

УДК 538.958; 535.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ФАНО В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ С $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДОМ, СФОРМИРОВАННОМ В ПЛЕНКЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Н. Н. Мельник<sup>1</sup>, В. В. Трегулов<sup>2</sup>, Г. Н. Скопцова<sup>2</sup>,  
А. И. Иванов<sup>2</sup>, Д. С. Косцов<sup>1</sup>

*Проведено исследование особенностей распределения параметров резонанса Фано во внутренних областях полупроводниковой структуры, содержащей  $p$ - $n$ -переход внутри пленки пористого кремния. Пленка пористого кремния сформирована методом металл-стимулированного травления. Исследование резонанса Фано проводилось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. Показано, что резонанс Фано наиболее заметно проявляется в приповерхностном слое  $por$ -Si.*

**Ключевые слова:** резонанс Фано, комбинационное рассеяние света, пористый кремний, металл-стимулированное травление,  $p$ - $n$ -переход, диффузия.

В нашей работе [1] была показана возможность реализации резонанса Фано в полупроводниковой структуре, содержащей  $p$ - $n$ -переход внутри пленки пористого кремния ( $por$ -Si). Актуальность резонанса Фано для современной микро- и наноэлектроники связана с улучшением характеристик оптических датчиков, лазеров, систем передачи и хранения информации [2, 3]. Полупроводниковые структуры с пленкой  $por$ -Si и  $p$ - $n$ -переходом актуальны для применения в качестве оптических датчиков и солнечных элементов. Пористая пленка выступает в качестве антиотражающего покрытия, способствующего повышению эффективности преобразования солнечных элементов и увеличению чувствительности оптических датчиков [4]. Активным элементом указанных полупроводниковых приборов является  $p$ - $n$ -переход, который обеспечивает разделение

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: melnik@sci.lebedev.ru.

<sup>2</sup> Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, 390000 Россия, Рязань, ул. Свободы, 46.

генерируемых светом носителей заряда и возникновение фотоэдс [5]. В работе [1] резонанс Фано исследовался при освещении фронтальной поверхности образца вдоль нормали к поверхности пленки  $\text{por-Si}$ , содержащей  $p$ - $n$ -переход. Полученные в [1] результаты не позволяют однозначно ответить на вопрос о пространственном распределении параметров резонанса Фано по толщине структуры. В данной работе исследованы особенности проявления резонанса Фано в различных слоях полупроводниковой структуры с  $p$ - $n$ -переходом, сформированным внутри пленки  $\text{por-Si}$ .

Для изготовления экспериментального образца использовалась монокристаллическая кремниевая пластина  $n$ -типа проводимости, с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Пленка  $\text{por-Si}$  выращивалась методом двухэтапного металл-стимулированного травления. Сначала на поверхности пластины осаждались серебряные частицы из раствора:  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  (0.01 M):  $\text{HF}$  (46%):  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (92%) при соотношении компонентов 1:0.1:0.3 в течение 20 с. Пористая структура формировалась при обработке пластины в растворе  $\text{H}_2\text{O}_2$  (1.24 M):  $\text{HF}$  (46%):  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (92%) с соотношением компонентов 1:0.5:0.25 в течение 30 мин. Далее образец отмывался в концентрированной азотной кислоте для удаления серебряных частиц. Формирование  $p^+$ - $n$ -перехода производилось методом термической диффузии бора. Для этого на поверхность пленки  $\text{por-Si}$  наносился 2%-й спиртовой раствор  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , и после высушивания формировалась пленка диффузанта. Диффузия бора проводилась в электрической печи при температуре 1100 °C в течение 15 минут. В результате на поверхности пленки  $\text{por-Si}$  формировался слой  $p$ -типа проводимости с высокой концентрацией акцепторной примеси (порядка  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Подобная технология диффузионного легирования  $\text{por-Si}$  использовалась в [6] для формирования  $p$ - $n$ -переходов и легированных слоев большой толщины.

С целью исследования особенностей распределения параметров резонанса Фано по толщине структуры был получен поперечный скол образца и исследованы спектры комбинационного рассеяния света (КРС). Для измерения спектров КРС использовался спектрометр *inVia* (Renishaw). Возбуждение КРС осуществлялось лазером на длине волны 785 нм. Возбуждение КРС и регистрация спектров осуществлялись в стандартной геометрии, когда лазерный луч и рассеянный свет направлены вдоль нормали к поверхности поперечного скола образца. Спектры КРС измерялись в режиме микрозонда в геометрии “отражение назад”. Пространственное разрешение при измерении спектров КРС на поперечном сколе образца было не хуже 1 мкм.

