

Н.И. Карась, К.А. Паршин

ЭФФЕКТ ЛОКАЛИЗАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

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

Исследована поверхностная фотопроводимость структур макропористого кремния (МПК) с оксидным покрытием толщиной от 3 до 30 нм при сильном поверхностном поглощении света; коэффициент поглощения изменялся от 330 до 10^5 см^{-1} (длина волны освещения от 0.93 до 0.4 мкм). На длине волны 0.4 и 0.57 мкм и толщине оксидного покрытия от 3 до 15 нм проявлялась поверхностная монополярная отрицательная фотопроводимость (ФП), что объясняется инверсионным изгибом зон в приповерхностных слоях полупроводника и прилипанием основных носителей заряда на так называемых «медленных» поверхностных уровнях. При толщине оксидного покрытия 30 нм проявлялась положительная ФП с аномальной спектральной зависимостью: с увеличением коэффициента поглощения от 330 до 10^5 см^{-1} (уменьшением длины волны освещения от 0.93 до 0.4 мкм) ФП не уменьшалась, а возрастала – проявлялся эффект локализации ФП в области пространственного заряда (ОПЗ).

Ключевые слова: инверсионный изгиб зон, истоцающий изгиб зон, встроенный заряд, отрицательная ФП, положительная ФП, эффект локализации фотопроводимости, «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 МПК и, вследствие этого, на характер поверхностной ФП. В работе [1] была обнаружена и исследована отрицательная стационарная ФП в структурах МПК и трактовалась как монополярная ФП, локализованная 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 положительного заряда оксида) и коэффициента поглощения света (длины волны света) на характер поверхностной отрицательной и положительной ФП в структурах МПК.

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 фтористоводородной кислоте [2]. 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 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 индий-пористый кремний в атмосфере водорода при температуре 400 °С в течение 30 мин для диффузии In через слой SiO_x и улучшения адгезии In с МПК. Коэффициент выпрямления на таких образцах не превышал 1.1.

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 нанометром В2-38 снимался полезный сигнал. ФП измеряли в режиме

максимальной чувствительности при $R=r$. В качестве источника света использовались три светодиода: инфракрасный, зеленый и синий с длинами волн 0.93, 0.57 и 0.4 мкм соответственно. В качестве инфракрасного источника света использовался светодиод АЛ-106В с максимальной мощностью излучения 0.6 мВт при токе через светодиод 100 мА. В пересчете на интенсивность излучения в наших экспериментах последняя составляла от $5.4 \cdot 10^{13}$ до $4.35 \cdot 10^{15}$ квант/(см²·с). Интенсивность освещения регулировалась током светодиодов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из рис. 1, отрицательная фотопроводимость структур МПК зависит как от толщины оксидного покрытия, так и от длины волны освещения, которые влияют как на абсолютные значения ФП, так и на характер ее зависимости от интенсивности освещения. При увеличении толщины оксидного покрытия от 3 до 15 нм ФП уменьшается по абсолютной величине (кривые 1, 2). В зависимости от длины волны освещения наблюдается превосходство абсолютных значений ФП на длине волны 0.4 мкм по сравнению с аналогичными значениями на длине волны 0.57 мкм, особенно контрастно это превосходство проявляется в структурах МПК с собственным оксидом толщиной 3 нм (кривые 3, 4). Экспериментально отрицательная ФП МПК была исследована в [1, 3–4], теоретически ФП полупроводников с учетом ряда поверхностных процессов, в том числе и прилипания носителей на поверхностных уровнях, была рассчитана в работах [5–7]. Этот расчет показал, что в общем случае стационарная ФП полупроводников описывается выражением, состоящим из двух слагаемых, одно из которых описывает биполярную ФП (как в объеме, так и в ОПЗ), другое – монополярную ФП, локализованную в ОПЗ. Последнее слагаемое может быть как положительным, так и отрицательным (т.е. монополярная ФП может быть и положительной, и отрицательной) в зависимости от того, какой тип носителей заряда прилипает на поверхностных уровнях. Если более интенсивным будет прилипание основных носителей, что происходит при инверсионном изгибе зон, то это ведет к отрицательной монополярной ФП.

Механизм поверхностного прилипания, приводящий к отрицательной ФП, состоит в следующем. Прилипание на поверхности носителей одного знака автоматически исключает из объемной проводимости носители другого знака. Перемещение незахваченных (свободных) возбужденных светом носителей становится возможным только параллельно поверхности в области $\leq L_D$ (дебаевской длины экранирования) [6].

