

Оптимизация напряжения пробоя в IGBT структуре по ее конструктивным и технологическим параметрам

И.Ю. Ловшенко¹, В.В. Нелаев¹, И.М. Шелибак¹, А.С. Турцевич²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, nvv@bsuir.by

²ОАО «Интеграл»

Аннотация — Напряжение пробоя в биполярном транзисторе как элементе высоковольтной IGBT структуры в решающей степени определяется распределением напряженности электрического поля вблизи боковой части коллекторного р–п–перехода. Это распределение зависит от напряжения, приложенного к р–п–переходу, распределения области пространственного заряда и концентрации примеси с обеих сторон р–п–перехода. Использование технологии охранных колец и полевых обкладок позволяет изменить распределение напряженности электрического поля и, следовательно, связанное с ним напряжение пробоя. В работе исследовано влияние конструктивных и технологических параметров IGBT структуры на напряжение пробоя.

Ключевые слова — биполярный транзистор с изолированным затвором, IGBT структура, конструкция, технология изготовления, вольт–амперные характеристики, напряжение пробоя, оптимизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Среди современных приборов силовой электроники в настоящее время доминируют два базовых типа: полевые транзисторы (Metal–Oxide–Silicon–Field Effect Transistor, MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), а также различные интегрированные структуры на их основе. Многочисленные требования к мощным электронным системам (низкие потери при переключении, малое падение напряжения во включенном состоянии, высокое сопротивление в выключенном состоянии, высокое быстродействие и пр.) стимулируют исследования новых конструкций, технологий изготовления, материалов структурных элементов таких приборов и топологий.

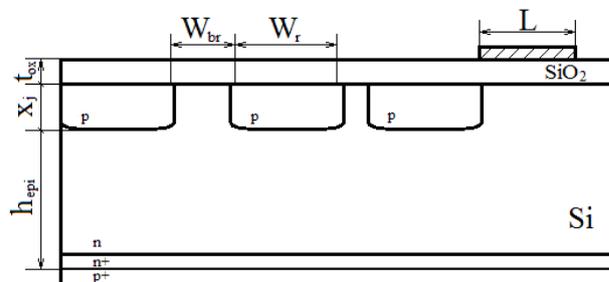
IGBT прибор вследствие своих исключительных функциональных характеристик, сочетающих положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов, является широко используемым силовым устройством и находит применение в устройствах электрической тяги и двигателях переменного тока, индуктивных системах отопления, радиологических системах, источниках бесперебойного питания, переключающих элементах.

Совершенствование IGBT структур направлено на повышение быстродействия, предельных коммутируемых токов и напряжений. Одним из важнейших пара-

метров IGBT структуры является напряжение пробоя коллекторного р–п–перехода.

II. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СТРУКТУР

Известно, что напряжение пробоя р–п–перехода (а коллекторный переход IGBT структуры является самым «слабым» местом с этой точки зрения) зависит от концентрации свободных носителей заряда с обеих сторон перехода, распределения области пространственного заряда (ОПЗ) и заряда на границе раздела Si–SiO₂. В стандартной практике повышения напряжения пробоя р–п–перехода используются различные методы. Основными из них являются формирование полевых обкладок, охранных колец или их совместное использование (рис. 1) [1], [2].



W_{br} – расстояние между кольцами; W_r – ширина кольца; x_j – глубина залегания р–п перехода; h_{epi} – толщина эпитаксиальной пленки; t_{ox} – толщина оксида; L – длина полевой обкладки

Рис. 1. Полупроводниковая структура с охранными кольцами и полевой обкладкой

Показанная на рис. 1 структура характерна для наиболее прогрессивного в настоящее время IGBT прибора, предложенного компанией Advanced Power Technology [3–5], с буферным n⁺ слоем (Punch Through IGBT). Такой PT IGBT прибор обладает уникальными характеристиками в высокочастотном диапазоне функционирования. В работе [6] приведены результаты исследования зависимости напряжения пробоя от типа структуры затвора, планарного (planar) или «канавочного» (trench), элементарной IGBT ячейки. Показано, что «канавочный» тип затвора предпочтителен независимо от наличия (PT IGBT) или отсутствия (NPT IGBT) буферного n⁺ слоя.

