## Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах: защита от перенапряжения

Локтаев Ю. М., Сурма А.М., Черников А. А.



Несмотря на возможность «внешней» защиты, применение тиристоров с интегрированными в полупроводниковую структуру элементами защиты от перенапряжения также может быть привлекательно для потребителя, если по своим ценовым характеристикам такой прибор не будет сильно отличаться от обычного тиристора.

Возможны два типа защитных элементов, различающихся принципом действия.

Во-первых, это ограничитель напряжения, подобный нелинейному резистору (варистору) или полупроводниковому лавинному ограничителю напряжения. Такой элемент можно характеризовать нелинейной ВАХ, где до некоторого порогового значения напряжения ток через защитный элемент имеет малую величину, а при превышении порогового значения напряжения резко растет. Защитные элементы такого типа могут ограничивать импульсы перенапряжения, прикладываемые к тиристору как в прямом, так и в обратном направлении, однако допустимая энергия этих импульсов, как правило, довольно невелика (до нескольких Джоулей), т.к. большая ее часть рассеивается в защитном элементе.

Во-вторых, это элемент с характеристикой динистора, переключающийся при превышении некоторого порогового напряжения. Как правило, конструкция такого элемента такова, чтобы при превышении порогового напряжения инициировать включение защищаемого тиристора. С помощью такого элемента может быть реализована защита от перенапряжения только в прямом направлении, однако защита эффективна и для импульсов с высокой энергией. Кроме того с помощью таких защитных элементов может быть достигнуто важное качество, повышающее надежность работы тиристоров в последовательных сборках высоковольтных вентилей: тиристор в составе последовательной сборки может безопасно переключаться при отказе драйвера (отсутствии штатных сигналов управления), т.е. вентиль сохраняет работоспособность при отказе драйвера одного из тиристоров

Простым и относительно дешевым способом получения защитных элементов, как первого, так и второго типов, интегрированных в полупроводниковом элементе тиристора, является создание локальных областей с пониженным напряжением лавинного пробоя, как, например, это показано на рис. 1.

Контролируемое снижение напряжения лавинного пробоя в этих областях достигается за счет создания в n-базе дополнительных n'-слоев c более высокой концентрацией доноров.

Для получения защитных элементов первого типа используется p-n-p область полупроводникового элемента не содержащая n+ эмиттерного слоя и не являющаяся областью, где расположен управляющий электрод. В этом случае протекание лавинного тока при ограничении импульса прямого напряжения не приводит к переключению тиристорного элемента.

Для получения защитных элементов второго типа используется p-n-p область полупроводникового элемента, расположенная под управляющим электродом. При этом протекание лавинного тока при ограничении импульса прямого напряжения вызывает включение тиристора, т.к. этот ток анало-



гичен току управления, поступающему на этот электрод.

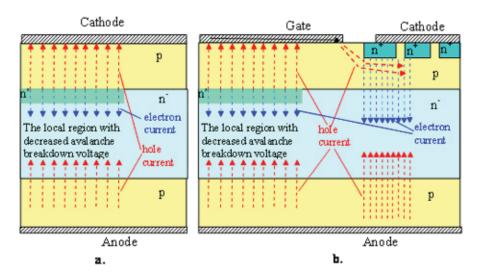


Рис. 1. Интегрированные в полупроводниковый элемент тиристора защитные элементы: а. – ограничитель напряжения p-n-p типа, b – переключающий ограничитель динисторного типа.

Одной из эффективных технологий, которые могут применяться для создания глубоких скрытых п' слоев в полупроводниковых элементах силовых высоковольтных тиристоров 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 п базе скрытых п' слоев с исключительно точным регулированием их глубины и концентрации дополнительных доноров. Вследствие этого становится возможной и высокая точность регулирования напряжения лавинного пробоя – на уровне нескольких десятков вольт при общем напряжении 4000-8000 В.

Также достигается высокая однородность напряжения пробоя, даже в пределах областей с относительно большой площадью. Так, например, на рис. 2 показана картина распределения температуры при протекании тока лавинного пробоя на экспериментальном полупроводниковом элементе, снятая при помощи тепловизора. Диаметр элемента составлял 56 мм, в центральной его части методом протонного облучения создана круглая область диаметром около 1 см с пониженным напряжением лавинного пробоя. Видно, что протекание лавинного тока вызывает относительно равномерный перегрев в пределах практически всей области со сниженным напряжением пробоя, т.е. распределение тока близко к равномерному.

