

Разработка топологии охранных колец мощных кремниевых диодов с блокирующим напряжением до 6,7 кВ

О.В. Сопова, Т.Б. Крицкая

АО «Ангстрем», г.Москва, Россия

sopova@angstrem.ru

Высоковольтные быстропереклюключающиеся диоды (Fast Recovery Diode, FRD) характеризуются малым падением прямого напряжения и низкой рассеиваемой мощностью. Основной характеристикой таких диодов является блокирующее обратное напряжение, или напряжение пробоя. Цель настоящей работы – разработка топологии охранных колец, позволяющей получать максимально возможное блокирующее напряжение диода и определенную локализацию места пробоя при условии использования стандартных технологических процессов и без применения новых материалов или подложек. Разработана топология высоковольтной части кремниевых быстропереклюключающихся мощных диодов для получения максимального блокирующего обратного напряжения. Для расчета использовалась среда TCAD, в редактор структур которой интегрирована программа для автоматизации создания моделей приборов с размерами порядка нескольких миллиметров. Предложен принцип расчета расположения охранных колец, позволяющий получать силовые диоды с разным напряжением пробоя. Топология разработана так, чтобы пробой происходил под краем активной области, что гарантирует отсутствие катастрофических отказов прибора. Изготовленные по предложенной топологии мощные быстропереклюключающиеся диоды имеют максимальное блокирующее обратное напряжение в диапазоне 3,3–6,7 кВ, что говорит о достоверности методологии расчета.

Ключевые слова: пробивное напряжение; высоковольтные диоды; приборно-технологическое моделирование

Для цитирования: Сопова О.В., Крицкая Т.Б. Разработка топологии охранных колец мощных кремниевых диодов с блокирующим напряжением до 6,7 кВ // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 260–267. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-260-267

Development of Guard Rings Layout of Silicon Power Diode with Blocking Capability up to 6.7 kV

O.V. Sopova, T.B. Kritskaya

JSC «ANGSTREM», Moscow, Russia

sopova@angstrem.ru

Abstract: The high voltage silicon transistors and diodes are used in the direct current sources, in the circuits for conversion of alternating current to direct current, in accumulative batteries as separate devices and in the circuits «bridge», «half-bridge» in the uncontrolled rectifiers. The main characteristic of such diodes is the blocking reverse voltage or the break-down voltage. The layout of the high-voltage part of silicon fast switching high power diodes for obtaining maximum blocking reverse voltage has been developed. For the calculation the standard TCAD programs into the editor of structures of which the created program had been integrated, have been used. This program permits to automate the calculations of the characteristics for devices with sizes of several millimeters. It has been shown that using the above presented principle for the periphery layout calculation it is possible to obtain high voltage diodes with different breakdown voltage, varying the number of rings. The layout has been developed so that the breakdown occurs under the edge of the active region. This guarantees the lack of catastrophic failures during the device operation. The high voltage fast switching diodes, manufactured using the proposed layout, have the maximum blocking reverse voltage in the range from 3.3 up to 6.7 kV, which indicates to the calculation methodology reliability.

Keywords: TCAD modeling; fast recovery diode; blocking voltage; ring termination

For citation: Sopova O.V., Kritskaya T.B. Development of guard rings layout of silicon power diode with blocking capability up to 6.7 kV. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 260–267. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-260-267

Введение. В силовой электронике широко применяются устройства защиты от перепадов напряжения. Высоковольтные быстропереключающиеся диоды (Fast Recovery Diode, FRD) характеризуются малым падением прямого напряжения и низкой рассеиваемой мощностью. За быстрое и «плавное» переключение отвечает «активная» центральная часть такого диода, а высокого напряжения пробоя U_{br} добиваются по-разному, например с помощью охранных колец вокруг активной области, созданных имплантацией.

