

# Новые симметричные ограничители напряжения с повышенной допустимой импульсной мощностью и энергоемкостью

**А. Сурма, Ю. Локтаев, А. Ставцев, А. Черников**

Обсуждаются особенности конструкции и технологии изготовления кремниевых симметричных ограничителей напряжения (ОНС) с повышенной допустимой импульсной мощностью и энергоемкостью. Предложен усовершенствованный полупроводниковый элемент, который содержит скрытые  $n'$  - слои с уменьшенным удельным сопротивлением, локализованные в активной области полупроводникового элемента, там, где возможен полноценный двухсторонний теплоотвод. Методами компьютерного моделирования и экспериментально исследованы особенности характеристик ОНС в зависимости от расположения и других параметров скрытых  $n'$  - слоев. Показано, что новые приборы имеют малое динамическое сопротивление ВАХ, допустимую импульсную мощность рассеяния свыше 60 кВт на 1 см<sup>2</sup> активной площади и энергоемкость около 50 Дж на 1 см<sup>2</sup> активной площади.

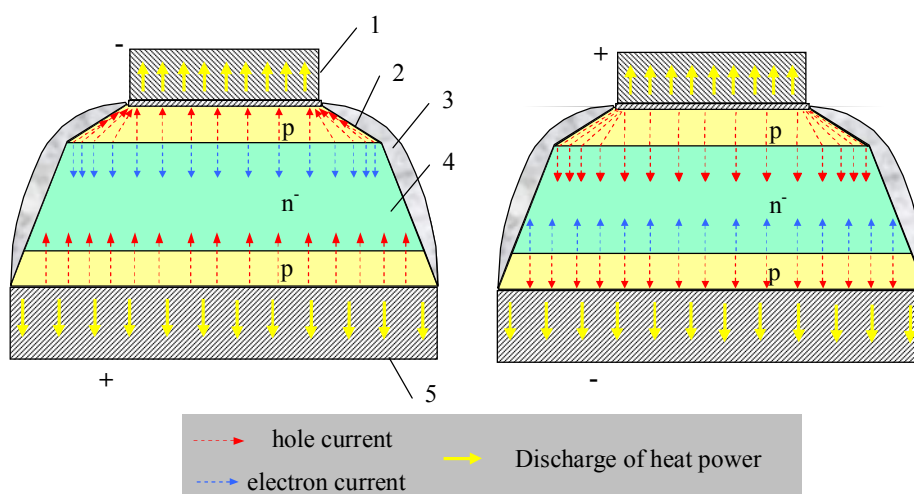


## Введение

Типичный элемент симметричного лавинного ограничителя напряжения «традиционной» конструкции изображен на рис. 1. Основой такого прибора является высоковольтный «симметричный» р-п-р транзистор со слаболегированной п-базой и двумя идентичными плавными р-п переходами. Высокие блокирующие напряжения р-п переходов на периферии элемента обеспечиваются специальным профилем краевой фаски, защищенной силиконовым компаундом. Приборы такой конструкции имеют низкую стоимость производства, однако могут обеспечить высокие значения пробивных напряжений (до нескольких тысяч вольт), симметричную вольт – амперную характеристику (ВАХ), а также имеют высокую допустимую импульсную мощность и энергоемкость, так как активная площадь полупроводникового элемента может достигать нескольких десятков квадратных сантиметров.

Для приборов традиционной конструкции проблемной зоной, ограничивающей максимальные импульсные значения рассеиваемой мощности и лавинного тока, а также максимально допустимую энергию потерь, является краевая область, граничащая с фаской. В этой зоне, как показано на фиг. 2, при любой полярности приложенного напряжения происходит концентрация плотности тока, кроме того ухудшены условия отвода тепла, т.к. размер верхнего контакта корпуса меньше размера полупроводниковой структуры.

