

## ИМПЕДАНС-СПЕКТРОСКОПИЯ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ (POR-SI) В ОБЛАСТИ СВЕРХНИЗКИХ ЧАСТОТ

© 2016 г. М.П. СЕВРЮГИНА, Ю.М. СПИВАК\*, В.А. МОШНИКОВ\*, Н.С. ПЩЕЛКО

Санкт-Петербургский горный университет,  
\*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)  
e-mail: marysevrugina@yandex.ru

Получение сложных соединений в виде монокристаллов является технологически трудной задачей, поэтому большинство функциональных материалов имеют разупорядоченную неоднородную структуру. Электротранспорт носителей заряда в структурно неоднородных образцах имеет ряд существенных особенностей. Использование метода импеданс-спектроскопии дает возможность получить информацию об электрофизических свойствах разупорядоченной структуры, качественно и количественно описать вклады в проводимость от объема включения, его поверхности и межфазной границы.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению диэлектрических свойств слоев пористого кремния методом импедансной спектроскопии в области сверхнизких частот.

Изготовление образцов слоев пористого кремния осуществлялось методом электрохимического анодного травления монокристаллического кремния марок КЭФ-5 (111), КЭФ-1 (111) и КДБ-10 (100) в течение 10 мин при плотности тока анодирования  $20 \text{ mA/cm}^2$  в гальваностатическом режиме [1]. В качестве электролита был использован водный раствор плавиковой кислоты с добавлением изопропанола.

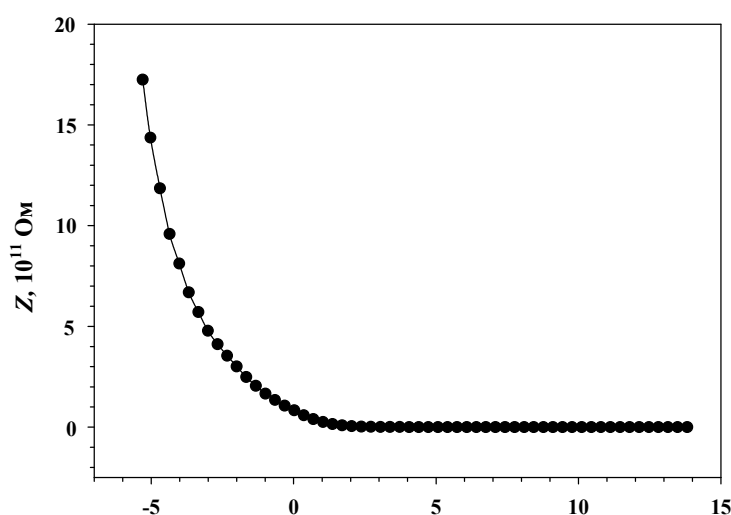


Рис. 1. Частотная зависимость импеданса  $Z$  образца слоя por-Si.

Измерения частотных зависимостей диэлектрических коэффициентов слоев por-Si были выполнены с применением спектрометра Concept-41 фирмы Novocontrol Technologies в частотном интервале  $10^{-3} < f < 10^6$  Гц при температуре 293 К. Установка состояла из частотного анализатора импеданса, измерительной ячейки, системы автоматического сбора данных с компьютерным интерфейсом.

На рис. 1 приведена частотная зависимость модуля импеданса слоя пористого кремния. В рассматриваемом интервале импеданс монотонно убывает с ростом частоты, что характерно для конденсаторных структур. Такой характер зависимости  $Z(f)$  определяется тем, что при увеличении частоты в общую проводи-