Исследование особенностей морфологии поперечного скола экспериментального образца производилось методом растровой электронной микроскопии (SEM). Использо-

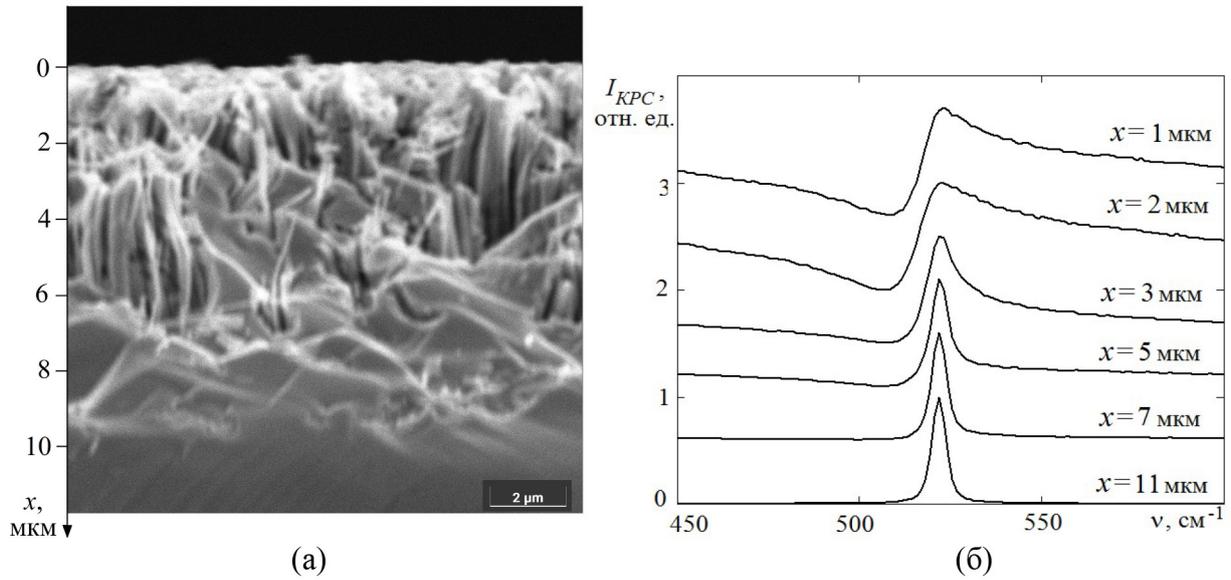


Рис. 1: Изображение поперечного скола исследуемого образца, полученное SEM, координата  $x$  обозначает расстояние от внешней поверхности пленки  $\text{por-Si}$  в глубину образца (а); спектры КРС, измеренные вблизи линии  $521 \text{ см}^{-1}$ , для различных значений величины  $x$  (б).

вался растровый электронный микроскоп Tescan Vega (Чехия). Изображение типичной области поперечного скола образца показано на рис. 1(а), величина  $x$  характеризует расстояние от внешней поверхности пленки  $\text{por-Si}$ . Толщина пленки  $\text{por-Si}$  составляет  $7 \pm 1 \text{ мкм}$ . Спектры КРС, измеренные вблизи линии первого порядка кремния  $521 \text{ см}^{-1}$ , показаны на рис. 1(б). Также на рис. 1(б) указаны значения величины  $x$ , при которой были измерены спектры КРС.

С целью количественной оценки резонанса Фано проводилось моделирование спектральной линии КРС первого порядка кремния с помощью формулы:

$$I(\nu) = \frac{1}{(q^2 + 1)} \frac{(q + \Omega)^2}{(1 + \Omega^2)}, \quad (1)$$

где  $q$  – параметр Фано (безразмерная величина),  $\Omega$  – безразмерная частота:

$$\Omega = (\nu - \nu_0)/\Gamma, \quad (2)$$

$\nu$  – текущее значение частоты  $\nu_0$ ,  $\Gamma$  – положение и ширина спектральной линии резонанса Фано, соответственно [7]. Численные значения величин  $q$ ,  $\nu_0$ ,  $\Gamma$ , характеризующие влияние резонанса Фано на форму спектральной линии КРС первого порядка кремния, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры резонанса Фано спектров КРС, измеренных вблизи линии  $521 \text{ см}^{-1}$  в зависимости от расстояния от внешней поверхности пленки  $\text{por-Si}$

$x$ , мкм	$\nu_0$ , $\text{см}^{-1}$	$\Gamma$ , $\text{см}^{-1}$	$q$
1	517	7.5	1.2
2	517	7.7	1.2
3	519	4.8	2.4
5	520	2.9	3.7
7	521	2.2	11.0
11	521	1.9	70.0

Наиболее заметно резонанс Фано проявляется в слое пленки  $\text{por-Si}$  толщиной 2 мкм вблизи фронтальной поверхности (рис. 1, табл. 1). Об этом свидетельствует максимально искаженный контур спектральной линии первого порядка КРС кремния на рис. 1(б) и минимальное значение величины  $q$  в табл. 1. С дальнейшим увеличением  $x$  влияние резонанса Фано на вид спектральной линии первого порядка кремния заметно снижается, о чем свидетельствует рост величины  $q$  в табл. 1, а также уменьшение искажения спектральной линии на рис. 1(б). В глубине кремниевой пластины при  $x \geq 11$  мкм резонанс Фано не наблюдается, о чем свидетельствует симметричность линии первого порядка спектра КРС на рис. 1(б) и резкий рост величины  $q$  в табл. 1.