Таким образом технология протонного облучения позволяет создать локальные области контролируемо сниженного напряжения лавинного про-



боя относительно большой площади с весьма равномерно распределяемой мощностью при протекании лавинного тока, т.е. встроенные в тиристорную структуру защитные элементы могут иметь довольно высокую энергоемкость и допустимую пиковую мощность.

Вольт-амперная характеристика ограничителя напряжения на основе трехслойного p-n-p полупроводникового элемента (рис. 1 а) 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 (рис. 3).

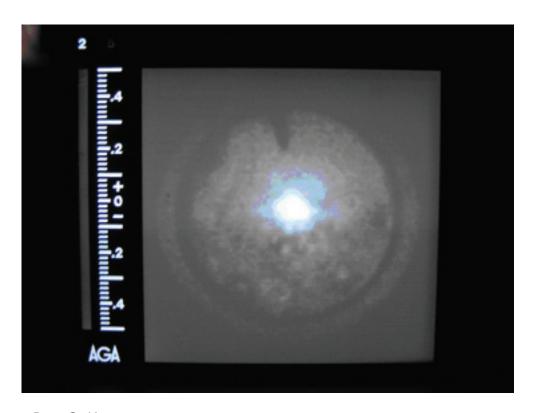


Рис. 2. Картина распределения температуры при протекании тока лавинного пробоя на экспериментальном полупроводниковом элементе с областью пониженного напряжения пробоя в центре.

В основной части области пространственного заряда p-n перехода, расположенной в высокоомном n- слое лавинной генерации электронно-дырочных пар не происходит, однако в этом слое протекает ток электронов, а также ток дырок, инжектированных вторым p-n переходом p-n-p элемента вследстствие транзисторного эффекта в p-n-p элементе. При этом ток электронов, возникший вследствие лавинной генерации, для этого p-n-p элемента аналогичен току базы, величины тока электронов и тока дырок, перенесенных в область пространственного заряда обратносмещенного p-n перехода составляют



$$J_p = \alpha \cdot J$$
$$J_n = (1 - \alpha) \cdot J$$

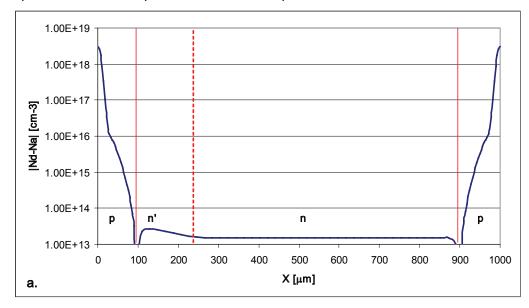
где  $J_p$ ,  $J_n$  – плотности дырочного и электронного токов в части области пространственного заряда p-n перехода, расположенной в высокоомном n- слое (без слоя лавинной генерации),

- J плотность тока, протекающего через ограничительный элемент,
- а коэффициент усиления по току (в схеме с общей базой) транзисторного p-n-p элемента.

При протекании указанных токов в области пространственного заряда возникает дополнительный заряд с объемной плотностью Qv:

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

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



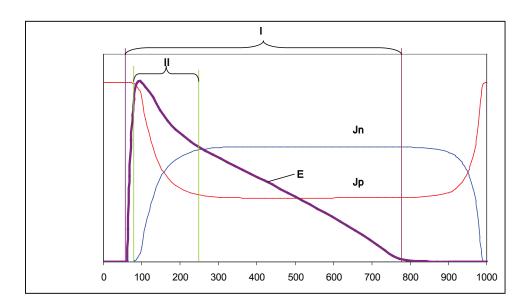


Рис. 3. Типичный профиль распределения атомов акцепторной и донорной примесей по толщине высоковольтного p-n-p элемента (a.); распределения напряженности электрического поля (E), плотности токов электронов (Jn) и дырок (Jp) при лавинном пробое. I – область пространственного заряда p-n перехода, II – слой с максимальными значениями напряженности электрического поля, в котором происходит генерация электронно-дырочных пар.

