

05;06;12

## Релаксация тока в микропористом кремнии

© Ю.А. Вашпанов<sup>1</sup>, Халмурат Азат<sup>2</sup>, В.А. Смынтына<sup>1</sup><sup>1</sup> Одесский государственный университет им. И.И. Мечникова, 270026 Одесса, Украина<sup>2</sup> Цинцзанский университет, Китай

(Поступило в Редакцию 11 января 1999 г.)

Обнаружена релаксация тока в образцах микропористого кремния, темп которой зависит от величины приложенного напряжения и состава газовой атмосферы. Обсуждается возможный физический механизм явления.

В настоящее время в физике и технологии полупроводниковых материалов формируется новое направление — нанoeлектроника [1]. Особое место в исследованиях наноразмерных структур занимает пористый кремний (ПК), физические свойства которого интенсивно изучаются [2]. Создание новых полупроводниковых приборов на основе пористого кремния требует изучения электронных и адсорбционных свойств этого материала и представляет актуальную в прикладном и теоретическом аспектах задачу.

Образцы пористого кремния были получены методом анодного электрохимического травления кристаллического кремния марки КДБ-10 <111> в водном растворе фтористоводородной кислоты при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$ . При продолжительности травления 10 min были получены слои ПК толщиной  $7 \mu\text{m}$  при средней пористости 35%. На поверхность ПК напыляли газопрозрачные контакты щелевого типа из алюминия [3]. Исследовали влияние адсорбции газов на электронные параметры материала в планарном режиме в области температур 293 К. Концентрация газа в измерительной камере изменялась с помощью газогенераторов серии ГР03М. В качестве газа-носителя был выбран особочистый азот, который не оказывает влияния на электрические свойства пористого кремния [4].

На полученных образцах ПК при приложении напряжения больше некоторой пороговой величины  $U_0 \approx 0.4 \text{ V}$  после предварительного термоотжига в вакууме при температуре 523 К наблюдали нарастающую релаксацию тока, временные зависимости которой с ростом напряжения представлены на рис. 1 (кривые 1–4). Впуск в измерительную камеру воздуха приводил к увеличению величины  $U_0$  и снижению темпа нарастания тока при тех же значениях напряжения (рис. 2, кривые 1–4). Из газов, входящих в состав воздуха, кислород и азот являются электрически нейтральными для ПК и только водяные пары оказывают влияние на величину электропроводности пористого кремния [3].

В [5] обнаружено появление электродвижущей силы, природа которой связывается с наличием встроенных микрополей в неоднородной структуре материала, величина которой изменяется при освещении и адсорбции полярного газа. Образование встроенного поля происходит на стадии анодной электрохимической обработки крем-

ния [6], что приводит к сильной флуктуации потенциала вдоль поверхности материала [7]. При локализации заряда  $10^{17} e$  ( $e$  — заряд электрона) в минимумах потенциальной энергии вблизи формируются значительные электрические поля, достигающие значений  $10^5 \text{ V/cm}$  [8]. Одной из особенностей ультрадисперсных частиц малого размера является уменьшение способности электронов экранировать электростатические поля, вследствие чего наблюдается увеличение радиуса взаимодействия между электронами [9].

Для ультрадисперсных сред, согласно модели Хила [9], в зависимости от приложенного напряжения величина тока описывается формулой

$$I(V, T) = \frac{1.24 \cdot 10^{11} c_p \sin h \left( \frac{eV}{kT} \right)}{(\Delta S)^2 m^*} \frac{\pi B k T}{\sin \pi B k T} \times \exp \left( -\frac{\delta E}{kT} \right) \exp(-1.03 \Delta S (m^* \varphi)^{1/2}),$$

где  $\delta E = \delta E_0 - qF^{1/2}$  — энергия активации в сильном электрическом поле, зависящая от величины электрического поля;  $\Delta S$  — расстояние между ультрадисперсными частицами.

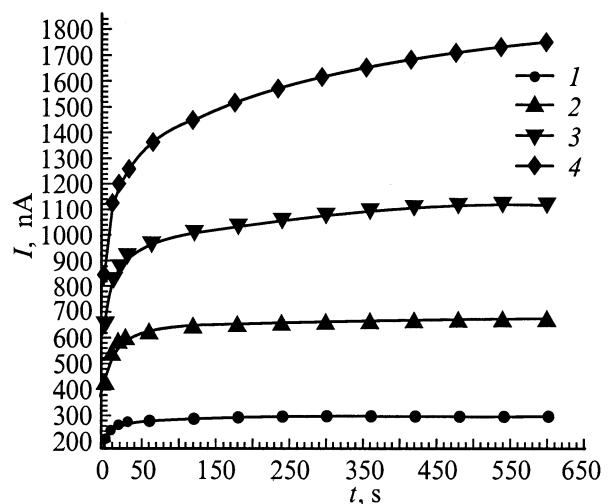


Рис. 1. Кинетика нарастания тока в структурах ПК в вакууме после отжига при напряжениях на планарных контактах 0.6 (1), 1.2 (2), 1.8 (3), 2.4 В (4). Температура измерений комнатная.