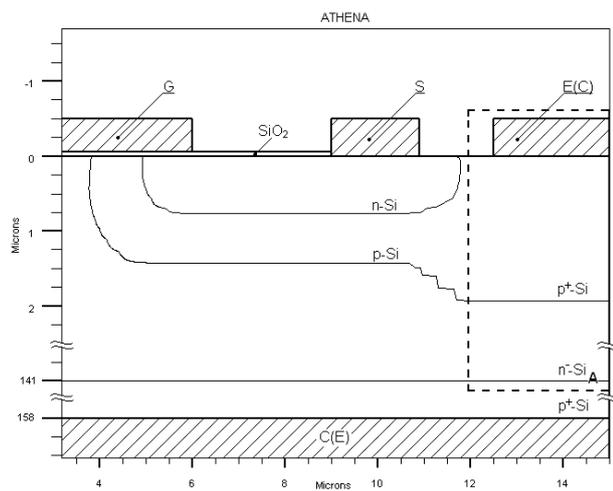
Основные конструктивные и технологические параметры исследуемой IGBT структуры взяты из рабо-

ты [7]. Результаты исследований, связывающих напряжение пробоя р–п–перехода с конструктивными и технологическими параметрами охранных колец, приведены в работе [1].

Эффективной является методика, заключающаяся в том, что расстояние между первым и вторым охранными кольцами W_{br} после добавления второго кольца должно быть равным оптимальному расстоянию между переходом и кольцом, полученному в структуре с одним кольцом. Очевидно, что таковым оказывается значение W_{br} , при котором достигается максимум напряжения пробоя. Таким образом, добавление нового охрannого кольца с выполнением приведенного выше условия приводит к дальнейшему повышению напряжения пробоя р–п–перехода.

III. МОДЕЛИРУЕМАЯ СТРУКТУРА

При расчете напряжения пробоя коллекторного перехода вертикального ррр–транзистора как составной части исследуемой IGBT структуры нет необходимости проводить моделирование структуры всего транзистора. На рис. 2 показана моделируемая область А (от поверхности на всю глубину эпитаксиального слоя), использованная при исследовании зависимости напряжения пробоя от различных комбинаций технологических параметров охранных колец и полевых обкладок, их количества и расположения. Такими параметрами для охрannого кольца являются расстояние между кольцами, ширина кольца, глубина залегания р–п перехода. Для полевой обкладки – ее длина и толщина диэлектрика. На рис. 2 перед скобками в обозначениях E(C) и C(E) – символы, принятые при описании соответствующих областей IGBT структуры, а в скобках – биполярного транзистора как элемента IGBT структуры.



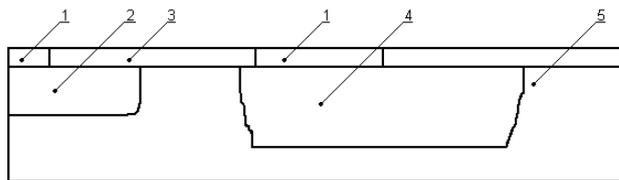
E – эмиттер; C – коллектор; S – исток; G – затвор

Рис. 2. IGBT структура с выделенной моделируемой областью А

Толщина эпитаксиального слоя моделируемой структуры была выбрана равной 141 мкм, а толщина р⁺–коллекторного слоя – 17 мкм согласно работе [7].

Оптимизация исследуемой конструкции с точки зрения достижения максимальной величины напряжения пробоя проводилась отдельно для структур с охранным кольцом и структур с полевой обкладкой.

Структура с охранным кольцом, для которой проводилось исследование пробивного напряжения, представлена на рис. 3.



1 – контакты к истоку и охрannому кольцу; 2 – исток; 3 – SiO₂; 4 – охрannое кольцо; 5 – подложка

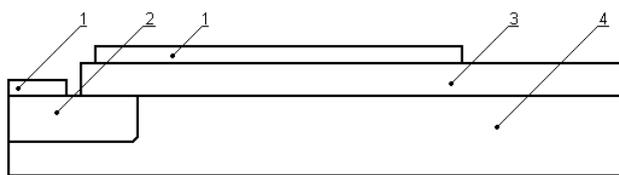
Рис. 3. Структура с охранным кольцом

Процедура оптимизации пробивного напряжения в структуре с охранным кольцом проводилась в три этапа, включающих:

- определение оптимального расстояния между охранным кольцом и р–п–переходом база–коллектор (W_{br});
- расчет оптимальной ширины охрannого кольца (W_r) при полученном оптимальном значении W_{br} ;
- исследование влияния глубины залегания р–п–перехода (x_j) охрannого кольца на напряжение пробоя с «геометрией» структуры, рассчитанной на предыдущих этапах.