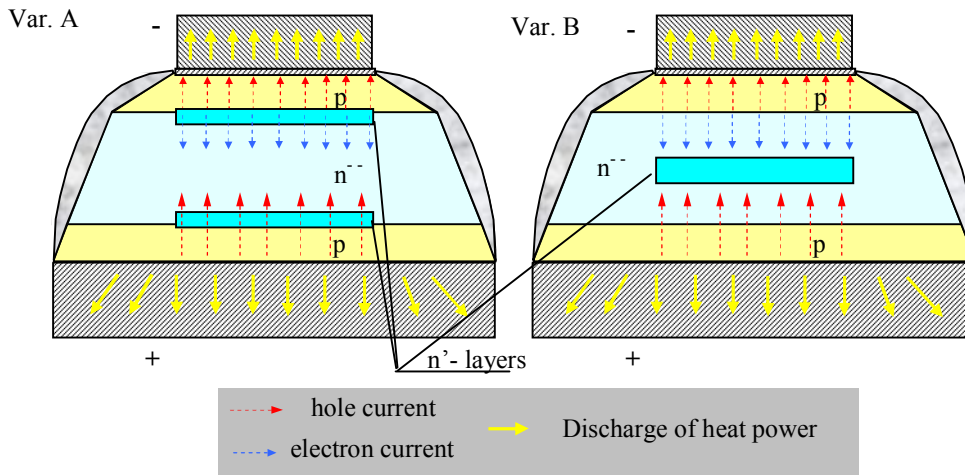
Для устранения указанных недостатков предлагается усовершенствованная полупроводниковая структура, которая содержит скрытые  $n'$  - слои с уменьшенным удельным сопротивлением, локализованные в активной области полупроводникового элемента, там, где возможен полноценный двухсторонний теплоотвод. При этом лавинный пробой происходит только в пределах той части площади структуры, где размещены скрытые  $n'$ -слои.



**Рис.1** Симметричный лавинный ограничитель напряжения «традиционной» конструкции. 1- верхний контакт корпуса; 2 – краевая фаска кремниевого элемента; 3 – компаунд, 4 – кремниевый элемент; 5 – термокомпенсатор.

## Конструкция и технология изготовления усовершенствованного полупроводникового элемента

Скрытые слои в усовершенствованном полупроводниковом элементе могут быть расположены различным образом. В частности, целесообразно рассмотреть варианты расположения двух идентичных слоев, примыкающих к р-п переходам, или одного скрытого слоя в центре базы, как это изображено на рис 2.



**Рис.2** Симметричный лавинный ограничитель напряжения усовершенствованной конструкции.

Оба этих варианта расположения скрытых слоев позволяют получить симметричную ВАХ и устранить протекание лавинного тока в периферийной области полупроводникового элемента.

Ниже будет рассмотрено влияние расположения скрытых слоев на важную характеристику ограничителя напряжения – динамическое сопротивление ВАХ при лавинном пробое.

Эффективной технологией, которая может быть применена для создания глубоких скрытых n<sup>'</sup> слоев является протонное облучение. Известно [1-4], что при протонном облучении кремния имплантированные атомы водорода индуцируют возникновение связанных с ними донорных центров, аналогичных по свойствам традиционным донорам (фосфор, мышьяк, сурьма). В отличие от атомов указанных химических элементов, водород достаточно легко можно имплантировать в кремний на глубину до нескольких сот микрон. Это дает возможность создания в n базе скрытых n<sup>'</sup> слоев с исключительно точным регулированием их глубины и концентрации дополнительных доноров. Вследствие этого становится возможной и высокая точность регулирования напряжения лавинного пробоя. Также достигается высокая однородность напряжения пробоя, даже в пределах областей с большой площадью.

### Моделирование характеристик ограничителя напряжения при различном расположении скрытых n<sup>'</sup> – слоев

Расчет характеристик полупроводникового элемента ограничителя проводился с использованием программы компьютерного физико-топологического моделирования «ИСТОК».

Базовый вариант полупроводникового элемента, не содержащий скрытых n<sup>'</sup> - слоев, представлял собой симметричный p-n-p транзистор с общей толщиной кремниевой пластины 450 мкм. Глубина p-n переходов составляла 80 мкм от поверхности, концентрация атомов донорной примеси в n базе –  $9.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Распределение примеси в p – слоях представлено на рис. 3.

