

**Н.И. Карась, В.Ф. Онищенко, Д.А. Калустова, В.И. Корнага**

## **“МЕДЛЕННЫЕ” ПОВЕРХНОСТНЫЕ УРОВНИ И РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА**

Исследована фотопроводимость (ФП) в структурах макропористого кремния в фиолетовом диапазоне длин волн 360–460 нм. Большое время релаксации ФП (примерно 4 мин), которое наблюдается в эксперименте, объясняется наличием “медленных” поверхностных уровней. Особенностью наблюдаемой медленной релаксации ФП в фиолетовом диапазоне по сравнению с релаксацией ФП в сине-зеленом диапазоне видимого света является то, что она состоит из двух компонент: быстрой (примерно 1-2 с), во время которой проявляется приблизительно 80% ФП, и медленной (4 мин), во время которой ФП достигает максимального значения.

**Ключевые слова:** “медленные” поверхностные уровни, релаксация ФП, отрицательная ФП, фиолетовая область оптического спектра.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Пористый кремний привлекает внимание исследователей в связи с потенциальными возможностями для создания источников видимого излучения, а также использования в качестве фотоприемников. Его фотоэлектрические свойства являются эффективным инструментом изучения электронных процессов в приповерхностных слоях полупроводников. Так, при исследовании ФП структур макропористого кремния (МПК) в зеленой и синей области оптического спектра наблюдалась отрицательная фотопроводимость и ее медленная релаксация, которая объяснялась сильным поверхностным поглощением излучения и наличием на поверхности “медленных” поверхностных уровней, вызывающих временные релаксации из-за того, что затруднен обмен носителями заряда между этими уровнями и зоной проводимости в объеме полупроводника [1]. Установлено, что на поверхности кремния существуют два типа поверхностных уровней с существенно различными временами релаксации [2, 3]. Поверхностные уровни, расположенные на границе раздела полупроводник – окисел, находятся в хорошем электрическом контакте с зонами в объеме и характеризуются малыми временами релаксации. Условно эти уровни названы “быстрыми” в отличие от “медленных”, происхождение которых связывают с наличием диоксида кремния на поверхности кремния. Как известно, на поверхности кремния всегда есть слой “собственного диоксида” толщиной 4 нм [4]. В настоящее время нет единого мнения о месте расположения “медленных” поверхностных уровней, т.е., расположены ли они на поверхности диоксида или внутри его [2, 3]. “Быстрые” уровни на кремнии связываются с несовершенствами структуры границы полупроводник–окисел. Таким образом, на реальной поверхности нужно учитывать поверхностные уровни не только на межфазной границе полупроводник–окисел, но и на наружной поверхности окисной пленки или внутри ее [2, 3], что приводит к различным временам релаксации отрицательной ФП.

Целью данной работы было исследование отрицательной ФП и ее релаксации в фиолетовой области оптического спектра, в которой достигается максимальное поверхностное поглощение излучения в видимой области, и по характеру релаксации оценить вклад в отрицательную ФП поверхностных уровней, расположенных непосредственно на межфазной границе собственный оксид – МПК и на поверхности или внутри оксида.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исходным материалом был монокристаллический  $n$ -Si с удельным сопротивлением 4,5 Ом. Макропоры глубиной 80 мкм и диаметром 4 мкм были сформированы методом электрохимического травления в растворе фтористоводородной кислоты. Толщина структуры МПК составляла 520 мкм. Концентрация макропор равнялась  $4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ . Омические контакты сформированы при температуре 3700 °С путем втирания золото-кремниевой эвтектики на поверхность структуры МПК.

В качестве источника освещения использовался фиолетовый светодиод. Для измерения спектральных и электрических параметров данного светодиода использовался высокоточный матричный спектрометр «НААС-2000» и интегрирующая фотометрическая сфера диаметром 0,3 м производства компании «EVERFINE Corporation», в комплекте с программируемым источником питания постоянного тока «Tektronix PWS4305». Измерения проводились в диапазоне длин волн 380–780 нм для потребляемых токов 1–20 мА. При токе потребления 20 мА мощность излучения используемого светодиода составила 12,28 мВт, пиковая длина волны 397,6 нм, полуширина пика излучения 13,2 нм. Спектральное распределение излучения используемого светодиода в диапазоне длин волн 360–460 нм при токе потребления 20 мА представлено на рис. 1 (получено путем добавления к измеренному спектральному распределению излучения аппроксимированной зависимости для диапазона 360–380 нм).

Фотопроводимость исследовали стандартным методом с постоянным (немодулированным) 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 фиолетовым светодиодом при перпендикулярном падении света на поверхность МПК. Интенсивность освещения исследуемой структуры МПК регулировалась током светодиода.

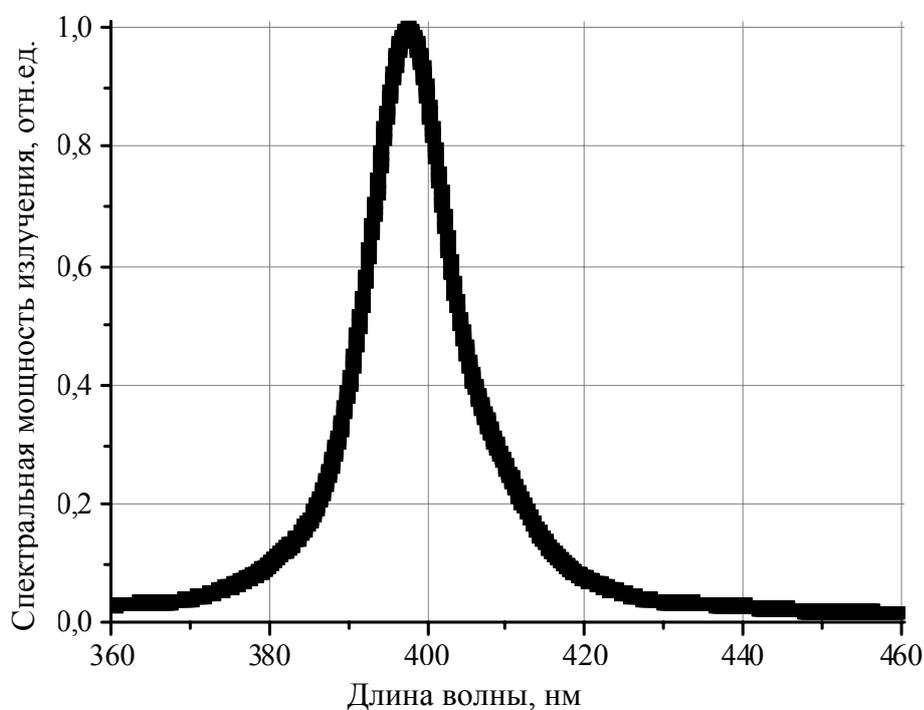


Рис. 1. Спектральное распределение излучения используемого фиолетового светодиода в диапазоне длин волн 360–460 нм при токе потребления 20 мА.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные результаты представлены на рис. 2 и 3. Как видно из рис. 1, отрицательная ФП увеличивается с ростом интенсивности освещения (увеличением тока светодиода) и достигает значения  $-3 \text{ мОм}^{-1}$  при полной мощности излучения фиолетового светодиода 12,28 мВт. Полученное значение отрицательной ФП значительно превосходит полученное ранее нами в сине-зеленой области оптического спектра ( $-11,69 \text{ мкОм}^{-1}$ ) [1]. Это объясняется большим коэффициентом поглощения  $K$  фиолетового излучения. На пиковой длине волны  $K = 1,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  [5] и соответственно глубина поглощения фиолетового излучения меньше 0,1 мкм. Таким образом, реализуются условия для сильного поверхностного захвата основных носителей заряда на “медленные” поверхностные уровни и возрастания отрицательной ФП. Отрицательная ФП трактуется нами как монополярная ФП, сосредоточенная в области пространственного заряда (ОПЗ) и связанная с поверхностным прилипанием основных носителей заряда на “медленных” поверхностных уровнях [1, 6, 7]. Монополярная отрицательная ФП ОПЗ 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) [8], т.е., в квазиповерхностной области. Захват основных носителей заряда на “медленные” поверхностные уровни приводит к образованию инверсионного изгиба зон на поверхности. В нашем случае начало образования инверсионного изгиба зон происходит при значении поверхностного изгиба зон  $Y_s = -22,8$  [1]. И только при этом значении  $Y_s$  начинает проявляться отрицательная монополярная фотопроводимость.

