

УДК 621.382

ШАХМАЕВА А.Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ПРОБИВНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Shakhmaeva A.R.

RESEARCH OF INTERRELATION OF A DESIGN AND MANUFACTURING TECHNIQUES OF SEMI-CONDUCTOR DEVICES WITH THEIR PENETRATIVE PRESSURE

Проведена оценка влияния конструкции и технологии формирования транзисторной структуры на значение пробивного напряжения. Получены зависимости в САПР TCAD Synopsys для пробивного напряжения от величины поверхностного заряда различных конструктивных исполнений транзистора.

Ключевые слова: транзистор, пробой, пробивное напряжение, поверхностный заряд, охранный кольцо.

The estimation of influence of a design and technology of formation of transistor structure on value of penetrative pressure is spent. Dependences in SAD TCAD Synopsys for penetrative pressure from size of a superficial charge of various designs of the transistor are received.

Key words: the transistor, breakdown, penetrative pressure, superficial charge, security ring.

Одним из основных электрических параметров, характеризующих мощный полупроводниковый прибор, является пробивное напряжение.

Анализ влияния конструктивно-технологических параметров прибора на пробивное напряжение транзисторной структуры необходимо начать с исследования влияния параметров, оказывающих на пробивное напряжение обычного р-п перехода. Затем можно провести анализу влияния параметров прибора на пробивное напряжение на примере структуры БСИТ-транзистора.

В р-п переходе при определенной величине обратного смещения наблюдается эффект пробоя, заключающийся в резком увеличении обратного тока через переход.

Как известно, существуют три основных механизма пробоя: туннельный, лавинный, тепловой [1]. Туннельный пробой происходит из-за прохождения носителей через изолирующий слой ОПЗ перехода, смещенного в обратном направлении. Для того, чтобы произошло туннелирование, ширина ОПЗ (при большом обратном смещении перехода) должна быть достаточно мала, что достигается в сильнолегированных р⁺-п⁺ переходах. Для возникновения теплового пробоя необходим тепловой саморазогрев структуры, что происходит при протекании значительного обратного тока через р-п - переход. Обычно тепловой пробой происходит после туннельного или лавинного пробоя р-п перехода.

При лавинном пробое неосновные носители разгоняются под действием электрического поля в ОПЗ и набирают энергию, достаточную для разрыва связи атомов кристаллической решетки. Происходит ударная ионизация атомов решетки с рождением новых носителей заряда, которые также разгоняются и ионизируют атомы кристаллической решетки. Величина разгоняющего электрического поля зависит от ширины ОПЗ р-п перехода в обратном смещении.

Доказано, что механизм пробоя в кремниевых переходах обязан туннельному эффекту при напряжениях пробоя, меньших $4E_g/q$. В переходах с напряжением пробоя,

превышающих $6E_g/q$, механизм пробоя обусловлен лавинным умножением. При напряжениях пробоя, лежащем в интервале 4 – 6 E_g/q , в пробое участвуют оба механизма (лавинный и туннельный).

Для типичной концентрации примеси в транзисторных структурах с $N_{\text{подл}} 10^{14} \text{ см}^{-3}$ максимальное пробивное напряжение одномерного р-п перехода равно 1600-1800 В при ширине ОПЗ 150 мкм.

Для двухмерного цилиндрического и трехмерного сферического перехода (с учетом бокового ухода примеси под маску) величина лавинного пробоя определяется не только концентрацией примеси в подложке, но и радиусом кривизны структуры. Пробивное напряжение реального диффузионного р-п перехода определяется величиной напряжения лавинного пробоя сферической части перехода.

Таким образом, пробивное напряжение р-п перехода сильно зависит от его геометрии.

Можно выделить основные факторы, определяющие пробивное напряжение реального р-п перехода:

- Уровень легирования истока перехода. Высокая концентрация примеси в истоке перехода ограничивает проникновение электрического поля в переход. Электрическое поле концентрируется вблизи глубины залегания р-п перехода и уменьшает пробивное напряжение.

- Состояние границы раздела Si-SiO₂. Обычно в технологическом процессе производства ИС и полупроводниковых приборов на пластине формируются слои SiO₂. На границе раздела Si-SiO₂ присутствует заряд, связанный с плотностью поверхностных состояний границы раздела. Положительный заряд границы раздела может приводить к обогащению нижележащей области n-типа электронами, что в свою очередь будет изменять ширину ОПЗ перехода вблизи поверхности, следовательно, и пробивное напряжение прибора.

Напряжение пробоя р-п перехода может быть увеличено за счет применения таких методов, как использование полевых обкладок и диффузионных колец.

Цель методов:

- во-первых, уменьшение вероятности электрического пробоя на поверхности путем создания, по возможности, условий для пробоя в объеме полупроводника,
- во-вторых, максимальное уменьшение напряженности электрического поля в объеме, чтобы как можно полней использовать все возможности полупроводника.

Рассмотрим ряд методов защиты р-п перехода, использованных при формировании структуры кристалла БСИТ - транзистора от поверхностного пробоя:

- Полевая обкладка (рис.1);
- Эквипотенциальное кольцо (охранная диффузия) (рис.2);
- Делительные кольца (рис.3);
- Частичное травление поверхности кремния (рис. 4);
- Снятие фаски (рис. 5).

Применение полевой обкладки является одним из распространенных методов повышения напряжения лавинного пробоя. Однако для эффективной работы обкладки необходимо правильно определить толщину окисла под обкладкой. Для обеспечения $U_{\text{проб}} \approx 1000 \text{ В}$ толщина окисла должна превышать 7 мкм, что практически не вписывается в технологию изготовления структуры БСИТ.

Эквипотенциальное кольцо (охранная диффузия) позволяет существенно повысить напряжение пробоя за счет увеличения радиуса кривизны р-п перехода. Ограничение метода состоит в необходимости проводить дополнительную диффузию и использования более толстых эпитаксиальных слоев, что ухудшает другие важные характеристики транзистора.

Приборы с рабочим напряжением в несколько сот вольт успешно работают, если вытравить глубокую канавку. Но при напряжениях пробоя выше 400-500 В используют механическое снятие фаски.

Снятие фаски - один из наиболее широко применяемых методов, особенно для приборов с напряжением более 1000 В, так как защитное покрытие, заполняющее канавку после травления фаски, обеспечивает качественную стабилизацию поверхности.

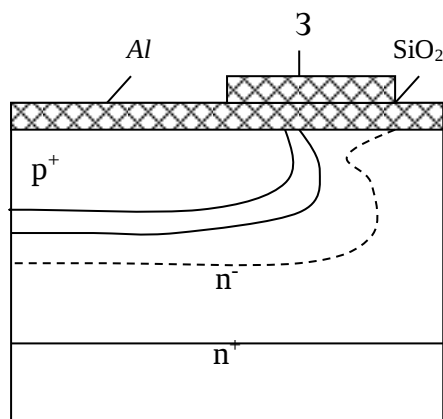


Рисунок 1 - Полевая обкладка

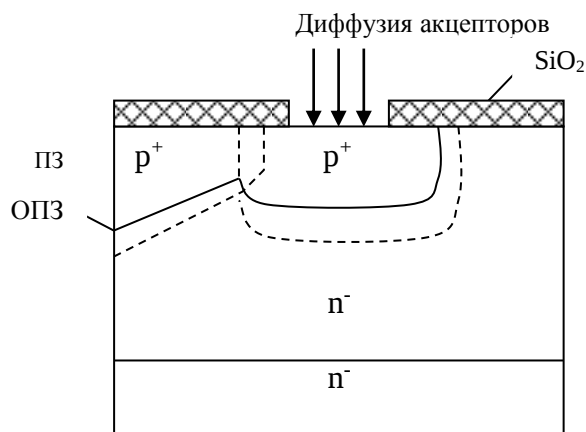


Рисунок 2 - Эквипотенциальное кольцо (охранная диффузия)

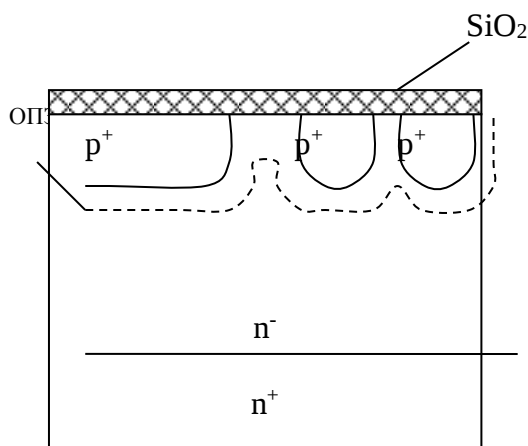


Рисунок 3 - Делительные кольца

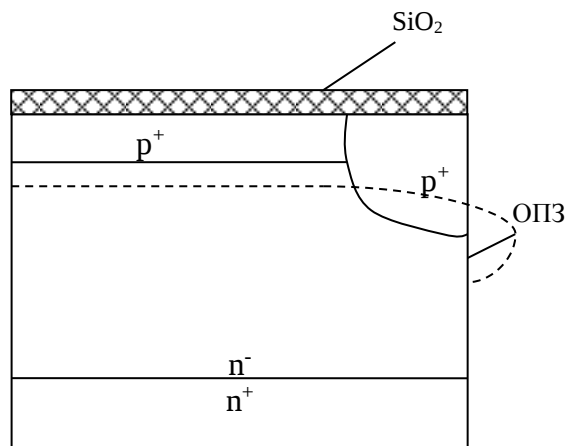


Рисунок 4 - Частичное стравливание поверхности кремния

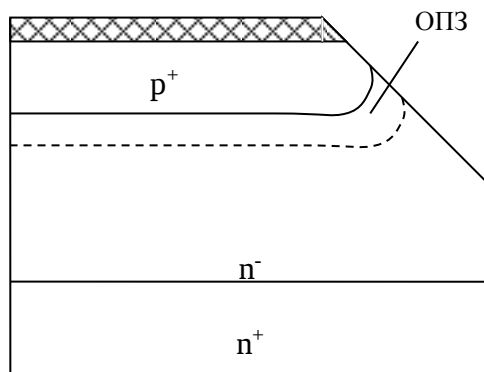


Рисунок 5 - Снятие фаски

Исследования показали, что одним из наиболее эффективных и технологичных методов повышения пробивного напряжения для полупроводниковых структур является применение диффузионных делительных колец. Делительные кольца формируют одновременно с созданием области основного р-п перехода – в нашем случае затворной области транзистора. Количество делительных колец и расстояние между ними выбираются, исходя из удельного сопротивления кремния и плотности поверхностных состояний (заряда) в пассивирующем р-п переход окисле.

На пробивное напряжение при формировании структуры исследуемых приборов существенное влияние оказывает технология изготовления (состояние поверхности на границе раздела Si-SiO₂ глубина залегания охранных колец) и, как следствие, конструкция прибора (число колец, расстояние между ними).

Целью данной работы являлась оценка влияния охранных колец и поверхностного заряда на границе раздела «полупроводник-диоксид кремния» на значения пробивного напряжения.

При изготовлении полупроводникового прибора первой операцией является выращивание диоксида кремния толщиной порядка одного микрона. В результате чего на границе раздела «полупроводник-диоксид кремния» формируется поверхностный заряд, величина которого может находиться в пределах от $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Исследования проводились с использованием САПР TCAD Synopsys на модели транзистора, изготавливаемого на подложке n-типа с концентрацией примеси $N=1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Охранные кольца формировались диффузией бора с последующей разгонкой. Наличие поверхностного заряда приводит к увеличению концентрации примеси в приповерхностном слое, из-за чего ширина обеднённой области (ОПЗ) вблизи поверхности отличается от ширины ОПЗ в объёме эпитаксиального слоя [2]. Напряженность поля увеличивается с увеличением концентрации примеси в приповерхностном слое. С помощью охранных колец – значение напряжённости на поверхности полупроводника можно снизить [3]. На рисунке 6 показано изменение концентрации примеси в эпитаксиальном слое полупроводника при величине поверхностного заряда $Q_{ss}=5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

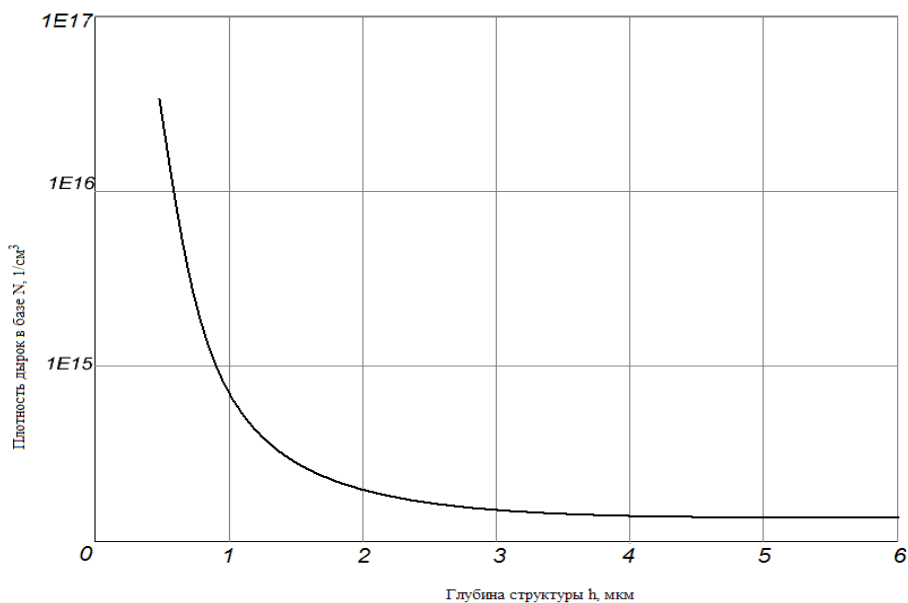


Рисунок 6 - Изменение концентрации примеси в эпитаксиальном слое полупроводника при величине заряда $Q_{ss}=5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

Увеличение числа колец и глубины их залегания приводит к увеличению пробивного напряжения, но при этом увеличивается площадь периферии структуры и

соответственно её стоимость. Поэтому оптимизация количества охранных колец и глубины их залегания является важной задачей при проектировании полупроводниковых приборов.

Исследования проводились для различных глубин залегания колец, различного числа колец и различных расстояний между кольцами при заданной глубине залегания. Результаты исследований представлены на рисунках 7-9.

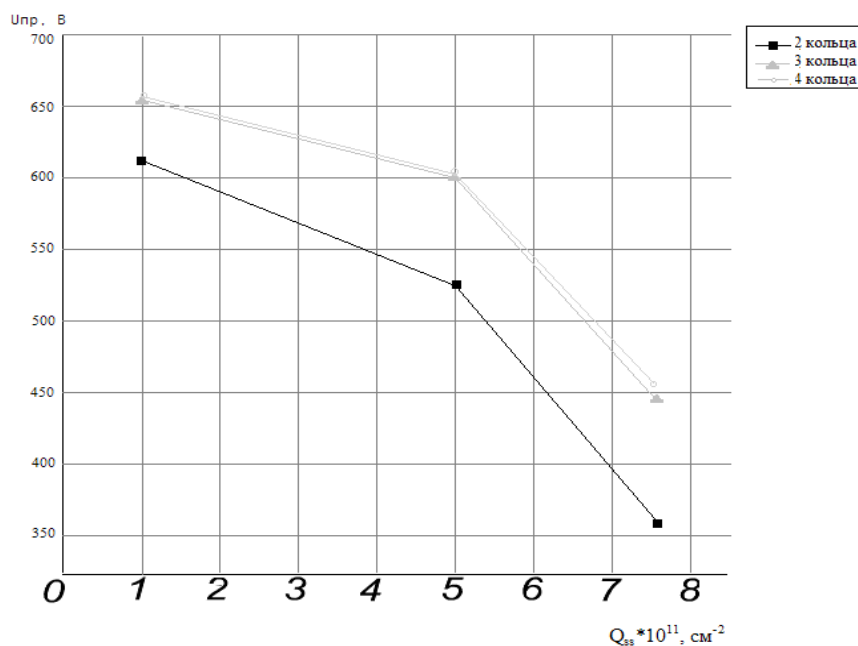


Рисунок 7 - Зависимость пробивного напряжения от величины поверхностного заряда при различном количестве колец при глубине залегания 8 мкм.

