

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТОКОПЕРЕНОС В КАНАЛЕ КРЕМНИЕГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

Смынтына В. А., Кулинич О. А., Глауберман М. А., Чемересюк Г. Г., Яцунский И. Р.
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
Дворянская 2, Одесса, Украина
E-mail: eltech@elaninet.com

Аннотация – Используя современные методы исследования определена структура приповерхностных слоев кремния, основные дефектозависимые параметры вольт-амперных характеристик кремниевых МОП-транзисторов и влияние на них структурных несовершенств в токопроводящем канале.

I. Введение

В настоящее время в связи с дальнейшей микроминиатюризацией элементной базы электроники и возможностью использовать полевые структуры диоксид кремния - кремний (ПСДКК) с инверсионным каналом в СВЧ устройствах возникает проблема изучения процесса токопереноса в этих структурах с учетом их реального состава. Исследованию процесса токопереноса в вышеуказанных структурах посвящено множество работ (см., например, [1, 2]). Однако, в этих работах не был учтен тот факт, что токоперенос в инверсионной зоне ПСДКК осуществляется в приповерхностной области кремния с довольно сложной структурой [3]. Этим фактом можно объяснить отклонение экспериментально измеренных токовых характеристик от теоретически рассчитанных без учета реальной структуры приповерхностной области кремния. В связи с этим, целью настоящей работы является моделирование процесса токопереноса в ПСДКК с учетом реальной структуры приповерхностной области кремния.

II. Основная часть

Исследовались ПСДКК, изготовленные по стандартной планарной технологии формирования полевых приборов с диоксидной изоляцией на основе монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5(111) и КДБ-10(100) и пластин эпитаксиального кремния ЭКЭС-1 (111). Толщины термически выращенных высокотемпературных (температура $\sim 1150^\circ\text{C}$) диоксидов составляли от 10 нм до 1 мкм. В качестве электродов использовался алюминий. Отношение ширины канала к длине канала составляло ~ 100 .

Для выявления структурных дефектов на поверхности кремния после удаления металлических электродов в растворе NaOH и диоксидов в растворе HCl, производилась послойная обработка поверхности пластин избирательными травителями Сиртля (поверхность 111) и Сэко (поверхность 100) (скорость травления порядка (2-3) мкм/мин) с предварительной обработкой в составах Каро и перекисноамиачном растворе [4]. Такая предварительная обработка позволяла повысить выявляющие свойства избирательных травителей.

Для исследований поверхности кремния после химических обработок использованы следующие методы и оборудование:

-Электронная сканирующая микроскопия (РЭМП), электронный сканирующий микроскоп-анализатор `Cam Scan`-4 D с системой энергетического дисперсионного анализатора `Link`- 860 (с использованием программы «Zaf», чувствительность прибора состав-

ляла 0,01% по массе, диаметр пучка – от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м).

-ОЖЭ - электронная спектроскопия (ЭОС), спектрометр LAS-3000 фирмы `Riber` (пространственная разрешающая способность – 3 мкм энергетическое разрешение анализатора – 0,3 %);

-Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), анализатор `Cameca`- 3F;

-Оптические методы исследований с помощью металлографического микроскопа ММР- 2Р.

На рис.1 представлена картина поверхности кремния КЭФ 4,5(111) после удаления металлических электродов, диоксида кремния (толщиной 0,5 мкм) и обработки поверхности химическим предварительным и избирательным (Сиртля) травителями. Изображение получено на обычном металлографическом микроскопе, так как вследствие сильной зарядки поверхности кремния и невозможности получить отраженный от поверхности пучок электронов применение электронного микроскопа было затруднено. Области проникновения диоксида кремния в кремний, связанные с ускоренной диффузией кислорода вдоль структурных дефектов, просматриваются в виде ямок неправильной формы, причем, ямок правильной формы, присущих структурным дефектам обнаружено не было. Исходя из этих фактов, можно сделать вывод, что эта область состоит из слоя разупорядоченного кремния с мелкой полиструктурой или не обладающего кристаллической структурой вообще. При дальнейшем травлении поверхности кремния избирательным химическим травителем Сиртля еще в течение 5 минут наблюдалось появление слоев, содержащих дислокационные сетки, состоящие из 60° дислокаций, плотностью 10^{12} м^{-2} , преципитированные кислородом и кислородосодержащими соединениями (рис.2). Наличие дислокационной структуры указывает на факт появления кристаллической структуры кремния. При дальнейшем травлении избирательным травителем Сиртля еще в течение 5 минут наблюдалось появление слоя, содержащего отдельные дислокации и линии скольжения (рис.3). Замечено, что толщина переходной области кремния, содержащего разупорядоченный слой и дислокационные сетки, прямо пропорциональна толщине выращенного диоксида, что совпадает с результатами работы [5]. Если учесть, что область инверсионного пространственного заряда на границе диоксид кремния- кремний, определяющая размер канала токопереноса, при нормальных концентрациях легирующей примеси ($10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$) плотности поверхностных состояний $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ эВ $^{-1}$ и затворных напряжениях порядка единиц вольт, составляет десятки микрон, становится ясно, что проводимость переходной области в процессе токопереноса должна играть решающую роль. Исходя из проведенных исследований реальную структуру можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 4.

