

Релаксация фотопроводимости в пористом кремнии с цилиндрической геометрией пор

Л. С. Монастырский, Б. С. Соколовский, М. Р. Павлык, Е. И. Аксиментьева

Представлена и численно исследована модель релаксации фотопроводимости пористого кремния, в которой учитывается рекомбинация фотоносителей на поверхности цилиндрических пор при выключении освещения. Методом конечных элементов рассчитана временная эволюция фотопроводимости пористого кремния и зависимость времени релаксации фотопроводимости от скорости поверхностной рекомбинации, а также от радиуса пор и среднего расстояния между ними.

PACS: 72.40.+w, 81.05.Rm

Ключевые слова: пористый кремний, сенсоры, фотопроводимость, кинетика фотопроводимости.

Введение

На сегодняшний день остро стоит проблема контроля токсических и других вредных веществ в воздушной атмосфере, питьевой воде, продуктах питания и др. В связи с этим возникает необходимость в разработке микроэлектронных систем детектирования газов для промышленных, офисных и жилищных помещений, которые могут быть компонентами интегральных систем защиты жизни и здоровья человека. Особый интерес представляют сенсоры на основе нанопористых полупроводников, в частности, пористого кремния.

Оптические сенсоры такого типа описаны в ряде научных работ [1, 2]. Среди таких сенсоров можно выделить фоточувствительные структуры из пористого кремния, основанные на изменении фотопроводимости и ее кинетики под действием различных газовых сред, которые могут использоваться как эффективные газоанализаторы. Для проектирования таких сенсоров необходимо знать зависимости фотопроводимости пористого кремния от состояния поверхности, зависящего от газовой среды, в которой он находится, а также от степени пористости материала и геометрии пор.

Адсорбция молекул газа приводит к возрастанию скорости поверхностной рекомбинации фотоносителей за счет увеличения захвата носителей заряда на энергетические уровни ловушек, создаваемых адсорбированными атомами, а также изменения структуры "оборванных" Si—Si связей [3]. Изменения количества ловушечных центров наблюдались при адсорбции ряда газов: N, NO₂, Cl₂, Br₂J₂ и др. [1]. Оксидация поверхности восстанавливает Si—Si связи.

Интенсивность рекомбинации фотоносителей при небольших концентрациях газа пропорциональна парциальному давлению адсорбата и зависит от его дипольного момента. Молекулы адсорбата с большим дипольным моментом усиливают захват электронов (дырок) на энергетические уровни ловушек, что приводит к возрастанию темпа рекомбинации через эти уровни и изменяет величину фотопроводимости. Таким образом, эффект изменения фотопроводимости пористого кремния под воздействием адсорбированных газов является перспективным для создания эффективных газовых сенсоров.

В работах [4, 5] аналитически исследованы особенности стационарной фотопроводимости пористого кремния со сферической и цилиндрической геометрией пор. В данной работе для случая пористого кремния с цилиндрическими порами выполнен численный расчет процесса релаксации фотопроводимости, происходящий после мгновенного выключения освещения.

Постановка задачи

Будем рассматривать пластинку мезапористого кремния с параллельно расположенными цилинд-

Монастырский Любомир Степанович, доцент.
Соколовский Богдан Степанович, ведущий научный сотрудник.
Павлык Михаил Романович, аспирант.
Аксиментьева Елена Игоревна, главный научный сотрудник.
Львовский национальный университет им. Ив. Франко.
Украина, 79005, г. Львов, ул. Драгоманова, 50.
Тел. (+38032) 96-46-23. E-mail: monastyrsky@electronics.wups.lviv.ua

Статья поступила в редакцию 12 мая 2011 г.

© Монастырский Л. С., Соколовский Б. С., Павлык М. Р., Аксиментьева Е. И., 2012

рическими порами радиуса r_0 , которые периодически распределены в объеме полупроводника при среднем расстоянии между центрами пор $2R$, образуя квадратную решетку в плоскости xOy , размещенной перпендикулярно оси цилиндрических пор. При расчетах будем предполагать, что начало координат находится на оси одной из пор. Данный полупроводник для конкретности p -типа проводимости освещается светом из области фундаментального поглощения, для которого функция генерации фотоносителей G , т. е. количество фотоносителей, которые генерируются за 1 с в единичном объеме, не зависит от координаты. Заметим, что условие однородной генерации фотоносителей выполняется в случае слабого поглощения света.