Модифицированные полупроводниковые элементы, содержащие скрытые n<sup>'</sup> – слои, имели идентичные базовому варианту толщину кремниевой пластины и распределение акцепторной примеси. Были рассмотрены следующие варианты модифицированного полупроводникового элемента: A1, A2, A3 – два слоя, примыкающие к p-n переходам, толщина слоев варьировалась; B1, B2 – один слой в середине n- базы, толщина слоя варьировалась. Для вариантов: A1, A2, A3 и B2 концентрация «исходной» равномерно распределенной в n- базе донорной примеси составляла  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , для варианта B2 -  $9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Распределение «дополнительной» донорной примеси в скрытых слоях соответствовало функции Гаусса, максимальная концентрация



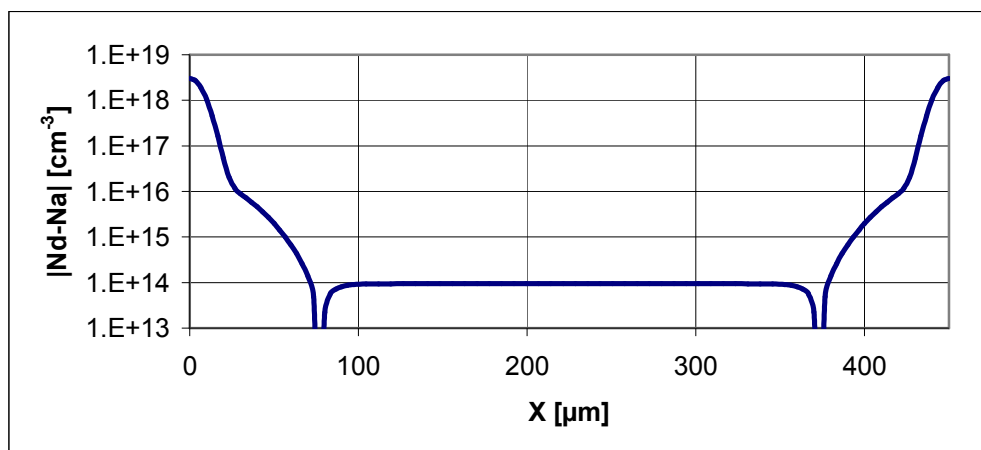
«дополнительной» донорной примеси выбиралась такой, чтобы напряжение начала лавинного пробоя было близко к этой характеристике для базового варианта.

Распределения донорной примеси для различных вариантов полупроводниковых элементов представлены на рис. 4.

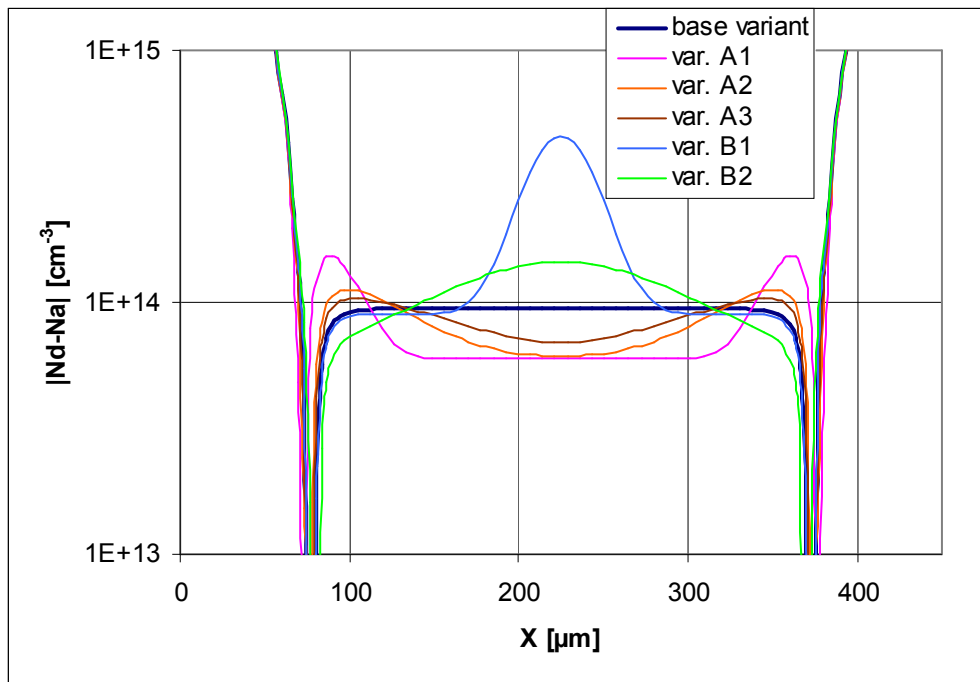
Вольт-амперная характеристика ограничителя напряжения на основе трехслойного р-п-р полупроводникового элемента имеет ряд особенностей по сравнению с характеристикой лавинного диода. Как и в высоковольтном диоде генерация электронно-дырочных пар при лавинном пробое происходит в относительно узком слое с максимальными значениями напряженности электрического поля.