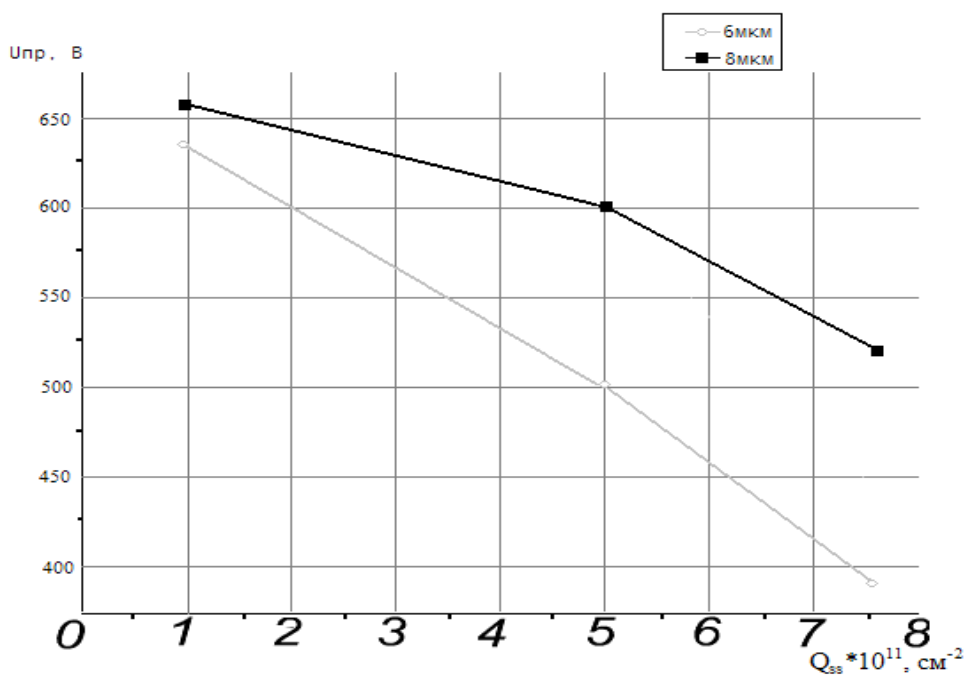


Рисунок 8 - Зависимость пробивного напряжения от величины поверхностного заряда при различной глубине колец, число колец – 4

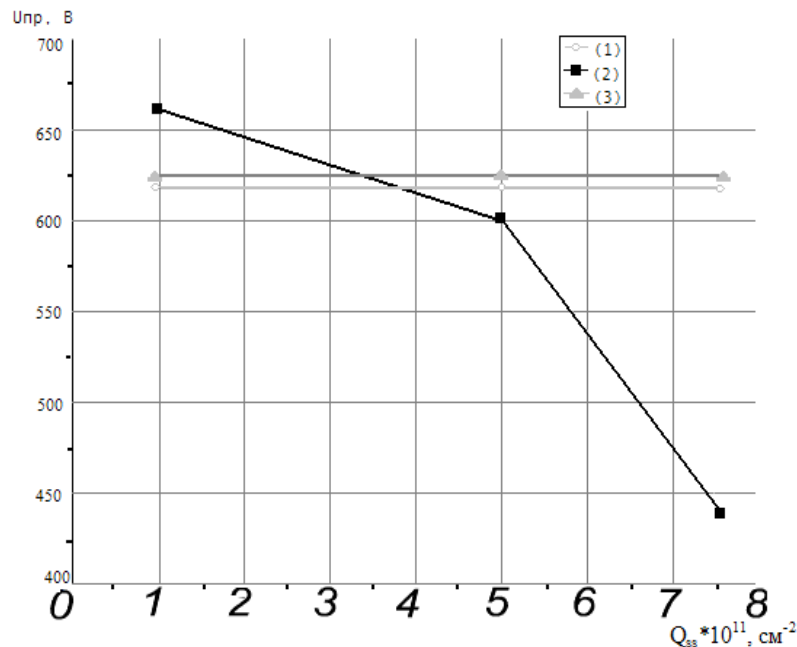


Рисунок 9 - Зависимость пробивного напряжения от величины заряда и расстояния между кольцами:

(1) – 6-8-10-12 мкм; (2) – 6-8-1-7 мкм; (3) – 6-6-7-7- мкм; число колец – 4.

Анализ данных показывает, что при максимальном значении заряда оптимальным является сочетание 4 колец с глубиной залегания 8 мкм при расстоянии между ними 6-6-7-7 мкм.

Получение высоких значений пробивных напряжений без охранных колец невозможно из-за возникновения поверхностного пробоя.

При проектировании полупроводниковых приборов необходим учёт максимального значения поверхностного заряда. Для приведенного значения поверхностного заряда глубина залегания охранных колец определяет их количество. Также особое внимание следует обращать на расстояние между кольцами. Расстояние между кольцами должно быть таким, чтобы не возник поверхностный пробой на основном переходе или на каком-либо из охранных колец.

Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными при проектировании и изготовлении БСИТ- транзистора КП 961.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Транзисторные структуры силовой электроники.- Спб.: Политехника, 2011. – 126 с.
 2. B.S. Avset, L. Evensen The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p^+ guard rings// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1996. Vol. 377. P. 397-403.
 3. Малеев С.А. и др. Проектирование на ЭВМ ограничительных колец с учётом заряда в диэлектрике// Электронная техника. Полупроводниковые приборы., - М.: 2007.
- M.S. Adler, V.A.K. Temple, A.F. Ferro Theory and Breakdown Voltage for Planar Devices with a Single Field Limiting Ring// IEEE Transactions on electron Devices, 1997. Vol. ED 24. No 2. P. 107-112