Генерированные фотоносители рекомбинируют как в объеме полупроводника, так и на поверхностях пор, причем при стационарном освещении устанавливается такое неоднородное пространственное распределение концентрации фотоносителей, при котором обеспечивается баланс между процессами генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда.

После выключения света, падающего на полупроводник, с течением времени t происходит изменение пространственного распределения концентрации фотоносителей $\Delta n(x, y, t)$, которое можно определить из нестационарного уравнения переноса:

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial y^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} + \frac{G\tau_n}{L_n^2} H(-t), \quad (1)$$

где L_n — диффузионная длина электронов;

τ_n — время их жизни;

$H(t)$ — функция Хевисайда, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице — для положительных.

Уравнение (1) следует дополнить граничными условиями:

$$\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left[x \frac{\partial \Delta n}{\partial x} + y \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \right] \Big|_{x^2 + y^2 = r_0^2} = -\frac{S\tau_n}{L_n^2} \Delta n \Big|_{x^2 + y^2 = r_0^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial x} \Big|_{x = \pm R} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y = \pm R} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (2) соответствует рекомбинации фотоносителей на поверхности цилиндрической поры со скоростью поверхностной рекомбинации S ,

которая зависит о состояния поверхности пор, в частности, от вида и концентрации адсорбированных молекул газа. Уравнения (3) и (4) следуют из условий симметрии задачи, которые приводят к тому, что на гранях "элементарной ячейки" ($x = \pm R, y = \pm R$) достигаются максимальные значения концентрации фотоносителей.

Начальное условие к уравнению (1) имеет вид:

$$\Delta n(x, y, t) \Big|_{t=0} = \Delta n_0(x, y), \quad (5)$$

где $\Delta n_0(x, y)$ — стационарное решение уравнения (1), которое в частном случае соблюдения цилиндрической симметрии в пространственном распределении фотоносителей дается выражением, приведенным в [5].

На основе координатного распределения концентрации фотоносителей можно рассчитать полное число фотоносителей N в "элементарной ячейке", приходящееся на единичную толщину пластинки пористого кремния:

$$N = \iint \Delta n(x, y, t) dx dy, \quad (6)$$

где интегрирование ведется по области с площадью A , которая представляет собой квадрат со стороной $2R$, имеющий в центре круглый вырез радиуса r_0 . Заметим, что полное число фотоносителей N с точностью до постоянного множителя, зависящего от подвижностей носителей заряда, определяет фотопроводимость пористого кремния.

Задача (1)–(5) решалась численно методом конечных элементов [6], который оказывается особенно эффективным при расчетах систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию. При проведении расчетов Δn и N использовались следующие безразмерные величины:

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{L_n}, & y^* &= \frac{y}{L_n}, & t^* &= \frac{t}{\tau_n}, & r_0^* &= \frac{r_0}{L_n}, \\ R^* &= \frac{R}{L_n}, & S^* &= \frac{S\tau_n}{L_n}, & N^* &= \frac{N}{G\tau_n A}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 1, *a* и *б* показаны временные зависимости нормированного полного числа фотоносителей N^* , полученные для различных значений скорости поверхностной рекомбинации и геометрических параметров пористого кремния. Видно, что увеличение S^* приводит к уменьшению как стационарного значения N^* , так и продолжительности релаксационного процесса, причем при меньших значениях расстояния между порами указанные изменения более значительные.