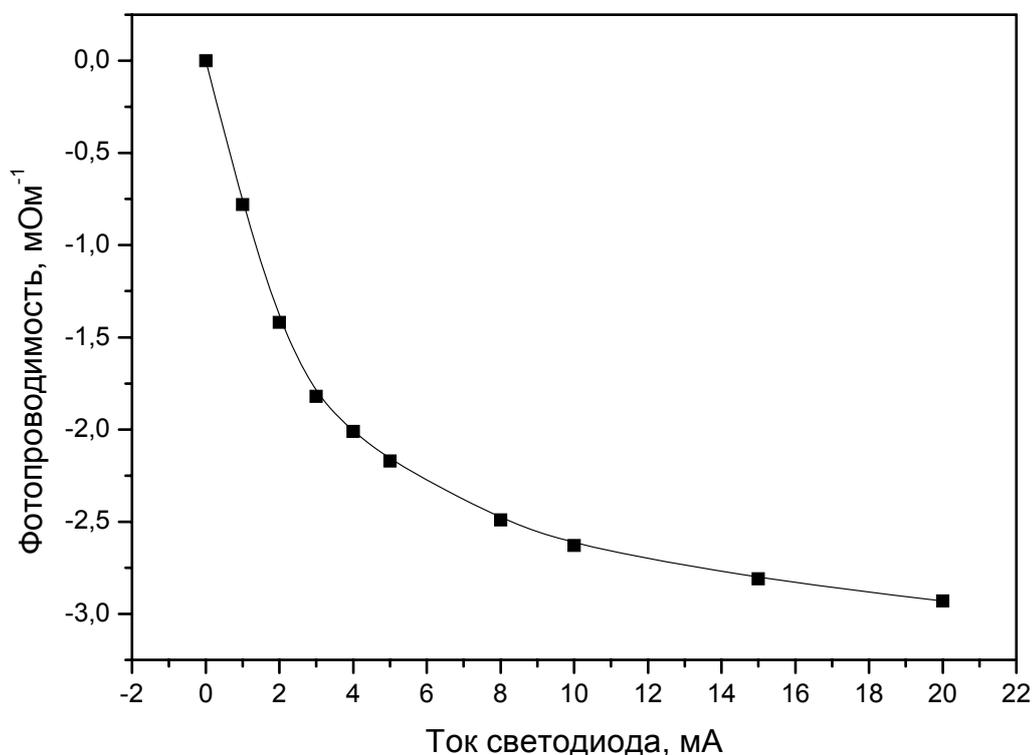


Рис. 2. Зависимость отрицательной ФП структуры МПК от интенсивности освещения в фиолетовой области оптического спектра.

На рис. 3 показана зависимость отрицательной ФП от времени релаксации. Отметим ее характерную особенность: время релаксации состоит из двух составляющих. При включении освещения отрицательная ФП достигает примерно 80% от своего максимального значения за первые примерно 1-2 с (быстрая составляющая релаксации) и через примерно четыре минуты наблюдается максимальное значение отрицательной ФП. Такой характер релаксации отличается от долговременных релаксаций отрицательной ФП в сине-зеленой области оптического спектра, которые наблюдались в работе [1], где время релаксации было 10 и больше минут и не наблюдался резкий рост отрицательной ФП в первые несколько секунд. Такое различие характера релаксации в фиолетовой и сине-зеленой области объясняется тем, что поглощение фиолетового излучения происходит на глубине 0,04–0,4 мкм [5], (т.е., ближе к поверхности) и при этом создаются условия для сильного поверхностного захвата основных, возбужденных светом, носителей заряда на поверхностных уровнях, расположенных на межфазной границе МПК–SiO<sub>2</sub>. При этом релаксация ФП происходит за 1-2 с. Чем ближе к поверхности МПК поглощается излучение, тем меньше время релаксации. В сине-зеленой области глубина поглощения составляла 0,3–1,6 мкм [5], а время релаксации ФП было порядка 10 мин [1].

