

ДИСПЕРСИОННЫЙ ПЕРЕНОС ДЫРОК В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

© Э.А.Лебедев, Г.Полисский*, В.Петрова-Коз*

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

*Technical University of Munich, Physics Department E16,
85747 Garching, Germany

(Получена 1 апреля 1996 г. Принята к печати 8 апреля 1996 г.)

С помощью время-пролетной методики определены характеристики дисперсионного переноса дырок в пористом кремнии. Особенностью переноса является сильное пространственное размытие пакета дырок при отсутствии зависимости дрейфовой подвижности от времени. Полученные результаты обсуждаются с позиции модели переноса по сетке траектории дрейфа и распределения носителей заряда по подвижности.

Пористый кремний вызывает к себе повышенный интерес как люминесцентный материал, в котором проявляются свойства низкоразмерных структур и систем с пониженной фрактальной размерностью. Перенос носителей заряда остается одной из самых малоизученных областей физики пористого кремния. С помощью время-пролетной методики (TOF) было показано, что особенностью переноса в пористом кремнии являются относительно низкие значения подвижности и сильное пространственное размытие пакета носителей заряда при их дрейфе, присущее аномальному дисперсионному переносу [1].

В настоящей работе приводятся результаты исследования характеристик дисперсионного переноса дырок в пористом кремнии.

В известных моделях дисперсионного переноса рассматривается транспорт в условиях, при которых не устанавливается равновесное энергетическое распределение носителей заряда [2]. При таком переносе определена связь между функцией, описывающей изменение тока $I(t)$ за время до и после времени пролета $t_{tr} = L/\mu F$, и зависимостью t_{tr} и μ от электрического поля F и толщины образца L :

$$I(t) \sim \begin{cases} t^{-(1-\alpha_i)}, & t < t_{tr} \\ t^{-(1+\alpha_f)}, & t > t_{tr}, \end{cases}$$

$$t_{tr} \sim (L/F)^{1/\alpha_{tr}}, \quad \mu(t) \sim (F/L)^{(1/\alpha_{tr})^{-1}}.$$

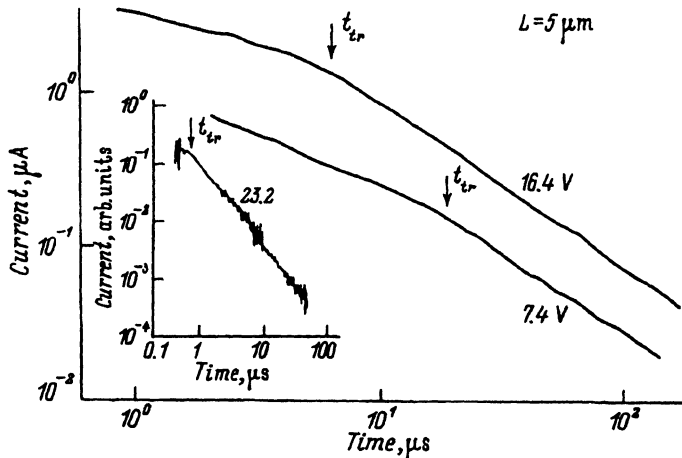


Рис. 1. Переходной ток дырок в пористом кремнии.

Параметры $\alpha_{i, f, tr}$ характеризуют степень дисперсии и изменяются в пределах $0 \leq \alpha_{i, f, tr} \leq 1$; $\alpha_{i, f, tr}$ уменьшаются по мере увеличения дисперсии. Наглядным примером дисперсионного переноса является транспорт, контролируемый захватом на локализованные состояния с концентрацией N , распределенные по экспоненциальному закону от энергии E , $N(E) \sim \exp(-E/E_0)$. В этом случае $\alpha_i = \alpha_f = \alpha_{tr} = \alpha$ и для дисперсионного параметра выполняется соотношение $\alpha = kT/E_0$ [3].