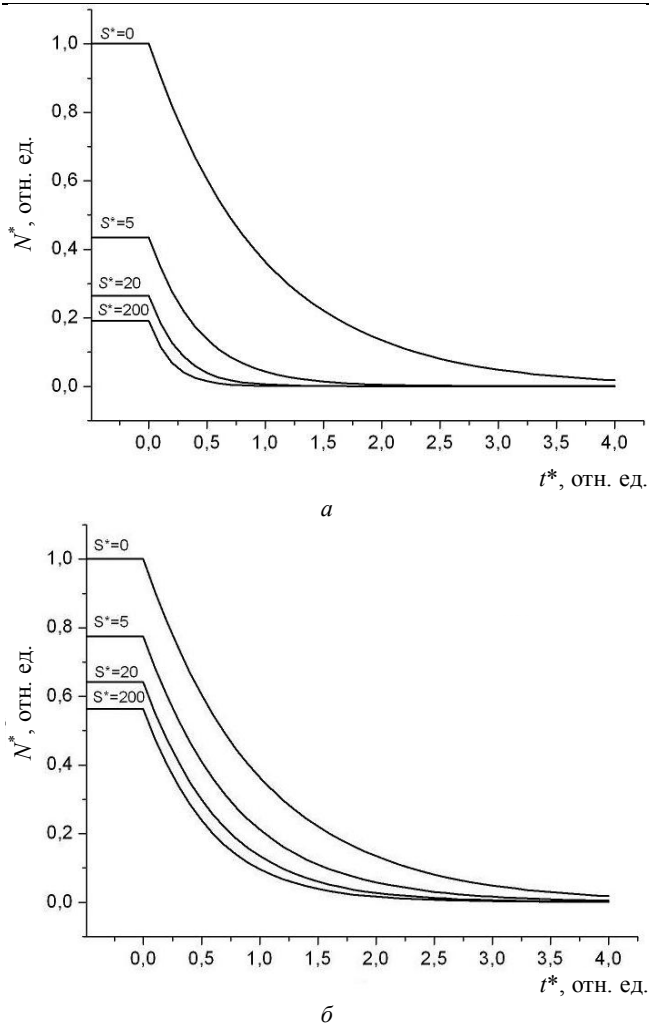


Рис. 1. Зависимости полного числа фотоносителей от времени при $r^*_0 = 0,1$ и различных значениях S^* .
График *a* соответствует $R^* = 0,5$; *б* — $R^* = 1$

Анализ кривых временной эволюции фотопроводимости (т. е. N^*) позволяет рассчитать время релаксации τ_{rel} как наклон этих зависимостей, представленных в полулогарифмическом масштабе. Результаты расчетов, показанные на рис. 2, *a* и *б* в виде двухмерных зависимостей времени релаксации фотопроводимости от скорости поверхностной рекомбинации и расстояния между порами, указывают, что время релаксации нелинейно уменьшается с ростом скорости поверхностной рекомбинации, достигая насыщения при больших значениях S^* . Наиболее быстрое уменьшение τ_{rel} с ростом S^* происходит, когда S^* принимает значения порядка единицы. Отметим, что за счет изменения скорости поверхностной рекомбинации можно достичь уменьшения времени релаксации фотопроводимости почти на один порядок величины. Последнее имеет место в материалах с высокой степенью пористости, когда велика площадь поверхности пор, приходящейся на единицу объема, т. е. когда отношение среднего расстояния между порами к радиусу пор достигает как можно

большой величины. Величины изменений времени релаксации, которые реализуются в пористом кремнии при значениях скорости поверхностной рекомбинации, превышающих скорость диффузионного движения L_n/τ_n фотоносителей, являются вполне приемлемыми, чтобы быть зарегистрированными простыми измерительными методиками.

