

МЕТОДЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

Программа спецкурса
Лектор – профессор В.П. МИТРОФАНОВ
V курс, 10-й семестр (32 час)

В курсе рассматриваются устройства и методы измерений различных физических величин, основанные на эффектах, имеющих принципиально квантовую природу, и относящихся как к макроскопическим объектам, так и отдельным атомам и молекулам. Их применение позволяет значительно улучшить метрологическую точность и разрешение в физических экспериментах и технических приложениях. Эти устройства условно разделены на несколько групп. К ним относятся различные устройства, основанные на туннельном эффекте, основанные на квантовых эффектах в сверхпроводниках; измерительные системы, оперирующие с единичными атомами и ионами, удерживаемыми в ловушках, одноэлектронные устройства и мазерные системы, в том числе на отдельных атомах. Специальное внимание уделяется рассмотрению физической сущности и анализу квантовых явлений, лежащих в основе этих измерительных систем.

Туннельный эффект и его применение в измерительных системах. Туннелирование электронов через изолятор между металлами. Туннельный магниторезистивный эффект. Туннельный преобразователь перемещений. Его обратное динамическое и флуктуационное влияние. Стандартный квантовый предел чувствительности в измерениях с туннельным преобразователем.

Туннельная микроскопия. Принцип действия и устройство сканирующего туннельного микроскопа. Атомно-силовой микроскоп и его использование в физических исследованиях. Зондовая микроскопия, и ее применение в экспериментальной физике и технике

Туннелирование в мезоскопических и наноскопических структурах. Эффект кулоновской блокады электронного туннелирования. Квантовый стандарт тока. Одноэлектронный транзистор-электрометр с субэлектронной чувствительностью.

Явление сверхпроводимости и его описание. Сверхпроводники первого и второго рода. ВТСП. Электродинамика сверхпроводников. Волновая функция сверхпроводящего конденсата. Уравнение Лондонов. Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Квантование магнитного потока в сверхпроводниках. Сверхпроводящие резонаторы в измерительных системах.

Туннельные явления в переходах, образованных сверхпроводниками. Эффекты Джозефсона. Резистивная модель джозефсоновского перехода. Явления квантовой интерференции в сверхпроводниках.

Квантовая магнитометрия. Принцип работы и схемы включения сквидов. Шумы сквида и его предельная чувствительность. Использование сквидов для измерения малых токов и напряжений. Джозефсоновские зарядовые и фазовые кубиты.

Спектроскопия одиночных атомов и молекул. Ловушки для атомов и ионов. Ловушки Пауля и Пеннинга. Магнитные ловушки. Охлаждение атомов радиационным давлением лазерного излучения. Предельная температура охлаждения. Магнито-оптические ловушки. Бозе-Эйнштейновская конденсация.

Молекула аммиака как пример двухуровневой системы. Стационарные состояния. Молекула аммиака в статическом электрическом поле. Разделение состояний. Взаимодействие молекул с электромагнитным полем. Частота Раби. Аммиачный мазер.

Мазер как усилитель. Мазер как генератор высокостабильных электромагнитных колебаний. Факторы, определяющие нестабильность частоты лазера. Ширина линии генерации. Водородный мазер. Цезиевые стандарты частоты.

Ридберговские состояния атомов. Мазер на одном атоме. Генерация неклассических состояний электромагнитного поля. Эффекты квантовой электродинамики в резонаторах электромагнитных колебаний.

Система единиц СИ и эталоны основных физических величин. Измерение постоянной Планка с помощью эффекта Джозефсона и квантового эффекта Холла. Эталон килограмма, основанный на квантовых эффектах. Перспективы создания «полностью квантовой» системы СИ.

Планковские единицы основных физических величин. Соотношения единиц Стони и Планка. Вселенная в планковских единицах. Роль планковских единиц в современной физике.

