

Переходный ток, ограниченный пространственным зарядом в пористом кремнии

© Л.П. Казакова, А.А. Лебедев, Э.А. Лебедев

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

(Получена 14 октября 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Проведено исследование переходного тока, ограниченного пространственным зарядом в пористом Si приготовленном из кристаллического Si *n*-типа. Определены значения дрейфовых подвижностей электронов и дырок как из значения времени пролета носителей заряда через образец, так и из величины начального фототока.

В последнее время большое внимание исследователей привлечено к пористому кремнию. Этот материал интересен тем, что обладает интенсивной фотолюминесценцией и заметной электролюминесценцией в видимой области спектра. До настоящего времени в пористом Si изучались характеристики люминесценции, оптические и фотоэлектрические свойства [1–7]. Изучению характеристик переноса носителей заряда уделено значительно меньше внимания, несмотря на то, что информация о дрейфовой подвижности электронов и дырок очень важна для выяснения механизма электролюминесценции. В литературе имеются данные о подвижности носителей заряда в пористом Si, исходным материалом для получения которого служил кристаллический Si *p*-типа [8]. Однако известно, что наиболее интересные результаты по электролюминесценции получены на образцах, приготовленных из кристаллического Si *n*-типа [5]. В связи с этим в данной работе проведены исследования с целью определения значений дрейфовых подвижностей электронов и дырок в пористом Si, полученном из кристаллического Si *n*-типа.

Для приготовления пористого кремния использовались полированные пластины кристаллического Si *n*-типа с ориентацией (111), легированного фосфором, с удельным сопротивлением 4.5 Ом · см. Пористые слои получались путем электролитического травления кремния в электролите состава (объемные %): 50% HF (48%) + 50% C₂H₅OH (90%) + 0.1% KNO₂ (одномолярный раствор) при подсветке лампой накаливания. Длительность травления при плотности тока $7 \div 10$ мА/см² составляла 25 ÷ 30 мин. На образцах, полученных таким образом, наблюдалась интенсивная фотолюминесценция в красно-оранжевой области спектра.

Исследование переноса носителей заряда проводилось на образцах, имеющих структуру типа сэндвич. В качестве нижнего электрода служила пластина кристаллического кремния. Верхний электрод представлял собой полупрозрачную пленку из Au, которая наносилась на пористый Si методом термического напыления в вакууме. Сопротивление образцов в электрическом поле 10³ В/см было около 10⁸ Ом при площади верхнего электрода $S = 7 \cdot 10^{-2}$ см². Толщина слоя пористого Si измерялась с помощью оптического микроскопа и составляла $L \approx 8$ мкм.

Для исследований использовался метод измерения времен пролета [9]. Инжекция неравновесных носителей заряда в образец производилась импульсом света от лазера ЛГИ-21 с длиной волны 0.337 мкм и длительностью порядка 8 нс.

Измерения проводились в режиме сильной инжекции, при котором наблюдался переходный фототок, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ). В условиях протекания ТОПЗ величина инжектированного заряда $Q \approx CV$, где C — емкость образца, который рассматривается как плоский конденсатор, V — приложенное к образцу напряжение [10]. Характерными чертами ТОПЗ являются независимость величины тока I от интенсивности инжектирующего излучения и квадратичная зависимость тока от напряжения: $I \sim V^2$ [10].

Измерения переходных ТОПЗ проводились при приложении к образцам импульсного напряжения длительностью порядка 1 мс и наличии времени задержки (~ 100 мкс) между моментами подачи напряжения и фотоинжекции. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов фототока, наблюдаемые при дрейфе дырок. Вид полученных осциллограмм переходного тока $I(t)$ является типичным для ТОПЗ. Зависимости $I(t)$ характеризуются начальным (I_0) и максимальным (I_m) токами. Отношение I_m/I_0 составляет величину, близкую к 2.7. Время t_m , соответствующее максимуму тока, изменялось обратно пропорционально приложенному к образцу напряжению. Величины I_0 и I_m возрастали с напряжением

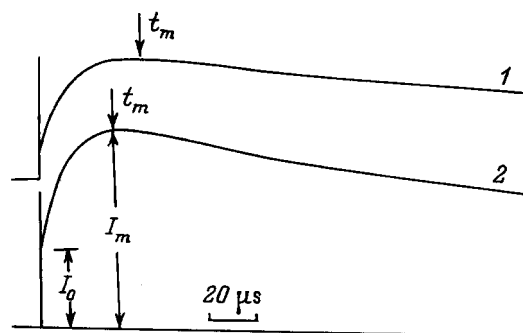


Рис. 1. Осциллограммы переходных фототоков, ограниченных пространственным зарядом, соответствующие дрейфу дырок в пористом Si. Приложенное напряжение V , В: 1 — 2, 2 — 3. Длительность развертки 20 мкс/дел.