В основной части области пространственного заряда p-n перехода, расположенной в высокоомном n- слое лавинной генерации электронно-дырочных пар не происходит, однако в этом слое протекает ток электронов, а также ток дырок, инжектированных вторым p-n переходом p-n-p элемента вследстствие транзисторного эффекта в p-n-p элементе. При этом ток электронов, возникший вследствие лавинной генерации, для этого p-n-p элемента аналогичен току базы, величины тока электронов и тока дырок, перенесенных в область пространственного заряда обратносмещенного p-n перехода составляют

$$J_p = \alpha \cdot J$$
$$J_n = (1 - \alpha) \cdot J$$

где  $J_p$ ,  $J_n$  – плотности дырочного и электронного токов в части области пространственного заряда p-n перехода, расположенной в высокоомном n- слое (без слоя лавинной генерации),

- J плотность тока, протекающего через ограничительный элемент,
- а коэффициент усиления по току (в схеме с общей базой) транзисторного p-n-p элемента.

При протекании указанных токов в области пространственного заряда возникает дополнительный заряд с объемной плотностью Qv:



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

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

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 достаточно просто регулировать, изменяя, например, время жизни носителей заряда в n- слое полупроводникового элемента. Это дает возможность изменять вид ВАХ ограничительного элемента. На рис. 4 по-казаны типичные ВАХ высоковольтного ограничителя напряжения, которые можно получить указанным способом. Для сравнения на этом же рисунке приведена ВАХ диодной структуры с идентичными параметрами высокоомного n- слоя.

В случае применения таких элементов в качестве защитных ограничителей перенапряжения желательно иметь ВАХ с по возможности малым динамическим сопротивлением, но без участка отрицательного сопротивления, аналогичную (1), показанной на рис. 4. Из рисунка видно, что, в сравнении с характеристикой диодного защитного элемента, динамическое сопротивление ВАХ может быть существенно уменьшено.

Перенос дырок через базовый слой p-n-p элемента имеет некоторую инерционность, поэтому актуален вопрос быстродействия ограничителя напряжения на основе такого элемента. Расчеты и эксперименты показали, что для ограничительных элементов, рассчитанных на напряжение до 8000 В, при подаче импульсов перенапряжения со скоростью нарастания напряжения до 1000-2000 В/мкс изменение напряжения по сравнению с «квазистатическим» может быть не очень значительным. Так, например, на рис. 5. показаны «динамические» ВАХ ограничительного элемента при различных скоростях нарастания напряжения в сравнении с «квазистатической» ВАХ.

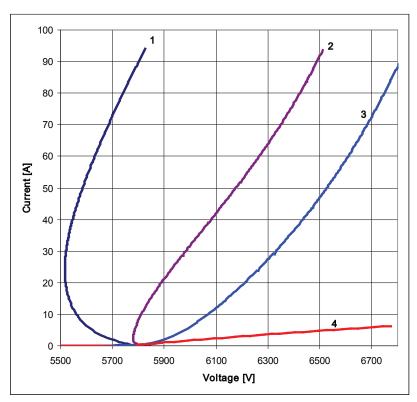


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики p-n-p элемента (1-3) и диодного p-n-n+ элемента (4) при лавинном пробое. Площадь полупроводниковых элементов 1 см2, толщина высокоомного n-слоя 820 мкм. 1 - a/(1-a) > vps/vns, 2 - a/(1-a) > vps/vns, 3 - a/(1-a) < vps/vns.

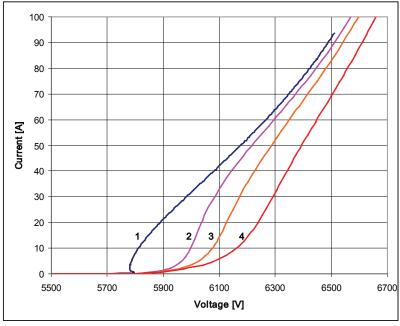


Рис. 5. Изменения ВАХ ограничителя напряжения p-n-p типа в зависимости от скорости нарастания напряжения на фронте импульса перенапряжения.



Площадь полупроводникового ограничительного элемента 1 см2, толщина высокоомного n-слоя 820 мкм. 1 – «квазистатическая» характеристика, 2 – dU/dt = 1000 B/мкс, 3 – dU/dt = 2000 B/мкс, 4 – dU/dt = 4000 B/мкс.

Для применения в защитных элементах динисторного типа (рис. 16) наиболее приемлемой представляется ВАХ р-n-р элемента с участком отрицательного динамического сопротивления. Такая характеристика позволяет сформировать для тиристорной части защитного элемента импульс тока управления необходимой амплитуды и с достаточно большой скоростью нарастания, что особенно важно, если воздействующий на защитный элемент импульс перенапряжения имеет малую скорость нарастания. На рис. 6 показаны типичные изменения токов p-n-р и тиристорного элементов, а также анодного напряжения, при включении такого динисторного защитного элемента импульсом перенапряжения с малой скоростью нарастания на фронте.

