

**Правительство Российской Федерации**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего**  
**профессионального образования**

**"Национальный исследовательский университет**  
**"Высшая школа экономики"**

Московский институт электроники и математики Национального  
исследовательского университета "Высшая школа экономики"  
Факультет информационных технологий и вычислительной техники

Программа мастер-класса

**Квантовый компьютер и квантовые вычисления**

для направления 230.100.68 «Информатика и вычислительная техника»  
магистерской программы «Компьютерное моделирование  
в технике и технологиях»

Автор программы:

Каган М.Ю., д.ф.-м.н., профессор,  
член-корреспондент РАН

Одобрена на заседании кафедры

Физическая химия и экология  
Зав. кафедрой Е.Д. Пожидаев

«23» января 2014 г

Рекомендована секцией УМС  
Председатель

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г

Утверждена УС факультета  
Ученый секретарь

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

Москва, 2013

*Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения кафедры-разработчика программы.*

## Область применения

В настоящее время развитие микроэлектроники и современной компьютерной техники в попытке уменьшить размеры современных вычислительных устройств и повысить их быстродействие перешло на нано-масштабы порядка 10-500 ангстрем и стремительно приближается к атомным масштабам. На этих масштабах мы вынуждены переходить от классического описания к квантовому описанию, основанному на операторных, матричных вычислениях с использованием уравнения Шредингера, принципа суперпозиции, соотношения неопределённостей Гейзенберга и концепции неразрушающих квантовых измерений. При этом можно резко улучшить ключевое для любого электронного устройства отношение сигнал-шум и с помощью квантовых стратегий и алгоритмов (типа алгоритма Шора) резко повысить быстродействие компьютера и улучшить защищённость хранения и передачи информации. Последние исследования в этой области привели к уменьшению горизонта создания квантового компьютера с 40 до 20 лет.

Основой квантового компьютера являются суперпозиционные двухуровневые состояния. На этих состояниях строятся квантовые биты (кубиты). При этом основой квантовой логики являются ключи и вентили на однокубитных и двухкубитных квантовых состояниях. Необходимо отметить, что для усиления быстродействия и защищённости информации двухкубитные и многокубитные состояния обязательно должны быть запутанными. Имеется несколько способов создания однокубитных и двухкубитных запутанных состояний. Самые популярные из них основаны на расщеплении уровней энергии электронных или ядерных спинов в постоянном магнитном поле (эффект Зеемана). Кроме того, двухуровневые системы можно организовать с помощью оптических переходов между электронными уровнями энергии в атомах и ионах. В этом случае для уменьшения естественной ширины линий необходимы сверхнизкие температуры и слабое взаимодействие между атомами. Эти требования можно реализовать с помощью электрически нейтральных или ионизованных квантовых разреженных газов, удерживаемых в ограниченной геометрии в ионных и магнитно-дипольных ловушках при сверхнизких температурах.

Ещё одна стратегия создания одно и двухкубитных состояний состоит в использовании одного фотона или коррелированной пары фотонов с двумя типами поляризации. Наконец, возможны разнообразные твердотельные реализации одно и двухкубитных состояний. Все они связаны с использованием так называемых макроскопических квантовых систем. Это и джозефсоновские сверхпроводящие контакты с разными фазами волновых функций левого и правого берега контакта, и магнитные капли или большие молекулы с ферромагнитным моментом, направленным параллельно и антипараллельно лёгкой оси намагничивания, и бозе-конденсаты нейтральных квантовых газов с фиксированной фазой, и тонкие плёнки сверхтекучего  $^3\text{He}$  на поверхности  $^4\text{He}$  с вакуумом или на подложках из графойла (отслаивающегося графита). На лекциях мы будем подробно разбирать каждую из этих систем. В то же время до настоящего момента по-прежнему самой перспективной с точки зрения приложений остаётся полупроводниковая технология, основанная на плазмонном сценарии создания одно и двухкубитных состояний. При этом мы сталкиваемся с необходимостью исследовать собственные моды коллективных электронных колебаний в многослойных сэндвичевых системах, в которых слои двумерного электронного газа отделены друг от друга слоями диэлектрика. В этом случае вопрос о проводимости и коллективных модах в такой системе тесно связан с различными вариантами локализации Мота-Андерсона, возникающей за счёт квантового беспорядка и интерференционных явлений при рассеянии электрона на ансамбле примесей, а также за счёт кулоновского взаимодействия электронов друг с другом. Мы будем рассматривать эти эффекты в применении к сэндвичевым и другим мезоскопическим системам. Мы также кратко обсудим

возможные применения квантового эффекта Холла и других твердотельных и оптических эффектов, перспективных для квантовой метрологии и навигации. К этой группе явлений относится создание и синхронизация сверхточных атомных часов, и создание эталонов квантовой проводимости (кондактанса).

