

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, А. Ю. КИЗЯК,  
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию  
16.01 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. А. ЕВТУХ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ НА ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОГО $n^{++}-p^+$ -ПЕРЕХОДА

*Приведены экспериментальные результаты и рассмотрены возможности их практического использования в технологии изготовления СБИС.*

В рамках разработки БИС на кремниевой подложке для электронных пластиковых карт с предварительной оплатой предусматривается возможность при необходимости проводить дальнейшее улучшение ее параметров [1, 2]. В качестве базовой ячейки памяти для такой БИС принят элемент FLOTOX, обладающий целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами ячеек памяти, которые используются в электрически программируемых постоянных запоминающих устройствах (ЭППЗУ) [2].

В ЭППЗУ с FLOTOX-ячейкой памяти, а также в некоторых других типах БИС, возможно наличие в схеме напряжений  $\geq 20$  В. В связи с этим необходимо, чтобы пробивное напряжение разветвленного неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода было не менее 21 В (см. рис. 1, где стрелками показана область пробоя, исследуемая в данной работе).

Здесь Si-poly — поликремниевый затвор;

LOCOS — окисная изоляция;

$n^{++}$  — диффузионные области сток/исток и диффузионная шина;

$x_j$  — глубина диффузионной области сток/исток и диффузионной шины;

$p^+$  — диффузионные области подлегирования под окисной изоляцией;

p-Si (100) — кремниевая подложка.

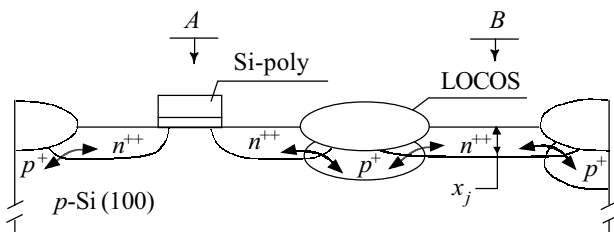


Рис. 1. Схематическое изображение сечения транзисторной структуры (A) и диффузионной шины (B)

Пробивное напряжение резкого  $n^{++}-p^+$ -перехода определяется полуэмпирическим выражением [3, с. 111]

$$V_B \cong 60 \left( \frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{N_B}{10^{10}} \right)^{-3/4}, \quad (1)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны кремния при комнатной температуре, эВ;

$N_B$  — концентрация примеси в слаболегированной области.

Однако данное выражение определяет “собственный” пробой  $n^{++}-p^+$ -перехода и не учитывает влияние на него дефектов в кремниевой подложке. Вместе с тем известно [4], что структурные несовершенства, или дефекты (точечные дефекты, дислокации и т. д.), присущие полупроводниковым твердым телам, вызывают существенные изменения их электрических свойств. Применительно к технологии изготовления БИС и сверхбольших интегральных схем (СБИС) величина их влияния зависит от уровня технологии, который определяется минимальными топологическими размерами элементной базы интегральной схемы (например, глубина  $n^{++}-p^+$ -перехода, длина канала и т. д.). Кислород попадает в кристалл в процессе выращивания при очень высоких температурах ( $\sim 1420^\circ\text{C}$ ) [5]. Концентрация  $\text{O}_2$  в кремнии, выращенном по методу Чохральского, достаточно высока и обычно составляет  $(0,5 \pm 2,0) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При изготовлении БИС ЭППЗУ в ситуациях, когда температуры близки к  $1000^\circ\text{C}$ ,  $\text{O}_2$  находится в перенасыщенном состоянии, что способствует выпадению  $\text{O}_2$  с образованием дефектов. Наличие же дефектов в приповерхностной области, где формируются активные элементы БИС (транзисторы, сопротивления, емкости), может приводить к деградации характеристик элементов. Например, размер дислокации либо кислородного кластера может достигать от 0,5 до 10 мкм. При  $x_j < 1$  мкм глубина диффузионного перехода и размер дефекта сравнимы, что может привести к снижению пробивного напряжения в месте наличия дефекта.

В настоящей работе рассматривается влияние атомов кислорода, углерода в кремниевой подложке (приводящих к образованию дефектов), а также микродефектов, имеющих в исходной пластине, на пробивное напряжение разветвленного неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода.

