

Н.И. Карась, В.Ф. Онищенко

МОНОПОЛЯРНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ИНВЕРСИОННОГО СЛОЯ И "МЕДЛЕННЫЕ" ПОВЕРХНОСТНЫЕ УРОВНИ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА

Исследована поверхностная фотопроводимость в структурах макропористого и монокристаллического кремния при коэффициенте поглощения в диапазоне $200 - 10^4 \text{ см}^{-1}$. При этом наблюдалась положительная и отрицательная фотопроводимость. Исходным материалом для формирования структур макропористого кремния был кремний n-типа с ориентацией [100] и удельным сопротивлением $4,5 \text{ Ом см}$. С помощью электрохимического травления образовывались макропоры с диаметром $D_p = 2 \text{ мкм}$, глубиной $h_p = 60 \text{ мкм}$ и периодом $a = 4 \text{ мкм}$. Установлено, при поглощении света с длиной волны $0,52 \text{ мкм}$ на толщине области пространственного заряда в 1 мкм наблюдается "медленная" отрицательная фотопроводимость. При поглощении света с длиной волны $0,935$ и $0,62 \text{ мкм}$ на глубине 50 и $2,5 \text{ мкм}$ соответственно наблюдается положительная фотопроводимость. Причиной негативной фотопроводимости является прилипания на "медленных" поверхностных уровнях основных носителей заряда, положительная поверхностная фотопроводимость проявляется при прилипании неосновных носителей заряда. На основании измеренной негативной фотопроводимости была рассчитана фотопроводимость инверсионного слоя и из нее получены оценочные значения концентрации "медленных" поверхностных уровней как в структуре макропористого ($N > 10^{13} \text{ см}^{-2}$), так и в монокристаллического кремния ($N < 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Показано, что отношение отрицательных значений фотопроводимости в структуре макропористого кремния и в монокристаллическом кремнии практически совпадают с отношением освещаемых площадей структуры макропористого (с учетом площади поверхности макропор) и монокристаллического кремния (27 и 25 соответственно), что подтверждает чисто поверхностную природу негативной фотопроводимости в условиях сильного поверхностного поглощения света.

Ключевые слова: "медленная" монополярная поверхностная отрицательная фотопроводимость, концентрация "медленных" поверхностных уровней, инверсионный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Двумерные структуры макропористого кремния, изготовленные методом фотоанодного травления, перспективны для использования в опто- и фотоэлектронике. Это связано с изготовлением структур с нужной геометрией, большой площадью поверхности, возможностью интеграции в микросхемы и особенностями фотоэлектрических характеристик, которые определяются процессами на поверхности макропор.

Одним из таких фотоэффектов в приповерхностных слоях полупроводников является отрицательная монополярная фотопроводимость (ФП), локализованная на глубине тонкого поверхностного слоя Дебая. Нами ранее была исследована поверхностная ФП МПК [1-4] и этот эффект в сущности определяется изменением заселенности поверхностных центров (состояний) при освещении и называется "эффектом прилипания носителей фототока". Ключевую роль в поверхностной ФП играют поверхностные состояния (ПС) или поверхностные уровни. Согласно классификации локальных электронных состояний, приведенных в [5], различают два типа "медленных" локальных электронных состояний на границе Si/SiO₂: "медленные" состояния в диэлектрике с характерным временем релаксации $10^3 - 10^4 \text{ с}$ и "медленные" состояния границы раздела (МСГР) с временем релаксации $10^{-1} - 10^{-2} \text{ с}$. В работах [1-4] нами исследовалась поверхностная ФП в структурах МПК, по измеренным временам релаксации был сделан вывод о присутствии в структуре МПК на границе Si/SiO₂ "медленных" поверхностных уровней, ответственных за "медленную" поверхностную ФП. В литературе встречаются различные данные по концентрации поверхностных состояний на поверхности монокристаллического кремния: от 10^{11} до 10^{15} см^{-2} . Концентрация ПС обычно очень велика, но ограничена сверху величиной концентрации самих поверхностных атомов кристалла кремния, т.е. 10^{15} см^{-2} [5, 6].

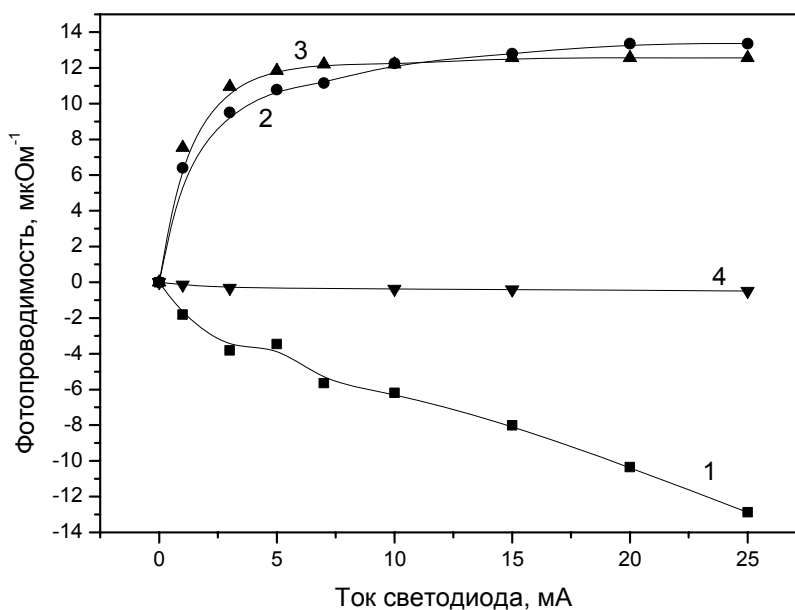
Практически концентрацию этих ПС не удается снизить до значений меньше 10^9 см^{-2} на границе Si/SiO₂ [6].

Целью данной работы была оценка концентрации “медленных” поверхностных уровней в структурах МПК и в монокристаллическом кремнии, исходя из измерений поверхностной ФП структур МПК и монокристаллического кремния в условиях сильного поверхностного поглощения света.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исходным материалом был монокристаллический кремний *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см. Макропоры глубиной 60 мкм, диаметром 2 мкм и периодом 4 мкм были сформированы методом электрохимического травления в растворе фтористоводородной кислоты. Толщина структуры 420 мкм. Омические контакты наносились вакуумным напылением индия на торцевые поверхности структур. Для исследования ФП использовался метод с постоянным освещением с помощью простейшей схемы с последовательным соединением источника напряжения (батарея), образца и нагрузочного сопротивления, с которого снимался полезный сигнал с помощью нановольтметра В2-38. Измерения производились в режиме максимальной чувствительности при равенстве сопротивлений измеряемой структуры и нагрузочного сопротивления. В качестве источников света использовались три светодиода: инфракрасный АЛ-106 В, красный и зеленый с длиной волны 0,935, 0,62 и 0,52 мкм соответственно. При такой длине волны глубина поглощения света равняется 50, 2,5 и 1 мкм соответственно [7]. Дебаевская длина экранирования для нашего случая ($n_0 = 1,34 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) равна 0,12 мкм, а толщина области пространственного заряда (ОПЗ) составляла 1,146 мкм [4].

На рисунке представлены люкс-амперные зависимости ФП структуры МПК и монокристаллического кремния. Как видно из рисунка, ФП структуры МПК сильно зависит от длины волны освещения λ , от которой зависит как величина, так и знак ФП. На длине волны 0,52 мкм проявляется отрицательная ФП, при $\lambda = 0,62$ и 0,93 мкм – положительная ФП. Отметим сильное расхождение люкс-амперных характеристик структуры МПК (кривая 1) и монокристаллического кремния (кривая 4) на длине волны 0,52 мкм при глубине поглощения 1 мкм, т.е. практически на толщине ОПЗ.



Люкс-амперные зависимости фотопроводимости периодической структуры макропористого кремния (1-3) и монокристаллического кремния (4) при разной длине волны освещения: 1, 4 – 0,52 мкм; 2 – 0,62 мкм; 3 – 0,93 мкм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В эксперименте реализован случай сильного приповерхностного поглощения света с длиной волны 0,52 мкм на глубине 1 мкм, что примерно равно толщине области пространственного заряда (1,146 мкм). Наблюдалась отрицательная ФП как в структуре МПК, так и в образце монокристаллического кремния. Известно, что отрицательная монополярная ФП σ_{m1} реализуется при инверсионном изгибе зон (в нашем случае из расчета получено значение $Y_s = -22,8$), который образуется при прилипанию на поверхностных уровнях основных носителей заряда. При этом образуется инверсионный приповерхностный слой толщиной равной примерно дебаевской длине экранирования и в нем реализуется монополярная фотопроводимость σ_{m1} [8-10]. Своим появлением σ_{m1} обязана тем подвижным носителям 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, ограниченной длиной экранирования Дебая [11]. В [9] показано, что по величине “медленной” монополярной ФП, которая локализована в тонком приповерхностном слое, можно определить концентрацию центров прилипания, т.е. поверхностную концентрацию “медленных” уровней (состояний). В эксперименте измеряется эффективное значение отрицательной ФП двухслойной структуры. Но фактически “медленная” отрицательная ФП реализуется в тонком инверсионном слое. Поэтому для оценки концентрации “медленных” поверхностных уровней, которые вызывают отрицательную ФП инверсионного слоя, необходимо определить ФП этого инверсионного слоя. Для этого воспользуемся формулой для эффективной проводимости двухслойной структуры [12]:

$$\sigma_{eff} = (\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2) / d. \quad (1)$$

Из формулы (1) легко получить выражение для фотопроводимости инверсионного слоя, учитывая, что в фотопроводимости при сильном поверхностном поглощении принимает участие только инверсионный слой d_1 :

$$\Delta\sigma_1 = (-\Delta\sigma_{eff} d) / d_1, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_{eff}$ – разница между эффективными значениями проводимости структуры макропористого кремния на свету и в темноте, d_1 – толщина инверсионного слоя. При расчете $\Delta\sigma_1$ использовалось экспериментально определенное значение “медленной” монополярной отрицательной ФП и рассчитанное значение d_1 , равное дебаевской длине экранирования 0,12 мкм. Полученное значение фотопроводимости инверсионного слоя позволяет оценить концентрацию “медленных” поверхностных уровней [9]:

$$N_{mny} = \Delta\sigma_1 (e\mu_{nn})^{-1}, \quad (3)$$

где μ_{nn} – приповерхностная подвижность дырок в инверсионном канале. Она отличается от подвижности в объеме из-за добавочного рассеяния на поверхности [8]. В результате из формулы (2), приняв $\mu_{nn} = 200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, получаем оценочную величину концентрации “медленных” поверхностных уровней в монокристаллическом кремнии ($N_{mny} < 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Для структуры МПК получается значение $N_{mny} > 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Так как отрицательная ФП является чисто поверхностным фотоэффектом, рассчитаем отношение площадей поверхности структуры МПК (с учетом площади поверхности макропор) и образца монокристаллического кремния:

$$S_{\text{МПК}}/S_{\text{Si}} = \pi D_p h / a^2 + 1, \quad (4)$$

где D_p – диаметр пор, h – глубина пор, a – период структуры МПК (расстояние между центрами соседних пор). Расчет по формуле (4) дает значение 25, которое почти совпало с отношением значений отрицательной ФП структуры МПК и монокристаллического кремния (27). Это подтверждает то, что отрицательная ФП является чисто поверхностным эффектом и пропорциональна площади поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование поверхностной фотопроводимости при сильном поверхностном поглощении света в структурах макропористого кремния и в монокристаллическом кремнии. Коэффициент поглощения изменялся в диапазоне от 200 до 10^4 см^{-1} .

2. Установлено, при поглощении света с длиной волны 0,52 мкм на толщине области пространственного заряда в 1 мкм наблюдается “медленная” отрицательная фотопроводимость. При поглощении света с длиной волны 0,935 и 0,62 мкм на глубине 50 и 2,5 мкм соответственно наблюдается положительная ФП. Причиной отрицательной ФП является прилипание на поверхностных уровнях основных носителей заряда, положительная поверхностная ФП проявляется при прилипании неосновных носителей заряда.

3. На основании измеренной отрицательной ФП была рассчитана ФП инверсионного слоя и из нее получены оценочные значения концентрации “медленных” поверхностных уровней как в структуре МПК ($N_{\text{мпу}} > 10^{13} \text{ см}^{-2}$), так и в монокристаллическом кремнии ($N_{\text{мпу}} < 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

4. Показано, что отношение отрицательных значений ФП в структуре МПК и в монокристаллическом кремнии практически совпадают с отношением освещаемых площадей структуры МПК и монокристаллического кремния (27 и 25 соответственно), что подтверждает чисто поверхностную природу отрицательной ФП в условиях сильного поверхностного поглощения света.

Н.І. Карась, В.Ф. Онищенко

МОНОПОЛЯРНА ФОТОПРОВІДНІСТЬ ІНВЕРСІЙНОГО ШАРУ І “ПОВІЛЬНІ” ПОВЕРХНЕВІ РІВНІ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО І МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ В УМОВАХ СИЛЬНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА

Досліджено поверхневу фотопровідність в структурах макропористого і монокристалічного кремнію при коефіцієнті поглинання в діапазоні $200 - 10^4 \text{ см}^{-1}$. При цьому спостерігалась позитивна і негативна фотопровідність. Вихідним матеріалом для формування структур макропористого кремнію був кремній n-типу з орієнтацією [100] і питомим опором 4,5 Ом см. За допомогою електрохімічного травлення утворювалися макропори з діаметром $D_p = 2 \text{ мкм}$, глибиною $h_p = 60 \text{ мкм}$ і періодом $a = 4 \text{ мкм}$. Встановлено, при поглинанні світла з довжиною хвилі 0,52 мкм на товщині області просторового заряду в 1 мкм спостерігається “повільна” негативна фотопровідність. При поглинанні світла з довжиною хвилі 0,935 і 0,62 мкм на глибині 50 і 2,5 мкм відповідно спостерігається позитивна фотопровідність. Причиною негативної фотопровідності є прилипання на “повільних” поверхневих рівнях основних носіїв заряду, позитивна поверхнева фотопровідність проявляється при прилипання неосновних носіїв заряду. На підставі вимірної негативної фотопровідності була розрахована фотопровідність інверсійного шару і з неї отримано оціночні значення концентрації “повільних” поверхневих рівнів як в структурі макропористого ($N > 10^{13} \text{ см}^{-2}$) так і в монокристалічному кремнії ($N < 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Показано, що відношення негативних значень фотопровідності в структурі макропористого кремнію і в монокристалічному кремнії практично збігаються з відношенням освітлюваних площ структури макропористого (з урахуванням площі поверхні макропор) і монокристалічного кремнію (27 і 25 відповідно), що підтверджує чисто поверхневу природу негативної фотопровідності в умовах сильного поверхневого поглинання світла.

Ключові слова: “повільна” монополярна поверхнева негативна фотопровідність, концентрація “повільних” поверхневих рівнів, інверсійний шар.

N.I. Karas, V.F. Onyshchenko

MONOPOLAR PHOTOCONDUCTIVITY OF THE INVERSION LAYER AND "SLOW"-SURFACE LEVELS IN THE STRUCTURES OF MACROPOROUS AND MONOCRYSTALLINE SILICON IN CONDITIONS OF STRONG SURFACE LIGHTNING

The surface photoconductivity in the structures of macroporous and monocrystalline silicon has been studied with an absorption coefficient in the range of $200 - 10^4 \text{ cm}^{-1}$. At the same time, positive and negative photoconductivity was observed. The starting material consisted of n-type silicon with [100] orientation and 4.5 Ohm cm resistivity. Macropores with diameter $D_p=2 \text{ }\mu\text{m}$, depth $h_p=60 \text{ }\mu\text{m}$ and period $a=4 \text{ }\mu\text{m}$ were formed by electrochemical etching. It was found that when light is absorbed with a wavelength of $0.52 \text{ }\mu\text{m}$, a "slow" negative photoconductivity is observed on the thickness of the space charge region of $1 \text{ }\mu\text{m}$. When light is absorbed with a wavelength of 0.935 and $0.62 \text{ }\mu\text{m}$ at a depth of 50 and $2.5 \text{ }\mu\text{m}$, respectively, positive photoconductivity is observed. The cause of negative photoconductivity is capture on the "slow" surface levels of the majority charge carriers, positive surface photoconductivity is manifested when capture of minority charge carriers. On the basis of the measured negative photoconductivity, the photoconductivity of the inversion layer was calculated, and from it the estimated values of the concentration of "slow" surface levels were obtained both in the macroporous structure ($N > 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) and in monocrystalline silicon ($N < 10^{13} \text{ cm}^{-2}$). It is shown that the ratio of negative photoconductivity in the structure of macroporous and monocrystalline silicon almost coincides with the ratio of illuminated areas of the structure of macroporous and monocrystalline silicon (27 and 25 , respectively), which confirms the purely surface nature of negative photoconductivity under conditions of strong surface absorption of light.

Keywords: "slow" monopolar surface negative photoconductivity, concentration of "slow" surface levels, inversion layer.

1. Карась Н.И., Паршин К.А. Эффект локализации фотопроводимости в структурах макропористого кремния. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2016. 7, №2. С. 246–250.
2. Konin K.P., Goltvyansky Yu.V., Karachevtseva L.A., Karas M.I., Morozovs'ka D.V. Photoconductivity of macroporous and nonporous silicon with ultra thin oxide layers. *J. Electron. Mater.* 2018. 47. P. 5105–5108.
3. Карась Н.И., Онищенко В.Ф., Калустова Д.А., Корнага В.И. "Медленные" поверхностные уровни и релаксация фотопроводимости в структурах макропористого кремния в фиолетовой области оптического спектра. *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2017. Вып. 52. С. 135–140.
4. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния. *Нові технології*. 2010. №1. С. 118–123.
5. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. *Космическая электроника*. В 2-х кн. Книга 2, С. 724. М.: Техносфера, 2015.
6. Горшков А.П., Тихов С.В. *Физика поверхности полупроводников: Учебное пособие*. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013.
7. Green M.A. *High Efficiency Silicon Solar Cells*. Trans Tech Publ., Switzerland, 1987.
8. Ляшенко В.И., Литовченко В.Г., Степко И.И., Стриха В.И., Ляшенко Л.В. *Электронные явления на поверхности полупроводников*. К.: Наукова думка, 1968.
9. Литовченко В.Г., Горбань А.П. и Ковбасюк В.П. Исследование эффекта прилипания фотоносителей тока на поверхности кремния. *ФТТ*. 1965. 7, №2. С. 565–572.
10. Саченко А.В., Снитко О.В. *Фотозффекты в приповерхностных слоях полупроводников*. К.: Наукова думка, 1984.
11. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И. Прилипание неравновесных носителей тока на поверхности германия. *ФТТ*. 1962. 4, №8. С. 1985–1993.
12. Кучис Е.В. *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования*. М.: Радио и связь, 1990.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
41, проспект Науки, 03028 Киев, Украина
E-mail: nikar@isp.kiev.ua

Получено 30.10.2018