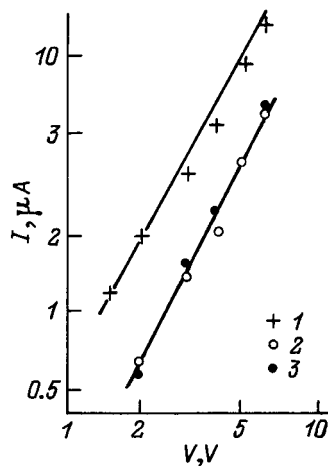


Рис. 2. Зависимость значений токов I_m (1) и I_0 (2,3) от напряжения V для переходных токов, ограниченных пространственным зарядом, соответствующих дрейфу дырок (1,2) и электронов (3) в слое пористого Si.

по закону, близкому к квадратичному: $I \sim V^2$ (рис. 2). Значение дрейфовой подвижности дырок μ_h определялось как из времени пролета $t_T = L^2/\mu_h V$, которое связано с t_m соотношением $t_m = 0.8t_T$, так и из величины плотности начального тока [10]

$$j_0 = I_0/S = \mu_h \varepsilon V^2 / 2.25 \cdot 10^{13} L^3,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость. Из времени пролета было получено значение $\mu_h = 5.7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Из величины начального тока следует такое же значение μ_h , если положить $\varepsilon = 4.8$. Представляет интерес тот факт, что при измерении емкости образцов на частоте 1 МГц было получено близкое значение $\varepsilon \approx 5$.

В отличие от переноса дырок при дрейфе электронов наблюдались импульсы тока, форма которых представляла собой непрерывный спад тока во времени. Независимость сигнала от интенсивности инжектирующего излучения и квадратичная зависимость его величины от напряжения (рис. 2) свидетельствовали о наличии ограничения тока пространственным зарядом. Дрейфовая подвижность электронов μ_e определялась из амплитуды тока, которая принималась за I_0 , при этом полагалось, что $\varepsilon = 5$. В результате было получено значение $\mu_e \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Отметим, что при перестройке зависимостей электронного фототока от времени в двойном логарифмическом масштабе на кривых $I(t)$ появлялся излом, по которому определялось время пролета. Значение подвижности электронов, найденное из времени пролета, оказалось близко к полученному из начального тока.

Таким образом, в результате проведенных исследований в слоях пористого Si, приготовленного из кристаллического Si n -типа, установлены близкие значения дрейфовых подвижностей дырок и электронов: $\mu_e \approx \mu_h \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Этот результат отличается

от полученного в работе [8], который свидетельствует о существенной разнице в величинах $\mu_e = 1 \div 2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, и $\mu_h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, определенных в пористом Si, приготовленном из кристаллического кремния p -типа. Высокие значения μ_e , видимо обусловлены тем, что в работе [8] они были определены из быстрой составляющей тока, хотя наблюдалась и медленная составляющая. Найденное нами значение μ_e может соответствовать этой составляющей.

Тот факт, что получены практически одинаковые значения μ_h в слоях пористого Si, приготовленных из кристаллического Si как p -, так и n -типа, позволяет сделать вывод об отсутствии сильного влияния типа проводимости исходного материала на перенос дырок в пористом кремнии. Важным результатом проведенной работы является также то, что показана возможность эффективного использования токов, ограниченных пространственным зарядом, для изучения переноса носителей заряда в пористом Si.

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] F. Koch. MRS Symp. Proc., **298**, 319 (1993).
- [3] N. Koshida, H. Koyama. Appl. Phys. Lett., **60**, 347 (1992).
- [4] N. Koshida, H. Mizuno, H. Koyama, G.J. Collins. Jap. J. Appl. Phys., **34**, 92 (1995).
- [5] P. Steiner, F. Kozlovski, W.Lang. MRS Symp. Proc., **538**, 665 (1995).
- [6] J.P. Zheng, K.L. Jiao, W.P. Shen, W.A. Anderson, H.S. Kwok. Appl. Phys. Lett., **61**, 459 (1992).
- [7] Е.В. Астрова, С.В. Белов, О.А. Зайцев, А.А. Лебедев. Письма в ЖТФ, **19**, 50 (1993).
- [8] Э.А. Лебедев, Г. Полицкий, В. Петрова-Кох. ФТП, **30**, 1648 (1996).
- [9] W.E. Spear. J. Non-Cryst. Sol., **1**, 197 (1969).
- [10] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные точки в твердых телах* (М., Мир, 1973). [Пер. с англ. М.А. Lampert, P. Mark. *Current injection in solids* (N.Y. — London, Academic Press, 1970)].

Редактор Т.А. Полянская

Transient space charge limited current in porous silicon

L.P. Kazakova, A.A. Lebedev, E.A. Lebedev

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

Abstract Transient space charge limited current has been measured in porous silicon which was prepared from n -type crystalline silicon. Both the transit time and the initial current value have been used to obtain the drift mobility of electrons and holes in porous silicon.

E-mail: elebedev@io.pti.spb.su (Э.А. Лебедев)