### Изготовление экспериментальных образцов и измерения

В качестве подложки использовался кремний КДБ-40/100, выращенный по методу Чохральского. На кремниевой подложке формировались  $n^{++}-p^+$ -переходы большой площади и большого периметра ( $S=10,5 \text{ мм}^2$ ,  $P=2,07 \text{ м}$ ).

Технологический маршрут формирования неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода соответствовал сокращенному варианту технологии изготовления БИС с проектными нормами 3 мкм для схем ЭППЗУ с ячейкой памяти типа FLOTOX, но с сохранением всех термических процессов. Он включал в себя следующие технологические операции.

На исходной пластине КДБ-40/100 выращивался окисный слой  $\sim 50$  нм, на который осаждался нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной  $\sim 150$  нм. Методами фотолитографии и плазмохимического травления пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  создавались активные и пассивные области. Ионным легированием энергией 100 кЭв и дозой 3 мкКул/см<sup>2</sup> подлегировались области пассивного поля (рис. 1,  $p^+$ -области). После ионного легирования над этими областями при температуре 1000°C выращивался толстый окисел (LOCOS) толщиной 1,3 мкм, который служит изоляцией между активными элементами интегральной схемы. Так как активные элементы (транзисторы) в исследуемой структуре отсутствовали из-за неостребованности, последующие технологические операции (до создания активных  $n^{++}$ -областей) включали только термические процессы (туннельное окисление, окисление под затвор и отжиги), сопутствующие созданию активных элементов. Диффузионные  $n^{++}$ -области создавались ионным легированием мышьяка энергией 100 кЭв и дозой 1000 мкКул/см<sup>2</sup>. Структура  $n^{++}-p^+$ -перехода на этом этапе его создания представлена на рис. 1, В.

Последующие технологические операции, такие как осаждение и оплавление межслойной изоляции, создание контактных окон, формирование металлической разводки с последующим отжигом в водороде при температуре 450°C, завершали процесс создания экспериментальных образцов. Глубина диффузионной  $n^{++}$ -области ( $x_j$ ) составила в конце технологического маршрута  $\sim 0,6$  мкм.

Концентрация кислорода и углерода определялась методом ИК-спектроскопии. Плотность микродефектов оценивалась методом оптической микроскопии и селективного травления пластины. Измерения концентрации примесей кислорода, углерода и микродефектов проводились на исходных пластинах. Содержание кислорода изменялось от  $4,8 \cdot 10^{17}$  до  $8,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,

углерода — от  $2 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, микродефектов — от  $10^4$  до  $10^5$  см<sup>-3</sup>.

Измерение пробивного напряжения проводилось на уровне тока  $10^{-6}$  А с помощью ПНХТ Л2-57. На каждой пластине измерялось пробивное напряжение  $n^{++}-p^+$ -переходов не менее чем на 50 модулях, группа из близких по дефектно-примесным характеристикам пластин состояла из 5—6 пластин. Снималась карта распределения пробивных напряжений на всех модулях в пределах пластины.

По результатам измерений были построены гистограммы распределения пробивного напряжения неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода, а также зависимости  $\ln(-\ln(1-f_i))$  от  $V_B$ , где  $f_i$  — общий процент пробоев, по  $i$ -е значение величины пробоя, включительно [6, 7].

### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены гистограммы, показывающие влияние атомов кислорода на пробивное напряжение неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода. На гистограммах видно наличие нескольких характерных областей в распределении напряжения пробоя. Пробои до 6 В обуславливают так называемую область “нулевых” пробоев. (В данной работе мы просто констатируем ее наличие либо отсутствие, без анализа причин ее появления.) Интервал напряжений пробоя 6—14 В называется областью “дефектного” пробоя, а интервал напряжений пробоя  $\sim 14$ —24 В называется областью “микродефектного” пробоя. Дефектный пробой обусловлен дефектами, размер которых больше или соизмерим с размером (глубиной) диффузионной области либо пространственного заряда  $n^{++}-p^+$ -перехода. Микродефектный пробой обусловлен микродефектами, размер которых должен быть меньше, чем размер диффузионной области либо области пространственного заряда  $n^{++}-p^+$ -перехода. Область напряжений пробоя больше 24 В называется областью “собственного” пробоя. Напряжение пробоя в данной области определяется по формуле (1).

