

Дрейфовая подвижность носителей заряда в пористом кремнии

© Н.С. Аверкиев, Л.П. Казакова[¶], Э.А. Лебедев, Н.Н. Смирнова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 ноября 2000 г. Принята к печати 4 ноября 2000 г.)

Проведено исследование дрейфовой подвижности носителей заряда в пористом кремнии в широком интервале температур 190–360 К и напряженности электрического поля $2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$ В/см. Установлена экспоненциальная зависимость дрейфовой подвижности дырок от температуры с энергией активации $d \sim 0.14$ эВ. Получена оценка плотности локализованных состояний, контролирующих перенос.

В связи с перспективой практического использования пористого кремния (ПК) до настоящего времени интенсивно исследовались оптические и фотоэлектрические свойства этого материала. Значительно меньше внимания уделялось изучению переноса носителей заряда, хотя информация о подвижности электронов и дырок и энергетическом спектре локализованных состояний важна для понимания различных свойств ПК и, в частности, механизма электролюминесценции [1–5].

В данной работе проведены исследования дрейфовой подвижности носителей заряда в ПК в широком интервале температур $T = 190$ – 360 К и напряженности электрического поля $F = 2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$ В/см.

Исследования дрейфовой подвижности проводились методом измерения времени пролета носителей заряда через образец [6]. Избыточная концентрация носителей заряда в образце создавалась импульсом излучения с длиной волны 0.337 мкм и длительностью ~ 8 нс, получаемым от азотного лазера ЛГИ-21. К образцам прикладывалось импульсное напряжение длительностью ~ 1 мс при наличии времени задержки ~ 100 мкс между моментами подачи напряжения и импульса излучения. Измерения проводились в режиме сильной инжекции, когда влиянием электрического поля дрейфующего пакета носителей заряда нельзя было пренебречь. Постоянная времени на входе усилителя была значительно меньше времени пролета.

Слой ПК толщиной $L \approx 10$ мкм изготавливались электрохимическим способом на полированной поверхности кремния p -типа с удельным сопротивлением 2–7 Ом·см. Образцы для измерений имели структуру типа "сэндвич". Кристаллический кремний использовался в качестве одного электрода. Другим электродом служила полупрозрачная пленка алюминия, напыленная на ПК в вакууме. Сопротивление образцов составляло 10^9 – 10^{10} Ом при площади верхнего электрода $(3$ – $7) \cdot 10^{-2}$ см².

На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов фототока, наблюдаемые при дрейфе дырок. Дрейф электронов наблюдать практически было невозможно из-за малой величины сигнала.

Как видно из рисунка, форма полученных осциллограмм переходного фототока $I(t)$ является типичной для тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ) [7]. Зависимости $I(t)$ характеризуются начальным (I_0) и максимальным (I_m) токами. Время t_m , соответствующее максимуму тока, изменялось обратно пропорционально приложенному к образцу напряжению. Величины I_0 и I_m возрастали с напряжением по закону, близкому к квадратичному: $I \propto U^2$. Величина сигнала не зависела от интенсивности инжектирующего излучения.

Значение дрейфовой подвижности дырок μ_h определялось двумя способами: из времени пролета и из величины фототока. В первом случае значение дрейфовой подвижности вычислялось по формуле

$$\mu_h = L^2 / t_T U, \quad (1)$$

где t_T — время пролета носителей заряда в условиях слабой инжекции и связано с t_m соотношением $t_m = 0.8t_T$ [7]. Величина дрейфовой подвижности дырок, полученная таким способом, составила $\sim 6.5 \cdot 10^{-3}$ см²/В·с при $T = 290$ К и $F = 10^4$ В/см.

Во втором случае для определения подвижности использовалось выражение для плотности начального фо-

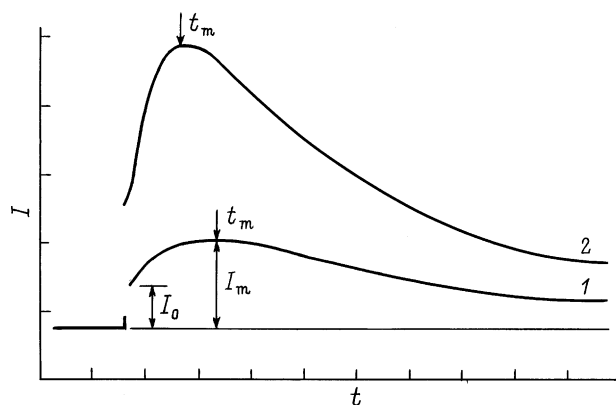


Рис. 1. Осциллограммы переходного фототока $I(t)$, соответствующего дрейфу дырок в слое пористого Si толщиной 10 мкм. Напряжение U , В: 1 — 3, 2 — 6. Масштаб по оси t — 20 мкс/дел, по оси I — 0.4 мкА/дел.

