

Д. ф.-м. н. В. А. СМЫНТЫНА, д. ф.-м. н. О. А. КУЛИНИЧ,  
к. ф.-м. н. И. Р. ЯЦУНСКИЙ, О. В. СВИРИДОВА, И. А. МАРЧУК

УДК: 537.311.33:622.382.33

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: yatsunskiy@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
05.04 2011 г.

## ВЛИЯНИЕ СЛОЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ТОКОПЕРЕНОСА В КОНТАКТАХ «МЕТАЛЛ — *p*-КРЕМНИЙ»

*Увеличение толщины слоя поликристаллического *p*-кремния приводит к увеличению дрейфовой составляющей тока в зоне пространственного заряда контакта, возникающей вследствие увеличения поверхностной плотности рассеивающих барьеров, локализованных на границах соседних зерен.*

Интерес к исследованию механизма токопере­носа в контактах «металл — кремний» с барьером Шоттки в настоящее время обусловлен широким использованием таких контактных систем в микро- и наноэлектронике. Моделирование процессов токопрохождения сквозь барьер Шоттки имеет как практическое, так и теоретическое значение. С одной стороны, исследование механизмов прохождения тока через контакт «металл — кремний» с учетом реальной структуры барьерной области позволяет изучать фундаментальные вопросы электроники. С другой стороны, появляется возможность проектировать контакты, обладающие различными физико-технологическими свойствами.

Известно, что на границах «металл — кремний» и «диоксид кремния — кремний» локализованы напряжения, приводящие к возникновению пластической деформации [1]. Поэтому для указанных межфазных границ характерно существование переходной области, содержащей разупорядоченный поликристаллический кремний [2]. Ширина области поликристаллического кремния определяется уровнем локализованной пластической деформации, которая зависит, с одной стороны, от упругих параметров кремния, с другой — от параметров контактирующих материалов, толщины металла или диоксида кремния и наличия дефектов в исходном кремнии [3]. По мере перемещения от границы раздела вглубь кремния размеры зерен поликристалла увеличиваются, появляются дислокационные сетки и отдельные дислокации [2].

Если толщина области поликристаллического кремния намного меньше, чем ширина области пространственного заряда в кремнии, то эта область существенно не влияет на характер токопере­носа и величину тока через контакты «металл — кремний». Однако когда толщина поликристаллического кремния соизмерима с шириной области пространственного

заряда (ОПЗ) контактов «металл — кремний», поликристаллический кремний оказывает влияние на процессы токопере­носа через контакт вследствие рассеяния носителей зарядов на симметричных электрических потенциальных барьерах, образованных двойными электрическими слоями на границах соседних зерен поликристаллов [4, 5].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния толщины слоя поликристаллического кремния на механизмы токопере­носа в контактах «металл — *p*-кремний».

### Объекты и методы исследования

Вольт-амперные характеристики контактов «металл — *p*-кремний» со слоями разупорядоченного поликристаллического кремния различной толщины и без них определяли с помощью ртутного зонда.

Для получения слоя поликристаллического кремния пластины кремния КДБ-10 (100) предварительно окисляли в атмосфере «сухого» кислорода при температуре 1150°C. Полученные слои диоксида кремния имели толщину от 10 нм до 1,0 мкм. Затем слои SiO<sub>2</sub> удаляли в водном растворе плавиковой кислоты. На границе SiO<sub>2</sub> и кремния локализовывались пластические напряжения, приводящие к появлению слоя поликристаллического кремния различной толщины (в зависимости от толщины выращенного слоя SiO<sub>2</sub>), которую контролировали эллипсометрическим методом и методом электронной сканирующей микроскопии.

Изучение поверхности кремния после химической обработки проводилось различными методами: для электронной сканирующей микроскопии (РЭМП) применяли микроскоп-анализатор Cam Scan-4D с системой энергетического дисперсионного анализатора Link-860 и программой «Zaf». Чувствительность прибора составляла 0,01% по массе, диаметр пучка — от 5·10<sup>-9</sup> до 1·10<sup>-6</sup> м.

Для ОЖЭ-спектроскопии использовали спектрометр LAS-3000 фирмы Riber с пространственной разрешающей способностью 3 мкм и энергетическим разрешением анализатора 0,3%.

Для оптических методов исследования применяли металлографический микроскоп ММР-2Р.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как показал рентгеноструктурный анализ, проведенный в нашем предыдущем исследовании [6], поверхность кремния под оксидом имеет сильно разупорядоченную структуру.

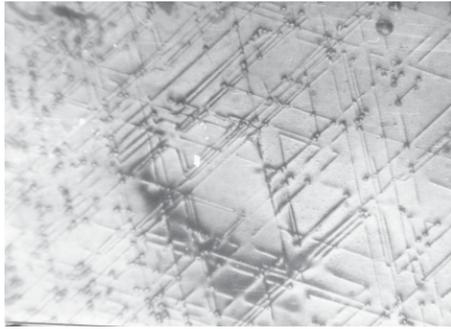


Рис. 1. Электронное изображение дислокационных сеток после обработки ИТ в течение 6 мин

порядоченную структуру, близкую к поликристаллической. Обработка поверхности кремния избирательным травителем (ИТ) приводит к появлению дислокационных сеток, которые можно наблюдать с помощью электронного микроскопа (рис. 1). Это свидетельствует о появлении упорядоченной кристаллической структуры кремния.