Структура с полевой обкладкой показана на рис. 4. Оптимизация геометрии такой структуры с напряжением пробоя в качестве целевой функции проводилась в два этапа, включая:

- определение оптимальной длины полевой обкладки (L);
- расчет оптимальной толщины оксида (t_{ox}) при оптимальном значении L.



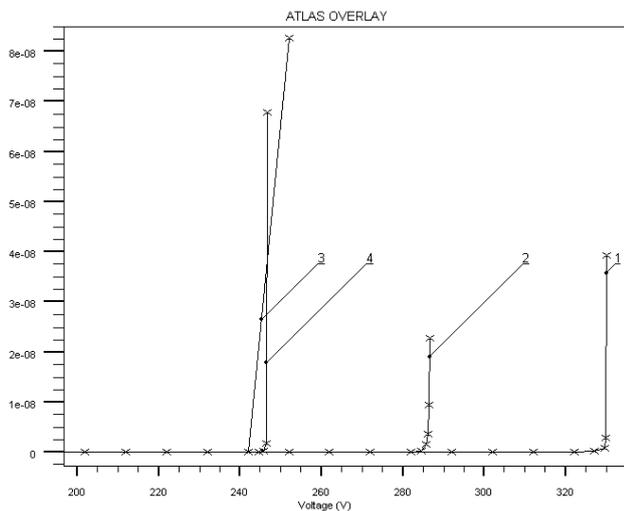
1 – контакты к истоку и полевой обкладка; 2 – исток; 3 – SiO₂; 4 – подложка

Рис. 4. Структура с полевой обкладкой

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Технологический процесс формирования исследуемой IGBT структуры, а также ее электрические характеристики, в том числе напряжение пробоя, моделировались с использованием программного обеспечения компании Silvaco [8].

Расчитанные зависимости тока I_c коллектора от напряжения на коллекторе V_c для структур с разными расстояниями между охранным кольцом и р–п–переходом W_{br} приведены на рис. 5.



$W_{br} = 5 \text{ мкм (1); } 15 \text{ мкм (2); } 35 \text{ мкм (3) и } 65 \text{ мкм (4)}$

Рис. 5. Зависимости тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе V_c для структур с разными расстояниями между охранным кольцом и р–п–переходом W_{br}

Данные, представленные на рис. 5, позволяют сделать вывод о немонотонном повышении напряжения пробоя V_{BV} с увеличением расстояния между охранным кольцом и р–п–переходом база–коллектор W_{br} . При достижении некоторого критического значения W_{br} (обозначим его L_{cr}) V_{BV} начинает снижаться при дальнейшем увеличении W_{br} . Для исследуемой структуры значение L_{cr} составляет примерно 15 мкм. Эту закономерность, по нашему мнению, можно объяснить тем, что в общем случае величина V_{BV} определяется распределением ОПЗ: для структуры с $W_{br} < L_{cr}$ ширина ОПЗ наименьшая в области охранныго кольца, а для $W_{br} > L_{cr}$ – в области перехода база–коллектор.

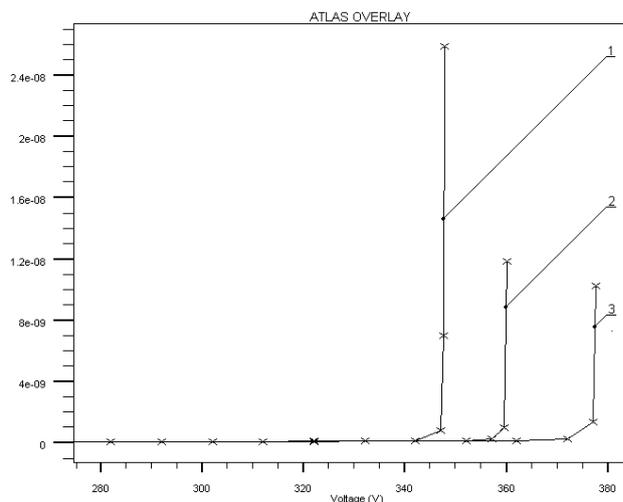
Зависимости тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе V_c для структур с разными значениями ширины охранныго кольца W_r приведены на рис. 6. Увеличение величины W_r приводит к повышению V_{BV} , что можно объяснить уменьшением кривизны («выпрямлением») ОПЗ р–п–перехода охранныго кольца.