Для исследования нами использовалась методика TOF [4,5]. Измерения проводились на слоях пористого кремния, не снятых с подложек, на которых они выращивались. Приготовление образцов и их характеристики описаны в [1]. Толщина слоев пористого кремния определялась с помощью микроскопа на поперечном сколе образцов и составляла 5 ± 0.5 мкм.

Для создания избыточной концентрации носителей заряда применялся азотный импульсный лазер (длина волны излучения 0.43 мкм, длительность импульса 8 нс). Измерения проводились при постоянной времени на входе усилителя много меньшей, чем время пролета $RC < t_{tr}$ на одиночных импульсах в условиях малого заряда, не влияющего на распределение электрического поля в образце.

На рис. 1 приведены зависимости $I(t)$, построенные в логарифмическом масштабе. Они отражают распространение пакета дырок, созданного импульсом света вблизи полупрозрачного электрода, через слой пористого кремния. На зависимостях тока от времени наблюдаются изломы при переходе от слабой к более сильной зависимости $I(t)$, соответствующие времени пролета. Полученные значения дрейфовой подвижности дырок согласуются с определенными ранее по интегралу переходного фототока [1] и составляют $(2.5 \div 6) \cdot 10^{-3}$ см²/В·с.

Приведенная на вставке рис. 1 кривая, полученная из срачивания двух осциллограмм, показывает, что в широком интервале значений тока при $t > t_{tr}$ выполняется характерная для дисперсионного переноса зависимость $I(t) \sim t^{-n}$. В согласии с моделью дисперсионного переноса при $t > t_{tr}$ величина n не зависела от прикладываемого к образцу напряжения. В исследованных образцах значение n лежало в пределах от 1.1 до 1.3, что соответствует значению дисперсионного

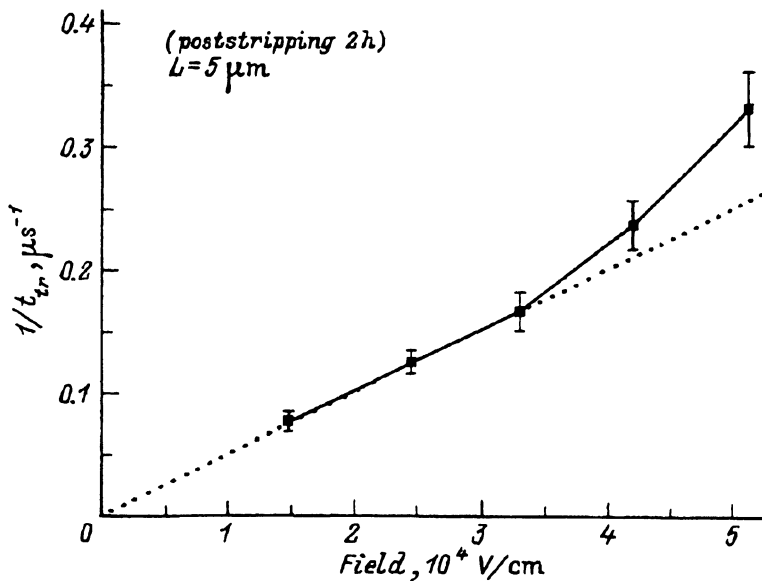


Рис. 2. Зависимость t_{tr}^{-1} от поля при дрейфе дырок в пористом кремнии.

параметра $\alpha_f = 0.1 \div 0.3$, указывающему на высокую степень дисперсионности переноса. Следует отметить близость полученных нами значений n при $t > t_{tr}$ к приведенным в [6].

Существенно иная величина дисперсионного параметра была получена из зависимости времени пролета от электрического поля (рис. 2). В полях до $3.5 \cdot 10^4$ В/см время пролета изменяется обратно пропорционально электрическому полю. Наблюдаемое отклонение от этой зависимости в более высоких полях сопровождается увеличением проводимости, и его естественно объяснить влиянием эффектов сильного поля, которые требуют отдельного рассмотрения. При линейной зависимости t_{tr}^{-1} от F и, следовательно, независимости μ от F дисперсионный параметр $\alpha_{tr} = 1$.