В основной части области пространственного заряда р-п перехода, расположенной в высокоомном п- слое лавинной генерации электронно-дырочных пар не происходит, однако в этом слое протекает ток электронов, а также ток дырок, инжектированных вторым р-п переходом р-п-р элемента вследствие транзисторного эффекта. При этом ток электронов, возникший вследствие лавинной генерации, для р-п-р элемента аналогичен току базы. При протекании указанных токов в области пространственного заряда возникает дополнительный заряд с объемной плотностью  $Q_v$ :

$$Q_v = \left( \frac{\alpha}{v_{ps}} - \frac{1-\alpha}{v_{ns}} \right) \cdot J$$



**Рис.3** Распределение легирующей примеси в полупроводниковом элементе (базовый вариант).



**Рис. 4** Распределение донорной примеси для различных вариантов полупроводниковых элементов со скрытыми  $n'$  слоями в  $n$  базе.

где  $v_{ps}$ ,  $v_{ns}$  – насыщенные (максимальные) скорости дырок и электронов при большой напряженности электрического поля,

$J$  – плотность тока, протекающего через ограничительный элемент,

$\alpha$  – коэффициент усиления по току (в схеме с общей базой) транзисторного  $p$ - $n$ - $p$  элемента.

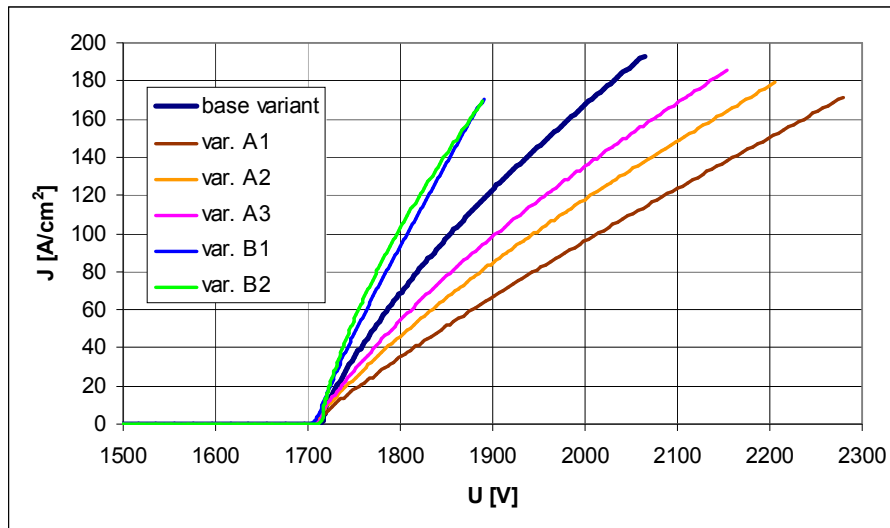
Наличие этого дополнительного заряда влияет на градиент электрического поля и, следовательно, на величину напряжения. При этом, если

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} > \frac{v_{ps}}{v_{ns}} \approx 0.8,$$

то  $Q_v$  положителен и, при увеличении  $J$  напряжение на полупроводниковом элементе уменьшается, т.е. ВАХ имеет участок с отрицательным динамическим напряжением. В противном случае напряжение полупроводникового элемента монотонно возрастает с ростом плотности тока, как и у лавинного диода, однако величина динамического сопротивления ВАХ может быть существенно ниже.

Величину  $\alpha$  достаточно просто регулировать, изменяя время жизни носителей заряда в  $n$  – слое полупроводникового элемента. В случае применения таких элементов в качестве защитных ограничителей перенапряжения желательно иметь ВАХ с (по возможности) малым динамическим сопротивлением, но без участка отрицательного сопротивления. При моделировании характеристик полупроводниковых элементов, описанных выше, было принято значение времени жизни носителей заряда в  $n$  – базе, равное 0.4 мкс, при котором для всех рассматриваемых вариантов ВАХ не имела участка отрицательного дифференциального сопротивления.

Полученные в результате моделирования ВАХ полупроводниковых элементов показаны на рис. 5.



