

**Н.И. Карась**

## **ВЛИЯНИЕ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Исследовано влияние оксидного покрытия на отрицательную фотопроводимость (ФП) структур макропористого кремния (МПК). Показано, что с увеличением толщины оксидного покрытия от 3 до 15 нм отрицательная ФП уменьшается по абсолютной величине, а при толщине оксидного покрытия 30 нм наблюдается только положительная ФП. Объясняется это компенсацией положительным «встроенным» зарядом оксида отрицательного заряда «медленных» поверхностных уровней, расположенных на поверхности макропористого кремния.

**Ключевые слова:** отрицательная фотопроводимость, «встроенный» заряд, инверсионный изгиб зон, «медленные» поверхностные уровни.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Макропористый кремний — перспективный материал микро- и оптоэлектроники. Основным недостатком для применения пористого кремния в оптоэлектронике является нестабильность его фотоэлектрических свойств. Для повышения стабильности применяется пассивация поверхности структур пористого кремния термическим окислением. Образующийся оксид кремния служит при этом защитным покрытием и резервуаром хранимого в нем «встроенного» заряда, влияющего на поверхностный изгиб зон в макропористом кремнии. В работе [1] была обнаружена и исследована отрицательная стационарная ФП в структурах макропористого кремния. Отрицательная ФП трактуется как монополярная ФП, сосредоточенная в области пространственного заряда (ОПЗ) и связанная с поверхностным прилипанием основных носителей заряда на «медленных» поверхностных уровнях. В данной работе исследовано влияние оксидного покрытия («встроенного» заряда) на отрицательную ФП структур макропористого кремния для использования в качестве фотоприемников.

### **ЭКСПЕРИМЕНТ**

Исходным материалом был монокристаллический *n*-Si с удельным сопротивлением 4,5 Ом · см. Макропоры глубиной 100 мкм и диаметром 4 мкм были сформированы методом электрохимического травления в растворе фтористоводородной кислоты. Покрытие оксида кремния толщиной 7—30 нм было сформировано методом сухого окисления. Омические контакты In—пористый кремний формировались так: 1) очистка поверхности МПК в атмосфере водорода при температуре 500 °С в течение 30 мин; 2) наложение маски на структуру МПК и вакуумное напыление In при температуре подложки 150—200 °С; 3) отжиг структуры In—пористый кремний в атмосфере водорода при температуре 400 °С в течение 30 мин для диффузии In через слой SiO<sub>x</sub> и улучшения адгезии In с макропористым кремнием. Коэффициент выпрямления на таких образцах не превышал 1,1.

© Н.И. Карась, 2013

Фотопроводимость исследовали стандартным методом с постоянным (не модулированным) освещением с использованием простейшей схемы: последовательное соединение источника напряжения, образца с сопротивлением  $r$  и нагрузочного сопротивления  $R$ , с которого нановольтметром В2-38 снимался полезный сигнал. Фотопроводимость измеряли в режиме максимальной чувствительности при  $R = r$ . Освещение проводилось на длине волны 0,4 мкм светодиодом при перпендикулярном падении света на поверхность макропористого кремния. Интенсивность освещения регулировалась током светодиода.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

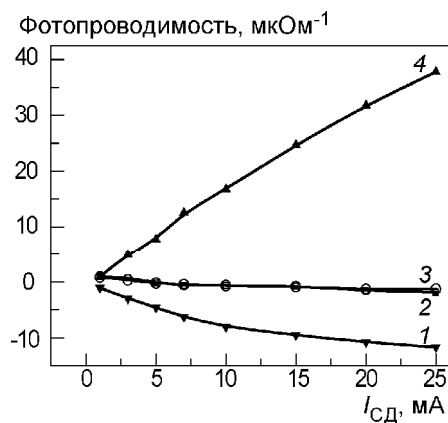
Как видим из рисунка, фотопроводимость структур макропористого кремния зависит от толщины оксидного покрытия, которое влияет как на абсолютные значения фотопроводимости, так и на ее знак и характер зависимости фотопроводимости от интенсивности освещения.

При увеличении толщины оксидного покрытия от 3 до 15 нм отрицательная фотопроводимость уменьшается по абсолютной величине (кривые 1–3) и переходит в положительную при толщине оксидного покрытия 30 нм (кривая 4).

Теоретически стационарная ФП полупроводника с полностью ионизированными объемными уровнями и с учетом ряда поверхностных процессов, в том числе и прилипания, была рассмотрена в работах [2–4], где показано, что ФП состоит из трех компонент: из биполярной ФП ОПЗ  $\sigma_{b1}$ , монополярной ФП ОПЗ  $\sigma_{m1}$  и биполярной ФП квазинейтрального объема  $\sigma_{b2}$ . Биполярная ФП ОПЗ  $\sigma_{b1}$  возникает из-за разведения генерированных светом электронно-дырочных пар полем, существующим в ОПЗ, причем ФП оказывается локализованной в ОПЗ полупроводника, поскольку силы электрического притяжения между электронами и дырками не позволяют им удаляться на расстояния, превышающие толщину ОПЗ.

