

УДК 535.8

КВАНТОВЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СЕНСОР НА СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ

Баженов А.Ю. Университет ИТМО

Научный руководитель – д.ф.-м.н., Алоджанц А.П.

Университет ИТМО

В данной работе изучается сверхизлучательный фазовый переход и его применение в квантовой температурной сенсорике высокой точности. Температурная чувствительность и температурная точность анализируются в рамках квантовой теории оценки. Предсказано масштабирование для стандартного квантового предела, вплоть до предела Гейзенберга для оценки температуры. Было показано, что с помощью фазового перехода можно достичь оценки точности температуры вплоть до мК и выше, при этом доступные в настоящее время узкополосные полупроводниковые микроструктуры размещаются в микрорезонаторах с высокой добротностью.

Введение. Система N двухуровневых атомов, взаимодействующих с квантовым полем (или резервуаром бозонной системы), называется модель Дике и применяется в теории сверхизлучения. Данные системы применяются в области квантовой сенсорике и квантовой метрологии. В этой области используются особенности квантовых систем для выполнения измерений определенной точности. На фундаментальном уровне температурная сенсорика основана на исследовании квантовой динамики, связывающая свойства квантовой системы и термодинамические характеристики, налагающие внешним полем (средой). В этой работе рассматривается квантовый фазовый переход для измерения температуры. Кроме того, исследуется сверхизлучательный фазовый переход (SPT) для высокоточной оценки температуры. Сверхизлучательный фазовый переход – это особое коллективное состояние вещества и поля, которое может быть достигнуто с использованием двухуровневых систем, представляющие атомы, или искусственные аналоги взаимодействующих с электромагнитным полем.

Полупроводниковые технологии предлагают особые преимущества при разработке датчиков на основе явления сверхизлучения. Образцы полупроводниковых микроструктур содержат набор квантовых точек (квантовых ям) которые могут быть применимы для получения коллективных состояний квантового вещества и поля. В работе рассматривается так называемая двухуровневая система, взаимодействующая с внешним полем. Таким образом, можно создать термодатчик, основанный на чувствительном взаимодействии двухуровневых систем с внешним полем.

Основная часть. Модель квантового термосенсора рассмотренная в данной работе состоит из N локализованных двухуровневых квантовых систем (КДС) и моды резонатора, представляющая собой подсистему с при некоторой температуре T . Полагаем, что КДС может находиться в основном состоянии $|g\rangle$ и в возбужденном $|e\rangle$. В данной работе рассматривается большой канонический ансамбль и термодинамический подход, чтобы получить выражения для параметра порядка и инверсии системы. Исследование термодинамической функции, для когерентного состояния системы позволяет получить уравнения, связывающие основные параметры двухуровневых системы.

Было предложено два предельных случая, которые соответствуют рабочим точкам для устройства измерения температуры с нулевым значением параметра порядка $\lambda = 0$, где происходит фазовый переход. В частности, при низкой плотности возбуждения, свойства сверхизлучения относятся к конденсированным состояниям экситон-поляритонам и не требуют инверсии в системе. И наоборот, при высокой плотности возбуждения сверхизлучение происходит в системе с инверсией вследствие формирования экситонно-поляритонного состояния комбинационного типа.

Две термодинамические фазы для экситон-поляритонов будут полезны для высокоточных измерений. Для этих целей выберем сверхизлучательное и нормальное состояния. Предположим, что эталонная температура близка, но не равна критической температуре фазового перехода T_c , а также плотность возбуждения близка к безинверсионному состоянию. В этом случае система близка к сверхизлучательному состоянию и возможно выполнить оценку температуры путем подсчета числа фотонов резонатора $N_\lambda = N\lambda^2$ покидающих образец с энергией μ_- , что приводит к тепловому сдвигу $\Delta(T)$. Фазовый тепловой сдвиг исчезает λ^2 с увеличением температуры. Это может быть достигнуто путем нагрева наночастицы, находящейся в образце. Оценка чувствительности квантового термодатчика описана в рамках квантовой теории оценки. Квантовый предел для подсчета данной температуры зависит не только от числа испустившихся фотонов, но и от числа ДКС, как $\Delta T \sim 1/N$, что соответствует пределу Гейзенберга для измерений. Критическая температура T_c варьируется до нескольких Кельвинов для узкополосных полупроводниковых материалов при комнатной температуре. С практической точки зрения удобнее использовать двухмодовую схему взаимодействия двухуровневых квантовых систем со световыми полями для датчика температуры, где первая мода действует как поле накачки, а вторая является (чисто квантовой) модой резонатора.

Выводы. Мы рассматриваем квантовый температурный датчик, основанный на явлении сверхизлучения КДС взаимодействующий с внешним полем. Были получены уравнения характеризующие связь основных термодинамических величин, таких как химический потенциал, параметр порядка, температура и т.д. Измерение температуры осуществляется посредством фазового перехода второго рода в сверхизлучающее состояние для поля резонатора, которое вызывает тепловой фазовый сдвиг.

Важным результатом данной работы является оценка температурной чувствительности, которая определяет погрешность при измерении температуры на сверхизлучательном фазовом переходе. Как было показано, данная оценка может быть улучшена до предела Гейзенберга. Численные оценки погрешности температуры, подтверждают тот факт, что параметр порядка чувствителен к температуре и может использоваться для точного измерения температур. В пределе малой плотности возбуждения происходит фазовый переход с экситон-поляритонами поэтому становится возможным достигнуть точности измерения температуры вплоть до мК и выше, что будет полезно для сверхточных измерений. Улучшение этого предела требует неклассических состояний поля материи.

Баженов А.Ю.

Подпись

Алоджанц А.П.

Подпись