## Цель проведения мастер-класса

Целью проведения мастер-класса «Квантовый компьютер и квантовые вычисления» является научить студентов магистерской программы «Компьютерное моделирование в технике и технологиях» самостоятельно анализировать материал передовых, прорывных идей, связанных с созданием квантовых компьютеров и развитием квантовых вычислений, и научиться выбирать и отделять реально ценные полученные научные результаты от рекламных пустышек.

Излагаемый материал достаточно сложен, так как базируется на самых передовых идеях и концепциях теоретической и прикладной физики. В связи с этим предусмотрено несколько лекций, в каждой из которых достаточно большое место занимает изложение этих концепций.

## Тематический мастер-класс

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Введение в дисциплину. Квантовый компьютер и квантовые вычисления.	4	2			2
2	Логические элементы и алгоритмы классического и квантового компьютера.	4	2			2
3	Физические основы квантовых вычислений. Введение в физику сверхпроводимости и сверхтекучести.	4	2			2
4	Сверхпроводящая реализация квантового компьютера.	4	2			2
5	Проблема измерений и парадоксы в квантовой механике.	4	2			2
6	Возможные пути создания квантовых компьютеров	4	2			2
7	Реализация квантового компьютера на нейтральных атомах и ионах в ловушках	4	2			2
8	Основы нанофизики и	4	2			2

	нанoeлектроники. Мезоскопика и локализация.					
9	Спинтроника и основные принципы магнитозаписи	4	2			2
	Итого	36	18			18

## Содержание программы мастер-класса

### **Тема 1. Введение в дисциплину. Квантовый компьютер и квантовые вычисления.**

Квантовый компьютер. Основы квантовых вычислений. Квантовая информатика. Информационная энтропия. Матричные вычисления. Ряды Фурье. Средние значения и ошибки в математической и физической статистике. Основные термины квантовых вычислений. Биты и кубиты. Запутанные состояния. Обзор рекомендованной литературы. Знакомство с аудиторией.

Вопросы академика Я.Б. Зельдовича по проверке общей эрудиции слушателей по необходимому для понимания курса математическому аппарату (линейная алгебра, матричные вычисления, дифференциальные и интегральные уравнения, уравнения математической физики, математический анализ, специальные функции и ряды, теория функций комплексных переменных, дифференциальная геометрия и топология, математическая статистика, математическая логика, теория чисел и теория групп, информатика и компьютерная техника) и основам современной физики (квантовая и классическая механика, статистическая физика, электродинамика и оптика, гидродинамика и физическая кинетика, электродинамика сплошных сред, атомная и молекулярная физика, физика твёрдого тела, сверхпроводимость, магнетизм, физика низких температур, микроэлектроника и физика полупроводников, радиационная физика и астрофизика, физика электрических цепей и основы электротехники).

(2 часа лекций).

Самостоятельная работа: проработка материала лекции (2 часа).

Литература:

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
2. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
3. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
4. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. – М.Постмаркет,2002, 376 с.
5. Китаев А., Шень А.,Вялый М., Классические и квантовые вычисления. – М.: Издательство Московского центра непрерывного математического образования, 1999, 192 с.
6. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.

7. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. и др., Квантовая информатика и квантовый компьютер, Учебное пособие, факультет ВМК, МГУ им. Ломоносова, 59 с.
8. Kagan M.Yu., Modern Trends in Superconductivity and Superfluidity. Lecture notes in Physics, v.874, Springer Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 2013, 550 pages

## **Тема 2. Логические элементы и алгоритмы классического и квантового компьютера.**

Квантовая связь и криптография. Логические элементы классического и квантового компьютера. Однокубитные и двухкубитные вентили. Миниатюризация интегральных схем классического компьютера. Нелинейные элементы электрических цепей для классических битов. Двоичная запись чисел. Квантовые алгоритмы и квантовый реестр компьютера. Алгоритмы Шора и Гровера. Задача Дойча. Схема построения квантового компьютера. Квантовый параллелизм вычислений. Гильбертово пространство квантового компьютера. Дешифровальные ключи и защита от взлома квантового компьютера.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

Литература:

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
2. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
3. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
4. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. – М. Постмаркет, 2002, 376 с.
5. Китаев А., Шень А., Вялый М., Классические и квантовые вычисления. – М.: Издательство Московского центра непрерывного математического образования, 1999, 192 с.
6. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A. Ya. Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.
7. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. и др., Квантовая информатика и квантовый компьютер, Учебное пособие, факультет ВМК, МГУ им. Ломоносова, 59 с.