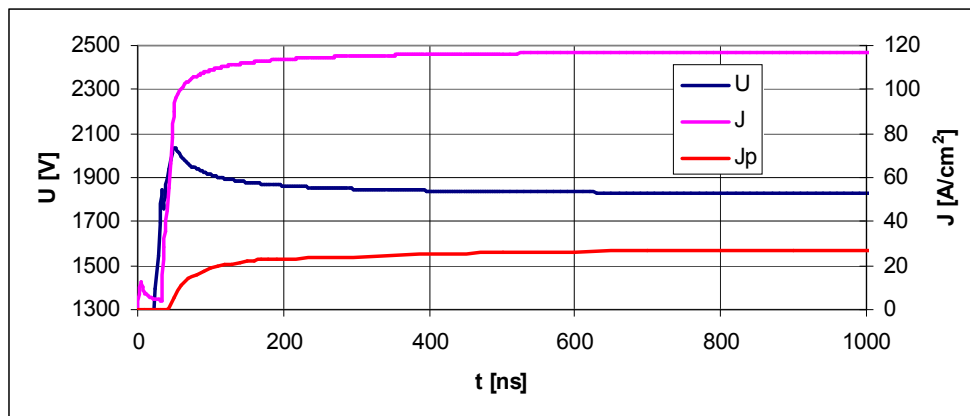
**Рис.5** Вольт-амперные характеристики в области лавинного для разных вариантов конструкции полупроводникового элемента.

Из рисунка видно, что расположение двух скрытых  $n'$  – слоев по краям  $n$  – базы приводит к увеличению дифференциального сопротивления в области лавинного пробоя при плотности тока по крайней мере до  $200 \text{ A/cm}^2$ . Этот негативный эффект увеличивается при уменьшении толщины скрытых слоев и соответственном увеличении максимальной концентрации доноров в этих слоях.

Расположение скрытого слоя в центре базы, наоборот, позволяет уменьшить дифференциального сопротивление приблизительно в 1.5 раза, по сравнению с базовым вариантом. Существенной зависимости дифференциального сопротивления от толщины слоя при этом не наблюдалось. Возможно, это связано с наличием для варианта B1 ,большой, чем в других вариантах со скрытыми слоями, «исходной» концентрацией равномерно распределенных в  $n$  – базе донорных атомов.

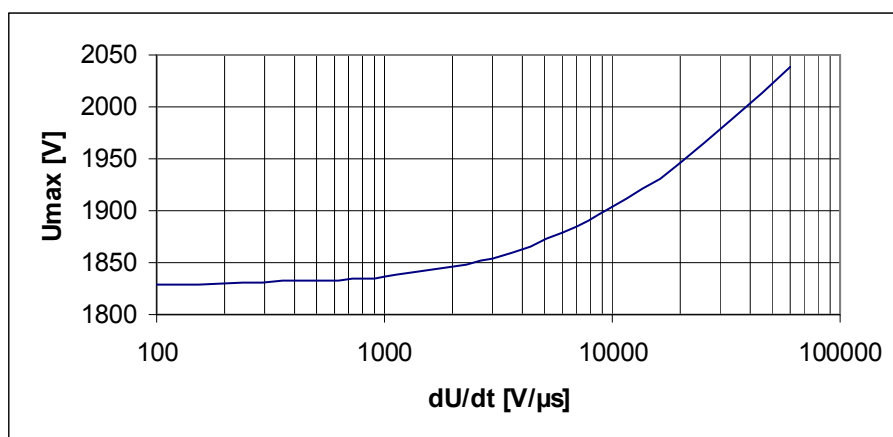
Увеличение этой концентрации оказалось необходимым для получения близкого к остальным вариантам напряжения пробоя. Таким образом, этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Перенос дырок через базовый слой р-п-р элемента имеет некоторую инерционность, поэтому актуален вопрос быстродействия ограничителя напряжения на основе такого элемента. На рис. 6 показаны зависимости напряжения и плотности тока от времени для полупроводникового элемента со скрытым  $n'$  – слоем в центре базы (var. B2). На полупроводниковый элемент подавался импульс напряжения амплитудой 3000 В, со скоростью нарастания  $60000 \text{ В/мкс}$  (длительность фронта 50 нс) от источника с внутренним сопротивлением 10 Ом. Видно, что время, в течение которого напряжение на полупроводниковом элементе заметно отличается от «квазистационарного» значения не превышает 100 нс, что обусловлено малой задержкой нарастания тока дырок. Зависимость от времени плотности тока дырок в области объемного заряда р-п перехода (вне области лавинной генерации) также приведена на рис. 6.



