

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С МАЛОЙ ДИССИПАЦИЕЙ

Программа спецкурса

Лектор – профессор В.П. Митрофанов
V курс, 9 семестр (36 час.)

Целью курса является изучение механических, электромагнитных и оптических, колебательных систем с точки зрения достижения максимальной добротности таких систем. Анализируются фундаментальные, принципиально неустранимые механизмы потерь энергии в них, а также механизмы, имеющие технический характер. Специальное внимание уделяется изучению физических механизмов диссипации энергии в колебательных наносистемах, как общих для макро- и наносистем, так и специфических, связанных с их малыми размерами. Рассмотрены вопросы технологии изготовления высокодобротных колебательных систем, методики измерения их параметров, их роль и применение в экспериментальной физике и технике, в частности, в прецизионных измерительных системах. Студенты обучаются проведению теоретических расчетов потерь энергии в различных колебательных системах, экспериментальным методам изучения диссипации в таких системах.

Высокоскоростные механические, электромагнитные и оптические колебательные системы. Их роль в фундаментальных и прикладных исследованиях. Наноскопические колебательные системы. Колебательные системы с линейным и нелинейным диссипативным членом. Экспериментальные методы определения добротности колебательной системы.

Наноэлектромеханические системы (НЭМС) на основе полупроводниковых структур, углеродных нанотрубок и графена. Базовая конструкция наномеханического осциллятора. Технология изготовления наномеханических осцилляторов. Структура НЭМС. Резонансные частоты типовых конфигураций НЭМС. Управление резонансной частотой. Границы применимости континуального приближения при расчете резонансных частот НЭМС.

Механизмы потерь энергии в НЭМС. Общее уравнение, связывающее напряжение и деформацию для неупругой среды. Модель стандартного неупругого тела. Термоупругая релаксация как источник неупругости. Вычисление потерь при гармоническом воздействии на неупругое тело. Уравнения Дебая. Угол механических потерь.

Комплексный модуль Юнга. Связь между добротностью осциллятора и тангенсом угла механических потерь материала. Термоупругие потери при изгибных колебаниях стержней. Термоупругие потери в нано-механических осцилляторах.

Диссипация упругой энергии, обусловленная механизмом фонон-фононных взаимодействий. Затухание Ахиезера. Затухание Ландау-Румера. Нелинейность как основной фактор, определяющий фундаментальные процессы диссипации энергии упругих колебаний. Затухание упругих колебаний, обусловленное фонон-электронными взаимодействиями в проводящих материалах

Точечные дефекты в кристаллах и связанные с ними релаксационные процессы. Уравнение Аррениуса для времени релаксации процесса, связанного с движением атомов в кристаллической решетке. Зависимость потерь упругой энергии от температуры.

Диссипация, обусловленная движением дислокаций в твердом теле. Дислокационная релаксация. Амплитудно-независимое и амплитудно-зависимое

внутренне трение. Барьер Пайерлса и его влияние на уровень диссипации энергии упругих колебаний.

Потери в креплении механических колебательных систем. Потери из-за взаимодействия с молекулами газа, окружающего осциллятор. Поверхностные потери как преобладающие в наномеханических осцилляторах. Диссипативные механизмы, связанные с дефектами поверхности и адсорбированными молекулами. Методы уменьшения поверхностных потерь.

Сенсоры и актюаторы для возбуждения механических колебаний НЭМС и их преобразования в электрические сигналы. Обратное динамическое и флуктуационное влияние сенсоров и вносимая ими диссипация. Подавление теплового шума НЭМС посредством нетеплового охлаждения. Квантовое поведение НЭМС. Области применения НЭМС.

Диссипация энергии электромагнитных колебаний в различных резонансных системах. Колебательный контур. Расчет потерь в катушке индуктивности и конденсаторе колебательного контура. Собственная и нагруженная добротность. Радиационные потери.

Объемные металлические резонаторы. Расчет потерь в стенках резонаторов. Поверхностное сопротивление. Сверхпроводящие резонаторы.

Диэлектрические резонаторы. Диэлектрические резонаторы с модами типа шепчущей галереи. Механизмы потерь в диэлектрических резонаторах. Температурная зависимость потерь в кольцевых диэлектрических резонаторах.

Открытые оптические резонаторы, их характеристики. Добротность и резкость оптического резонатора. Дифракционные потери. Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи. Механизмы потерь в оптических микрорезонаторах.

Оптический нанорезонатор ($\lambda = 1,5\mu\text{m}$) на основе двумерного фотонного кристалла из кремния как базовый элемент для анализа диссипации в оптических нанорезонаторах. Технология изготовления. Механизмы потерь в оптических нанорезонаторах. Области применения оптических микро- и нанорезонаторов.