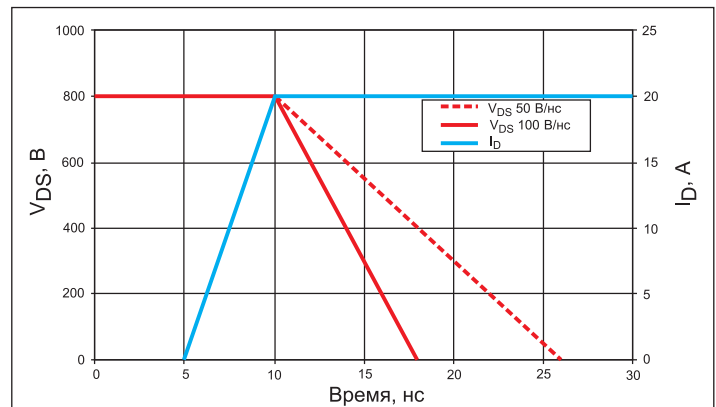


Рис. 2. «Идеальная» эпора включения MOSFET при ограничении dV/dt на уровне 50 и 100 В/нс

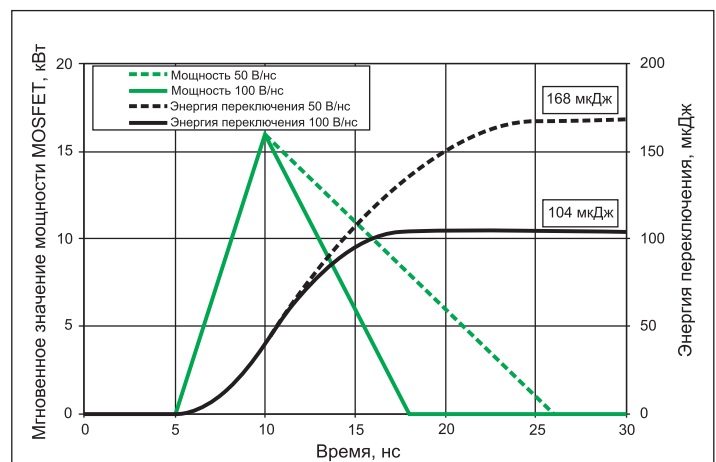


Рис. 3. Мгновенная рассеиваемая мощность и энергия включения при dV/dt 50 и 100 В/нс