Величина дисперсионного параметра α_i , определенная из $I(t)$ при $t \leq t_{tr}$, находилась в пределах $0.5 \div 1$. Она сильно зависела от истории образцов и особенностей их приготовления. В связи с этим для характеристики дисперсионного переноса в основном использовались параметры α_f и α_{tr} .

Для установления возможного влияния границы пористый Si-кристаллический Si нами был проведен анализ полученных результатов на основе данных исследования переходного фототока в двухслойных структурах [7]. Он показал, что такое влияние может иметь место только на параметр дисперсии α_i .

Особенностью дисперсионного переноса дырок в пористом кремнии является сильное различие дисперсионных параметров α_f и α_{tr} . Хотя отличие α_f и α_{tr} в модели дисперсионного переноса, контролируемого захватом, и можно объяснить немонотонным характером распределения локализованных состояний по энергии [8], нам представляется, что в пористом кремнии оно имеет другую причину, связанную с особенностями структуры этого материала.

Поскольку параметр α_{tr} характеризует в основном степень неравновесности переноса, а α_f — пространственное размытие пакета носителей заряда, полученные результаты свидетельствуют о том, что пространственное размытие пакета может быть и не связано с неравновесностью переноса. В случае пористого кремния, который можно рассматривать как физическую модель фрактальной системы [9], сильное пространственное размытие пакета может быть вызвано проявлением некоторой сетки траекторий дрейфа носителей заряда. Естественно предположить, что возникновение такой сетки обусловлено структурными элементами, простирающимися на всю толщину слоя пористого кремния. Наличие разных траекторий дрейфа приводит к распределению носителей заряда по подвижности. Если пренебречь переходами носителей заряда между разными траекториями, то, пользуясь результатами работы [10], из оценки α_f можно получить некоторые данные о распределении носителей заряда по подвижности $P(\mu)$. При $\alpha_f \leq 0.3$ следует ожидать сильное увеличение $P(\mu)$ по мере уменьшения μ . Если $\alpha_f = 0$, то $P(\mu)$ стремится к бесконечности при $\mu \rightarrow 0$.

Следствием такого подхода к происхождению сильного пространственного размытия пакета является высокая доля в общем количестве носителей заряда, обладающих значительно более низкими подвижностями по сравнению с теми, которые определены из времени пролета.

Авторы благодарны проф. Ф. Коху за поддержку в работе.

Список литературы

- [1] Э.А. Лебедев, Г. Полицкий, В. Петрова-Кох. ФТП, **30**, 1468 (1996).
- [2] H. Scher, E.W. Montroll. Phys. Rev. B, **12**, 2455 (1975).
- [3] T. Tiedje, A. Rose. Sol. St. Commun., **37**, 49 (1981).
- [4] W.E. Spear. J. Non-Cryst. Sol. **1**, 197 (1969).
- [5] Л.П. Казакова, Б.Т. Коломиец, Э.А. Лебедев, С.А. Таурайтине. ФТП, **21**, 274 (1987).
- [6] O. Klima, P. Hlinomaz, A. Hospodkova, J. Oswald, J. Koska. J. Non-Cryst. Sol., **164-162**, 961 (1993).
- [7] Э.А. Лебедев, Л.Н. Карпова. ФТП, **15**, 2421 (1981).
- [8] В.И. Архипова, В.Р. Никитенко. ФТП, **23**, 978 (1989).
- [9] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [10] В.И. Архипов, Э.А. Лебедев, А.И. Руденко. ФТП, **15**, 712 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Dispersive hole transport in porous silicon

E.A. Lebedev, G. Polisski, V. Petrova-Koch**

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

*Technical University of Munich, Physics Department E16, 85747 Garching, Germany

The parameters of the hole dispersive transport in porous silicon were determined by time-of-flight technique. The specific feature of the observed transport is the strong spatial dispersion of the hole packet, while the drift mobility is time-independent. The obtained results are discussed as manifestation of the network of carrier-drift path and distribution of carriers in mobility.