[¶] E-mail: kazakova@pop.ioffe.rssi.ru
Tel.: (812) 2479982;
Fax: (812) 2471017

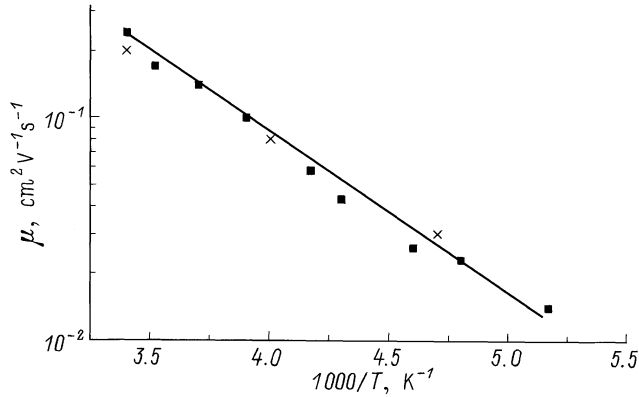


Рис. 2. Зависимость дрейфовой подвижности дырок от температуры, $L = 10$ мкм, $F = 5 \cdot 10^3$ В/см. Крестики соответствуют обратному ходу температуры.

тока в условиях ТОПЗ [7]:

$$j_0 [\text{A}/\text{cm}^2] = I_0/S = \mu_h \varepsilon U^2 / (2.25 \cdot 10^{13} L^3), \quad (2)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость. Ранее в работе [3] для пористого Si была получена величина $\varepsilon = 4.8$. При использовании этой величины в формуле (2) было определено значение подвижности дырок $\mu_h = 7.4 \cdot 10^{-3}$ см²/В·с, которое практически совпало со значением μ_h , вычисленным из времени пролета по формуле (1).

Установленные значения μ_h оказались близки к полученным ранее в работе [4] на образцах ПК, приготовленных методом анодизации в режиме, не сильно отличающимся от использованного нами.

Исследования показали, что в интервале электрических полей 10^3 – 10^4 В/см величина μ_h не зависела от напряженности электрического поля.

В данной работе было также проведено исследование зависимости дрейфовой подвижности от температуры в интервале $T = 190$ – 360 К. Измерения проводились в вакууме $\sim 10^{-2}$ Торр. В условиях вакуума значение дрейфовой подвижности при комнатной температуре уменьшалось в 3–4 раза. В результате нескольких циклов нагрева и остывания образца в вакууме подвижность дырок возрастала. Стабилизация произошла при значении $\mu_h = 10^{-1}$ см²/В·с. Исследования показали, что после стабилизации зависимость $\mu_h(T)$ имеет активационный характер:

$$\mu = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где $E_a \cong 0.14$ эВ (рис. 2). На рисунке крестиками указаны значения μ_h , полученные при обратном ходе температуры.

Следует отметить, что подвижность, определенная в пористом Si, имеет низкое значение, характерное для веществ с неупорядоченной структурой, в которых обычно наблюдается перенос носителей заряда, контролируемый

захватом на локализованные состояния. Кроме того, в работе [8] отмечалась аналогия в электрических свойствах этих материалов. Эти факты позволяют высказать предположение о сходстве механизмов переноса носителей заряда в ПК и веществах с неупорядоченной структурой. Таким образом, энергия активации дрейфовой подвижности в ПК может быть обусловлена энергетическим положением ловушек, контролирующих перенос.

Сделанное предположение подтверждается оценкой величины предэкспоненциального множителя: $A \approx 50$ см²/В·с, полученной из формулы (3) при использовании экспериментально установленных величин подвижности и ее энергии активации. Известно [9], что такая величина предэкспоненциального множителя свидетельствует о переносе носителей заряда, контролируемом захватом на локализованные состояния. В этом случае при наличии дискретного уровня локализованных состояний дрейфовая подвижность описывается выражением

$$\mu = \mu_0 \frac{N_c}{N_t} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (4)$$

где μ_0 — подвижность носителей заряда в зоне, N_c и N_t — эффективная плотность состояний в зоне и плотность локализованных состояний соответственно.