Монополярная ФП ОПЗ  $\sigma_{m1}$  обусловлена теми подвижными носителями заряда, которые компенсируют заряд захваченных поверхностными уровнями неравновесных возбужденных светом носителей заряда противоположного знака. Перемещение незахваченных (свободных) возбужденных светом носителей становится возможным только параллельно поверхности в области  $\leq L_D$  ( $L_D$  — дебаевская длина экранирования) [5], т. е. в квазиповерхностной области. ФП ОПЗ  $\sigma_{m1}$  может быть положительной и отрицательной в зависимости от изгиба зон у поверхности полупроводника. Случай положительной монополярной ФП ОПЗ  $\sigma_{m1}$  реализуется при истощающем изгибе зон, когда скорость захвата неосновных носителей заряда (дырок) значительно превышает скорость захвата электронов. Если более интенсивным будет прилипание основных носителей (электронов), то монополярная поверхность ФП будет отрицательной. Последний вариант согласно [4] возможен при инверсионном изгибе зон. В нашем случае это соответствует значению поверхностного изгиба зон  $Y_s = -22,8$  [1].

Зависимость фотопроводимости структур макропористого кремния на длине волны 0,4 мкм от интенсивности освещения при разных толщинах оксидного покрытия: 1 — «собственный оксид» (~3 нм); 2 — 7 нм; 3 — 15 нм; 4 — 30 нм



Отрицательную фотопроводимость структур макропористого кремния без термического оксида кремния (кривая 1) исследовали в работе [1]; ее трактовали как монополярную ФП в области пространственного заряда, связанную с поверхностным прилипанием основных носителей заряда на «медленных» поверхностных уровнях. Последние проявляют себя тем, что вызывают временные релаксации ФП из-за того, что затруднен обмен носителями между этими уровнями и зоной проводимости в объеме полупроводника. В наших экспериментах наблюдались такие долговременные релаксации (до 10 мин) фотопроводимости при включении и выключении освещения.

Изменение значения и знака ФП в данном случае при увеличении толщины оксидного покрытия объясняется следующим образом. В процессе окисления в термическом диоксиде кремния формируется положительный фиксированный заряд  $Q_f$ , локализованный в узком слое диоксида толщиной около 2 нм, прилегающем к межфазной границе Si-SiO<sub>2</sub> [6]. По мере увеличения толщины оксидного покрытия возрастает его положительный заряд [4], который все в большей степени компенсирует отрицательный заряд «медленных» поверхностных уровней, возникающий в результате прилипания на них основных носителей заряда (электронов). При этом инверсионный изгиб зон у поверхности макропористого кремния превращается в истощающий. Таким образом, по мере увеличения толщины оксидного покрытия и компенсации отрицательного заряда «медленных» поверхностных уровней уменьшается по величине и отрицательная фотопроводимость (кривые 1–3), которая при толщине оксида 30 нм переходит в положительную (кривая 4).

## ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование влияния оксидного покрытия толщиной 3–30 нм на отрицательную фотопроводимость структур макропористого кремния.

2. Установлено, что наличие оксидного покрытия структур МПК из-за «встроенного» в нем положительного заряда позволяет в широких пределах изменять ФП МПК. При этом наблюдается изменение как значения, так и знака ФП.

3. Предложен механизм наблюдаемого эффекта изменения знака и значения ФП, который заключается в компенсации положительным «встроенным» зарядом оксида кремния отрицательного заряда «медленных» поверхностных уровней структур МПК. При увеличении толщины оксидного покрытия увеличивается и положительный «встроенный» заряд и при определенном его значении отрицательная фотопроводимость переходит в положительную.

**N. Karas**

### **INFLUENCE OXIDE COATINGS ON NEGATIVE PHOTOCONDUCTIVITY IN STRUCTURES MACROPOROUS SILICON**

The influence of the oxide coating on the negative photoconductivity of macroporous silicon structures has been investigated. It is shown that with increasing oxide coating thickness from 3 to 15 nm negative photoconductivity decreases in absolute value. When the thickness of the oxide layer was 30 nm, there was only positive photoconductivity. This is due to compensation of the positive charge built-oxide negative charge of the «slow» surface levels on the surface of macroporous silicon.

**Keywords:** negative photoconductivity, «built-in» charge, inversion band bending, «slow» surface levels.

1. *Карась Н.И.* Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния // *Нові технології.* — 2010. — № 1. — С. 118–123.
2. *Зуев В.А., Саченко А.В., Толыго К.Б.* Кинетика фотопроводимости в полупроводниках, обладающих уровнями захвата неосновных носителей на поверхности // *ФТТ.* — 1965. — **6**, № 10. — С. 3174–3177.
3. *Зуев В.О., Саченко А.В.* Теоретичне дослідження поверхнево-чутливих фотоефектів у Si // *УФЖ.* — 1973. — **18**, № 10. — 1680–1687.
4. *Саченко А.В., Снитко О.В.* Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. — Киев: *Наук. думка*, 1984. — 232 с.
5. *Литовченко В. Г., Ляшенко В.И.* Прилипание неравновесных носителей тока на поверхности германия // *ФТТ.* — 1962. — **4**, № 8. — С. 1985–1993.
6. *Александров О.В., Дусь А.И.* Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния // *ФТП.* — 2011. — **45**, № 4. — С. 474–480.

Институт физики полупроводников  
им. В.Е. Лашкарева  
НАН Украины  
Проспект Науки, 41  
03028 Киев  
Телефон: 525 23 09  
E-mail: nikar@isp.kiev.ua

Получено 06.06.2013