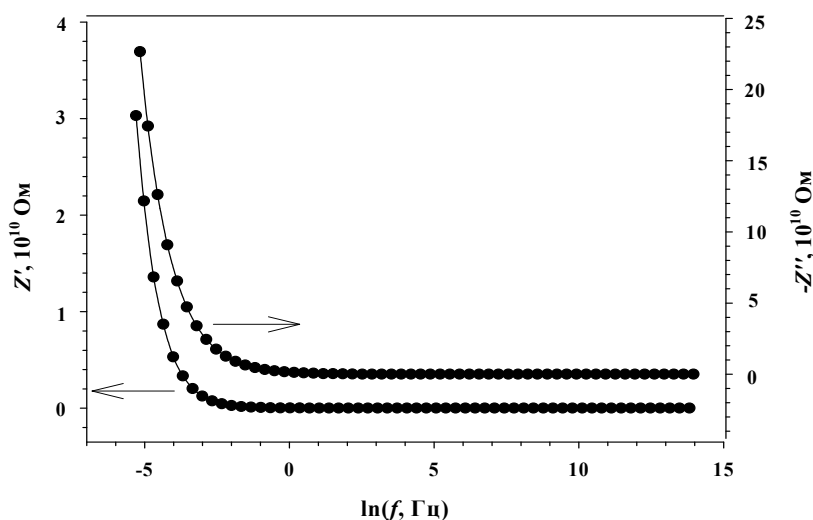


Рис. 2. Частотные зависимости действительной и мнимой компонент импеданса  $Z'$  и  $Z''$  образца слоя por-Si.

мость слоя начинает вносить вклад ток смещения, и на высоких частотах импеданс полностью определяется реактивной компонентой проводимости.

Частотные зависимости действительной и мнимой компонент импеданса представлены на рис. 2. Полученные зависимости обнаруживают дисперсию, выраженную в уменьшении значений компонент комплексного импеданса с ростом частоты электрического поля.

В области низких частот резкий спад функции  $Z''(f)$  наблюдается в интервале  $5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$  Гц, а для функции  $Z'(f)$  такой спад наблюдается до 1 Гц. Начиная с значений частоты  $f > 1$  Гц и  $f > 20$  Гц спектры мнимой и действительной компонент импеданса соответственно отвечают постоянному минимальному уровню. Дисперсия импеданса характеризуется временем электрической релаксации, которое определяется графически путем построения зависимости мнимой компоненты импеданса  $Z''$  от действительной  $Z'$ .

На диаграммах импеданса слоя пористого кремния в координатах  $Z''-Z'$  для областей низких и высоких частот (рис.3) наблюдаются дуги окружностей с центрами на частотах  $f_{01} \sim 7 \cdot 10^{-3}$  Гц и  $f_{02} \sim 6 \cdot 10^2$  Гц соответственно, которые переходят в прямолинейные участки. Такой характер зависимости  $Z''(Z')$  позволяет говорить о существовании релаксационных процессов, связанных с диффузией ионов, в исследуемом материале, а именно, миграционной поляризации, характерной для неоднородных полупроводниковых структур. Миграционная поляризация характеризуется перемещением зарядов в вклю-