## **Тема 3. Физические основы квантовых вычислений. Введение в физику сверхпроводимости и сверхтекучести.**

Нобелевские премии по квантовой физике, физике твёрдого тела и физике низких температур. Основы квантовой механики. Уравнение Шредингера. Принцип линейной суперпозиции. Волновая функция и вероятностный подход. Постоянная Планка. Спин и статистика частиц. Принцип неопределённости Гейзенберга. Двухуровневые системы. Спиновый гамильтониан. Матрицы Паули.

Сверхпроводимость в импульсном и реальном пространстве. Протяжённые куперовские пары и сильно-связанные локальные пары. Сверхпроводящая щель. Макроскопическая волновая функция. Сверхпроводники с s- и p- спариванием. Высокотемпературные сверхпроводники. Поиски сверхпроводимости при комнатной температуре.

Сверхтекучесть. Квантовая двухскоростная гидродинамика и квантовые вихри. Фазовая диаграмма сверхтекучего He-4. Фононы и ротоны. Нормальная и сверхтекучая плотность. Звуковые колебания. Растворы He-3 в He-4. Криостаты растворения и криогенная техника. Тонкие плёнки и двумерные монослои He-3 на границе He-4 с вакуумом. Топологический заряд и квантовая критическая точка. Квантовые биты в топологических изоляторах в сверхпроводниках с p-спариванием.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.

2.Тилли Д.Р., Тилли Дж., Сверхпроводимость и сверхтекучесть, М.-Мир, 1977

3.Халатников И.М. Введение в теорию сверхтекучести. М. -Наука,1965

4. Шмидт В.В., Введение в физику сверхпроводников, М.-Наука, 1982

5. Паттерман С., Гидродинамика сверхтекучей жидкости. М.-Мир.1978

6.Де Жен П., Сверхпроводимость металлов и сплавов. М.-Мир, 1966.

7.Vollhardt D., Woelfle P., The superfluid phases of He-3, L.-Taylor and Francis, 1990

8.Фейнман Р., Статистическая механика. – М.: Мир. 1978. – 407 с.

#### **Тема 4. Сверхпроводящая реализация квантового компьютера.**

Прикладная сверхпроводимость. Сильноточная и слаботочная сверхпроводящая электроника. Левитирующий поезд на сверхпроводящей магнитной подушке. Сверхпроводящие моторы и магниты. Сверхпроводящие провода и кабели. Применения в медицине. ЯМР-томография на высокотемпературных сверхпроводниках.

Эффект Джозефсона как мостик между физикой сверхпроводимости и слаботочной сверхпроводящей электроникой. Стационарный и нестационарный эффект Джозефсона. Применение в базах данных современной телефонной связи и в экспериментах по инфракрасному смещению света на спутниках и космических аппаратах.

Сверхпроводящие контакты сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (SIS) и сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник (SNS).

Магнитный поток через сверхпроводящий контур и сверхпроводящий квантовый интерферометр (SQUID). Нелинейный LC-контур. Терагерцовое излучение. «Потенциал стиральной доски» (washboard potential) в сверхпроводящей электронике и сверхпроводящий зарядовый кубит. Различные реализации квантового компьютера.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

Литература:

1. Вихман Э. Квантовая физика. Берклевский курс физики. Том 4. М—Наука, Физматлит, 1977, 410 с., с илл.
2. Фейнман Р., Статистическая механика. – М.: Мир, 1978. – 407 с.
3. Шредингер Э., Лекции по физике, --Ижевск. Научно-издательский центр Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 160 с..
4. Киттель Ч., Введение в физику твёрдого тела / пер. с англ. – М.: Наука, 1978. .
5. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. – М.: Наука, 1987. – 520с.
6. Каган М.Ю., Ожаровский А.В., Введение в теорию высокотемпературных сверхпроводников. – М.: МИФИ, 1998. – 61 с.
7. Devoret M.H., Wallraff A., Martins J.M., Superconducting Qubits. A short review. Arxiv cond-mat / 04 111 74, 7 November 2004, Devoret M.H., Scholkopf R. J., Nature, N406, p.1039, 2002
8. Mooij J.E., Nazarov Yu.V., Superconducting nanowires as quantum phase-slips junctions, Nature Physics, N2, p.169-172, 2006