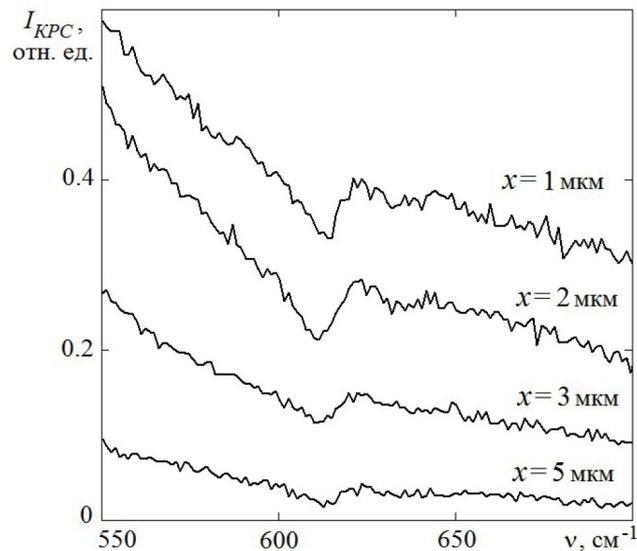


Рис. 2: Спектры КРС экспериментального образца вблизи линии  $615 \text{ см}^{-1}$ .

На спектрах КРС, измеренных при  $x = 1-5$  мкм (рис. 2), проявляется линия вблизи  $615 \text{ см}^{-1}$ , которая согласно [8] связана с примесью бора в кремнии. В связи с тем, что контур данной линии также искажен за счет проявления резонанса Фано, можно предположить, что она обусловлена влиянием электрически активной акцепторной примеси (бора). На спектрах КРС, измеренных при  $x > 5$  мкм, интенсивность данной линии становится ниже предела чувствительности спектрометра (рис. 2). Также при  $x > 5$  мкм резонанс Фано проявляется значительно слабее (рис. 1(а), табл. 1).

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Резонанс Фано наиболее заметно проявляется в приповерхностном слое  $\text{por-Si}$  толщиной  $\sim 2$  мкм. Также здесь сосредоточена наибольшая концентрация акцепторной примеси (бора). С дальнейшим увеличением  $x$  концентрация бора снижается. Наблюдаемая ситуация объясняется тем, что вследствие гидрофобности пленки  $\text{por-Si}$  раствор диффузанта проникает в нее на ограниченную глубину. Вследствие этого, в результате термической диффузии наибольшая концентрация акцепторной примеси (бора) сосредоточена в слое пленки  $\text{por-Si}$  толщиной не более 5 мкм. Таким образом,  $p$ - $n$ -переход находится внутри кремниевых кристаллитов пленки  $\text{por-Si}$ , толщина которой составляет  $7 \pm 1$  мкм. Полученные результаты представляют практический интерес при разработке солнечных элементов и оптических датчиков видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Н. Мельник, В. В. Трегулов, Г. Н. Скопцова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(2), 24 (2023). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=50738781>.
- [2] M. F. Limonov, *Advances in Optics and Photonics* **13**(3), 703 (2021). <https://doi.org/10.1364/AOP.420731>.
- [3] Yi Yu, M. Neuck, Hao Hu, et al., *Applied Physics Letters* **105**(6), 061117 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4893451>.
- [4] T. Dzhafarov, A. Bayramov, *Porous Silicon and Solar Cells. – Handbook of Porous Silicon* (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018, edited by L. Canham), pp. 1479-1492. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6_95).
- [5] С. М. Зи, *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [6] Е. В. Астрова, В. Б. Воронков, И. В. Грехов и др., *Письма в журнал технической физики* **25**(23), 72 (1999). <https://doi.org/10.1134/1.1262694>.

- [7] М. В. Рыбин, И. С. Синев, К. Б. Самусев и др., Физика твердого тела **56**(3), 560 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1063783414030263>.
- [8] F. Cerdeira, T. A. Fjeldly, M. Cardona, Physical Review B **9**(10), 4344 (1974).

Поступила в редакцию 26 марта 2023 г.

После доработки 5 июня 2023 г.

Принята к публикации 6 июня 2023 г.