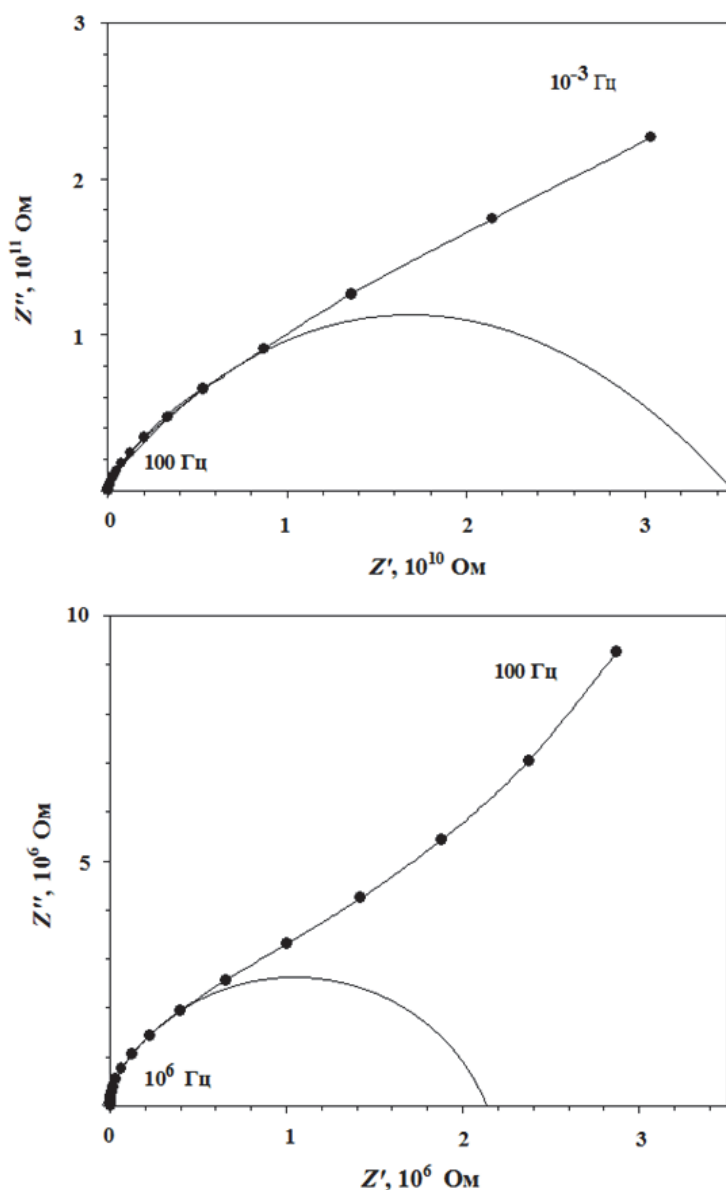


Рис. 3. Годограф импеданса образца слоя por-Si (низкочастотная и высокочастотная области).

чениях до их границ и накоплением зарядов на границах раздела.

Для описания линейных диффузионных процессов принято использовать импеданс Варбурга для полубесконечной длины диффузии  $W_s$  [2]:

$$Z_W = \frac{(1-j)W}{\omega^{0,5}},$$

где  $W$  – постоянная Варбурга, зависящая от концентрации частиц и коэффициента диффузии.

Участки диаграмм, соответствующие дуге окружности, характеризуются Дебаевским типом релаксации с одним временем релаксации  $\tau$ . Центр полуокружности смещен ниже оси  $Z'$ , что свидетельствует об отклонении от идеального Дебаевского поведения в области релаксационных потерь, и также является характерным для сложных структур. Величину  $\tau$  можно оценить по частоте  $f_0$ , соответствующей максимуму  $Z''$

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_0}$$

Для области низких частот  $f_{01} = 7 \cdot 10^{-3}$  Гц находим  $\tau_1 = 22,7$  с, для высоких -  $f_{02} = 600$  Гц находим  $\tau_2 = 130 \cdot 10^{-6}$  с.

Исследование импедансных характеристик пористого кремния позволяет сделать вывод о существовании двух типов поляризации в исследуемой структуре: дипольно-релаксационной и миграционной в области низких частот [3]. Вклад миграционной составляющей поляризации обусловлен существованием в порах пористого кремния абсорбированных ионов в электрически активном состоянии, которые перемещаются к границе раздела пористый кремний-монокристаллический кремний и образуют пространственный заряд.

Таким образом, пористый кремний представляет собой материал с сложной комплексной структурой, поляризационные процессы в котором сильно зависят от внешних факторов, в частности, от частоты приложенного электрического поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мошников В.А., Спивак Ю.М.* Глава 5. «Электрохимические методы получения пористых материалов для топливных элементов» // Основы водородной энергетики. Под ред. В.А. Мошникова и Е.И. Терукова. 2-е изд. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011, 288 с.
2. *Warburg E.* Uber das Verhalten sogenannter unpolarisierbarer Electroden gegen Wechselstrom // Ann. Phys. Chem. – 1899. vol. 67, № 3. p. 493-499.
3. *Севрюгина М.П., Спивак Ю.М., Пщелко Н.С.* Низкочастотная диэлектрическая спектроскопия слоев por-Si // Intermatic – 2014 / Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – М.: МИРЭА, 2014, ч. 3, с. 59-61.