#### **Тема 5. Проблема измерений и парадоксы в квантовой механике.**

Разрушающие и неразрушающие измерения в квантовой механике. Эффект Зеемана. Прецессия спина во внешнем магнитном поле. Ядерный и электронный магнитный резонанс. Фотоны и квантовая оптика. Многофотонные запутанные состояния. Парадоксы квантовой механики. Парадокс Эйнштейна, Подольского, Розена. Парадокс Шредингеровского кота. Квантовая телепортация. Многокубитная, максимально запутанная волновая функция Шредингеровского кота в квантовых алгоритмах. Базисные функции и неравенства Белла.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

Литература:

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
2. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
3. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
4. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. –М.Постмаркет,2002, 376 с.
5. Китаев А., Шень А., Вялый М., Классические и квантовые вычисления. – М.: Издательство Московского центра непрерывного математического образования, 1999, 192 с.
6. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya. Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.

7. Schroedinger E., Naturwissenschaften, v.23, p.807-812, 1935

9. Einstein A., Podolsky A, Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered complete? Phys. Rev., v.47, p.777-780, 1935, Bohr N., Phys. Rev., v.48, p.676-702, 1935

### **Тема 6. Возможные пути создания квантовых компьютеров**

Твердотельные реализации квантовых битов. Магнитная и полупроводниковая реализации. Слоистых МОП (металл-оксид-полупроводник) структуры. Квантовые точки и квантовые ямы.

Коллективные возбуждения в слоистых системах. Плазмоны, экситоны и поляритоны.

Фотонная реализация квантовых битов. Линейная и нелинейная оптика. Нелинейные оптические кристаллы. Когерентные состояния. Интерференция световых лучей. Оптические интерферометры, зеркала и устройства для сдвига фазы световой волны. Двухфотонные и многофотонные процессы. Различные оптические источники и детекторы запутанных фотонов.

Сохранение корреляций и телепортация перепутывания. Ограничения на практическую реализацию квантового компьютера. Отношение сигнал/ шум. Белый и дробовой шум. Спектр  $1/f$ -шума. Предел белого шума. Стандартный квантовый предел. Фундаментальный Гейзенберговский предел точности измерений. Квантовое сжатие. Квантовые стратегии и квантовая коррекция ошибок при вычислениях. Квантовая память. Квантовый обман и квантовое преимущество. Время потери квантовой когерентности. Взаимодействие с термостатом и колебаниями решётки (фононами). Различные источники декогерентизации. Переход к квантовому хаосу в квантовых алгоритмах.

(2 часа лекций) Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

#### Литература

1. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.

2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.

3. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000

4. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000

5. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. –М.Постмаркет,2002, 376 с.

6. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. и др., Квантовая информатика и квантовый компьютер, Учебное пособие, факультет ВМК, МГУ им. Ломоносова, 59 с.

7. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005

8. Chaplik A.V., Vitilina R.Z., Superlattices and microstructures, N33, p.263, 2003,

9. Chaplik A.V., Berman G.P., Arxiv cond-mat /05072507, 2005



## **Тема 7. Реализация квантового компьютера на нейтральных атомах и ионах в ловушках**

Ультрахолодные нейтральные атомы и ионы в магнитных и оптических ловушках. Квантово-усиленные эталоны измерений. Трёхуровневый атомный кубит и запутывание на атомных частицах в ловушках. Атомные часы. Применение в навигации (синхронизация часов для системы ГЛОНАСС) и для квантовой метрологии. Строение и дизайн магнитных и дипольных ловушек. Методы лазерного и испарительного охлаждения. Фазовая когерентность и явление Бозе-эйнштейновской конденсации в ультрахолодных квантовых газах. Резонанс Фешбаха. Кроссовер между локальными и куперовскими парами в ультрахолодных ферми-газах в магнитных ловушках. Ионные ловушки и оптические полости. Ионные и оптические кристаллы. Квантовая электроника в резонансных электродинамических полостях и волноводах.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

### Литература

1. Lee S.N., Webster C.H., Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
3. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
4. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
5. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. –М.Постмаркет, 2002, 376 с.
6. Peters A., Chung K.Y., Chu S., High precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia, v.38, p.25-31, 2001
7. Lee S.N., Webster C.H., Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005
8. Каган М.Ю., Физика макроскопических квантовых систем, Курс лекций, прочитанный на Первой высшей школе физики гос. корпорации Росатом, Снежинск, 2012, М.-Издательский дом МЭИ, 2014, 345 с.