Из рис. 2 видно, что если концентрация атомов кислорода в подложке равна  $4,8 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, то мода распределения пробивного напряжения находится в области “собственного” пробоя  $n^{++}-p^+$ -перехода (24—30 В). Изменение концентрации кислорода приблизительно в два раза приводит к резкому смеще-

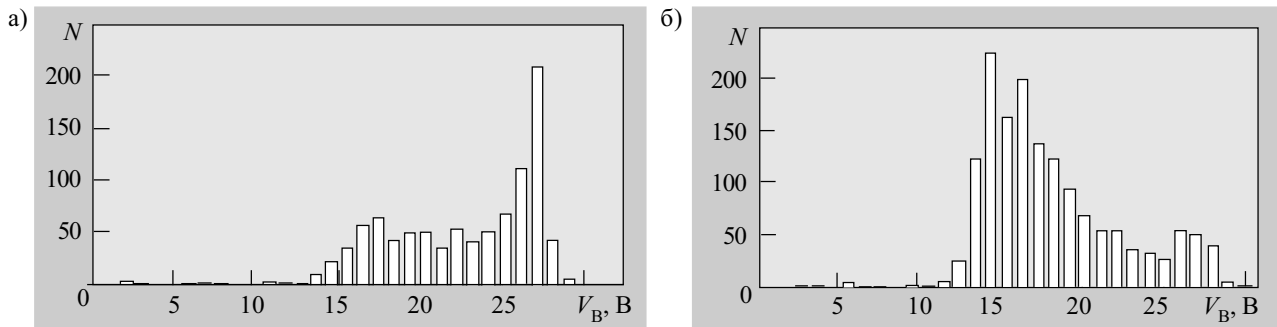


Рис. 2. Гистограмма распределения пробивного напряжения неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода для пластин кремния с разной концентрацией кислорода  $\text{O}_2$  ( $N_{\text{O}_i}$ ): а —  $N_{\text{O}_i} = 4,8 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (объем выборки: 959 измерений по 7 пластинам); б —  $N_{\text{O}_i} = 8,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (объем выборки: 1527 измерений по 9 пластинам)

нию моды распределения пробивного напряжения в область “дефектного” и “микродефектного” пробоев. На количество “нулевых” пробоев рассмотренный диапазон изменения концентрации кислорода в кремниевой подложке практически не влияет.

Механизмы влияния кислорода на пробой  $n^{++}-p^+$ -перехода могут быть следующие [5]. Кислород в кремнии может находиться в виде кластеров, размер которых зависит от концентрации кислорода в кремнии. Когда кластеры находятся у поверхности кристалла, они могут стать электрически активными, действуя как центры зарождения преципитатов таких примесей как медь.

Кроме этого, нагрев при  $900^{\circ}\text{C}$  обычно ведет к выделению  $\text{SiO}_2$ , вследствие чего может наблюдаться эффект электрической поляризации частиц  $\text{SiO}_2$ , который приводит к образованию микроплазмы в  $n^{++}-p^+$ -переходах и, соответственно, к пробоем  $n^{++}-p^+$ -перехода. Линейный размер кластеров и их концентрация и определяют, видимо, какой вид пробоя является наиболее вероятным — “дефектный” либо “микродефектный”. Некоторые авторы ([5]) предполагают, что кислород может быть ответственен за образование микродефектов типа свирлей (микродефекты роста в виде спиральных полос), которые, как показано ниже, приводят, в основном, к “дефектному” типу пробоя.