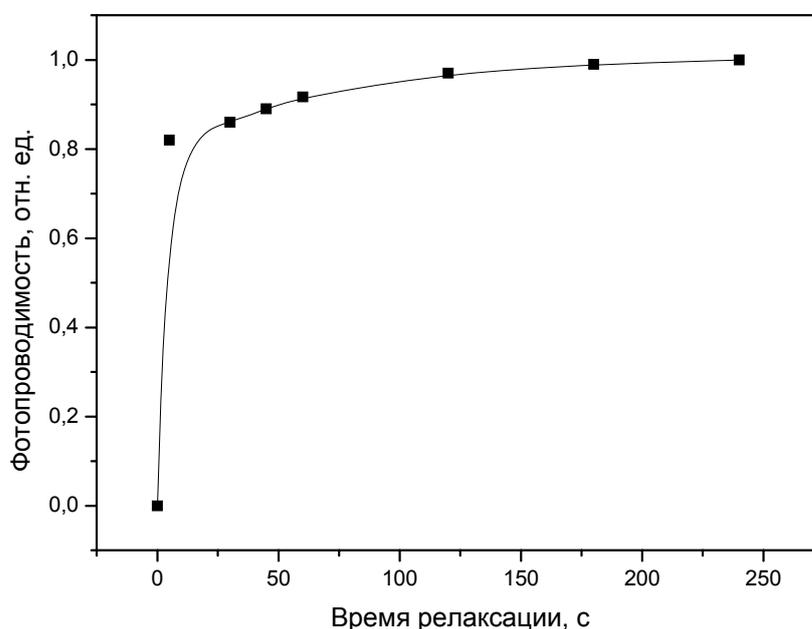


Рис. 3. Зависимость фотопроводимости структуры МПК от времени релаксации.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование отрицательной ФП и ее релаксации в фиолетовой области оптического спектра в диапазоне длин волн 360–460 нм. Максимальное значение отрицательной ФП равно  $-3 \text{ мОм}^{-1}$ , которое значительно превосходит аналогичное в сине-зеленой области ( $-11,69 \text{ мкОм}^{-1}$ ), полученное в работе [1].
2. Обнаружена особенность в характере релаксации отрицательной ФП по сравнению с релаксацией в сине-зеленой области – время релаксации состоит из двух составляющих: быстрой – 1-2 с, за которые отрицательная ФП достигает около 80% от своего максимального значения, и медленной – около 4 мин, за которые ФП достигает максимального значения.
3. Из анализа характера зависимости ФП от времени релаксации сделано предположение, что поверхностные уровни, расположенные на поверхности МПК, приводят к быстрой релаксации (1-2 с) отрицательной ФП в фиолетовой области, где глубина поглощения составляет 0,04–0,4 мкм, что значительно меньше, чем в сине-зеленой области, где

глубина поглощения равна 0,3–1,6 мкм. И таким образом в фиолетовой области выполняются условия для сильного поверхностного захвата основных, возбужденных светом, носителей заряда на поверхностные уровни, расположенные непосредственно на границе МПК–оксид. Обмен носителями заряда между этими уровнями и зоной проводимости в объеме полупроводника происходит быстрее, чем в случае расположения поверхностных уровней на поверхности или внутри оксида.

**N.I. Karas', V.F. Onyshchenko, D.A. Kalustova, V.I. Cornaga**

### **"Slow" surface levels and relaxation of photoconductivity in the structures of macroporous silicon in the violet range of the optical spectrum**

Photoconductivity in the structures of macroporous silicon within the violet range of wavelengths 360–460 nm has been studied. The large relaxation time of the photoconductivity (approximately 4 min) observed in the experiment is explained by the presence of "slow" surface levels. A feature of the observed slow relaxation of the photoconductivity in the violet range as compared to that in the blue-green range of visible light is that it consists of two components: fast (approximately 1–2 s), during which approximately 80% of the photoconductivity appears, and slow (4 min), during which the photoconductivity reaches its maximum value.

**Keywords:** "slow" surface levels, photoconductivity relaxation, negative photoconductivity, violet region of the optical spectrum.

**Н.И. Карась, В.Ф. Онищенко, Д.А. Калустова, В.И. Корнага**

### **"МЕДЛЕННЫЕ" ПОВЕРХНОСТНЫЕ УРОВНИ И РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА**

Исследована фотопроводимость (ФП) в структурах макропористого кремния в фиолетовом диапазоне длин волн 360–460 нм. Большое время релаксации ФП (примерно 4 мин), которое наблюдается в эксперименте, объясняется наличием "медленных" поверхностных уровней. Особенностью наблюдаемой медленной релаксации ФП в фиолетовом диапазоне по сравнению с релаксацией ФП в сине-зеленом диапазоне видимого света является то, что она состоит из двух компонент: быстрой (примерно 1–2 с), во время которой проявляется приблизительно 80% ФП, и медленной (4 мин), во время которой ФП достигает максимального значения.

**Ключевые слова:** "медленные" поверхностные уровни, релаксация ФП, отрицательная ФП, фиолетовая область оптического спектра.

1. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния. *Нові технології*. 2010. №1. С. 118–123.
2. Горшков А.П., Тихов С.В. *Физика поверхности полупроводников*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. университета, 2013.
3. Пека Г.П. *Физика поверхности полупроводников*. К.: Изд-во Киевского университета, 1967.
4. Скворцов А.М., Трифонова Т.А., Хуинь Конг Ту. Микроструктурирование монокристаллов кремния волоконным лазером в режиме высокоскоростного сканирования. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. 15, №6. С. 1062–1071.
5. Green M.A. *High Efficiency Silicon Solar Cells*. Switzerland, Trans. Tech. Publ., 1987.
6. Саченко А.В., Снитко О.В. *Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников*. Киев: Наукова думка, 1984.
7. Зуев В.О., Саченко А.В. Теоретичне дослідження поверхнево-чутливих фотоэффектів у Si. *УФЖ*. 1973. 18, №10. С. 1680–1687.
8. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И. Прилипание неравновесных носителей тока на поверхности германия. *ФТТ*. 1962. 4, №8. С. 1985–1993.

Институт физики полупроводников  
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины  
41, проспект Науки, 03680 Киев  
Телефон 525-23-09  
E-mail: nikar@isp.kiev.ua