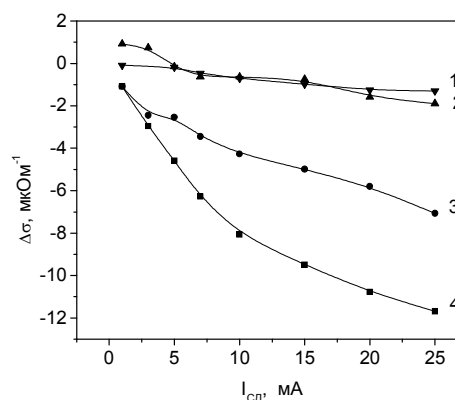


Рис. 1. Зависимость отрицательной фотопроводимости от тока светодиода (интенсивности освещения). Толщина оксида: 1 – 15 нм, 2 – 7 нм, 3, 4 – 3 нм. Длина волны светодиода (λ): 1, 3 – 0.57 мкм, 2, 4 – 0.4 мкм

Существенное увеличение отрицательной ФП на длине волны 0.4 мкм (кривая 4) по сравнению с ее величиной на длине волны 0.57 мкм (кривая 3) объясняется тем, что возрастает роль эффекта прилипания при уменьшении длины волны и глубины поглощения света. На длине волны 0.4 и 0.57 мкм глубина поглощения света в кремнии равна 0.1 и 1.6 мкм соответственно. Таким образом, максимальная отрицательная монополярная ФП наблюдается при сильном поверхностном поглощении света, в нашем случае при поглощении света с длиной волны 0.4 мкм на дебаевской длине экранирования (0.12 мкм) на структуре с минимальной толщиной оксидного покрытия 3 нм (собственный оксид).

Уменьшение отрицательной ФП при увеличении толщины оксидного покрытия на кривых 1, 2 по сравнению с кривыми 3, 4 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, прилегающим к межфазной границе Si-SiO₂ [8]. По мере увеличения толщины оксидного покрытия возрастает его положительный заряд [7], 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 МПК уменьшается и уменьшается отрицательная ФП (кривые 1, 2).

В [1] были рассчитаны толщина ОПЗ и инверсионный изгиб зон для нашего случая. Соответственно, они равны $W = 1.146$ мкм и $Y_s = -22.8$. Таким образом, при поглощении света примерно на толщине ОПЗ и инверсионном изгибе зон в структурах МПК наблюдается отрицательная ФП.

На рис. 2 представлены люкс-амперные характеристики (ЛАХ) структуры МПК с оксидным покрытием толщиной 30 нм.

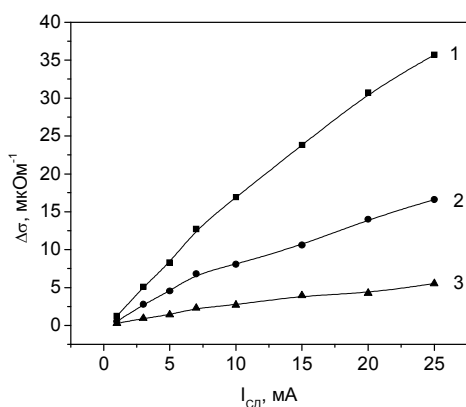


Рис. 2. Зависимость фотопроводимости МПК с толщиной оксидного покрытия 30 нм от тока светодиода (интенсивности освещенности). Длина волны светодиода (λ): 1 – 0.4 мкм, 2 – 0.57 мкм, 3 – 0.93 мкм

Как видно из рис. 2, на всех длинах волн проявляется положительная ФП. При этом наблюдается аномальный характер ее спектральной зависимости: с увеличением коэффициента поглощения (уменьшением длины волны освещения и уменьшением глубины поглощения – соответствующие данные приведены в таблице [9]) ФП не уменьшается, а возрастает.

Такой эффект имеет место при истокающих изгибах зон и во всех случаях, когда биполярная ФП ОПЗ больше биполярной

ФП квазинейтрального объема, и называется эффектом локализации ФП в ОПЗ. Теоретически он был рассчитан в [5, 7]. В нашем случае изменение знака ФП при толщине оксидного покрытия 30 нм объясняется следующим образом. По мере увеличения толщины оксидного покрытия возрастает его положительный заряд [7], компенсирующий все в большей степени заряд «медленных» поверхностных уровней. При этом инверсионный изгиб зон у поверхности МПК уменьшается и переходит в истокающий, при котором отрицательная ФП переходит в положительную ФП с аномальной спектральной зависимостью (рис. 2).

