

# Особенности вольт-амперных характеристик МДП-структур $\text{SiO}_2/4H\text{-SiC}$ с имплантированным в карбид кремния фосфором

© А.И. Михайлов<sup>\*+</sup>, А.В. Афанасьев<sup>\*</sup>, В.А. Ильин<sup>\*</sup>, В.В. Лучинин<sup>\*</sup>, Т. Sledziewski<sup>\*</sup>,  
С.А. Решанов<sup>♦</sup>, А. Schöner<sup>+♦</sup>, М. Krieger<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Acreo Swedish ICT AB,  
16440 Kista, Sweden

<sup>\*</sup> Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg,  
91058 Erlangen, Germany

<sup>♦</sup> Ascatron AB,  
16440 Kista, Sweden

(Получена 19 мая 2015 г. Принята к печати 3 июня 2015 г.)

Исследовано влияние имплантации ионов фосфора в эпитаксиальный слой  $4H\text{-SiC}$  непосредственно перед термическим ростом подзатворного диэлектрика в атмосфере сухого кислорода на надежные характеристики подзатворного диэлектрика. Установлено, что наряду с пассивацией поверхностных состояний внедрение ионов фосфора приводит к незначительному снижению поля диэлектрического пробоя и уменьшению высоты энергетического барьера между карбидом кремния и диэлектриком, связанными с присутствием атомов фосфора на  $4H\text{-SiC}/\text{SiO}_2$  интерфейсе и в объеме диоксида кремния.

## 1. Введение

В краткосрочной перспективе силовые полевые транзисторы на  $4H\text{-SiC}$  способны вытеснить с рынка кремниевые биполярные транзисторы в диапазоне пробивных напряжений 1–3 кВ [1] благодаря низкому сопротивлению активной области, низким потерям при переключении, а также в силу униполярной природы прибора, что особенно важно для высокочастотных применений.

Однако присутствие кластеров углерода на границе раздела  $4H\text{-SiC}/\text{SiO}_2$  в результате окисления карбида кремния при формировании подзатворного диэлектрика [2], а также большая ширина запрещенной зоны  $4H\text{-SiC}$  обуславливают высокую плотность уровней прилипания вблизи дна зоны проводимости полупроводника, что значительно снижает подвижность носителей заряда в канале транзистора и эффективность работы прибора в целом.

В работе [3] было показано, что введение ионов фосфора в  $4H\text{-SiC}$  методом ионной имплантации перед формированием подзатворного диэлектрика в атмосфере сухого кислорода существенно снижает плотность поверхностных состояний на границе раздела  $4H\text{-SiC}/\text{SiO}_2$ .

Помимо низкой плотности состояний на границе раздела, важным параметром любого транзистора является его надежность и срок службы. В данной работе мы провели исследование влияния ионов фосфора, введенных методом ионной имплантации в  $4H\text{-SiC}$  перед формированием подзатворного диэлектрика методом сухого окисления, на надежные характеристики подзатворного диэлектрика.

## 2. Методика эксперимента

Тестовые структуры были сформированы на коммерческих подложках  $n^+4H\text{-SiC}$  с эпитаксиальным слоем  $n$ -типа с концентрацией азота около  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , выращенным на  $4^\circ$ -разориентированной Si-границе (0001).

Электрофизические свойства образцов исследовались при комнатной температуре методом вольт-амперных измерений.

Вольт-амперные характеристики были сняты при комнатной температуре, за ток пробоя был принят ток плотностью  $1 \text{ мА/см}^2$  (рис. 1). На всех кривых, построенных в полулогарифмическом масштабе, можно выделить два линейных участка с изменением угла наклона в районе  $6 \text{ МВ/см}$ . Протекание тока через подзатворный диэлектрик в области до  $6 \text{ МВ/см}$  обусловлено механизмом Пула–Френкеля, а изменение наклона прямой при превышении напряженности поля  $6 \text{ МВ/см}$  — включением механизма автоэлектронной эмиссии по Фаулеру–Нордгейму. Включение механизма автоэлектронной эмиссии наступает при меньшем значении напряженности электрического поля для образцов с имплантированным фосфором по сравнению с образцом-свидетелем. Это, вероятно, вызвано присутствием фосфора в объеме диэлектрика, который создает электронные состояния в запрещенной зоне диоксида кремния и делает возможным туннелирование электронов из полупроводника в поликремний через данные состояния при меньших значениях напряженности электрического поля. В остальном характер вольт-амперных кривых не меняется от образца к образцу, при этом среднее значение поля пробоя падает с увеличением концентрации ионов фосфора (см. таблицу).