Анализ работ, посвященных кремниевым диодам с охранными кольцами [1–6], показал, что способы повышения пробивного напряжения таких приборов до значений порядка 6,5 кВ требуют либо наличия многослойного (толщиной до 5 мкм) диэлектрика на поверхности пластины, либо использования подложек толщиной более 700 мкм, либо осаждения специальных материалов, таких как SIPOS (полуизолирующий поликристаллический кремний) или DLC (аморфный гидрогенизированный углерод).

Цель настоящей работы – разработка топологии охранных колец, позволяющей получать максимально возможное блокирующее напряжение диода и определенную ло-

кализацию места пробоя при условии использования стандартных технологических процессов и без применения новых материалов или подложек.

Особенности разработанной конструкции. С помощью приборно-технологического моделирования в TCAD разработана конструкция периферийной части диода. Принцип действия охранных колец заключается в «вытягивании» электростатического потенциала по направлению от центрального перехода активной области к краям прибора. Важную роль при этом играет расположение поликремния Si^* , в частности длина, на которую он перекрывает толстый оксид. На рис.1 показаны область ячейки и первые кольца высоковольтной части.

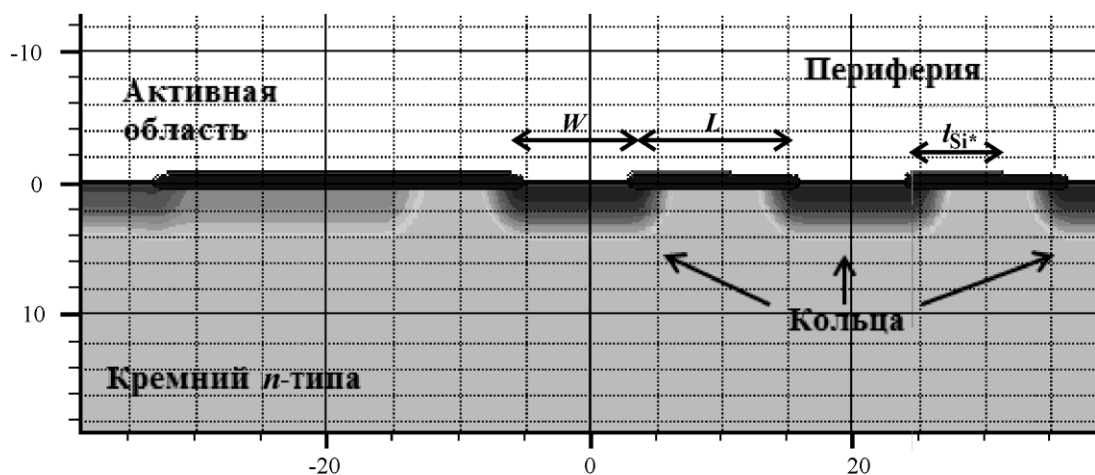


Рис.1. Распределение примеси в двумерной модели
 Fig.1. Fragment of the 2D model with doping concentration distribution, one can see the active part and initial rings

В разработанной конструкции горизонтальный размер каждого охрannого кольца больше размера предыдущего кольца. Зазоры между кольцами также увеличиваются и составляют от 13 мкм вблизи активной области до 52 мкм на периферии. Поликремний n -типа контактирует с каждым кольцом. Пусть L – зазор перед кольцом, l_{Si^*} – длина, на которую поликремний перекрывает изолирующий оксид. Тогда ширину кольца W можно рассчитать по формулам:

$$W = (L - l_{Si^*}) \cdot 1,3 \text{ для колец } 1-13; \quad W = (L - l_{Si^*}) \cdot 1,4 \text{ для колец } 14-22;$$

$$W = (L - l_{Si^*}) \text{ для колец } 23-35; \quad W = (L - l_{Si^*}) \cdot 0,9 \text{ для колец } 36-52.$$

Топология с 52 кольцами позволяет получать напряжение пробоя, равное 6,7 кВ, при использовании подложки с концентрацией примеси $1,05 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Для достижения требуемого напряжения пробоя при увеличении концентрации примеси в подложке количество охранных колец можно уменьшать, не меняя принципа расчета их расположения. Форма колец, меняющаяся в зависимости от дозы легирования, времени, температуры и последовательности термических процессов, также влияет на результат. При разработке технологии минимизировано число фотокопий, а также учтено, что параметры перехода в активной части оптимизированы для улучшения переключающих свойств диода и не должны изменяться. Толщина изолирующего диэлектрика между кольцами составляет 0,9 мкм. Толщина подложек может варьироваться от 400 до 660 мкм в зависимости от концентрации примеси.

