

# Спин-зависимое туннелирование в полумагнитных гетеровалентных наноструктурах $A^3B^5/A^2B^6:Mn$

А. А. Торопов

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

В последние годы в физике полупроводников наблюдается рост интереса к спин-зависимым явлениям, связанным в первую очередь с перспективами полупроводниковых «спинтронных» применений. Среди существенных достижений в этой области следует отметить реализацию эффективной спиновой инжекции [1, 2] и управления спиновой поляризацией [3, 4] с использованием разбавленных магнитных полупроводников группы  $A^2B^6$  и наблюдение длинных времен спиновой релаксации в немагнитных полупроводниках группы  $A^3B^5$  с  $n$ -типом легирования [5, 6].

Результаты этих исследований допускают в принципе осуществление основных функций «спиновой» электроники: создание электронной спиновой поляризации, ее сохранение в течение достаточно длительного времени и управление знаком спиновой поляризации с помощью приложения внешнего электрического или магнитного полей. Тем не менее, сочетание различных функций в рамках одной монокристаллической гетероструктуры является технологически сложной и фактически нерешенной задачей, так как требует изготовления «гетеровалентных» структур, объединяющих полупроводниковые соединения различных химических групп [7–9].

Недавно нами был предпринят подход к решению этой проблемы, заключающийся в конструировании и изготовлении гетеровалентных резонансно-туннельных структур, в которых квантовая яма немагнитных полупроводников группы  $A^3B^5$  (GaAs/AlGaAs) и квантовая яма разбавленных магнитных полупроводников группы  $A^2B^6$  (ZnCdMnSe/ZnSe) были электронно связаны через тонкий барьер, содержащий гетеровалентный интерфейс AlGaAs/ZnSe [10]. Ожидалось, что гибридные структуры такого типа позволят объединить эффективное управление спин-зависимым потенциалом в области  $A^2B^6:Mn$  при приложении внешнего магнитного поля [11] и полезные характеристики немагнитных полупроводников группы  $A^3B^5$  — высокую подвижность носителей, относительно медленную спиновую релаксацию и хорошо разработанную технологию эпитаксиального роста наноструктур.

Практическая реализация этого подхода потребовала развития технологии роста гетеровалентных квантовых ям методом молекулярно-пучковой эпитаксии и проведения магнитооптических исследований изготовленных образцов. К настоящему времени изготовлен набор оптически-активных гетеро-

валентных двойных квантовых ям GaAs/AlGaAs/ZnSe/ZnCdMnSe, отличающихся шириной квантовой ямы GaAs/AlGaAs. Анализ спектров экситонной фотолюминесценции, измеренной с временным разрешением в различных образцах, позволил сделать выводы о характере экситонного локализирующего потенциала в «при-интерфейсной» квантовой яме. Близость гетеровалентного интерфейса вызывает дополнительное неоднородное уширение экситонного резонанса, связанное в первую очередь с флуктуациями локальных электрических полей, индуцированных флуктуациями химического состава интерфейсных слоев вблизи гетерограницы  $A^3B^5/A^2B^6$ . Тем не менее, тщательный дизайн гетеровалентного интерфейса позволил изготавливать туннельно-связанные квантовые ямы, демонстрирующие яркую экситонную фотолюминесценцию и приемлемые ширины экситонных резонансов (10–25 мэВ).

Основным фактором, определяющим свойства двойной квантовой ямы, является отстройка электронных уровней в электронно-связанных квантовых ямах. Варьирование этого параметра осуществлялось изменением толщин квантовых ям или приложением внешнего магнитного поля, в результате действия эффекта гигантского зеемановского расщепления в слое разбавленного магнитного полупроводника ZnCdMnSe. Резонансное электронное связывание наблюдалось в образце со специфичной шириной GaAs/AlGaAs квантовой ямы ( $\sim 3$  нм). Достижение резонансных условий проявлялось в смене знака магнитного  $g$ -фактора экситона в GaAs/AlGaAs квантовой яме и увеличении его абсолютной величины более чем на порядок. Варьирование взаимного расположения электронных уровней позволило также контролировать радиационное время жизни экситона и время жизни спиновой поляризации в диапазоне от десятков пикосекунд до нескольких наносекунд.

Естественным развитием этих исследований представляется изготовление диодных структур с гетеровалентными двойными квантовыми ямами, допускающих электрическое управление резонансной электронной связью между ямами. Работы в этом направлении ведутся в настоящее время. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практических применений структур с  $A^3B^5/A^2B^6$  гетеровалентными квантовыми ямами для решения задачи управления спиновой поляризацией электронов при приложении внешнего магнитного и электрического полей.

## План лекции

1. Гетеровалентная эпитаксия — проблемы и методы их решения.
2. Экситонная спектроскопия как метод исследования микроскопической структуры гетеровалентного интерфейса.

3. Экситоны в связанных квантовых ямах разбавленных магнитных полупроводников — теория и эксперимент.
4. Управление экситонным  $g$ -фактором и скоростью спиновой релаксации в двойной гетеровалентной квантовой яме.
5. Перспективы использования гетеровалентных наноструктур в спинтронике.

## Литература

- [1] R. Fiederling, *et al.* Nature **402**, 787 (1999).
- [2] B. T. Jonker, *et al.* Phys. Rev. B **62**, 8180 (2000).
- [3] Th. Gruber, *et al.* Appl. Phys. Lett. **78**, 1101 (2001).
- [4] A. Slobodsky, *et al.* Phys. Rev. Lett. **90**, 246601 (2003).
- [5] J. M. Kikkawa and D. D. Awschalom, Phys. Rev. Lett. **80**, 4313 (1998).
- [6] R. I. Dzhioev, *et al.* Phys. Rev. B **66**, 245204 (2002).
- [7] W. A. Harrison, *et al.* Phys. Rev. B **18**, 4402 (1978).
- [8] R. Nicolini, *et al.* Phys. Rev. Lett. **72**, 294 (1994).
- [9] A. Kudelski, U. Bindley, J. K. Furdyna, M. Dobrowolska, and T. Wojtowicz, Appl. Phys. Lett. **82**, 1854 (2003).
- [10] A. A. Toropov, *et al.* Phys. Rev. B **71**, 195312 (2005).
- [11] J. K. Furdyna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).