

УДК 621.315.592

## РАЗНОВИДНОСТИ ДИФфуЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ СИЛОВЫХ ДИОДОВ

К. т. н. А. З. Рахматов

ОАО «FOTON»  
Узбекистан, г. Ташкент  
plan-foton@mail.ru

*Приведены результаты исследования различных модификаций процесса диффузии легирующих примесей в кремнии применительно к  $p-n$ - и  $p^+np^+$ -структурам, предназначенным для изготовления мощных ограничителей напряжения. Результаты представляют интерес для использования в технологии создании силовых диодов на основе кремния.*

*Ключевые слова: ограничитель напряжения, диффузионная технология, мощные импульсы, пробой, кремний.*

Силовые диоды, которые могут выпрямлять, переключать и коммутировать мощные импульсы, требуют дальнейшего улучшения их функциональных параметров. К ним относятся ограничительные диоды, производимые в ОАО «FOTON». Они изготавливаются на основе усовершенствованной диффузионной технологии, которая обеспечивает получение низкого дифференциального сопротивления выпрямляющего  $p-n$ -перехода в  $p-n$ - и  $p^+np^+$ -структуре.

При разработке технологии необходимо учитывать, что в ограничителе напряжения (ОН) все области являются активными, включая квазинейтральные, контактную и базовую. При переходе из одной области в другую параметры должны резко отличаться. Контактные области в рабочем режиме осуществляют непрерывный отвод тепла. В квазинейтральных областях необходимо исключить падение напряжения, т. е. их удельное сопротивление должно быть как можно более низким. Наличие немодулируемой части приводит к лишнему поглощению мощности. Поэтому для создания эффективных ОН первостепенной задачей является выбор базового материала и технологии. Кроме того, переходные сопротивления соединений в случае прижимной конструкции приведут к резкому ограничению предельно допустимой импульсной мощности. Так как ОН должен выдерживать воздействие мощных импульсов тока, конструкцию его целесообразно формировать цельной. В частности, он должен обеспечивать длительную работу, рассеивая без существенного ущерба для себя сотни и тысячи паразитных импульсов значительной мощности. Учитывая необходимость обеспечения близкой к теоретической характеристики в выбранной  $p^+np^+$ -структуре, исследования процесса диффузии примесей проведены на основе известных, основанных на некоторых физических предположениях, методах диффузии примесей.

В настоящей работе приведены результаты проведенных технологических исследований диффузионных процессов четырьмя способами. При этом поэтапное совершенствование предусматривало избавление от недостатков, свойственных традиционному способу диффузии примесей, таких как образование неконтролируемого распределения примесей в диффузионных областях, создание неустойчивых дефектов, связанных с кислородом.

### **Технологии получения и некоторые параметры ограничителей напряжения**

Рассмотрим четыре способа диффузии примесей, отличающиеся друг от друга и часто используемые в полупроводниковой технологии.

**По первому традиционному способу** на одну поверхность исходного базового кремния однократно наносили бор, а на другую поверхность — фосфор с последующей ИК-сушкой. Процесс диффузии осуществляли при температуре 1250°C в течение 20—60 мин. В этом способе диффузии концентрация диффундируемых примесей по глубине уменьшалась по закону Фика.

**Второй способ** отличается тем, что перед процессом диффузии введена дополнительная операция — предварительный отжиг по определенному экспериментально подобранному температурному

режиму. В частности, исходная пластина нагревается со скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  от  $600$  до  $1050^{\circ}\text{C}$  в среде сухого кислорода, выдерживается при  $1050^{\circ}\text{C}$  в течение  $60$  мин в среде влажного кислорода и затем охлаждается до  $600^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  в среде сухого кислорода. В предлагаемом температурном режиме происходит распад низкотемпературных термодоноров (ТД) с выделением на один донор примерно  $10$  атомов кислорода, часть из которых уходит на формирование высокотемпературных ТД и, таким образом, нестабильные связи исключаются, а количество рекомбинационных центров уменьшается. Далее осуществляется одноразовое двухстороннее нанесение диффузантов, и после ИК-сушки проводится процесс диффузии при температуре  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение  $48$  часов.

**В третьем способе**, так называемом пакетном [1], базовый кремний подвергается предварительному отжигу, затем двукратно наносится бор и один слой фосфора с ИК-сушкой. Процесс диффузии примесей из твердой фазы осуществляли с использованием пленкообразующих растворов борной (КБК) и фосфорной (КФК) композиций, приготовляемых на основе тетраэтоксисилана и, соответственно, борной и фосфорной кислот. Для сравнения проведены процессы диффузии примесей из газовой фазы с использованием жидких диффузантов ( $\text{BBr}_3$ ,  $\text{PCl}_3$ ).

Пакетный способ отличается тем, что процесс диффузии проводится сразу на нескольких образцах, помещаемых в кварцевую кассету. На поверхности исходных кристаллов с определенным удельным сопротивлением ( $0,012\text{—}40$  Ом·см) шлифовкой создается микрорельеф для улучшения адгезии с диффузантом. Диффузант КБК-45 (45%-е содержание борной кислоты), создающий с исходным кристаллом  $p$ - $n$ -переход, на поверхность кристалла наносится дважды, а второй диффузант — КФК-54 (54%-е содержание фосфорной кислоты) наносится одним слоем. Для создания условий диффузии из бесконечного источника между исходными кристаллами располагаются матированные корундом прокладки  $\varnothing 800$  мкм толщиной  $1$  мм  $n^+$ - и  $p^+$ -типа проводимости. Исходные кристаллы устанавливаются в кассеты таким образом, чтобы прокладки оказались заключенными между одноименными сторонами. Сам процесс диффузии проводится в камере печи СДО 125/13-15. Температурный режим процесса диффузии включает нагрев системы со скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  от  $650$  до  $1250^{\circ}\text{C}$  в среде азота, выдержку при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение  $48$  часов и последующее охлаждение до  $650^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  в среде сухого кислорода. Использование пакетного способа диффузии примесей бора и фосфора в кремний позволило снизить поверхностное сопротивление  $p^+$ -слоя до  $1,1\text{—}1,2$  Ом/□, а  $n^+$ -слоя до  $0,3\text{—}0,4$  Ом/□. Характерным для предлагаемого способа является то, что в начальном участке (до  $25$  мкм) получаются близкие к поверхностному удельные сопротивления, которые затем сравнительно резко увеличиваются на три-четыре порядка, обеспечивая создание резкого  $p$ - $n$ -перехода. Значение коэффициента диффузии, определенного из условия бесконечного источника, составляет  $7,47 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с, что одного порядка с приведенными в литературе значениями. Глубина диффузии бора в кремний увеличивается сублинейно от времени диффузии и при  $48$  часах доходит до  $50\text{—}70$  мкм. Аналогичная закономерность одновременно имеет место и для диффузии фосфора. Механизм диффузии при этом соответствует междуузельному. Таким образом, на кристаллах кремния были получены с одной стороны диффузионные области  $p^+$ -типа, а с другой стороны —  $n^+$ -типа с параметрами, подходящими для изготовления на их основе ограничителей напряжения.

Качественное сравнение хода обратной ветви ВАХ  $p^+n$ - $n^+$ -структур указывает на то, что до предпробойной области в образцах, полученных первым и вторым способом, имеется некоторый рост обратного тока. Зависимость обратного тока от напряжения подчиняется степенному закону  $I_{\text{обр}} \sim U^{\gamma}$ .

На образцах, полученных первым способом, в области напряжений от  $0,02$  до  $0,75$  В имеют место генерационные процессы ( $\gamma=0,3\text{—}0,8$ ) в области объемного заряда  $p$ - $n$ -перехода, далее до  $6$  В генерационный механизм сменяется переносом носителей с участием рекомбинационных центров ( $\gamma=1\text{—}1,8$ ), и с последующим увеличением напряжения имеем туннельно-лавинный механизм ( $\gamma=2\text{—}4$  и больше). Аналогичные зависимости наблюдаются и на образцах, полученных вторым способом. В частности, на начальном участке до  $4$  В  $\gamma=0,6\text{—}0,8$ , а затем порядка  $\gamma=1\text{—}1,6$ , и далее ток определяется участием микроплазм и туннельным пробоем ( $\gamma=2\text{—}4$ ). Переходя к образцам ОН, полученным по третьему способу, следует отметить, что в  $p^+nn^+$ -структурах получают наилучшие результаты, т. е. в предпробойной области протекают малые обратные токи, определяемые генерацией носителей в слое объемного заряда. Соответственно, показатель степени  $\gamma$  будет меньше  $0,5$ . На участке резкого роста тока имеем лавинный механизм токопереноса, когда напряжение пробоя с ростом температуры возрастает. На основе таких структур изготавливаются высоковольтные ОН ( $10\text{—}350$  В).

