

УДК 537
ББК 22.334.2
М 126



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 08-02-07065.

Берман Г. П., Боргонови Ф., Горшков В. Н., Цифринович В. И.

Магнитно-резонансная силовая микроскопия и односпиновые измерения. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. — viii+196 с.

Магнитно-резонансная силовая микроскопия (МРСМ) — быстро развивающаяся область, которая зародилась в 1990-е годы и не так давно достигла зрелости, объявив о первой регистрации спина единичного электрона, находящегося внутри непрозрачного твердого вещества. Дальнейшее развитие методов МРСМ окажет огромное влияние на многие отрасли науки и техники, включающие физику, химию, биологию и даже медицину. Целью данной книги является описание основных принципов современной теории МРСМ и ее приложений. Особое внимание в книге уделяется методам экспериментального обнаружения спина единичного электрона с помощью адиабатических обращений, вызываемых осциллирующим кантилевером (метод OSCAR). Книга также содержит ценные экспериментальные данные, которые, несомненно, пригодятся ученым, работающим в области квантовой физики или магнитного резонанса. Даже если читатель не знаком с квантовой механикой и явлением магнитного резонанса, он сможет понять и по достоинству оценить основные принципы МРСМ.

ISBN 978-5-93972-811-9

ББК 22.334.2

© World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2006

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, электронными или механическими, включая фотокопирование, запись на магнитный носитель, или при помощи любой другой системы хранения и обработки информации, если на то нет письменного разрешения издательства.

Перевод на русский язык публикуется с разрешения издательства World Scientific Publishing Co. Pte Ltd, Сингапур.

© Перевод на русский язык:

НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010

<http://shop.rcd.ru>

Оглавление

Предисловие	vii
ГЛАВА 1. Введение	1
ГЛАВА 2. Спиновая динамика. Квазиклассическое описание . .	4
ГЛАВА 3. Спиновая динамика. Квантовое описание	14
ГЛАВА 4. Механические вибрации кантилевера	22
ГЛАВА 5. Регистрация единичных спинов в магнитно-силовой микроскопии (МСМ)	29
5.1. Статическое смещение конца кантилевера (КК)	29
5.2. Время декогерентности	33
ГЛАВА 6. Переходный процесс в МСМ. Точное решение основного уравнения	36
6.1. Гамильтониан и основное уравнение системы спин – КК . . .	36
6.2. Решение для диагональных по спину матричных элементов .	40
6.3. Решение для недиагональных по спину матричных элементов	46
ГЛАВА 7. Периодические переориентации спина, возбуждаемые π-импульсами, в магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ)	51
ГЛАВА 8. Осциллирующие адиабатические переориентации спина, вызываемые частотно-модулированным высокочастотным по- лем	56
8.1. Шрёдингеровская динамика системы КК – спин	57
8.2. Декогерентность и тепловая диффузия для КК	68

ГЛАВА 9. Метод адиабатических обращений, вызываемых осциллирующим кантилевером (OSCAR) в MPCM	74
9.1. Динамика спин–КК. Обсуждение и оценка	75
9.2. Экспериментальная регистрация единичного спина	82
ГЛАВА 10. Динамика системы спин – КК в методе OSCAR	85
10.1. Квазиклассическая теория. Простая геометрия	85
10.2. Квантовая теория метода OSCAR в MPCM	92
10.3. Частотный сдвиг в методе OSCAR для реалистической задачи	99
ГЛАВА 11. Магнитный шум и спиновая релаксация в методе OSCAR	112
11.1. Релаксация в спиновом ансамбле по методу OSCAR	112
11.2. Уменьшение магнитного шума	126
11.3. Простая модель квантовых скачков	132
11.4. Уменьшение частотного сдвига	138
ГЛАВА 12. Применение MPCM. Измерение перепутанного состояния и квантовые вычисления	143
12.1. Измерение перепутанного спинового состояния методом MPCM	143
12.2. Спиновый квантовый компьютер на основе MPCM	148
ГЛАВА 13. Методы MPCM и спиновая диффузия	161
13.1. Спиновая диффузия в присутствии неоднородного магнитного поля	161
13.2. Подавление спиновой диффузии в спиновом квантовом компьютере	169
ГЛАВА 14. Заключение	182
14.1. Аббревиатуры	183
14.2. Префиксы	183
14.3. Условные обозначения	183
Литература	188
Предметный указатель	193