В результате формирования поликристаллического кремния непосредственно под диоксидом кремния были получены две разновидности образцов: у первой толщина  $d$  поликристаллической области была существенно меньше ширины ОПЗ  $W$  ( $d_1 \approx 10 \text{ нм} \ll W$ ), у второй — сопоставима с ней ( $d \approx 1 \text{ мкм} \approx W$ ).

В первом случае при приложении положительного напряжения на ртутный зонд наблюдается уменьшение ширины ОПЗ и возрастание тока  $I$ . Из анализа ВАХ на рис. 2, а можно сделать вывод, что результирующий ток описывается законом  $I \sim U^2$ . При выращивании тонкого слоя диоксида кремния образуется тонкий слой поликристаллического кремния, который

не влияет на механизм токопереноса и величину тока. В этом случае ток определяется двойной инжекцией в зону пространственного заряда: электронов из металла и дырок из кремния [7], при этом рассеяние в слое поликристаллического кремния пренебрежимо мало и не влияет на результирующий токоперенос.

Для образцов с  $d \approx W$  при ширине ОПЗ 0,5—1,0 мкм и в отсутствие напряжения на зонде токоперенос осуществляется в зоне поликристаллического кремния. В этом случае границу раздела диоксида кремния и поликремния можно аппроксимировать моделью плотноупакованных дислокаций, на границе блоков которых образуется двойной барьерный слой.

Поскольку процессы туннелирования носителей зарядов сквозь потенциальные барьеры на границах кристаллов маловероятны, основным механизмом токопереноса в поликристаллическом кремнии в зоне ОПЗ, когда  $d \approx W$ , является рассеяние носителей зарядов на потенциальных барьерах. Это приводит к уменьшению подвижности носителей зарядов и ограничению тока. Из анализа формы прямой ветви ВАХ такой структуры (см. рис. 2, б) можно сделать вывод о том, что прямой ток изменяется по дрейфово-диффузионному механизму в соответствии с выражением  $I \sim \mu \cdot \exp[qU/(kT)]$  [7].

Было замечено, что при больших значениях электрического напряжения, прикладываемого к контакту «Hg-p-Si», и значительной концентрации преципитированной примеси (более 1%) наблюдается значительный ток утечки. Этот ток связан с туннельным переносом заряда вдоль состояний, создаваемых преципитированными примесями, а его величина зависит от концентрации электрически активных примесей, локализованных на границах соседних кристаллитов [8].

Известно, что малоугловые границы и границы кристаллитов представляют собой дислокационные стенки [9]. Скопление заряженных дислокаций на границах блоков приводит к образованию двумерных пространственных слоев заряда и к изгибу дна зоны проводимости, а также может привести к образованию проводящих каналов на границах кристаллитов. Степень изгиба дна зависит от величины заряда дислокаций и от разориентации соседних кристаллитов. Как показал Оже-анализ, дислокации и, как следствие, границы кристаллитов преципитированы кислородом. Концентрация кислорода была максимальна на границе «диоксид — кремний» и составляла приблизительно 6,4% (см. таблицу). Хорошо известно, что кислород в кремнии создает электрически активные донорные энергетические уровни при образовании комплексов «кислород — вакансия» при температуре около 1150°C [10]. Поскольку именно при этой температуре происходит термическое окисление кремния, можно предположить, что на границах кристаллитов кислород находится в электрически активном состоянии, т. е. возможен перенос заряда