В настоящее время ряд фирм располагает типовыми конструктивными решениями и технологиями, позволяющими опционально или в массовой продукции применять интегрированные в полупроводниковую структуру элементы защиты от импульсов перенапряжения. «Протон - Электротекс», используя описанные выше типовые конструкции и технологию протонного облучения [3], применяет их опционально, в соответствии со специальными требованиями заказчиков для тиристоров всей выпускаемой гаммы токов и напряжений от 1200 до 6500 В. Типичная характеристика ограничителя напряжения p-n-p типа приведены на рис. 7, встроенного динисторного элемента – на рис. 8.

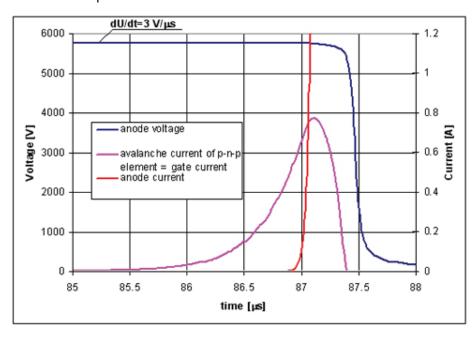


Рис. 6. Переключение динисторного защитного элемента импульсом перенапряжения с малой скоростью нарастания на фронте. ВАХ p-n-p элемента соответствует (1) на рис. 4, площадь p-n-p элемента 0.1 см2.

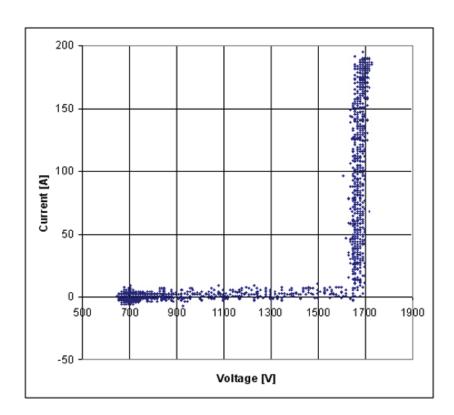
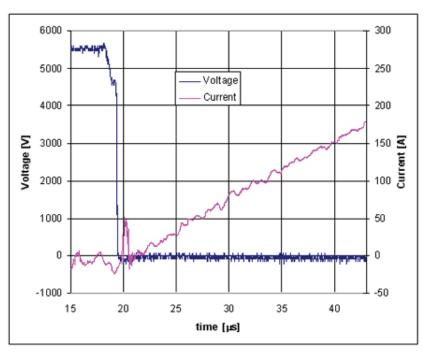
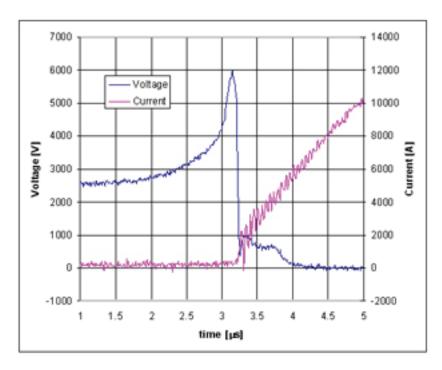


Рис.7. Вольт-амперная характеристика элемента – ограничителя перенапряжения для тиристоров на напряжение до 1800 В.



a.





b.

Рис. 8. Переключение тиристора с встроенным элементом защиты от перенапряжения: а. – при низкой скорости нарастания напряжения, b – при высокой скорости нарастания напряжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

V.V. Kozlovski. Modification of semiconductors by proton beam. S.-Pb., Nauka, 1993.

E. P. Neustroev et al. Donor center formation in hydrogen implanted silicon. – Physica B. 1999, vol. 270, No. 1-2, p. 1-5.

V. N. Gubarev, A.Yu. Semenov, V. S. Stolbunov, A. M. Surma. Technology of proton irradiation and possibilities of applying it for performance improvement of power thyristors and diodes. – Power Electronics Europe, Issue 3, 2011, p. 35-38.

J. N. Klug, J. Lutz, J. B. Meijer. N-type doping of silicon by proton implantation. - Conf. Proc. of EPE'2011, Birmingham, 2011.