Учитывая такую структуру приповерхностной области кремния, результирующий токоперенос, параллельный плоскости перехода, будет определяться, как

$$I_T = WL^{-1} C_i V_d (V_g - V_t) (\sum \mu_i d_i), \quad (1)$$

где V_g — напряжение на затворе, V_t — пороговое напряжение, зависящее обычным образом от напряжения плоских зон, заряда в диоксиде, заряда на границе диоксид кремния — кремний и заряда в кремнии, C_i — объемная емкость диоксида, $\mu_i d_i$ — произведение подвижности на толщину i -го слоя, $W L^{-1}$ — отношение ширины к длине канала.

Экспериментально измеренные значения тока (I_0) насыщения отличались от теоретически рассчитанных (I_T). Если учесть, что основными дефектозависящими параметрами являются подвижность и пороговое напряжение, необходимо исследовать влияние на них реальной структуры кремния в канальной области. На основе измерения вольт-фарадных характеристик, сделан вывод в том, что отклонение измеренных пороговых напряжений от теоретически рассчитанных составляет не более 2 В, что не может вносить решающий вклад в изменение вольт-амперных характеристик.

Если учесть, что в инверсионной области структуры располагается канал токопереноса, содержащий разупорядоченный слой кремния и дислокационные сетки, то уменьшение тока связывалось с изменением подвижности носителей заряда в канале. Таким образом, если не учитывать «интерференцию» процессов рассеяния, выражение для результирующей подвижности имеет вид

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{q,f}} + \frac{1}{\mu_{q,d}} + \frac{1}{\mu_{q,s}}, \quad (2)$$

где $\mu_{q,f}$ — фононная составляющая, $\mu_{q,s}$ — рассеяние от границы раздела, $\mu_{q,d}$ — рассеяние на дислокациях. Согласно общеизвестному выражению [5] для $\mu_{q,d}$

$$\mu_{q,d} = \frac{3q}{8m^*} \cdot \frac{1}{RN\bar{V}}, \quad (3)$$

где q — заряд электрона, m^* — эффективная масса носителей заряда, N — плотность дислокаций, R — радиус пространственного заряда дислокаций, \bar{V} — скорость рассеяния электронов.

С помощью выражения (1) можно рассчитать теоретические значения тока и с учетом экспериментальных значений тока (I_0), составляя разницу токов (I_0) - (I_T), можно определить параметр дислокации в сетках R . Для 60° дислокаций он составляет порядка 1 мкм. Расчет для чистой (не преципитированной) 60° дислокации согласно выражению

$$R = \left(\frac{f}{\pi N_{a,d}} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где f — функция заполнения «ненасыщенных» связей, s — среднее расстояние между «ненасыщенными связями» и $N_{a,d}$ — концентрация легирующей примеси ($N_{a,d} \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) давал результат $R \approx 0,05 \text{ мкм}$.

Методом ЭОС было установлено (таблица), что вдоль дислокаций и в местах их пересечения происходит преципитация кислорода. Кислород накапливается в областях максимального изменения деформационного потенциала, возле ядер дислокаций и образует хорошо известные атмосферы Коттрела. В зависимости от положения атомов кислорода в кристаллической решетке кремния он либо электри-

чески активен, либо пассивен. Поскольку на эксперименте было получено значение радиуса пространственного заряда дислокации в 20 раз превосходящее теоретически рассчитанный, сделан вывод о том, что дислокации в реальном случае преципитированы кислородом, который изменяет электрическую активность дислокации через изменение радиуса пространственного заряда, что в дальнейшем приведет к изменению подвижности носителей зарядов и, как следствие, к объяснению наблюдаемого эффекта отклонения экспериментальных токов от теоретически рассчитанных.

III. Заключение

Таким образом, в процессе формирования оксидных слоев в приповерхностных областях кремния образуется довольно сложная структура, состоящая из слоев разупорядоченного кремния, области дислокационных сеток, состоящих из 60° дислокаций и преципитированных кислородом. Учитывая такую структуру, результирующий токоперенос, параллельный плоскости перехода будет определяться как сумма токов через каждый из слоев.

Эффект отклонения экспериментальных вольт-амперных характеристик от теоретически рассчитанных можно объяснить уменьшением подвижности носителей зарядов при взаимодействии с преципитированными дислокациями в токопроводящем канале.