Зависимости тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе V_c для структур с разными значениями глубины залегания р–п–перехода охранныго кольца приведены на рис. 7.

На рис. 7 показано, что увеличение глубины залегания р–п–перехода охранныго кольца x_j приводит к повышению величины V_{BV} . Чем больше глубина залегания р–п–перехода при толщине эпитаксиальной пленки, не ограничивающей ОПЗ, тем выше величина V_{BV} , поскольку радиус кривизны ОПЗ при этом увеличивается. В противном случае радиус кривизны ОПЗ уменьшается и, следовательно, величина V_{BV} понижается.

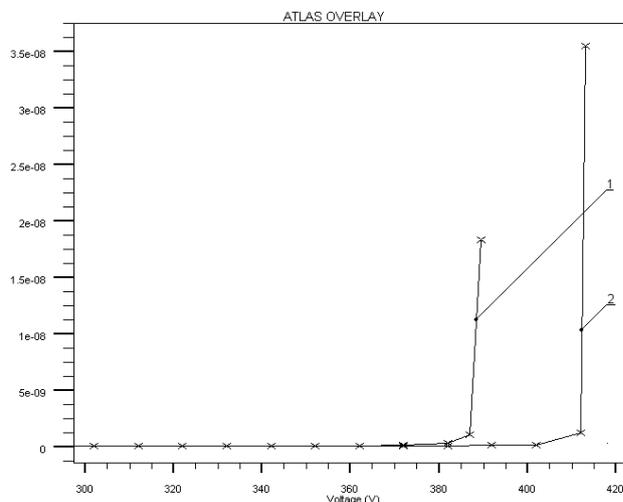
Зависимости тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе V_c для структур с разными длинами L полевой обкладки приведены на рис. 8, из которого видно, что величина V_{BV} повышается с увеличением дли-

ны полевой обкладки. Однако при достижении определенной величины L (на рис. 8 $L=10 \text{ мкм}$) происходит уменьшение V_{BV} при дальнейшем увеличении L . Как и для зависимости V_{BV} от расстояния между охранным кольцом и р–п–переходом (рис. 5), такая закономерность объясняется изменением распределения ОПЗ.



$W_r = 15 \text{ мкм (1); } 20 \text{ мкм (2) и } 30 \text{ мкм (3)}$

Рис. 6. Зависимости $I_c(V_c)$ для структур с разными значениями ширины охранныго кольца W_r

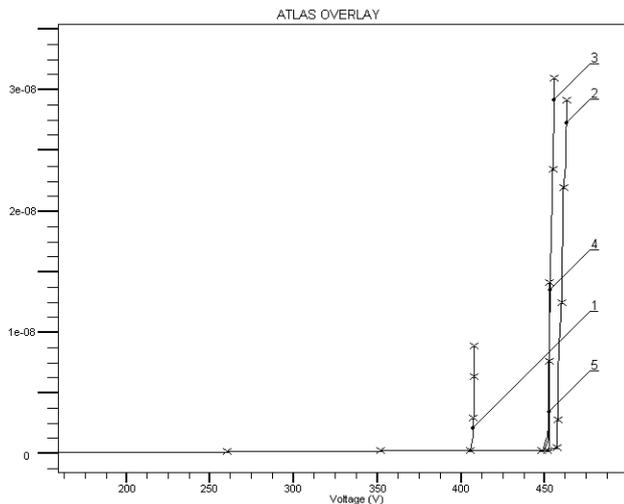


$x_j = 1,8 \text{ мкм (1) и } 2,4 \text{ мкм (2)}$

Рис. 7. Зависимости $I_c(V_c)$ для структур с разными глубинами залегания р–п–перехода охранныго кольца x_j

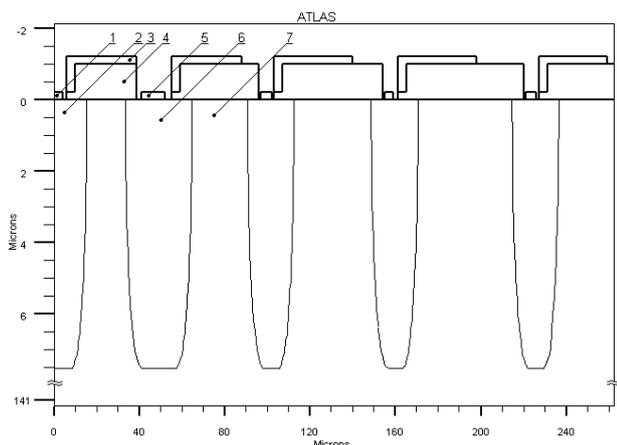
Все зависимости, представленные на рис. 5–8, характеризуются величиной V_{BV} , меньшей, чем 450 В. Для повышения V_{BV} целесообразно рассмотреть комбинирование различного количества охранных колец и полевых обкладок.

