

Спектры оптического поглощения сверхрешеток Фибоначчи PbS/C с участием фононов

© С.Ф. Мусихин, О.В. Рабизо, В.И. Ильин, А.С. Федоров, Л.В. Шаронова*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 мая 2000 г. Принята к печати 24 мая 2000 г.)

Методом лазерного напыления получены сверхрешетки Фибоначчи в системе n -PbS/C (C — алмазоподобный углерод). Спектры оптического поглощения в области 1.12–3.25 эВ сравниваются с энергетическим спектром электронов, рассчитанным в модели Кронига–Пенни. Определена энергия сродства к электрону в алмазоподобном углероде: 0.25 ± 0.05 эВ. Тонкая структура в спектре поглощения в области 1.7865–1.7914 эВ интерпретируется межзонными переходами при участии фононов с энергиями $(0.92–2.35) \cdot 10^{-3}$ эВ.

Непериодические сверхрешетки (СР) Фибоначчи обладают специфическим энергетическим спектром, который характеризуется проявлениями квазипериодичности, а в структурах с большим числом слоев — фрактальной структурой энергетического спектра. Отсутствие строгой периодичности в спектре энергий приводит к неповторимому набору ступеней и плато в спектрах поглощения. Такой характер спектра позволяет в результате сравнения экспериментального и теоретически рассчитанного спектров определить основные параметры гетероструктуры и, в частности, разрывы энергетических зон [1,2].

Работа посвящена исследованию оптических спектров пропускания СР (сульфид свинца)–(алмазоподобный углерод), выращенных по закону последовательности чисел Фибоначчи. Объектом исследования в данной работе являлись СР, содержащие два структурных элемента. Элемент *A* состоял из слоя сульфида свинца толщиной 15 Å и слоя алмазоподобного углерода толщиной 5 Å, элемент *B* — из слоя сульфида свинца толщиной 30 Å и слоя алмазоподобного углерода толщиной 5 Å. Сверхрешетка $S = ABAABAABAABAABAABA$ содержала 21 пару слоев, выращенных методом импульсного лазерного напыления в вакууме [3] на подложки кварца. Пленки сульфида свинца имели n -тип проводимости с концентрацией электронов $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Регистрация спектров пропускания проводилась на монохроматоре МДР-23. В области энергий фотонов $E = 1.12–3.25$ эВ в качестве источника излучения использовалась кварцевая лампа накаливания большой мощности. В узкой области спектра $E = 1.7865–1.7914$ эВ СР облучалась гелий-неоновым лазером с максимумом излучения при энергии 1.78958 эВ. Применение лазера позволило увеличить разрешающую способность в спектре по энергии до $8 \cdot 10^{-6}$ эВ и выявить тонкую структуру оптического спектра СР.

На оптических спектрах (см. рисунок) по оси ординат отложена величина $1 - T$, пропорциональная коэффициенту поглощения, где T — коэффициент пропускания СР.

Оптические спектры СР при облучении от лампы накаливания обнаруживают особенности в виде "ступенек" и пиков поглощения, обусловленных, как известно [1], межзонными и внутризонными переходами в СР, а также оптической ионизацией квантовых ям.

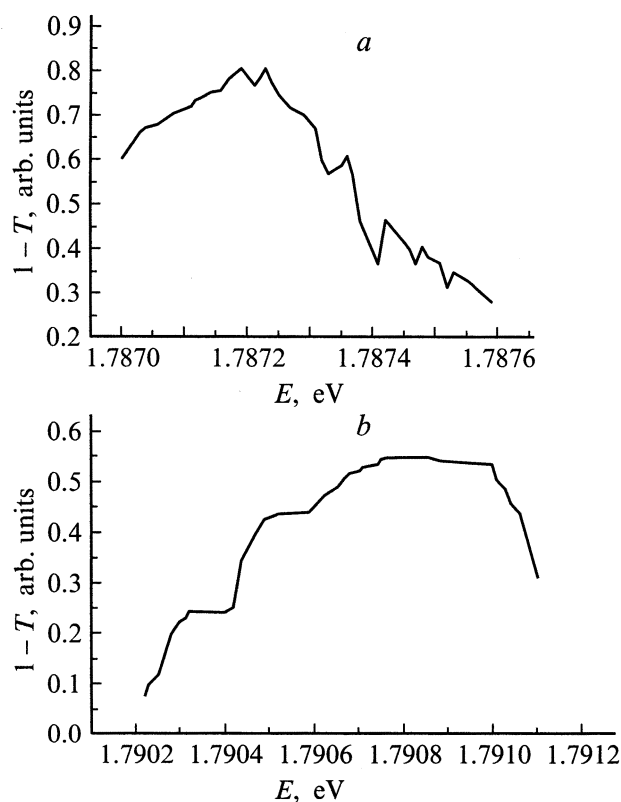
Расчет энергетического спектра носителей СР Фибоначчи проводился в модели Кронига–Пенни для взаимодействующих квантовых ям, разделенных туннельно-прозрачными барьерами. Глубина потенциальных ям для электронов в зоне проводимости определяется разрывом энергетических зон проводимости $\Delta E_c = \chi_{\text{PbS}} - \chi_C$, где χ_{PbS} и χ_C — сродство к электрону сульфида свинца и алмазоподобного углерода соответственно. Величина $\chi_{\text{PbS}} = 4.35$ эВ получена из исследований фотоэлектрических свойств гетеропереходов [4]. Данные о величине χ_C имеют значительный разброс. Поэтому для определения величины χ_C рассчитывались энергетические спектры носителей в СР для различных значений ΔE_c . В диапазоне энергий 3.50–4.35 эВ расчет производился с интервалом 0.05 эВ. Наибольшее согласие экспериментальных и расчетных данных получено при $\Delta E_c = (4.10 \pm 0.05)$ эВ и, таким образом, $\chi_C = (0.25 \pm 0.05)$ эВ.