<sup>†</sup> E-mail: m.aleksey.spb@gmail.com

Характеристики исследованных образцов

Образец	$E_{impl}$ , кэВ	$D_{impl}$ , см <sup>-2</sup>	$d$ , нм	$\langle E_b \rangle$ , МВ/см	$\Phi_b$ , эВ
#1	20	$3 \cdot 10^{12}$	63.1	9.8	2.73
#2	20	$3 \cdot 10^{13}$	66.8	9.7	2.71
#3	35	$3 \cdot 10^{12}$	68.1	9.7	2.73
#4	35	$3 \cdot 10^{13}$	72.0	9.4	2.63
#5	—	—	49.2	10.0	2.76

Величина энергетического барьера между полупроводником и диэлектриком была определена по углу наклона линейного участка вольт-амперных кривых в координатах Фаулера–Нордгейма (рис. 2) в соответствии с уравнением [4]

$$\lg \left( \frac{J}{E^2} \right) = \lg(a) - \frac{8\pi\sqrt{2m^*}(q\Phi_b)^{\frac{3}{2}}}{3qh \ln(10)} \frac{1}{E},$$

где  $J$  — плотность тока (А/м<sup>2</sup>),  $E$  — напряженность электрического поля (В/м),  $a$  — постоянная,  $m^*$  — эффективная масса электронов в диоксиде кремния,  $\Phi_b$  — высота потенциального барьера между полупроводником и диэлектриком. Присутствие фосфора в диоксиде кремния приводит к снижению величины барьера на 0.13 эВ для образца #4 с самой высокой концентрацией фосфора по сравнению с образцом-свидетелем без ионной имплантации (см. таблицу). Это связано с создаваемыми фосфором электронными состояниями, энергетически расположенными в пределах запрещенной зоны диоксида кремния, из-за которых происходит сужение эффективной ширины запрещенной зоны диэлектрика в местах локализации фосфора.

Стандартным методом оценки надежности подзатворного диэлектрика при промышленном производстве полевых транзисторов являются вольт-амперные измерения и метод TDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown), который предполагает измерение времени до пробоя диэлектрика при приложении фиксированного тока. Однако данный метод требует долговременных измерений, поэтому в данной работе был использован метод TZDB (Time Zero Dielectric Breakdown), заключающийся в измерении пробойного напряжения диэлектрика и, как правило, построении функции распределения Вейбулла.

График функции распределения Вейбулла (рис. 3) наглядно демонстрирует незначительное ухудшение электрической надежности подзатворного диэлектрика при использовании ионной имплантации фосфора как метода снижения плотности поверхностных состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> по сравнению с образцом-свидетелем без ионной имплантации фосфора. Оба образца демонстрируют только внутренний тип пробоя, поскольку не имеют ярко выраженных изломов на графике функции распределения Вейбулла. Деградация пробойных характеристик диоксида кремния связана с присут-

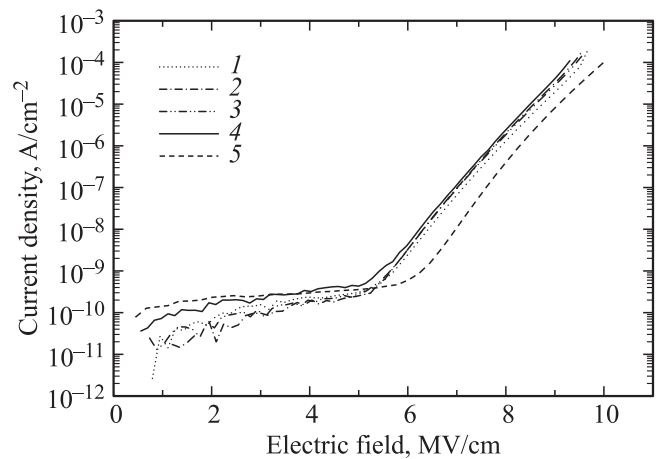


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики МОП-структур, снятые при комнатной температуре: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3, 4 — образец #4, 5 — образец-свидетель (без ионной имплантации).

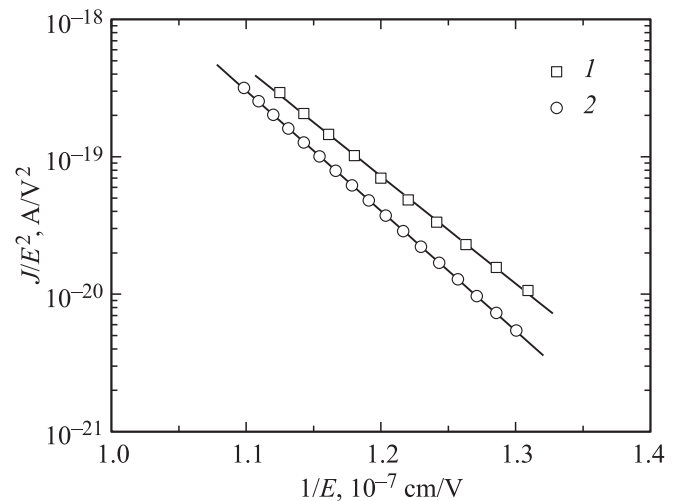


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики МОП-структур в координатах Фаулера–Нордгейма: 1 — образец #4, 2 — образец-свидетель (без ионной имплантации).