Расчет и эксперимент. Задача по подбору горизонтальных размеров охранных колец, даже когда их число невелико, достаточно сложна [7, 8]. Для автоматизации работы с большим числом охранных колец в Sentaurus Structure Editor написана программа на языке сценариев Scheme. Приведем часть сценария на языке Scheme, позволяющую добавить в модель с 51 кольцом толстый изолирующий оксид и скруглить его:

```
(define N 51)

(define x1 3)
(define x2 16)

(define L x1)
(define Y x2)
(do ( (i 0 (+ i 1)) ) ; i: Counter name; 0: initial value; (+ i 1): incrementer
    ( (= i (+ N 1)) ) ; End Tester
    (begin ; Body of loop
        (define REGION (string-append "region." (number->string i)))
        (sdegeo:create-rectangle
            (position Y -0.55 0.0)
            (position L 0.45 0.0) "Oxide" REGION )

        (sdegeo:fillet-2d (list (car (find-vertex-id (position Y -0.55 0))))3)
        (sdegeo:fillet-2d (list (car (find-vertex-id (position Y 0.45 0))))3)
        (sdegeo:fillet-2d (list (car (find-vertex-id (position L -0.55 0))))3)
        (sdegeo:fillet-2d (list (car (find-vertex-id (position L 0.45 0))))3)

        (set! L (+ a (* Y b)))
        (set! Y (+ c (* Y d)))
    )
)
```

Для расчета лавинного пробоя перехода p^+ -подложка использовались модели, учитывающие лавинную генерацию новых пар, ударную ионизацию решетки, рекомбинацию носителей заряда Шокли – Рида – Холла и Оже. Для расчета скорости ударной ионизации носителей заряда выбрана модель New University of Bologna Impact Ionization Model (UniBo2), позволяющая получить наиболее достоверный результат. Она основана на решателе уравнения Больцмана HARM [9] и применима для полей, возникающих в исследуемом диоде. Учитывались влияние концентрации и значения электрического поля на подвижность носителей. Расчет проводился для двумерной модели в цилиндрической системе координат, так как она наилучшим образом учитывает специфическую форму кристалла. Заряд границы раздела кремний/оксид и заряд оксида задавался динамическими ловушками, параметры которых получены из эксперимента.

Так как площадь центрального перехода большая (до $1,3 \text{ мм}^2$) и переход $p_{\text{акт}} - n$ практически плоский, его пробивное напряжение выше, чем пробивное напряжение периферийной области, где концентрируются эквипотенциальные линии. Если эта область пробивается раньше, ток, протекающий по поверхности пластины от активной области, приводит к нагреву и «прожигу» кремния – катастрофическому отказу прибора. Оптимальным местом пробоя считается край активной области.

На рис.2 приведены расчетные характеристики диода с максимальным обратным напряжением, равным 6,7 кВ: распределение продольного электрического поля и плотности тока под кольцами при обратном токе диода 1,3 мкА (пробой не произошел) и 3 мА (пробой произошел).