Основная литература

1. *Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., Физматлит, 2001.
2. *Braginsky V.B., Vorontsov Yu.I., Thorne K.S.* Quantum Nondemolition Measurements Science, 209, p. 547, 1980.
3. *Володин А.П.* Новое в сканирующей микроскопии. ПТЭ, № 6, 3, 1998.
4. *Лифшиц Е.М. и Питаевский Л.П.* Статистическая физика, часть 2. М. Физматлит, 2001.
5. *Введенский В.Л., Ожогин В.И.* Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. М., Наука, 1986.
6. *Клышко Д.Н.* Физические основы квантовой электроники. М., Наука, 1986.
7. *Пинпард А.* Физика колебаний, квантово-механические системы. М., Высшая школа, 1986.
8. *Скалли М.О., Зубайри М.С.* Квантовая оптика, Физматлит, 2003.
9. *Вальтер Г.* Одноатомный мазер и другие эксперименты квантовой электродинамики резонаторов, УФН, **166**, 777, 1996.
10. *Багаев С.Н., Чеботаев В.П.* Лазерные стандарты частоты, УФН, **148**, 143, 1986.
11. *Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2009.

Дополнительная литература

1. *Зоммерфельд А.* Электронная теория металлов. М., Л., 1938.
2. *Chappert C, Fert A., Nguyen Van Dau F.* The emergence of spin electronics in data storage // Nature Publishing Group, 2007, p.813-823.

3. *Ileda S. et al.* Tunnel magnetoresistance of 604% of 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature // *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93, 082508.
4. *Митрофанов В.П., Якимов В.Н.* Стандартный квантовый предел при измерении малых сил с использованием туннельного датчика // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физика, астрономия.* **30** (4), с. 36, 1989.
5. *Presilla C., Onofrio R., Bosko M.F.* Uncertainty-principal noise in vacuum-tunneling transducer // *Phys. Rev. B* 1992, V.45, P. 3735.
6. *Averin D.V. and Likharev K.K.* Coulomb blockade of tunneling, and coherent oscillations in small tunnel junctions // *J. Low Temp. Phys.*, 1986, v. 62, pp. 345-372,
7. *Hartwig W.H.* Superconducting resonators and devices // *Proc. IEEE* 1973, v.61, p. 58-69.
8. *Hofheinz M. et al.* Synthesizing arbitrary quantum states in a superconducting resonator // *Nature*, v.459, p. 546-549.
9. *Watanabe T., Watanabe S., Ikeda T. et al.* Design of highly-sensitive current monitor with HTS squid and HTS magnetic shield // *Proceedings of EPAC 2002, Paris, France*, p. 1995-1997.
10. *Maklin Yu., Schon G., Shirman A.* Quantum – state engineering with Josephson-junction devices // *Rev. Mod. Phys.*, 2001, V. 73, P.357 - 400.
11. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэнлс М.* Фейнмановские лекции по физике: Пер.с англ. Т. 6, Электродинамика. М.: Мир. 344 с.
12. *Quinn T.J.* Base Units of the Système International d'Unitès, their Accuracy, Dissemination and International Traceability // *Metrologia.* 1994/1995. V. 31. P. 515-527.
13. *Paul W.* Electromagnetic traps for charged and neutral particles // *Rev. Mod. Phys.* 1990, v. 62, № 3, p. 531-540.
14. *Brown L. S., Gabrielse G.* Geonium theory: Physics of single electron or ion in a Penning trap.// *Rev. Mod. Phys.* 1986. V.58, P. 233.
15. *Cohen-Tannoudji C.N.* Manipulating atoms with photons // *Rev. Mod. Phys.*, 1998. v. 70, p. 707,
16. *Cornell E.A., Wieman C.E.* Nobel Lecture: Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments // *Rev. Mod. Phys.* 2002, v. 74, № 3, p.875
17. *Фон Клитцинг К.* Квантовый эффект Холла: Нобелевские лекции по физике –1985 г. // *УФН* 1986, Т. 150. Вып. 1, С. 107-126.
18. *Keller M.W.* Current status of the quantum metrology triangle // *Metrologia*, 2008, v. 45, p. 102-109.
19. *Williams E.R. Steiner R.L., Newell D.B. and Olsen P.T.* Accurate Measurement of the Planck Constant // *Phys. Rev. Lett.*, 1998, v.81, p. 2404-2407.
20. *Mohr P.J.* Defining units in the quantum based SI // *Metrologia*, 2008, v. 45, p. 129-133.