**Четвертый способ** предназначен для получения низковольтных ОН высококонцентрационной диффузией мышьяка в вакуумированных ампулах [2].

Известно, что при легировании кремния мышьяком процессы испарения и осаждения собственно атомов кремния и примесных атомов бора из сильнолегированных кремниевых пластин марки КДБ приводят к образованию структурных дефектов на поверхности кремниевых пластин. Определенное участие в этом процессе принимает также газообразный мышьяк. Кроме того, как показали исследования, несмотря на меры по заключительному охлаждению ампул с пластинами, дефектность рабочих пластин в случае применения источника как в виде кристаллического As, так и в виде лигатуры при проведении диффузии в сильнолегированный кремний типа КДБ-0,001 и КДБ-0,002 была недопустимо высокой.

Для решения этой проблемы были проведены эксперименты, в которых вместе с навеской кристаллического As в ампулу дополнительно помещали порошок КДБ 0,001 с дисперсностью порядка 200 мкм и площадью поверхности  $S_p$ . Такой порошок служил источником паров бора и был предназначен для создания необходимого уровня противодействия, препятствующего испарению бора из подложки. Чтобы исключить испарение бора из подложки, его дополнительный источник должен обеспечивать в свободном объеме ампулы ( $V_F$ ) концентрацию паров бора ( $N_g$ ), близкую к его концентрации в подложке ( $N_B$ ), т. е. должно выполняться условие  $N_g \approx N_B$ . Таким образом процесс встречного испарения базовой примеси (бора) можно контролировать, управляя технологическими факторами —  $V_F$  и  $S_p$ . Процессы с использованием составного источника диффузии дали положительные результаты как по электрическим параметрам  $p$ - $n$ -структур, так и по уровню их дефектности. В результате в качестве источника диффузии при легировании мышьяком в вакуумированной кварцевой ампуле был выбран составной источник диффузии в виде навески кристаллического мышьяка и навески порошка кремния с концентрацией бора не менее его концентрации в рабочих кремниевых пластинах. Кремниевые образцы, подготовленные к ампульной диффузии, на поверхности имели слой оксида кремния толщиной 1—2 нм. Процесс диффузии мышьяка проводили при температуре 1150°C в течение 1 часа. Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла порядка 2 мкм. Использование в качестве источника кристаллического As (450 мг) и 5 г порошка КДБ с высокой концентрацией бора позволило ускорить диффузию мышьяка через естественный оксид кремния и обеспечить торможение продвижения диффузионного фронта As по сравнению с диффузией атомов As, находящихся в зоне с более высокой концентрацией, что способствовало увеличению градиента концентрации As в области  $p$ - $n$ -перехода и, соответственно, получению, в отличие от диффузии фосфора, качественных низковольтных  $p$ - $n$ -структур с относительно низкими значениями дифференциального сопротивления.

На основе полученных диффузией мышьяка в кремний  $p^+n^+$ -структур был освоен выпуск малогабаритных бескорпусных ограничителей напряжения на импульсные мощности от 1,5 до 3 кВт в виде таблеток. При этом упростился процесс монтажа и сборки нескольких ограничителей напряжения в модуль. Монтажная площадь по сечению разработанных бескорпусных ограничителей напряжения несколько раз превышает площадь корпусных аналогов разработанных приборов, и в связи с этим выделяемая мощность быстрее рассеивается.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Патент 5328, Узбекистан. Способ изготовления кремниевых ограничителей напряжения / Муратов А.Ф., Рахматов А.З., Меркулов А.А., Исмаилов И.Р.— 1994.— Бюл. № 3.
2. Рахматов А.З., Скорняков С.Л., Каримов А.В. и др. Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010.— № 5—6.— С. 30—35.

A. Z. Rakhmatov

#### **Various diffusion technologies for silicon power diodes production.**

The paper presents the results of the study on different modifications of the process of diffusion of doping impurities in silicon with respect to the  $p$ - $n$  and  $p^+n^+$  structures designed for the manufacture of high-power voltage limiters. The results are of interest for technology of silicon-based power diodes production.

Keywords: *voltage limiter, diffusion technology, high power pulses, breakdown, silicon.*