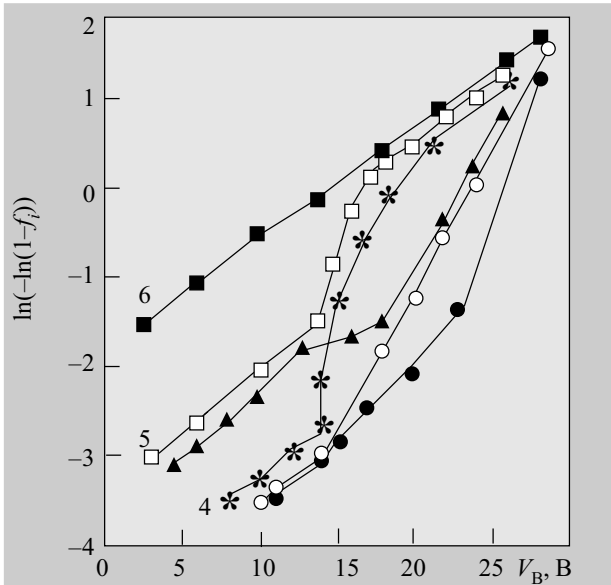


Рис. 3. Кривые распределения пробивного напряжения разветвленного  $n^{++}-p^+$ -перехода для пластин монокристаллического кремния с различным содержанием кислорода ( $N_O$ ), углерода ( $N_C$ ) и микродефектов ( $N_{md}$ ):  
 1 —  $N_O=(5,7...6,3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_C\leq 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_{md}\leq 10^4\text{ см}^{-2}$ ;  
 2 —  $N_O=(5,7...6,3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_C\leq 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_{md}\geq 10^5\text{ см}^{-2}$ ;  
 3 —  $N_O=(5,7...6,3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_C\geq 6\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_{md}\geq 10^5\text{ см}^{-2}$ ;  
 4 —  $N_O\geq 9\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_C\leq 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_{md}\geq 10^5\text{ см}^{-2}$ ;  
 5 —  $N_O\geq 9\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_C\geq 6\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_{md}\geq 10^5\text{ см}^{-2}$ ;  
 6 — свирлевое распределение микродефектов,  $N_O\geq 9\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$

На рис. 3 представлены результаты совместного влияния примесей кислорода, углерода и микродефектов на пробивное напряжение разветвленного

$n^{++}-p^+$ -перехода. При преобладании одного механизма пробоя зависимости представляют собой прямую линию, а наличие перегибов указывает на присутствие нескольких механизмов пробоя.

При концентрации кислорода  $\leq (5,7...6,3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$  и углерода  $\leq 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  изменение плотности микродефектов не влияет на вероятность образования «нулевого» пробоя, но приводит к незначительному увеличению вероятности «дефектного» и, особенно, «микродефектного» пробоя (кривые 1, 2). Увеличение концентрации углерода в кремниевой подложке вызывает при этом увеличение вероятности появления «дефектного» пробоя (кривые 2 и 3, 4 и 5). Возможные механизмы влияния углерода на пробой  $n^{++}-p^+$ -перехода недостаточно ясны.

Свирлевое распределение дефектов на пластине с высоким содержанием кислорода ( $9\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ) приводит к преобладанию одного механизма пробоя — «дефектного» (кривая б).

**Выводы**

Примеси кислорода и углерода оказывают очень существенное влияние на вероятность пробоя. В исследованном в данной работе диапазоне концентраций кислород, в основном, влияет на вероятность “микродефектного” пробоя, а углерод — “дефектного”. Плотность микродефектов, имеющих в исходном кремнии, также оказывает влияние на вероятность “микродефектного” пробоя.

Полученные результаты позволяют определить требования к дефектно-примесному состоянию исходных пластин кремния (по содержанию кислорода, углерода и микродефектов), необходимые для изготовления СБИС с определенными значениями пробивного напряжения неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода. С другой стороны, определив дефектно-примесное состояние исходных пластин кремния (по содержанию кислорода, углерода и микродефектов), можно прогнозировать, какое значение пробивного напряжения неуправляемого  $n^{++}-p^+$ -перехода и с какой вероятностью можно получить.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Сидоренко В. П., Забродина О. Н., Сидорчук В. Н., Николаенко Ю. Е. БИС электронных пластиковых карт с предварительной оплатой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 53—57.
2. Сидоренко В. П., Сидорчук В. Н., Забродина О. Н., Николаенко Ю. Е. Энергонезависимая память на элементах FLOTOX для БИС электронных карт // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 57—61.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1.— М.: Мир, 1984.
4. Полупроводники / Под ред. Н. Б. Хеннея.— М.: Иностранная литература, 1962.
5. Hu S. M. Defects in silicon substrates // J. Vac. Sci. and Technol.— 1977.— Vol. 14, N 1.— P. 17—31.
6. Wolters D. R., Van der Shoot J. J. Dielectric breakdown in MOS devices. Part I / Philips J. Res.— 1985.— Vol. 40, N 3.— P. 115—136.
7. Gumbel E. Statistics of extremes.— New York: Columbia University Press, 1958.