**Рис. 6** Зависимости напряжения, общей плотности тока и плотности тока дырок от времени при воздействии импульса напряжения на полупроводниковый элемент (var. B2). Параметры импульса напряжения: амплитуда 3000 В, скоростью нарастания 60000 В/мкс, внутреннее сопротивление источника 10 Ом.

Зависимость максимального импульсного напряжения на полупроводниковом элементе (var. B2) от скорости нарастания напряжения приведена на рис. 7. Видно, что в актуальном для силовой электроники диапазоне  $dU/dt$  до 10000 В/мкс отличие максимального импульсного напряжения от «квазистационарного» значения составляет менее 5%.



**Рис. 7** Зависимость максимального импульсного напряжения на полупроводниковом элементе (var. B2) от скорости нарастания напряжения воздействующего импульса. Параметры воздействующего импульса: амплитуда 3000 В, скоростью нарастания 60000 В/мкс, внутреннее сопротивление источника 10 Ом.

### Экспериментальные результаты

Были изготовлены экспериментальные ограничители напряжения, на базе исходных подложек нейтроннолегированного кремния с удельным сопротивлением 80 Ом\*см, толщиной 450 мкм. Слои p – типа формировались одновременной двухсторонней диффузией бора и алюминия на глубину ~30 и 80 мкм, соответственно. К контактным поверхностям полупроводникового элемента с одной стороны методом высокотемпературной вакуумной пайки на силумин (сплавление) был присоединен молибденовый термокомпенсатор. С другой стороны кремниевого элемента контактная металлизация формировалась напылением слоя алюминия толщиной 10 мкм. Диаметр кремниевого элемента готовых ограничителей напряжения составлял 32 мм, диаметр активной структуры после формирования и защиты краевой фаски – около 27 мм. В n – базе полупроводниковых элементов был сформирован скрытый n' – слой, топологически область распространения этого слоя представляла собой круг диаметром около 26 мм. Скрытый слой формировался с помощью протонного облучения.

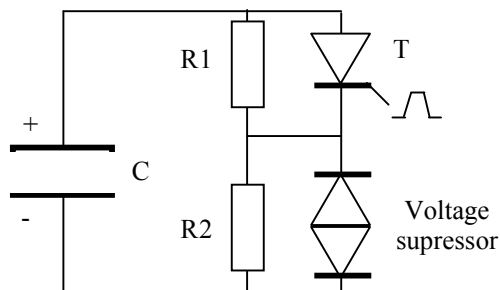




После облучения элементы были отожжены для активации H-induced donors и регулирования времени жизни носителей заряда.

Значения напряжения лавинного пробоя при токе 10 мА составляли до облучения протонами 2100 – 2300 В, после облучения и отжига 1650-1750 В.

Испытания экспериментальных образцов производились по схеме, приведенной на рис. 8. Коммутация импульса напряжения на испытуемый ограничитель напряжения производилась при включении тиристора Т, скорость нарастания напряжения составляла около 1000 В/мкс. Исходное постоянное напряжение на ограничителе напряжения формировалось делителем R1-R2 и составляло около 700 В.

