

УДК 538.958; 535.8

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

Н. Н. Мельник¹, В. В. Трегулов², Г. Н. Скопцова²,
А. И. Иванов², Д. С. Косцов¹

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

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

² 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 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 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 por-Si выращивалась методом двухэтапного металл-стимулированного травления. Сначала на поверхности пластины осаждались серебряные частицы из раствора: Ag_2SO_4 (0.01 M): 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 H_2O_2 (1.24 M): 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 por-Si наносился 2%-й спиртовой раствор H_3BO_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 por-Si формировался слой p -типа проводимости с высокой концентрацией акцепторной примеси (порядка 10^{20} см^{-3}). Подобная технология диффузионного легирования 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-

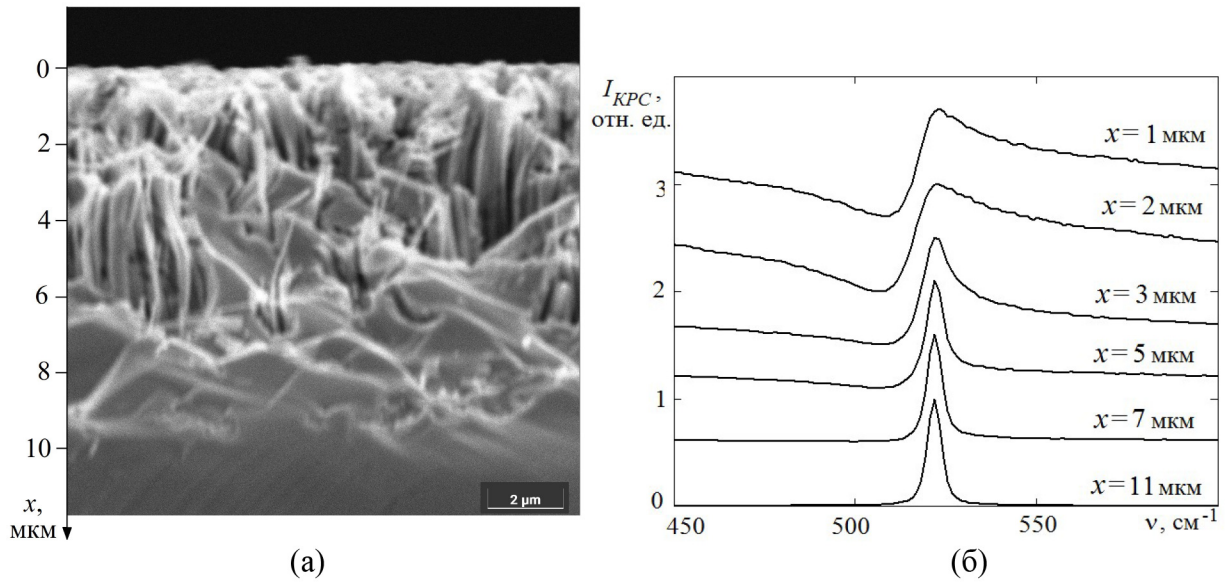


Рис. 1: Изображение поперечного скола исследуемого образца, полученное SEM, координата x обозначает расстояние от внешней поверхности пленки por-Si в глубину образца (а); спектры КРС, измеренные вблизи линии 521 см^{-1} , для различных значений величины x (б).

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 por-Si . Толщина пленки por-Si составляет 7 ± 1 мкм. Спектры КРС, измеренные вблизи линии первого порядка кремния 521 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), Ω – безразмерная частота:

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

ν – текущее значение частоты ν_0 , Γ – положение и ширина спектральной линии резонанса Фано, соответственно [7]. Численные значения величин q , ν_0 , Γ , 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 см^{-1} в зависимости от расстояния от внешней поверхности пленки por-Si

x , мкм	ν_0 , см^{-1}	Γ , 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 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.

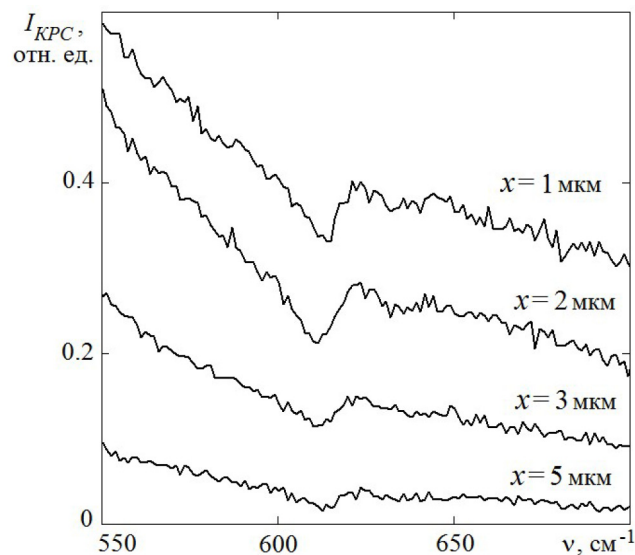


Рис. 2: Спектры КРС экспериментального образца вблизи линии 615 см^{-1} .

На спектрах КРС, измеренных при $x = 1-5$ мкм (рис. 2), проявляется линия вблизи 615 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 por-Si толщиной ~ 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 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 por-Si толщиной не более 5 мкм. Таким образом, p - n -переход находится внутри кремниевых кристаллитов пленки por-Si , толщина которой составляет 7 ± 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.
- [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.