В результате оптимизационных исследований проектирования прибора с высокой величиной напряжения пробоя и минимальной площадью, занимаемой охранными кольцами, была получена структура, состоящая из 4–х охранных колец и 5–ти полевых обкладок (рис. 9).



$L=20$ мкм (1); 10 мкм (2); 30 мкм (3); 45 мкм (4) и 5 мкм (5)

Рис. 8. Зависимости $I_c(V_c)$ для структур с разными длинами полевой обкладки



1 – контакт к истоку; 2 – исток; 3 – первая полевая обкладка; 4 – SiO_2 ; 5 – контакт к первому охранным кольцу; 6 – первое охранным кольцо; 7 – подложка

Рис. 9. Оптимизированная структура

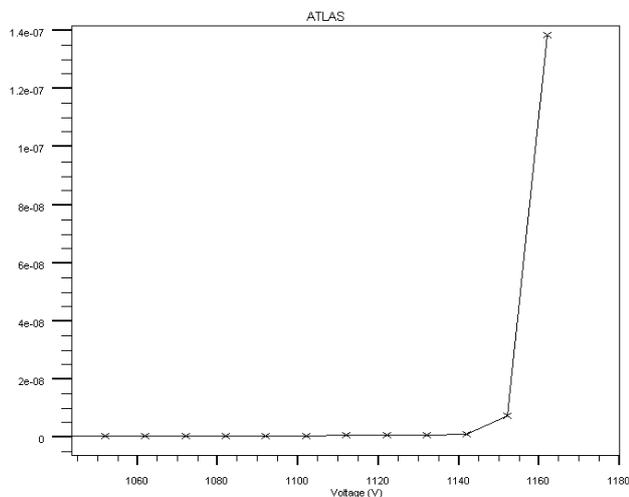


Рис. 10. Зависимость $I_c(V_c)$ для структуры, представленной на рис. 9

На рис. 10 представлена зависимость тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе V_c для полученной структуры, напряжение пробоя для которой составляет 1150 В.

Таким образом, совместное использование методологий повышения напряжения пробоя, описанных в работах [1] и [2] для ДМОП и биполярных транзисторов, позволило добиться существенного его увеличения для IGBT структуры.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследования возможности повышения величины напряжения пробоя биполярного транзистора как элемента IGBT структуры посредством комбинированного применения охранных колец и полевых обкладок. В результате оптимизации IGBT структуры по рассмотренным конструктивно-технологическим параметрам достигнуто напряжение пробоя, равное 1150 В.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при поддержке Белорусской республиканской научно-технической программы «Электроника и фотоника».

Авторы выражают благодарность ведущему конструктору ОАО «Интеграл» С.А. Сороке за ценные замечания и конструктивные предложения при обсуждении результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ключников А.А. Исследование и разработка конструктивно-технологических решений создания мощных ДМОП-транзисторов с оптимальной площадью при помощи средств приборно-технологического моделирования : автореф. дисс. : к-та тех. наук / А.А. Ключникова : М.: МИЭТ, 2007.
- [2] Еременко А., Зайцев Н., Новоселов А., Романов И. Двухмерное приборно-технологическое моделирование. Оптимизация конструкции высоковольтного биполярного прп-транзистора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 4. С. 58-60.
- [3] Dodge J., J.Hess J. IGBT tutorial // Application Technology APT0201 Rev. B. July 7, 2002. 15 pp.
- [4] Dodge J. Latest technology PT IGBTs vs. power MOSFETs // Application Technology APT0302 Rev. B. April 4, 2003. 6 pp.
- [5] Щукина И., Некрасов М. Новая технология PT IGBT против мощных МОП-транзисторов // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 14-16.
- [6] Designing a high-voltage IGBT stucture with TCAD // The Simulation Standard. April-June, 2010. P. 1-3.
- [7] Khanna V.K. The Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT. Theory and Design // The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2003. 544 pp.
- [8] <http://silvaco.com>.