Недавно в работе [4] было установлено значение дрейфовой подвижности электронов $\mu \approx 2$ – 4 см²/В·с, не зависящее от температуры. Этот факт позволяет предположить, что величина подвижности носителей заряда у края разрешенной зоны в ПК составляет $\mu_0 \approx 1$ см²/В·с. Если в формуле (4) использовать эту величину μ_0 и положить $N_c = 10^{19}$ см⁻³, то концентрация локализованных состояний может быть оценена как $N_t = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Из полученных данных следует, что многократные циклы нагрева и охлаждения в вакууме существенно влияют на величину дрейфовой подвижности носителей заряда и ее энергию активации. Эти изменения можно связать с сильным взаимодействием атмосферного кислорода с поверхностью ПК. Это предположение подтверждается, например, результатами исследований, полученными в работах [10,11].

Таким образом, в результате проведенной работы в пористом кремнии:

- определено значение дрейфовой подвижности дырок $\mu_0 = (6.5$ – $7.4) \cdot 10^{-3}$ см²/В·с при $T = 290$ К и $F = 10^4$ В/см;

- установлено, что μ_0 практически не зависит от напряженности электрического поля в интервале $F = 2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$ В/см;

- установлена экспоненциальная зависимость дрейфовой подвижности от температуры с энергией активации ~ 0.14 эВ;

- установлено сильное влияние многократных циклов нагрева образца на величину дрейфовой подвижности и ее энергию активации;

— показано, что механизм дрейфовой подвижности может быть объяснен в рамках модели переноса, контролируемого захватом носителей заряда на локализованные состояния;

— получена оценка плотности локализованных состояний, контролирующих перенос.

Авторы выражают благодарность П.С. Яковлеву за помощь при обработке экспериментальных данных.

Работа поддержана программой Министерства науки РФ "Физика твердотельных наноструктур" (проекты № 97-1039 и № 99-1107).

Список литературы

- [1] O. Klima, P. Hlinomaz, A. Hospodkova, J. Oswald, J. Kocka. *J. Non-Cryst. Sol.* **162–164**. 961 (1993).
- [2] Э.А. Лебедев, Г. Полицкий, В. Петрова-Кох. *ФТП*, **30**, 1468 (1996).
- [3] Л.П. Казакова, А.А. Лебедев, Э.А. Лебедев. *ФТП*, **31**, 609 (1997).
- [4] E.A. Lebedev, E.A. Smorgonslaya, G.Polisski. *Phys. Rev. B*, **57**, 14 607 (1998).
- [5] P. Rao, E.A. Schiff, L. Tsybeskov, P.M. Fauchet. *Abstracts of the Int. Conf. "Porous semiconductors — Science and Technology"* (Mallorca, Spain, 1998) p. 53.
- [6] W.E. Spear. *J. Non-Cryst. Sol.*, **1**, 197 (1969).
- [7] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973). [Пер. с англ.: М.А. Lampert, P. Mark. *Current injection in solids* (N.Y.–London, Academic Press, 1970)].
- [8] M. Ben-Chorin, F. Möller, F. Koch, W. Schirmacher, M. Eberhard. *Phys. Rev. B*, **51** (4), 2199 (1995).
- [9] Н.Ф. Мотт, Э.А. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [10] С.П. Кобелева, Т.Н. Бахтигараев, Е.А. Петрова, А.Ф. Орлов. *Тез. докл. 2-й Всеросс. конф. по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния* (М., 2000) с. 348.
- [11] Е.А. Петрова, К.Н. Богословская, Л.А. Балагуров, Г.И. Кочарадзе. *Тез. докл. 2-й Всеросс. конф. по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния* (М., 2000) с. 365.

Редактор Т.А. Полянская

Charge carrier drift mobility in porous silicon

N.S. Averkiev, L.P. Kazakova, E.A. Lebedev,
N.N. Smirnova

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract The charge carrier drift mobility is investigated in porous silicon in the wide temperature (190–360 K) and electric field ($2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$ V/cm) range. An exponential dependence of the drift mobility of holes with the activation energy ~ 0.14 eV is established. The estimation of the concentration of localized states controlling the transport of charge carriers is obtained.