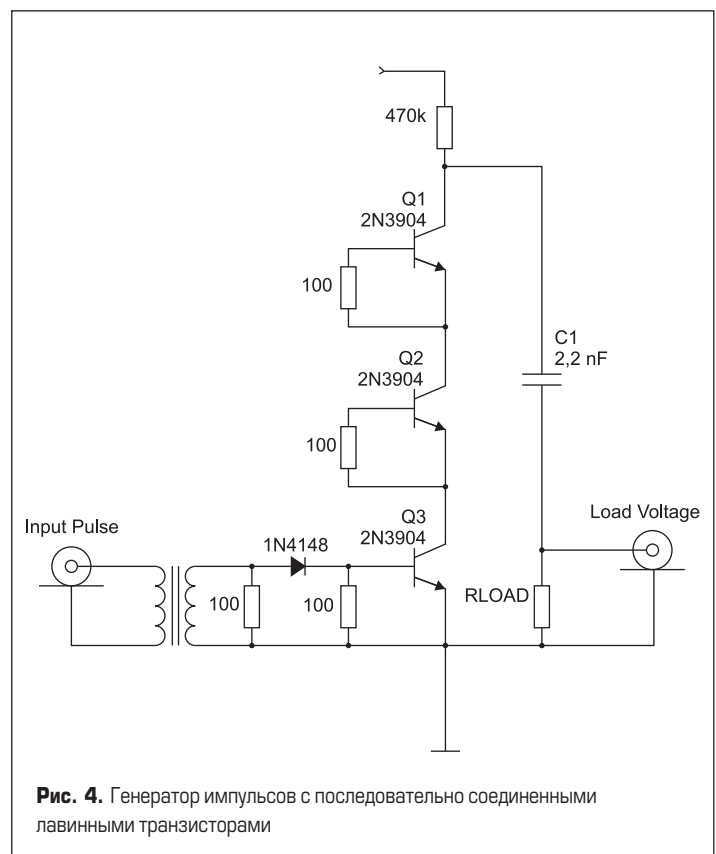
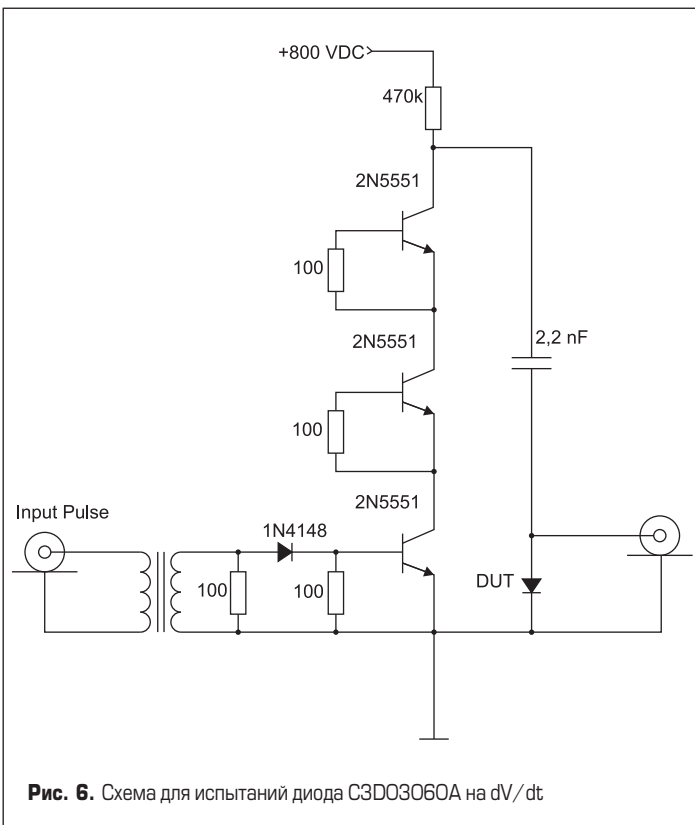
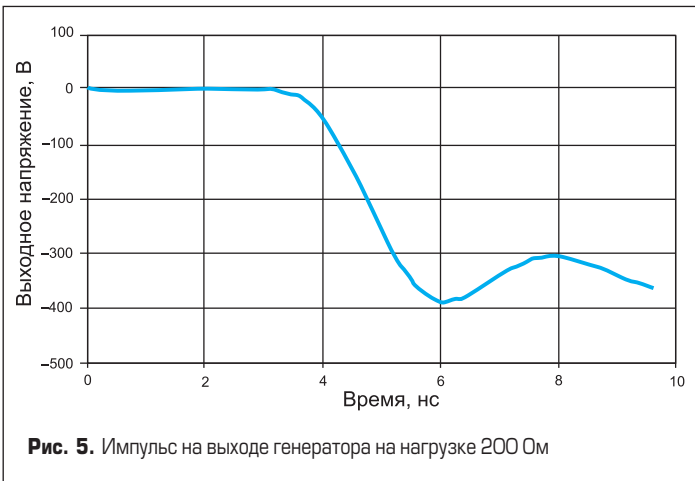
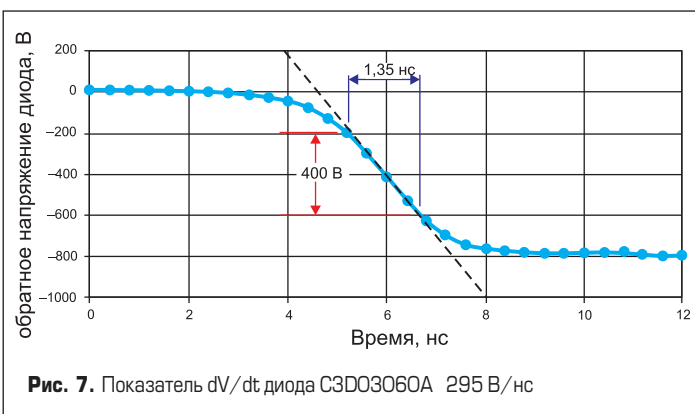


Рис. 4. Генератор импульсов с последовательно соединенными лавинными транзисторами



нагрузке 200 Ом. Напряжения измерялись с помощью высоковольтного пробника, подключенного непосредственно к разъему BNC, с адаптером, позволяющим устранить индуктивность заземляющего провода. Эпюры были получены с помощью цифрового осциллографа с частотой дискретизации 350 МГц (время нарастания — 1 нс) и пробника с частотой 400 МГц, 100:1 (время нарастания — 900 пс). Общее время нарастания сигнала, обуслов-



ленное частотными характеристиками осциллографа и пробника, составляет 1,35 нс.