Таблица. Значения коэффициента поглощения α и глубины поглощения $1/\alpha$ в зависимости от длины волны освещения

Длина волны, λ , мкм	Коэффициент поглощения, α , см ⁻¹	Глубина поглощения, $1/\alpha$, мкм
0.4	10^5	0.1
0.57	$6 \cdot 10^3$	1.6
0.93	330	30

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование влияния оксидного покрытия толщиной 3–30 нм и коэффициента поглощения света ($330\text{--}10^5$ см⁻¹) на поверхностную ФП в структурах МПК.

2. Установлено, что при толщине оксидного покрытия 3–15 нм и длине волны света 0.4 и 0.57 мкм (коэффициент поглощения 10^5 и $6 \cdot 10^3$ см⁻¹ соответственно) проявлялась отрицательная поверхностная монополярная ФП. Из литературных данных [6] известно, что отрицательная ФП локализована в инверсионном слое в пределах дебаевской длины экранирования. В наших экспериментах она уменьшалась с увеличением толщины оксидного покрытия и была больше на длине волны освещения 0.4 мкм, т.е. увеличивалась с уменьшением длины волны освещения и глубины поглощения света. Отрицательная ФП наблюдается при поглощении света примерно на толщине ОПЗ, при инверсионном изгибе зон и при прилипании на «медленных» поверхностных уровнях основных носителей заряда.

3. При толщине оксидного покрытия 30 нм проявлялась положительная биполярная ФП с аномальной спектральной зависимостью (эффект локализации ФП в ОПЗ), т.е. с увеличением коэффициента поглощения (уменьшением длины волны освещения) ФП не уменьшалась, а увеличивалась. Эффект локализации ФП в ОПЗ проявляется в тех

случаях, когда биполярная ФП ОПЗ больше ФП квазинейтрального объема и при истожающих изгибах зон [5].

4. Экспериментально установлено влияние оксидного покрытия и длины волны падающего света на величину, знак и особенности поверхностной ФП в структурах МПК.

Ефект локалізації фотопровідності в структурах макропористого кремнію

М.І. Карась, К.А. Паршин

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України
просп. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, nikar@isp.kiev.ua

Досліджено поверхневу фотопровідність структур макропористого кремнію (МПК) з оксидним покриттям завтовшки від 3 до 30 нм при сильному поверхневому поглинанні світла, коефіцієнт поглинання змінювався від 330 до 10^5 см^{-1} (довжина хвилі від 0.93 до 0.4 мкм відповідно). На довжині хвилі 0.4 і 0.57 мкм і товщині оксидного покриття від 3 до 15 нм проявлялась поверхнева монополярна негативна фотопровідність (ФП), що пояснюється інверсійним вигином зон в приповерхневих шарах напівпровідника і прилипанням основних носіїв заряду на так званих «повільних» поверхневих рівнях. При товщині оксидного покриття 30 нм проявлялась позитивна фотопровідність з аномальною спектральною залежністю: із збільшенням коефіцієнта поглинання від 330 до 10^5 см^{-1} (зменшенням довжини хвилі від 0.93 до 0.4 мкм) ФП не зменшувалась, а зростала – проявлявся ефект локалізації ФП в області просторового заряду (ОПЗ).

Ключові слова: інверсійний вигин зон, виснажуючий вигин зон, вбудований заряд, негативна ФП, позитивна ФП, ефект локалізації ФП в ОПЗ, «повільні» поверхневі рівні

The effect of photoconductivity localization in macroporous silicon

N.I. Karas, K.A. Parshin

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
41 Nauky Pr., Kyiv, 03028, Ukraine, nikar@isp.kiev.ua

The surface photoconductivity in macroporous silicon with an oxide coating with thickness of 3 to 30 nm with a strong surface light absorption, the absorption coefficient is varied from 330 to 10^5 cm^{-1} (wavelength is from 0.93 to 0.4 micron) has been investigated. The starting material consisted of n-type silicon with [100] orientation and $4.5 \Omega\cdot\text{cm}$ resistivity. Macropores with diameter $D_p = 4 \mu\text{m}$ and depths $h_p = 100 \mu\text{m}$ were formed by electrochemical etching. At the wavelengths of 0.4 and 0.57 microns, and the thickness of the oxide layer of 3 to 15 nm the surface monopolar negative photoconductivity was manifested, due to the inversion band bending in the surface layers of the semiconductor and due to capture of majority carriers on the so-called «slow» surface levels. When the thickness of the oxide layer is 30 nm, a positive photoconductivity with anomalous spectral dependence takes place with an increase in the absorption coefficient from 330 to 10^5 cm^{-1} (decreasing wavelength from 0.93 to 0.4 microns) photoconductivity is not decreasing, but increases – localization effect of the surface photoconductivity in the space charge region was manifested. The experimental results are explained as follows. With the increasing of oxide coating thickness its positive charge also increases and compensates the negative charge of the slow surface levels. The inversion band bending at the same time becomes depletion band bending. In general, the semiconductor photoconductivity, taking into account surface effects (space charge region)

consists of three components: bipolar photoconductivity of the space charge region, monopolar photoconductivity of the space charge region and bipolar photoconductivity of the quasi-neutral volume.

Effect of localization photoconductivity occurs in all cases where the bipolar photoconductivity of the space charge region is more than bipolar photoconductivity quasi-neutral volume. This occurs in the case of the depleting band bending on the semiconductor surface.

Keywords: the inversion band bending, the depleting band bending, a built-in charge, negative PC, positive PC, the localization effect of the surface photoconductivity, the «slow» surface levels

ЛИТЕРАТУРА

1. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость в структурах макропористого кремния // Нові технології. – 2010. – № 1. – С. 118–123.
2. Карачевцева Л.А., Литвиненко О.А., Маловичко Э.А. Стабилизация электрохимического процесса формирования макропор в n-Si // Теорет. и эксперим. химия. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 314–318.
3. Карась Н.И. Отрицательная фотопроводимость и поверхностно-барьерный фотодиодный эффект – два взаимосвязанных поверхностных фотоэффекта в макропористом кремнии // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2014. – Т. 49. – С. 88–92.
4. Карась Н.И. Положительная и отрицательная фотопроводимость в макропористом кремнии // Тез. Доп. VI Української наук. конф. з фізики напівпровідників (Чернівці, 30 вересня – 4 жовтня 2013 р.). – С. 276–277.
5. Зуев В.О., Саченко А.В. Теоретичне дослідження поверхнево-чутливих фотоэффектів у Si // Укр. фіз. журн. – 1973. – Т. 18, № 10. – С. 1680–1687.
6. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И. Прилипание неравновесных носителей тока на поверхности германия // Физика твердого тела. – 1962. – Т. 4, № 8. – С. 1985–1993.
7. Саченко А.В., Снитко О.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. – Киев: Наук. думка, 1984. – 232 с.
8. Александров О.В., Дусь А.И. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 4. – С. 474–480.
9. Полупроводниковые приборы и их применение: сборник статей / Под ред. Я.А. Федотова. – Москва: Сов. Радио, 1971. – 472 с.

REFERENCES

1. Karas M.I. Negative photoconductivity in macroporous silicon structures. *New Technologies*. 2010. **1**(27): 118. [In Russian].
2. Karachevtseva K.A., Litvinenko O.A., Malovichko E.A. Stabilization of electrochemical formation of macropores in n-Si. *Theor. Exp. Chem*. 1998. **34**(5): 287.
3. Karas M.I. Negative photoconductivity and the surface barrier effect – two connected surface effects in macroporous silicon. *Optoelectronics and Semiconductor Technics*. 2014. **49**: 88. [In Russian].
4. Karas M.I. Positive and negative photoconductivity in macroporous silicon. In: *VI Ukrainian Sci. Conf. on Semiconductor Physics*. (2013). P. 276. [In Russian].
5. Zuev V.O., Sachenko A.V. Theoretical investigation of the surface sensitive photoeffects. *Ukr. Phys. J*. 1973. **18**(10): 1680. [In Ukrainian].
6. Litovchenko V.G., Lyashenko V.I. Adhesion of nonequilibrium charge carriers on Ge surface. *Physics of the solid state*. 1962. **4**(8):1985. [In Russian].
7. Sachenko A.V., Snitko O.V. *Photoeffects in presurface semiconductor layers*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1984). [In Russian].
8. Alexandrov O.V., Dus' A.I. Model of the fix charge formation in the thermal silicon dioxide. *Semiconductors*. 2011. **45**(4): 474.
9. Fedotov Ya.A. *Semiconductor devices and its application*. (Moscow: Sov. Radio, 1971). [In Russian].

Поступила 18.02.2016, принята 31.03.2016