IV. Список литературы

- [1] Velchev N., Toncheva L., Dimitrov I. Electrical properties of MOS structures with process induced defects. *Gryst. Lattice Defects*. 1980.8 (4). P.159-166.
- [2] Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик — полупроводник Киев: Наукова думка, 1978. С. 323.
- [3] Кулинич О. А., Глауберман М. А., Садова Н. Н. Исследование приповерхностных слоев кремния в структурах SiO₂-Si // Изв. Вузов. Физика. 2003. 10. С. 63-66.
- [4] Кулинич О. А., Лисовская А. А., Садова Н. Н. О повышении выявляющей способности избирательного травления монокристаллов кремния // УФЖ. 1990. 35(11). С. 1691-1695.
- [5] Кулинич О. А., Глауберман М. А., Садова Н. Н. О связи фотолюминесцентных свойств пористого кремния с его реальной структурой // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2004. - №7. - С. 96 — 99.

INFLUENCE OF STRUCTURAL DEFECTS ON ELECTRIC CURRENT IN THE CHANNEL OF MOS-TRANSISTOR

Smyntyna V., Kulinich O., Glauberman M.,
Chemeresuk G., Yatsunsky I.
Mechnikov Odessa National University
e-mail: eltech@elaninet.com

Abstract — The influence of structural imperfections on the basic parameters of the I-V characteristic of MOS-transistors has been found out with aid of modern research methods.

— Silicon's subsurface layers consist of strong breaking silicon, which has some dielectric properties, and silicon crystal layers with dislocation's nets and finished within the limits of layers of silicon.

— Oxygen reveals electrical activity and influences the parameters of structural defects that, in turn, affect the charge carrier mobility.

Key words: structural defects, MOS-transistor, silicon.

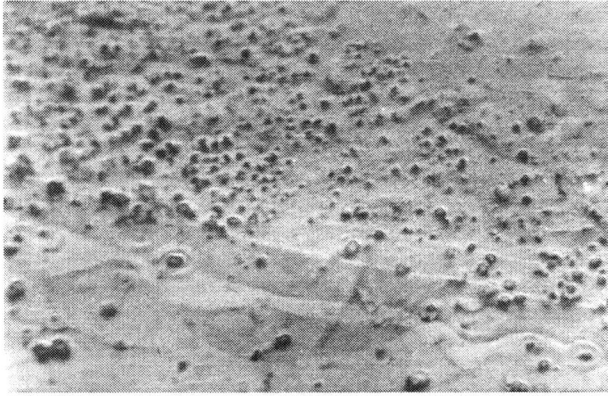


Рис. 1. Поверхность кремния после снятия SiO_2 .
 Fig. 1. Silicon's surface after removal SiO_2

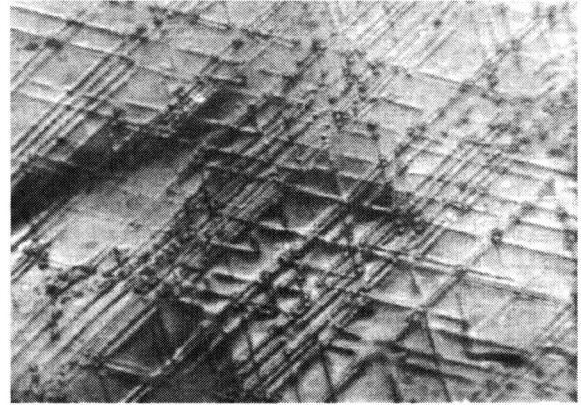


Рис. 2. Электронное изображение дислокационных сеток

Fig. 2. Electron-beam image of the dislocations nets

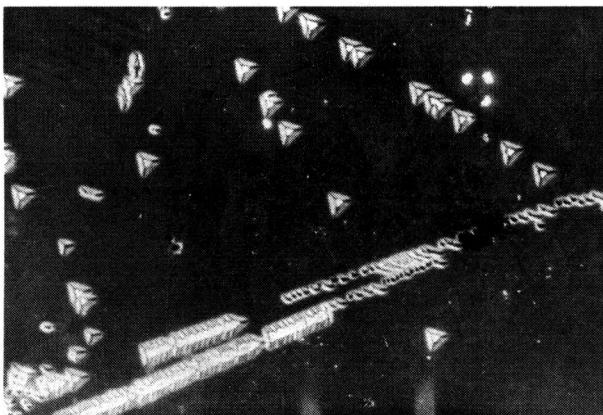


Рис. 3. Электронное изображение дислокаций.

Fig. 3. Electron-beam image of a bunch of dislocations

ELMT	% ELMT	ATOM.%
Si	46.064	32.786
Cl	0.201	0.125
Al	0.238	0.221
O	52.633	66.067
Na	0.360	0.300
K	0.520	0.500

Таблица. ЭОС дислокационных сеток.

Table. EOS of dislocations nets