В схеме использованы три последовательных транзистора с максимальным значением $V_{CEO} = 40$ В. В установившемся режиме работы входное напряжение 400 В делится поровну, в результате чего напряжение «коллектор-эмиттер» V_{CE} на каждом транзисторе достигает 133 В, что находится очень близко к лавинному состоянию. Схема работает следующим образом: на вход подается импульс управления, что вызывает лавинный пробой транзистора Q3. Далее вследствие «эффекта домино» происходит развитие лавинного процесса в двух остальных транзисторах. После этого конденсатор C1, подключенный к верхнему терминалу схемы, разряжается в течение менее чем 2 нс. Результатом описанного процесса является формирование отрицательного импульса с высоким значением dV/dt на нагрузочном резисторе RLOAD. Форма выходного импульса со временем нарастания 1,35 нс представлена на рис. 5.

Тестирование стойкости диода SiC Шоттки к dV/dt

Наличие аттестованного высокоскоростного генератора импульсов позволяет протестировать стойкость к dV/dt диодов Шоттки Wolfspeed C3D03060A (600 В, 3 А). Цель испытаний состояла в использовании новой измерительной установки для подачи очень быстрого импульса на диод C3D03060A и проверки возможного уровня ограничения по dV/dt . Подобная процедура позволяет провести более надежную оценку серии диодов C3D, чем это было сделано в предыдущих исследованиях. Лавинный генератор импульсов создан на основе последовательного соединения кремниевых биполярных транзисторов 2N5551 ($V_{CEO,max} = 160$ В) для достижения более высоких значений переходных напряжений. В ходе проверки нагрузочный тестовый резистор 200 Ом (RLOAD) был заменен на испытуемый диод DUT (Device Under Test), а амплитуда испытательного импульса была установлена на уровне 800 В. Схема установки показана на рис. 6, результаты теста — на рис. 7.

Базовое значение dV/dt для диода с напряжением 600 В составляет 50 В/нс [13]. Это примерно в три раза выше, чем показали предыдущие измерения, выполненные Wolfspeed. Как и ранее, в ходе этих испытаний не произошло ни одного отказа. Полученные данные наглядно демонстрируют стойкость диода C3D03060A и всего семейства C3D к dV/dt . Для подтверждения результатов испытаний необходимо провести дальнейшие тесты, однако проведенные измерения уже показали, что диоды Wolfspeed Шоттки C3D способны выдерживать более 300 В/нс.

Следующим логическим шагом является проведение аналогичных испытаний диодов Wolfspeed семейства C4D с рабочим напряжением 1200 В, чтобы подтвердить их стойкость к dV/dt . В качестве испытуемого прибора (DUT) для этих тестов был выбран диод C4D10120A (1200 В, 10 А). Схема испытательной установки показана на рис. 8. Тестовое напряжение V_{DD} в ней установлено на уровне 1000 В. Следует отметить, что схема генератора импульсов должна быть изменена, для того чтобы учесть новую величину V_{DD} , а также тот факт, что номинальное напряжение $V_{RRM} = 1200$ В у диода C4D10120A вдвое больше, чем у C3D03060A.

Два кремниевых транзистора 2N5551 заменены на один Wolfspeed SiC MOSFET C2M0080120D. Он быстро включается с помощью импульса, подаваемого на оставшийся в схеме лавинный транзистор 2N5551. Открытие SiC MOSFET-ключа вызывает разряд подключенного к верхней клемме SMD-конденсатора на общий провод, в результате чего обратно смещенный импульс 1000 В прикладывается к испытуемому диоду DUT. Измерение напряжения проводилось с помощью низкоимпедансного резистивного делителя, чтобы минимизировать дребезг.

Как показано на рис. 9, измеренное обратное значение dV/dt составляет 490 В/нс. Это примерно в шесть раз выше типового значения 80 В/нс, приводимого для SiC JBS-диодов с напряжением 1200 В [15]. В ходе испытаний не было выявлено ни одного отказа. Полученные результаты наглядно демонстрируют стойкость к dV/dt JBS-диодов C4D10160A и дают четкое подтверждение надежности всего семейства C4D.