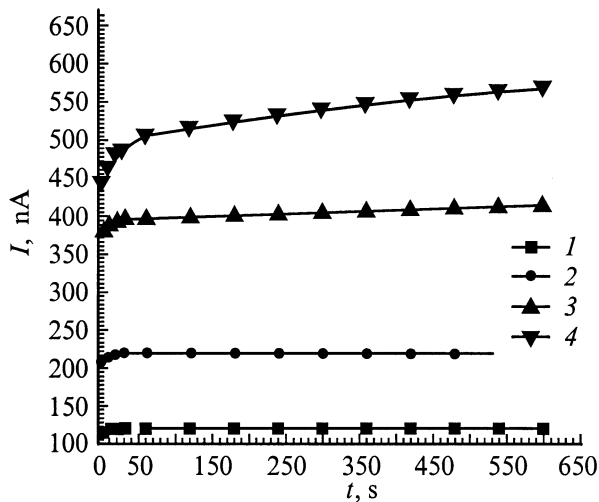


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, после выпуска воздуха.

В нашем случае нитевидные кластеры кремния включены последовательно в планарном режиме измерений. Вследствие разных размеров пор структура пористого кремния является крайне неоднородной вдоль поверхности. Пространственное квантование электронного энергетического спектра приводит к собственным значениям энергии электронов и дырок, зависящим от поперечного размера нитей [10]. Это приводит к появлению локальных внутренних микробарьеров, ограничивающих движение тока.

Рост тока при появлении напряжения на контактах ПК можно было объяснить уменьшением параметра  $\delta E$  в результате перераспределения микрополей в структуре материала. При адсорбции полярного газа изменяется структура микрополей в микропористом кремнии [4]. В этом случае величина  $\delta E_0 - qF^{1/2}$  будет изменяться в меньшей степени из-за роста параметра  $\delta E_0$ .

При появлении напряжения на контактах вследствие неоднородности структуры пористого кремния напряжение падает на отдельные микронеоднородные участки с большим значением флуктуации потенциала, ограничивающие протекание тока вдоль структуры ПК. При размерах неоднородности порядка 10 nm и  $U = 0.1$  V величина электрического поля достигает  $10^5$  V/cm, что сопоставимо с величиной внутренних полей в ПК. В области значений напряжения на контактах  $U$  менее  $U_g$  изменения величины  $\delta E$  практически не происходит, так как электрическое поле недостаточно для изменения  $\delta E_0$ . В области напряжений на контактах  $U$  более  $U_g$  происходит понижение величины барьера и перераспределение поля по структуре материала. Согласно этой модели, рост напряжения на контактах должен приводить к росту темпа нарастания релаксации, что экспериментально подтверждается (рис. 1, кривые 1–4).

Адсорбция паров воды изменяет внутреннюю микроструктуру полей в материале [5]. При этом релаксация тока при тех же значениях напряжения значительно

меньше (рис. 2, кривые 1–4). Это возможно вследствие роста параметра  $\delta E_0$ .

В неоднородных образцах пористого кремния в планарном режиме измерений обнаружена нарастающая кинетика темного тока, физическая природа которой связана с перестройкой внутренней микроструктуры полей в материале, формируемых в результате анодной электрохимической обработки кремния. На процессы релаксации тока влияет адсорбция полярных молекул воды, создающих дополнительные локальные микрополя в структуре пористого кремния.

## Список литературы

- [1] *Abstreiter G.* // European Conf. MRS'98. Strasbourg (France), 1998. PS-3.
- [2] *Yakimov A.I., Stepin N.P., Dvurechenskii A.V.* // European Conf. MRS'98. Strasbourg, France, 1998. Vol. B11. P. 42.
- [3] *Вашпанов Ю.А.* // Фотоэлектроника. 1996. № 6. С. 68–71.
- [4] *Wu-Mian, Tomkiewicz M., Clement C.V.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 74. N 6. P. 3635–3639.
- [5] *Вашпанов Ю.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Vol. 23. Вып. 11. С. 77–82.
- [6] *Компан М.Е., Шабанов И.Ю.* // ФТП. 1995. Т. 29. Вып. 10. С. 1859–1869.
- [7] *Компан М.Е., Новак И.И., Шабанов И.Ю.* // ФТТ. 1995. Т. 37. С. 678.
- [8] *Vashpanov Yu.A.* // Intern. Conf. on Electron Localization and Quantum Transport in Solids. Jaszowic (Poland), 1996. P. 177–178.
- [9] *Морохов И.Д., Трусов Л.Н., Лаповок В.Н.* Физические явления в ультрадисперсионных средах. М.: Энергоиздат, 1984. 224 с.
- [10] *Бреслер М.С., Ясиевич И.Н.* // ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 5. С. 871–883.