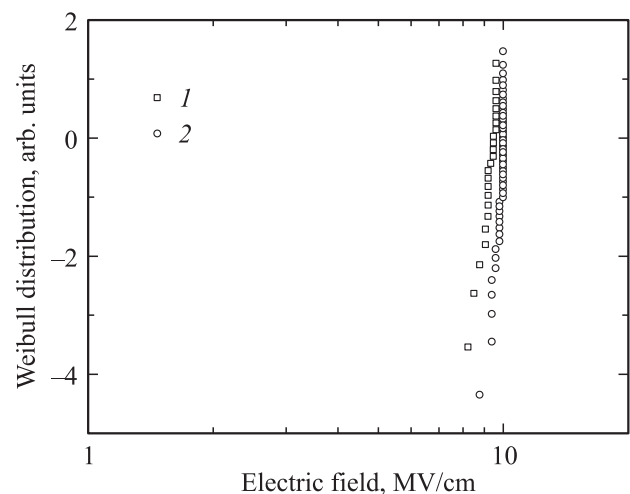


Рис. 3. График функции распределения Вейбулла для электрического пробоя подзатворного диэлектрика. 1 — образец #4, 2 — образец-свидетель (без ионной имплантации).

ствием в объеме диэлектрика ионов фосфора, создающих состояния в запрещенной зоне SiO<sub>2</sub> и способствующих протеканию тока при приложении напряжения.

### 3. Заключение

Выявлено снижение поля диэлектрического пробоя диоксида кремния на 6%, а также высоты энергетического барьера между 4H-SiC и диоксидом кремния на 5% для образца, имеющего самую высокую концентрацию ионов фосфора на границе раздела 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> и в объеме диоксида кремния. Введенные на интерфейс методом ионной имплантации ионы фосфора аккумулируются около границы раздела и в то же время остаются в объеме диоксида кремния, что и приводит к деградации пробойных характеристик подзатворного диэлектрика. Использование методов локального внедрения ионов фосфора на границе раздела 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> является вариантом дальнейшего развития данного метода, что позволит снизить плотность поверхностных состояний на границе раздела и избежать негативного влияния фосфора на надежностные характеристики подзатворного диэлектрика.

### Список литературы

- [1] A. Agarwal, R. Callanan, M. Das, B. Hull, J. Richmond, S.-H. Ryu, J. Palmour. *13<sup>th</sup> Eur. Conf. on Power Electronics and Applications*, 2009.
- [2] R. Schörner, P. Friedrichs, D. Peters, D. Stephani. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **20**, 241 (1999).
- [3] А.И. Михайлов, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, С.А. Решанов, М. Криeger, А. Schöner, T. Sledziewski. *ФТП*, **48** (12), 1621 (2014).
- [4] R.H. Fowler, L. Nordheim. *Proc. Royal Soc.*, **109**, NA781, 173 (1928).

Редактор А.Н. Смирнов

### Phosphorus implantation as method of interface traps passivation at 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> interface thermally grown in dry oxygen ambient

A.I. Mikhaylov<sup>\*+</sup>, A.V. Afanasyev<sup>\*</sup>, V.A. Ilyin<sup>\*</sup>, V.V. Luchinin<sup>\*</sup>, T. Sledziewski<sup>•</sup>, S.A. Reshanov<sup>♦</sup>, A. Schöner<sup>+♦</sup>, M. Krieger<sup>•</sup>

<sup>\*</sup> SPbETU „LETI“,  
197376 St. Petersburg, Russia

<sup>+</sup> Acreo Swedish ICT AB,  
16440 Kista, Sweden

<sup>•</sup> Friedrich–Alexander–Universität  
Erlangen–Nürnberg,  
91058 Erlangen, Germany

<sup>♦</sup> Ascatron AB,  
16440 Kista, Sweden

**Abstract** Effect of phosphorus implantation prior to dry oxidation on reliability of gate oxide has been investigated. Besides significant decrease of interface states density as shown earlier, presence of phosphorus ions leads to insignificant degradation of reliability of the dielectric and decrease of barrier height to the gate oxide.