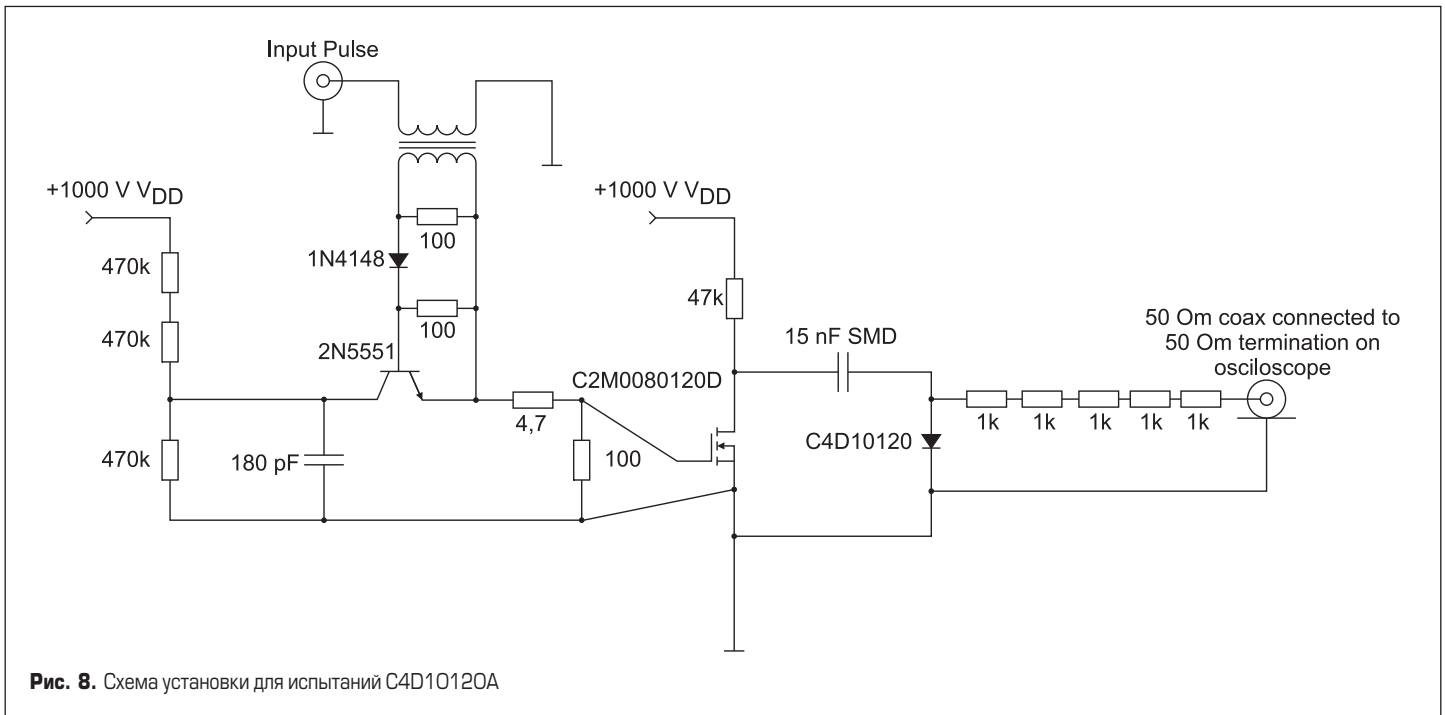


Рис. 8. Схема установки для испытаний C4D10120A

Заключение

Стойкость SiC-диодов Шоттки к воздействию dV/dt является проблемой для многих разработчиков. Цель данной работы состояла в создании высокоскоростного генератора импульсов, способного подвергнуть тестируемое устройство воздействию импульса с показателем dV/dt , значительно превышающим реальные значения, что необходимо для оценки надежности SiC-диодов Шоттки Wolfspeed семейств C3D и C4D. Диоды Wolfspeed продемонстрировали стойкость к dV/dt , в шесть раз превышающую общепромышленные показатели. Измеренные в ходе тестов значения dV/dt составили 295 и 490 В/нс соответственно. Важно отметить, что в ходе испытаний не произошло ни одного отказа, а значит, фактические возможности диодов Wolfspeed превышают измеренные значения. Во время написания статьи предельные показатели dV/dt для этих устройств остаются неизвестными.

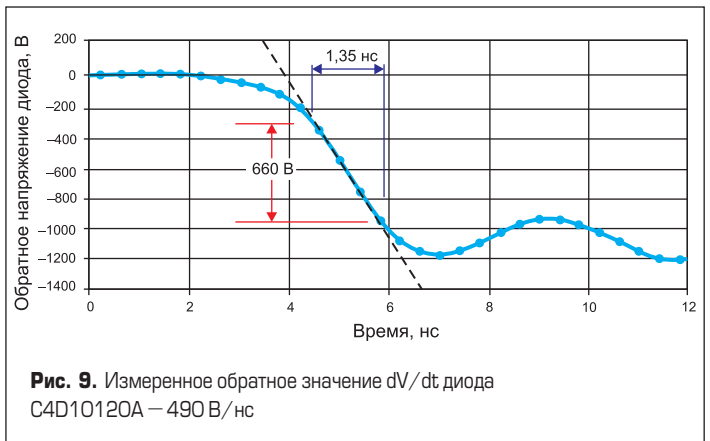


Рис. 9. Измеренное обратное значение dV/dt диода C4D10120A – 490 В/нс