Энергетический спектр СР Фибоначчи, рассчитанный при $\Delta E_c = 4.1$ эВ, состоит из 6 разрешенных минизон, общих для всей СР в потенциальной яме зоны проводимости и содержащих 53 уровня для электронов E_K^N , где верхний индекс N обозначает номер минизоны, а нижний K — номер уровня в минизоне. Энергетический спектр в потенциальной яме валентной зоны состоит из 3 минизон разрешенных состояний с 18 разрешенными уровнями H_K^N . Так как пленки сульфида свинца имели n -тип проводимости, в исследованных СР возможны внутризонные переходы в потенциальной яме зоны проводимости, межзонные переходы и оптическая ионизация квантовых ям.

Расчет проводился в предположении о неполном заполнении первой минизоны в зоне проводимости $E_1^1 - E_8^1$. Общий вид спектра поглощения СР согласуется с расчетными данными.

На рисунке представлены оптические спектры поглощения при облучении СР гелий-неоновым лазером. Область измерения спектров 1.7865–1.7914 эВ частично перекрывается со "ступенькой", обнаруженной при исследовании спектров поглощения СР от лампы накаливания. Характерной особенностью спектров является их тонкая структура — наличие 6 узких пиков поглощения, расположенных до максимума энергии излучения лазера (1.78958 эВ), и трех ступенек на энергиях 1.7903–1.7904, 1.7905–1.7906, 1.7907–1.7910 эВ за максимумом излучения лазера. Первая и третья ступеньки соответствуют энергиям межзонных переходов $H_7^1 - E_1^2$ и $H_8^1 - E_1^2$ между двумя ближайшими разрешенными уровнями, расположенными в первой минизоне потенциальной ямы валентной зоны PbS. Поэтому появление второй ступеньки не связано с межзонными переходами, для этого потребовалась бы меньшая энергия. Аналогично серия из 6 пиков поглощения в области энергий 1.78723–1.78756 эВ также не связана с межзонными переходами в СР, так как минимальное различие в энергии для двух ближайших межзонных переходов в несколько раз превышает всю область энергий, где наблюдались эти пики поглощения.

Полученные результаты можно объяснить, если предположить, что процессы поглощения в СР происходят с участием фононов.



Спектр поглощения сверхрешетки PbS/C при облучении гелий-неоновым лазером. *a, b* — разные спектральные области.

Параметры пиков поглощения

Номер пика	Энергия пика, эВ (эксперимент)	Энергия фонона, 10^{-3} эВ
1	1.7823	2.35
2	1.78730	2.28
3	1.78735	2.23
4	1.78742	2.16
5	1.78750	2.08
6	1.78756	2.02
7	1.7905–1.7906	0.92–1.02

Для первых 6 наблюдаемых пиков поглощения (см. таблицу) происходит процесс поглощения фотона $E = 1.78958$ эВ (максимум лазерного излучения) с испусканием фонона, энергия которого не превышает $2.35 \cdot 10^{-3}$ эВ. Узкая "полка" в области энергий 1.7905–1.7906 эВ, расположенная за максимумом излучения лазера, связана с поглощением фотона $E = 1.78958$ эВ и поглощением фонона с энергией, не превышающей $1.02 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Полученные экспериментально величины энергий фононов в несколько раз меньше величины поперечного оптического фонона $8.2 \cdot 10^{-3}$ эВ для сульфида свинца [5]. Такое различие объясняется квантованием фононного спектра и соответствующим уменьшением области изменения волнового вектора фононов зоны Бриллюэна в квантово-размерных структурах [6].

Таким образом, методом лазерного напыления получены непериодические СР Фибоначчи n -PbS/C на кварцевой подложке. Исследованы спектры пропускания СР в областях энергий 1.12–3.25 и 1.7865–1.7914 эВ с источниками излучения — лампой накаливания и гелий-неоновым лазером соответственно. Проведен расчет энергетического спектра СР в модели Кронига–Пенни для потенциальных ям различной глубины. На основе полученных данных определена величина сродства к электрону алмазоподобного углерода 0.25 ± 0.05 эВ. Изучение оптических спектров при облучении СР гелий-неоновым лазером показало, что спектры имеют тонкую структуру. Обнаружены пики поглощения, связываемые с поглощением в СР с участием фононов с энергиями в области $(0.92–2.35) \cdot 10^{-3}$ эВ.

Работа выполнена в рамках программы "Интеграция", проект № 75.

Список литературы

- [1] А.Я. Шик. *Двумерные электронные системы* (СПб., СПбГТУ, 1993).
- [2] M. Qulichini. *Rev. Mod. Phys.*, **69**, 277 (1997).
- [3] Л.Г. Бакуева, В.И. Ильин, С.Ф. Мусихин, Л.В. Шаронова. *ФТП*, **27**, 1868 (1993).
- [4] Л.Г. Бакуева, В.И. Ильин, Т.И. Зубкова. *ФТП*, **13**, 345 (1979).

- [5] Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS* (М., Наука, 1968).
- [6] А.И. Касиян. *Кинетические эффекты в полупроводниках различной размерности* (Кишинев, Штиинца, 1989).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical absorption spectra of Fibonacci PbS/C superlattices with phonon participation

S.F. Musikhin, O.V. Rabizo, V.I. Il'in, A.S. Fedorov,
L.V. Sharonova*

St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia