

УДК 538.958:535.8

НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСА ФАНО В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ С *p-n*-ПЕРЕХОДОМ, СФОРМИРОВАННЫМ В ПЛЕНКЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

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

*Сообщается о первом наблюдении резонанса Фано методом спектроскопии комбинационного рассеяния света в полупроводниковой структуре с *p-n*-переходом, сформированным термической диффузией бора в пленке пористого кремния. Пористая пленка выращена методом металлстимулированного травления на монокристаллической кремниевой подложке *n*-типа проводимости.*

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

Резонанс Фано представляет собой универсальное явление, которое возникает в результате квантово-механического взаимодействия между дискретным и непрерывным состояниями [1]. Характерной особенностью проявления резонанса Фано является асимметричный профиль спектральной линии [2]. Реализация резонанса Фано в твердотельных структурах актуальна для улучшения характеристик оптических и химических датчиков, лазеров, создания принципиально новых оптических систем передачи и хранения информации с улучшенными характеристиками по сравнению с традиционно используемыми устройствами [1]. Применение резонанса Фано позволяет создать быстродействующие оптоэлектронные коммутаторы, скорость переключения которых не ограничивается временем жизни носителей заряда в активных областях полупроводниковой структуры [3]. В частности, в [3] сообщается о создании электронно-оптического модулятора на основе InP, реализующего эффект резонанса Фано, который работает на скорости переключения до 10 Гбит/с. Также следует отметить, что резонанс Фано

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

² Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина, 390000 Россия, Рязань, ул. Свободы, 46.

проявляется в высоколегированном монокристаллическом кремнии p -типа проводимости с концентрацией примеси порядка $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [4, 5]. Данное обстоятельство имеет важное практическое значение, так как в настоящее время производство монокристаллического кремния хорошо освоено промышленностью, он является относительно недорогим полупроводниковым материалом, и применяется для изготовления подавляющего большинства микроэлектронных приборов. В работах [6, 7] сообщается о наблюдении резонанса Фано в пленках пористого кремния, выращенных на высоколегированных кремниевых монокристаллических пластинах p -типа проводимости. В пленках, исследованных в этих работах, p - n -переход не использовался, и исследованные пленки могут применяться только в качестве антиотражающих покрытий, способствующих повышению КПД солнечных фотовольтаических преобразователей и увеличению чувствительности оптических датчиков [8], но не в качестве активного элемента. В качестве активного элемента солнечных батарей используются p - n -переходы, созданные диффузией в кремниевой пластине. Таким образом, для развития солнечной энергетики, микро- и нанoeлектроники, фотоники большой интерес представляет реализация эффекта резонанса Фано в новых полупроводниковых структурах с p - n -переходами.

В нашей работе впервые сообщается о наблюдении резонанса Фано в полупроводниковой структуре с p - n -переходом, сформированным внутри пленки пористого кремния, выращенной на монокристаллической кремниевой подложке. Актуальность темы исследования объясняется тем, что именно p - n -переход является активным элементом оптических датчиков и солнечных элементов, обеспечивающих разделение носителей заряда, генерируемых светом, и возникновение фотоЭДС [9].

Для изготовления исследуемой полупроводниковой структуры использовалась монокристаллическая кремниевая подложка n -типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и ориентацией поверхности (100). Пленка пористого кремния выращивалась методом металлстимулированного травления в два этапа. Сначала на поверхности кремниевой пластины осаждались частицы серебра из раствора: Ag_2SO_4 (0.01 М), HF (46%), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92%) при соотношении компонентов 1:0.1:0.3 в течение 30 с. Затем пластина отмывалась в дистиллированной воде. Далее пластина с нанесенными частицами серебра погружалась в раствор: KMnO_4 (0.06 М), HF (46%) при соотношении компонентов 2:1 и выдерживалась в течение 20 мин. После формирования пористой структуры образцы отмывались в дистиллированной воде, а затем в концентрированной HNO_3 в течение 15 минут для удаления из пор серебряных частиц. Толщина пленки por-Si составляла 1.5 мкм. Формирование p - n -перехода осуществлялось методом термической

диффузии бора. Для этого на поверхность пористого слоя наносился 1%-й спиртовой раствор H_3BO_3 . После высушивания пластина помещалась в электрическую печь и выдерживалась в течение 5 минут при температуре 1100°C .

Проводились измерения спектров комбинационного рассеяния света (КРС) образца с пленкой *por-Si* после диффузии, а также монокристаллической кремниевой подложки. Возбуждение КРС осуществлялось на длинах волн (λ_{ex}) 488, 785 и 1064 нм. Измерения спектров КРС при $\lambda_{\text{ex}} = 488$ нм производились с помощью спектрометра U-1000 (Jobin Yvon). Для измерений при $\lambda_{\text{ex}} = 785$ и 1064 нм использовался спектрометр inVia (Renishaw). Возбуждение КРС и регистрация спектров осуществлялись в стандартной геометрии “на отражение”, когда лазерный луч и рассеянный свет направлены вдоль нормали к поверхности образца.

На спектрах КРС исследуемых образцов проявляется несимметричность вблизи линии первого порядка кремния 521 см^{-1} в высокочастотной области при всех значениях λ_{ex} (рис. 1). Наиболее этот эффект заметен на спектре КРС при $\lambda_{\text{ex}} = 785$ нм (рис. 1). Указанная ситуация характерна для проявления резонанса Фано в кремнии [4–7]. Также следует отметить, что спектры КРС подложки, измеренные при $\lambda_{\text{ex}} = 488, 785$ и 1064 нм, практически совпадают. Совпадали и спектры КРС исходной подложки и подложки с выращенной на ней пористой пленкой. Для подложки резонанс Фано не наблюдается (пунктирная линия на рис. 1).

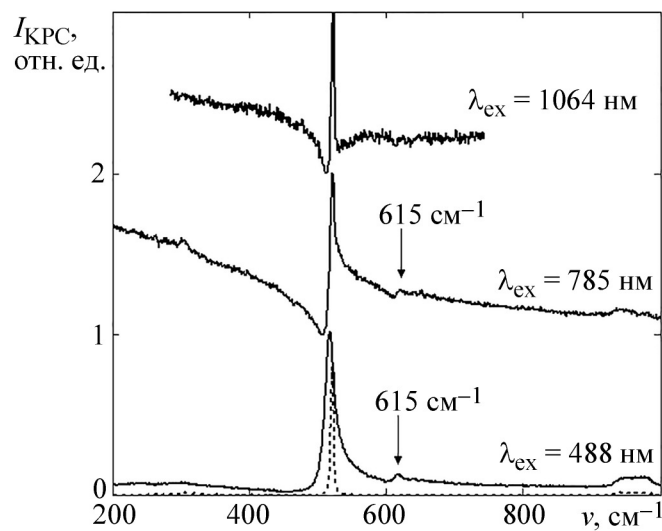


Рис. 1: Спектры КРС пленки *por-Si* (сплошная линия) и подложки (пунктирная линия) при возбуждении на длинах волн 488, 785, 1064 нм.

На спектрах КРС, измеренных при λ_{ex} 488 и 785 нм, проявляется линия вблизи 615 см^{-1} , которая связана с примесью бора в кремнии [11].

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. В результате диффузии бора на поверхности кремниевой пластины n -типа проводимости, содержащей пленку por-Si , формируется слой p -типа проводимости с высокой концентрацией акцепторной примеси (порядка 10^{20} см^{-3} . Концентрация была определена методом измерения поверхностного сопротивления на аналогичных образцах.) При возбуждении на $\lambda_{\text{ex}} = 785 \text{ нм}$ на спектре КРС отчетливо наблюдается резонанс Фано. В то же время, при возбуждении на λ_{ex} 488 и 1064 нм резонанс Фано проявляется значительно слабее. При $\lambda_{\text{ex}} = 488 \text{ нм}$ возбуждающее излучение преимущественно поглощается вблизи поверхности образца, покрытого слоем боросиликатного стекла, сформированного в результате окисления поверхностного слоя кремния и диффузии бора. При $\lambda_{\text{ex}} = 1064 \text{ нм}$ возбуждающее излучение достаточно глубоко проникает в подложку n -типа, при этом вклад p -области с высокой концентрацией акцепторной примеси относительно небольшой, и резонанс Фано проявляется слабее, чем при $\lambda_{\text{ex}} = 785 \text{ нм}$. Важно отметить, что в научной литературе о наблюдении резонанса Фано в полупроводниковых структурах с пленкой por-Si , содержащей p - n -переход, не сообщается. Исследование способов управления параметрами резонанса Фано в перспективных полупроводниковых структурах открывает новые возможности улучшения их характеристик.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. F. Limonov, *Advances in Optics and Photonics* **13**(3), 703 (2021). <https://doi.org/10.1364/AOP.420731>.
- [2] A. E. Miroshnichenko, S. Flach, Y. S. Kivshar, *Reviews of Modern Physics* **82**(3), 2257 (2010). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2257>.
- [3] Yi Yu, M. Heuck, Hao Hu, et al., *Applied Physics Letters* **105**(6), 061117 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4893451>.
- [4] B. G. Burke, J. Chan, K. A. Williams, et al., *Journal of Raman Spectroscopy* **41**(12), 1759 (2010). <https://doi.org/10.1002/jrs.2614>.
- [5] K. Kato, K. Oguri, H. Sanada, et al., *AIP Advances* **5**(9), 097152 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4931393>.
- [6] Y. A. Pusep, A. D. Rodrigues, L. J. Borrero-Gonzalez, et al., *Journal of Raman Spectroscopy* **44**(6), 1405 (2011). <https://doi.org/10.1002/jrs.2870>.

- [7] А. В. Павликов, О. В. Рахимова, П. К. Кашкаров, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. № 2, 77 (2018). <https://doi.org/10.3103/S0027134918020121>.
- [8] 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.
- [9] С. М. Зи, Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984).
- [10] M. Yang, D. Huang, P. Hao, Journal of Applied Physics **75**(1), 651 (1994). <https://doi.org/10.1063/1.355808>.
- [11] F. Cerdeira, T. A. Fjeldly, M. Cardona, Physical Review B **9**(10), 4344 (1974).

Поступила в редакцию 23 августа 2022 г.

После доработки 27 декабря 2022 г.

Принята к публикации 28 декабря 2022 г.