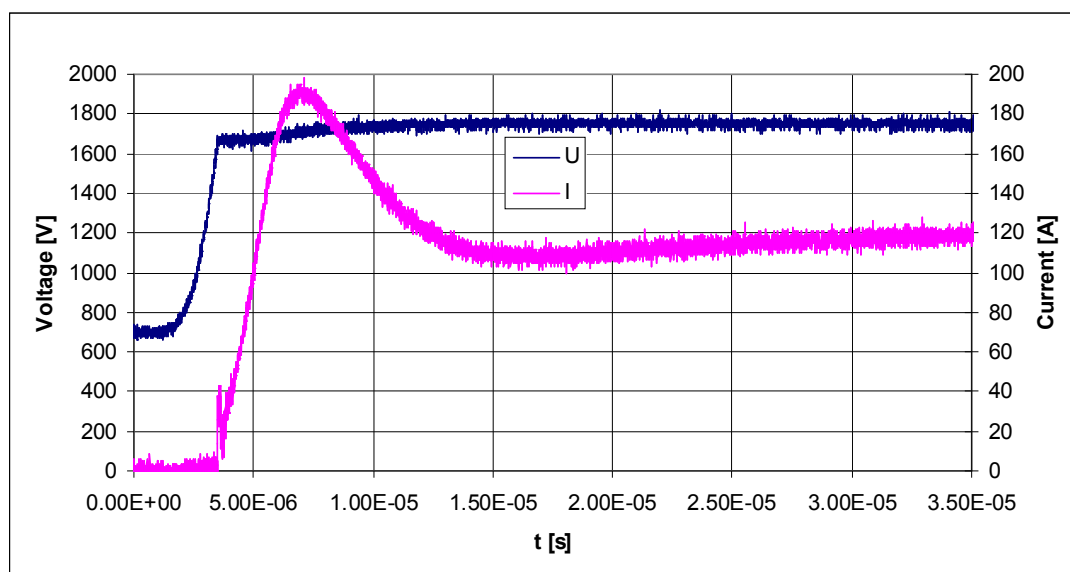


**Рис. 8** Схема испытаний ограничителей напряжения.

При испытаниях экспериментальные образцы ограничителей напряжения устойчиво коммутировали импульсы тока амплитудой около 200 А с длительностью (по уровню 0.1 от амплитудного значения) около 1000 мкс. Пиковая рассеиваемая мощность составляла более 300 кВт (более 60 кВт на 1 см<sup>2</sup> активной площади). Полная энергия, рассеиваемая ограничителем напряжения за один импульс составляла при этом около 250 Дж (или 50 Дж на 1 см<sup>2</sup> активной площади).

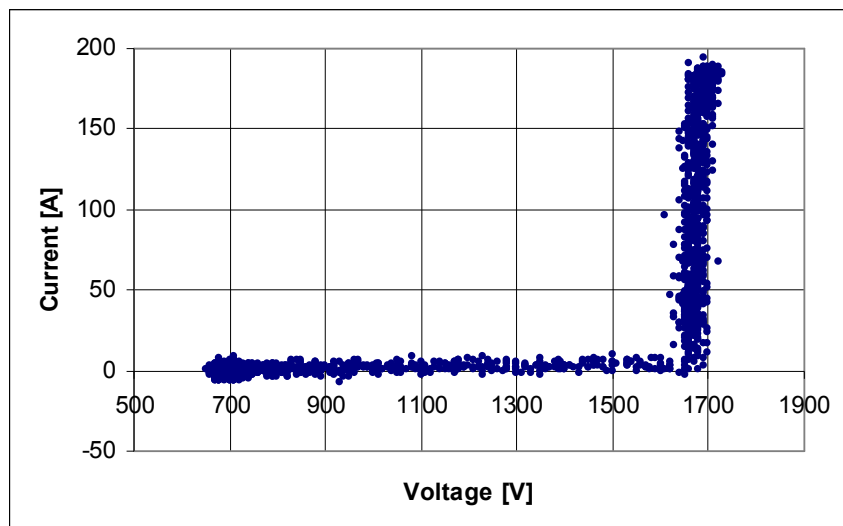
Типичные временные зависимости тока и напряжения на экспериментальных образцах при испытаниях приведены на рис. 9.

В течение первых нескольких микросекунд после коммутации импульса напряжения, когда происходит нарастание тока, изменения температуры в полупроводниковом элементе можно считать незначительными. Это позволяет построить «квазиизотермическую» ВАХ полупроводникового элемента, приведенную на рис. 10. Затем изменения температуры начинают заметно влиять на напряжение пробоя, приводя к его некоторому увеличению и, соответственно, к некоторому уменьшению тока. Далее происходит сначала стабилизация тока и затем его относительно медленный спад при разряде батареи конденсаторов С (за пределами временного интервала, показанного на рис. 9).



**Рис. 9** Типичные зависимости тока и напряжения от времени.





**Рис. 10** «Квазиизотермическая» ВАХ экспериментального ограничителя напряжения.

### Заключение

Предложен усовершенствованный силовой кремниевый симметричный ограничитель напряжения, на основе р-п-р транзистора, база которого содержит скрытые  $n'$  - слои с уменьшенным удельным сопротивлением, локализованные в активной области полупроводникового элемента, там, где возможен полноценный двухсторонний теплоотвод.

Методами компьютерного моделирования показано, что расположение скрытого  $n'$  слоя в середине базы позволяет существенно уменьшить дифференциальное сопротивление ВАХ полупроводникового элемента при лавинном пробое в области больших плотностей тока.

Экспериментально показано, что новые приборы имеют малое динамическое сопротивление ВАХ, допустимую импульсную мощность рассеяния свыше 60 кВт на 1 см<sup>2</sup> активной площади и энергоемкость не менее 50 Дж на 1 см<sup>2</sup> активной площади.