## **Тема 8. Основы нанопластики и наноэлектроники. Мезоскопика и локализация.**

Макроскопические и мезоскопические системы. Нанокластеры. Характерные размеры в нанопластике. Сканирующий туннельный микроскоп и детальное изучение поверхности кристалла с атомным разрешением. Остаточное сопротивление при рассеянии электрона на примеси. Интерференционные эффекты и усреднение по примесному ансамблю в физике локализации. Квантовый эффект Холла. Минимальная проводимость и квантовый кондактанс. Эпитаксиальное напыление тонких плёнок (метод МВА - molecular beam epitaxy). Нанесение наноразмерных бороздок и рисок на поверхность. Тонкие проволоки и висеры. Методы литографии. Наномеханика и нанотрение. Графен и нанотрубки. Квантовые приборы наземного и космического базирования. Основы современной микроэлектроники.

Гетероструктуры и квантовые ямы. P-n переходы и инверсные слои. Светодиодные устройства. Многослойные сандвичевые системы с чередующимися слоями двумерного электронного газа и диэлектрическими слоями. Туннельные контакты. Одноэлектронное туннелирование и кулоновская блокада.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

Литература

1. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya. Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
3. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
4. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
5. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. –М.Постмаркет,2002, 376 с.
6. Имри Й., Введение в мезоскопическую физику. М.- Физматлит, 2012, 304 с..
7. Ашкрофт Н., Мермин Н., физика твёрдого тела. М.-Мир, 1979
8. Мотт Н.Ф., Дэвис Э.А., Электронные процессы в некристаллических веществах. М.- Наука, 1974

### **Тема 9. Спинтроника и основные принципы магнитозаписи**

Эффект колоссального, туннельного и гигантского магнитосопротивления. Туннельные мостики. Магнитные многослойки с чередующимися слоями ферромагнитного металла и антиферромагнитного металла или диэлектрика. Управление спиновым током. Магнитозапись и спинтроника. Наноразмерное расслоение на фазы в магнитных оксидах (манганиты, никелаты, кобальтиты). Ферромагнитные металлические капли в диэлектрической антиферромагнитной или зарядово-упорядоченной матрице. Спин-зависимый транспорт, туннельное магнетосопротивление и спектр  $1/f$ -шума в фазово-расслоенных манганитах. Большие магнитные молекулы. Построение квантовых битов на магнитных молекулах. Магнитная мезоскопика. Резонансное туннелирование. Петля гистерезиса и спиновая релаксация. Время декогерентности для магнитных молекул. Магнитная анизотропия типа лёгкая ось или лёгкая плоскость. Молекулярная бистабильность магнитных молекул и квантовая память.

(2 часа лекций)

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (2 часа).

Литература

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск. – Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 352 с.
2. Валиев К.А. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Обзорный доклад. вестник Российской академии наук, т.70, N8, с.688-695, 2000
3. Звездин А.К. Магнитные молекулы и квантовая механика. Обзорный доклад. Природа N12, 2000
4. Баумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А., Физика квантовой информации. – М. Постмаркет, 2002, 376 с.
5. Китаев А., Шень А., Вялый М., Классические и квантовые вычисления. – М.: Издательство Московского центра непрерывного математического образования, 1999, 192 с.
6. Lee S.N., Webster C.H, Sinclair A.G., Tzalenchuk A.Ya., Applications of quantum entanglement in metrology, report of the National Physical Laboratory (NPL, Teddington, UK), October 2005.
7. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. и др., Квантовая информатика и квантовый компьютер, Учебное пособие, факультет ВМК, МГУ им. Ломоносова, 59 с.
8. Kagan M.Yu., Modern Trends in Superconductivity and Superfluidity. Lecture notes in Physics, v.874, Springer Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 2013, 550 pages

## Образовательные технологии

Лекции проходят в аудитории, оборудованной проектором или программой Teacher. Занятия проходят в форме лекций.

Для достижения хороших результатов при изучении дисциплины студентам необходимо самостоятельно дома выполнять задания, выданные преподавателем, а также разбирать материалы лекций или соответствующие темы в рекомендованных учебниках.