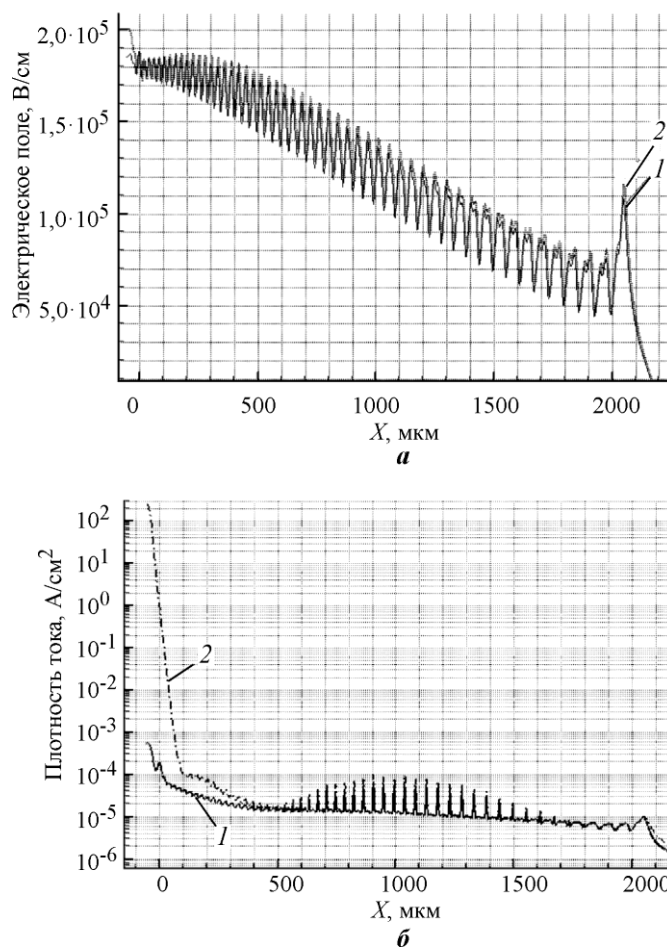


Рис.2. Распределение продольного электрического поля (а) и плотности тока (б) до (1) и в момент (2) пробоя на расстоянии 10 мкм от поверхности
 Fig.2. Electric field distribution (a) and total current density (b) shortly before (1) and in the moment of breakdown (2) at a depth of 10 мкм

Из рис.2 видно, что пробой происходит под краем активной области ($x = 0$ соответствует середине первого кольца). Как показало исследование, такое распределение электрического поля является оптимальным для достижения минимального уровня утечки.

На рис.3 приведены расчетные зависимости тока от обратного напряжения для диодов разных номиналов.

Полученная с помощью моделирования топология – ширина колец, расстояние между ними и длина перекрытия поликремнием оксида – позволяет изготавливать диоды с напряжением пробоя до 6,7 кВ при концентрации примеси в подложке $1,05 \cdot 10^{13}$ ед./см², 4,5 кВ при концентрации примеси $1,77 \cdot 10^{13}$ ед./см² и 3,3 кВ при концентрации примеси $2,61 \cdot 10^{13}$ ед./см². На рис.4 приведен снимок части кристалла с охранными кольцами, изготовленного в АО «Ангстрем».

Результаты измерений пробивного напряжения экспериментальных образцов, изготовленных по разработанной топологии, показали минимальную погрешность расчетов. На рис.5 приведены блокирующие ВАХ экспериментальных образцов.

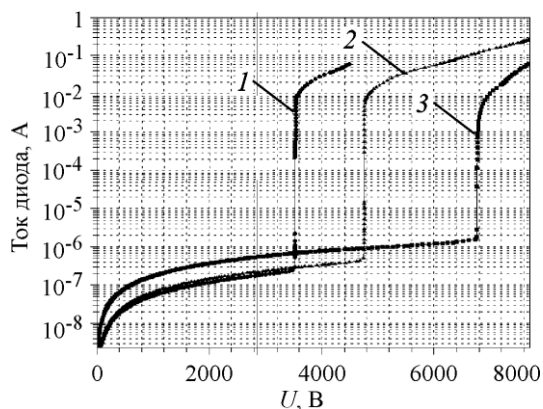


Рис.3. Расчетная зависимость тока от обратного напряжения для диодов различных номиналов: 1 – $U_{br} = 3,3$ кВ; 2 – $U_{br} = 4,5$ кВ; 3 – $U_{br} = 6,5$ кВ
 Fig.3. Simulated reverse-bias characteristics of different diodes: 1 – breakdown voltage of 3.3 kV; 2 – breakdown voltage of 4.5 kV; 3 – breakdown voltage of 6.5 kV

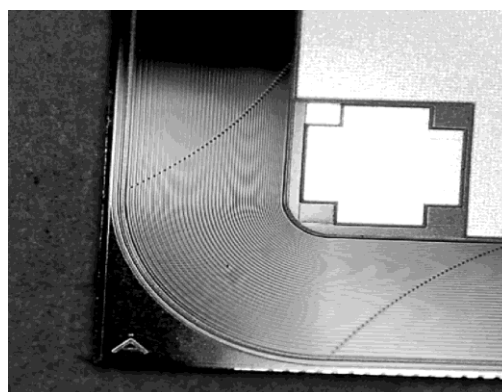
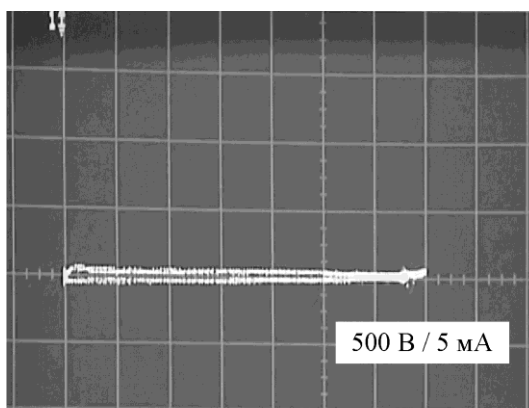
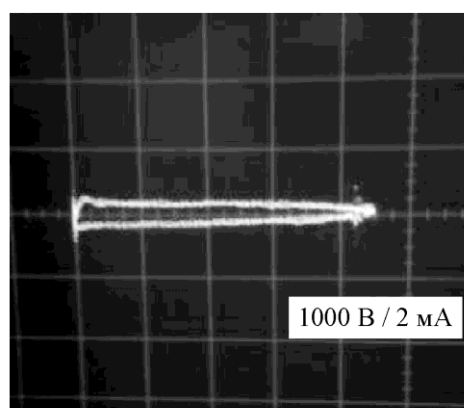


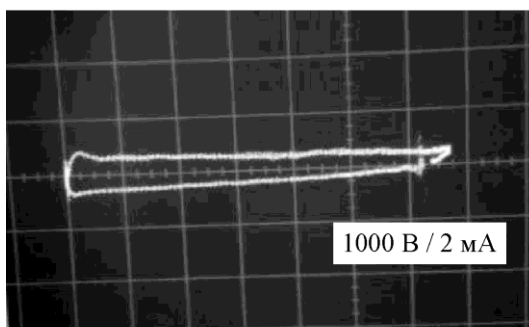
Рис.4. Край кристалла диода с максимальным обратным напряжением 3,3 кВ
 Fig.4. Image of the experimental 3.3 kV diode's periphery



а



б



в

Рис.5. Зависимость тока диода от обратного напряжения на диоде экспериментальных образцов: а – $U_{br} = 3,5$ кВ; б – $U_{br} = 4,5$ кВ; в – $U_{br} = 6,8$ кВ
 Fig.5. Measured reverse-bias characteristics of different diodes: а – $U_{br} = 3,5$ кВ; б – $U_{br} = 4,5$ кВ; в – $U_{br} = 6,8$ кВ

Закключение. Для разработки приборов с высокими рабочими напряжениями и большими размерами целесообразно применение программ для приборно-технологического моделирования. Написанная на языке сценариев Scheme программа, интегрированная с TCAD, автоматизирует расчет структур с размерами порядка 1 мм.

Спроектированная конструкция высоковольтной части силового диода позволяет получать приборы с пробивным напряжением от 3,3 до 6,7 кВ, не внося значительных изменений в топологию.

Литература

1. Design and optimization of suitable edge terminations for 6.5 kV IGBTs / **M. Vellvehi, D. Flores, X. Jorda et al.** // *Microelectronics Journal*. – 2002. – Vol.33 – P. 765–769.
2. **Ciappa M.** Some reliability aspects of IGBT modules for high-power applications // Doctoral Thesis. – Swiss Federal Institute of Technology. – 2001.
3. **Humbel O.** Application-specific improvements on fast recovery 4.5kV press-pack rectifiers // Doctoral Thesis. – Swiss Federal Institute of Technology. – 2000.
4. **Baliga Jayant B.** Fundamentals of power semiconductor devices // Springer Science. – 2008. – P. 1–163.
5. **Kopta A.** High voltage silicon based devices for energy efficient power distribution and consumption // Proc. of the Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International. – 2014. – P. 2.4.1–2.4.4.
6. **Baliarda A. V.** Avalanche Ruggedness of local charge balance power super junction transistors // Doctoral Thesis. – Autonomous University of Barcelona. – 2013.
7. **Netzel M., Herzer R.** Simulation of complex planar edge termination structures for vertical igbts by solving the complete semiconductor device equations // *Simulation of semiconductor devices and processes*. – 1995. – Vol.6. – P. 290–293.
8. An improved methodology for the CAD optimization of multiple floating field-limiting ring terminations / **N. Baradai, C. Sanfilippo, R. Carta et al.** // *IEEE transactions on electron devices*. – 2001. – Vol. 58. – N.1. – P. 266–270.
9. **Vecchi M.C., Rudan M.** Modeling electron and hole transport with full-band structure effects by means of the spherical-harmonics expansion of the BTE // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1998. – Vol. 45. – N.1, pp. 230–238.

Поступила после доработки 23.11.2017 г.; принята к публикации 27.02.2018 г.

Сорова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник службы инновационных технологий АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 2, стр. 3), sorova@angstrem.ru

Крицкая Татьяна Борисовна – начальник отдела разработки силовой электроники АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 2, стр. 3), kritskaya@angstrem.ru

References

1. Vellvehi M., Flores D., Jorda X., Hidalgo S., Rebollo J., Coulbeck L., Waind P., Newcombe D. Design and optimization of suitable edge terminations for 6.5 kV IGBTs. *Microelectronics Journal*, 2002, vol. 33, pp.765–769.
2. Ciappa M. *Some reliability aspects of IGBT Modules for high-power applications*. Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology. 2001.
3. Humbel O. *Application-specific improvements on fast recovery 4.5kV press-pack rectifiers*. Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology. 2000.
4. Baliga Jayant B. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science, 2008. P. 1–163.
5. Kopta A. High voltage silicon based devices for energy efficient power distribution and consumption. *Proceedings of the Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International*, 2014, pp. 2.4.1–2.4.4.
6. Baliarda A.V. *Avalanche Ruggedness of local charge balance power super junction transistors*. Doctoral Thesis, Autonomous University of Barcelona, 2013.
7. Netzel M., Herzer R. *Simulation of complex planar edge termination structures for vertical IGBTs by solving the complete semiconductor device equations*. *Simulation of semiconductor devices and processes*, 1995, vol.6, pp. 290–293.

8. Baradai N., Sanfilippo C., Carta R., Cappelluti F., Bonani F. An improved methodology for the CAD optimization of multiple floating field-limiting ring terminations. *IEEE transactions on electron devices*, January 2001, vol. 58, no. 1, pp. 266–270.

9. Vecchi M. C., Rudan M. modeling electron and hole transport with full-band structure effects by means of the spherical-harmonics expansion of the BTE. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 1, pp. 230–238.

Submitted 23.11.2017; Accepted 27.02.2018.

Information about the authors:

Olga V. Sopova – Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, JSC Angstrom (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokina sq., bld. 2, str. 3), sopova@angstrom.ru

Tat'ana B. Kritskaya – Chief of the Power Electronic's Design Department, JSC Angstrom (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokina sq., bld. 2, str. 3), kritskaya@angstrom.ru