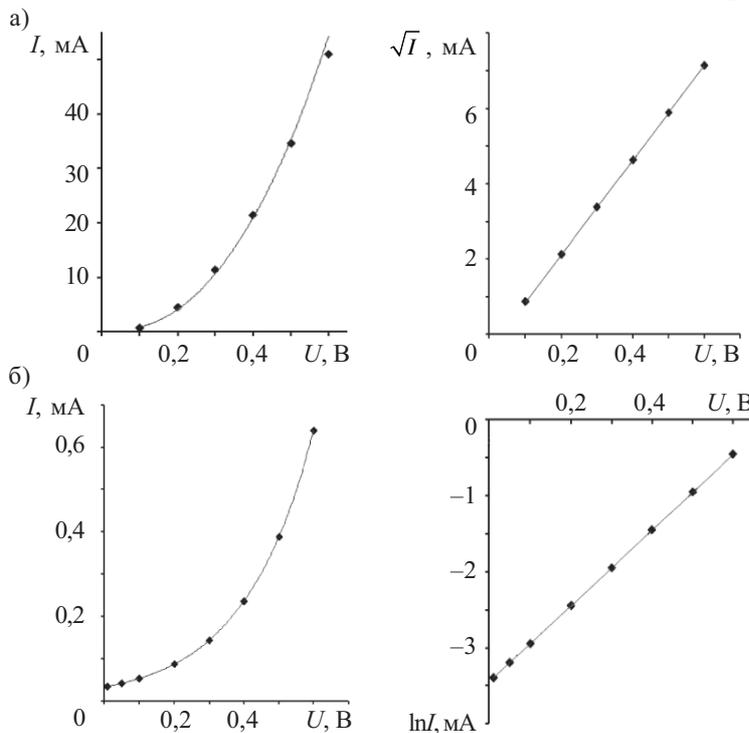


Рис. 2. ВАХ структуры Hg-p-Si в случаях когда  $d \ll W$  (а) и  $d \approx W$  (б)

Расчет Оже-спектра на границе раздела «SiO<sub>2</sub>-Si» (без учета диоксида)

Элемент	Концентрация (%) на глубине	
	2—3 мкм	10—12 мкм
К	0	0
С	0,348	0,452
Na	0,05	0,04
Si	92,675	95,245
O	6,393	3,742

вдоль преципитированных примесями границ кристаллитов, как это было показано в [4].

\*\*\*

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что при увеличении толщины слоя поликристаллического *p*-кремния механизм токопереноса изменяется от двойного инжекционного, который описывается квадратичной зависимостью, к дрейфово-диффузионному, описываемому экспоненциальной зависимостью. Такое изменение связано с увеличением дрейфовой составляющей тока в зоне пространственного заряда контакта «металл — *p*-кремний», возникающей вследствие увеличения поверхностной плотности рассеивающих барьеров, локализованных на границах соседних зерен поликристаллов кремния.

На механизм токопереноса через контакт «металл — поликристаллический *p*-кремний» могут оказывать влияние присутствующие в *p*-кремнии электрически активные атомы примесей типа кислорода. Эти примеси, локализуясь на границах кристаллитов, создают дополнительные состояния в запрещенной зоне кремния, что увеличивает вероятность туннельного токопереноса. Установлено, что величина туннельно-

го тока будет зависеть от концентрации электрически активных примесей, локализованных на границах соседних кристаллитов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Кулинич О. А., Смынтына В. А., Глауберман М. А. и др. Влияние исходных дефектов на распределение механических напряжений и деформаций при окислении кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 62—64. [Kulinich O. A., Smyntyna V. A., Glauberman M. A. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 5. P. 62]
- Smyntyna V. A., Kulinich O. A., Glauberman M. A., Yatsunskiy I. R. The structure investigation of near-surface layers in silicon-dioxide silicon structure // Photoelectronics.— 2008.— N. 17.— P. 61—63.
- Smyntyna V. A., Kulinich O. A., Yatsunskiy I. R., Marchuk I. A. Factors influencing the yield stress of silicon // Photoelectronics.— 2010.— N. 19.— P. 120—123.
- Алиев Р. Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых *p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>*-структурах // Физика и техника полупроводников.— 1997.— Т. 31, Вып. 4.— С. 425—426. [Aliiev R. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31. N 4. P. 425]
- Кюрегян А. С. Краевые инверсионные каналы и поверхностные токи утечки в высоковольтных полупроводниковых приборах // Физика и техника полупроводников.— 2011.— Т. 45, Вып. 3.— С. 372—378. [Kuregyan A. S. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2011. Vol. 45. N 3. P. 372]
- Yatsunskiy I. R., Kulinich O. A. Complex destruction of near-surface silicon layers of Si-SiO<sub>2</sub> structure // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.— 2010.— Vol. 13, N4.— P. 418—421.
- Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 2.— М.: Мир, 1984. [Zi S. Moscow. Mir. 1984]
- Кулініч О. А. Вольт-амперні характеристики структур метал-хімічно-модифікований кремній-*p*-кремній // Фізика і хімія твердого тіла.— 2006.— Т. 7, № 4.— С. 776—779. [Kulinich O. A. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2006. Vol. 7. N 4. P. 776]
- Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках.— М.: Мир, 1974. [Matara G. Moscow. Mir. 1974]
- Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии.— М.: Мир, 1984. [Reivy K. Moscow. Mir. 1984]

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Эрентраут Д., Мейсснер Э., Боковски М. Технология выращивания кристаллов нитрида галлия / Под редакцией В. П. Чалого.— М.: Техносфера, 2011.— 384 с.

Книга представляет собой подробный обзор передовой технологии выращивания кристаллов нитрида галлия. Проведен анализ возможностей долгосрочного и краткосрочного применения объемных подложек на основе GaN, а также мотивация и задачи по внедрению соответствующей технологии в конкретные приборы. Книга написана командой из 45 специалистов, признанных лидеров науки и промышленности, и подготовлена опытными редакторами. Издание окажется незаменимым ресурсом для инженеров, исследователей и студентов, работающих в области выращивания кристаллов GaN и занимающихся обработкой и изготовлением приборов на их основе как в сугубо научных, так и промышленных целях.