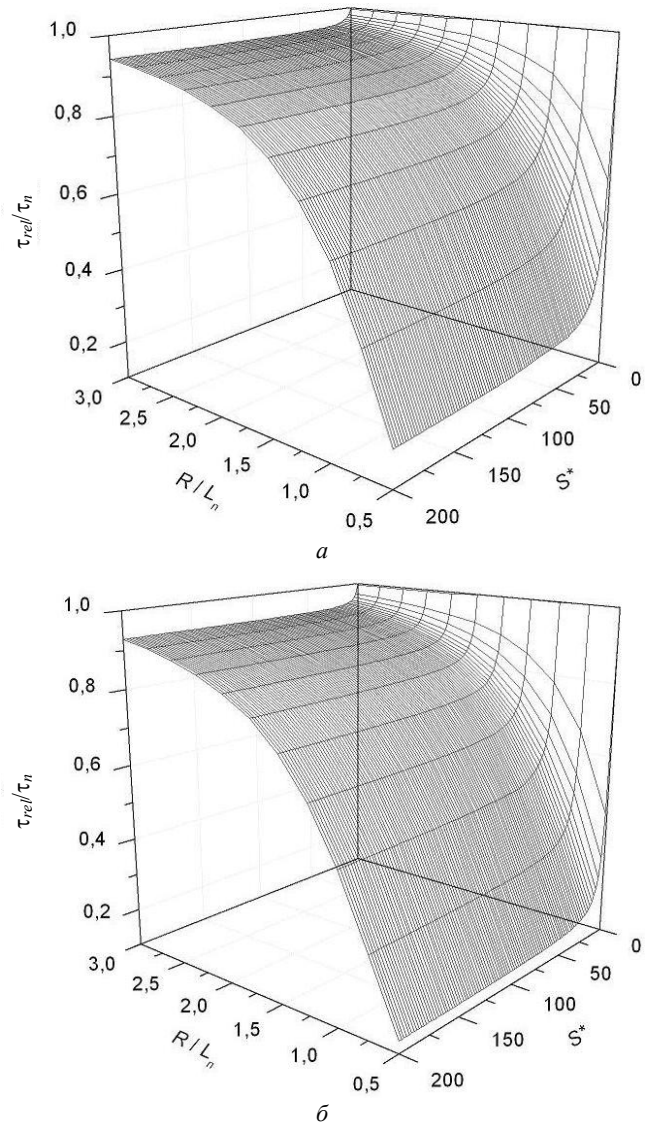


Рис. 2. Зависимость времени релаксации фотоносителей от скорости поверхностной рекомбинации и расстояния между порами.

График *a* соответствует $r^*_0 = 0,05$; *б* — $r^*_0 = 0,1$.

Все величины на графиках в относительных единицах

Заключение

Численные расчеты релаксации фотопроводимости пористого кремния с цилиндрическими порами, выполненные методом конечных элементов, показали, что время релаксации фотопроводимости после выключения света заметно уменьшается с ростом скорости поверхностной рекомбинации

фотоносителей, причем темп уменьшения принимает наибольшие значения при скоростях поверхностной рекомбинации порядка скорости диффузионного движения фотоносителей. Поскольку скорость поверхностной рекомбинации фотоносителей зависит от концентрации и типа адсорбируемого газа, то установленная в данной работе особенность процесса релаксации фотопроводимости может быть использована для создания газовых сенсоров на основе пористого кремния, работающих в нестационарном режиме.

Литература

1. Ваупанов Ю. А., Смынтына В. А. Адсорбционная чувствительность полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2005.
2. Baratto C., Faglia G., Sberveglieri G., Gaburro Z., Pancheri L., Oton C., Pavesi L. // *Sensors*. 2002. V. 2. No. 3. P. 121.
3. Monastyrskii L. S., Lesiv T. I., Olenych I. B. // *Thin Solid Films*. 1999. V. 343—344. P. 335.
4. Монастырский Л. С., Соколовский Б. С. // *Прикладная физика*. 2007. № 6. С. 127.
5. Monastyrskii L. S., Sokolovskii B. S., Vasylyshyn V. S. // *Optical Memory and Neural Networks*. 2009. V. 18. No. 1. P. 55.
6. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. — М.: Мир, 1977.

Relaxation of photoconductivity in porous silicon with the cylindrical geometry of pores

L. S. Monastyrskii, B. S. Sokolovskii, M. R. Pavlyk, E. I. Aksiment'eva
Ivan Franko National University
50 Dragomanov str, Lviv, 79005, Ukraine
E-mail: monastyrsky@electronics.wups.lviv.ua

The model of relaxation of photoconductivity of porous silicon, in which recombination of photo-carriers is taken into account on the surface of cylindrical pores at the shutdown of illumination, is presented and numerically investigated. Time evolution of the porous silicon photoconductivity and dependence of the photoconductivity relaxation time on the surface recombination velocity as well as on the radius of pores and average distance between them are obtained by the finite elements method.

PACS: 72.40.+w, 81.05.Rm

Keywords: porous silicon, sensors, photoconductivity, photoconductivity kinetics.

Bibliography — 6 references.

Received May 12, 2011