

Таблица результатов эксперимента

N	Масса груза, кг	Диаметр струны, м	Контактная длина струны, м	Давление, атм	Расчетная температура плавления льда, К
1	12	0,0005	0,035	66,32	272,65

Расчетное значение температуры плавления льда получилось 272,65 К, что на 0,5 К меньше, чем температура плавления при атмосферном давлении.

Таким образом, лед под струной начинает плавиться при температуре, которая немного ниже, чем 0°C, а после прохождения струны, когда давление возвращается к атмосферному значению, снова замерзает. Едва видимая плоскость в слое льда над струной возникает вследствие того, что при замерзании воды над струной во льду образуются дефекты, которые меняют показатель преломления и делают этот слой видимым под определенными углами наблюдения.

В результате эксперимента был подтвержден тот факт, что температура плавления вещества не является постоянной величиной, она зависит от внешнего давления, оказываемого на вещество. Фазовый переход первого рода может осуществляться не только за счет передачи теплоты, но и под внешним силовым воздействием. Величина внешнего давления для тел с отрицательной разницей удельных объемов твердой и жидкой фаз определяет температуру плавления вещества в сторону ее понижения.

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов // 11-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 560 с.

УДК 539.184

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ

Балаш Н. Г., Рокало Д. И.

Научный руководитель – Маркова Л.В., д.т.н.

Использование квантовых компьютеров в повседневной жизни является перспективной областью науки и техники. Квантовый компьютер в отличие от обычного оперирует не битами, принимающими значение 0 или 1, а кубитами, имеющими значения одновременно и 0, и 1. Это позволяет

одновременно обрабатывать все возможные состояния, достигая существенного преимущества над обычными компьютерами в ряде алгоритмов. Однако для достижения высокой точности и надежности вычислений квантовые компьютеры требуют специфических условий работы. В частности, для обеспечения стабильности кубитов необходимо поддерживать их температуру близкой к абсолютному нулю. По мере роста интереса к квантовым компьютерам растет актуальность создания эффективных методов их охлаждения [1, 2].

В настоящее время для охлаждения квантового компьютера применяются методы гелийного, магнитного охлаждения, а также методы лазерного охлаждения.

Гелийное охлаждение основано на использовании гелия в качестве хладагента, который обладает высокой теплопроводностью. Гелий способен переносить тепло от одной части системы к другой, тем самым снижая ее температуру. Недостатками такого метода является высокая стоимость используемого изотопа гелия-3, а также опасность просачивания гелия через уплотнители, что может привести к снижению эффективности охлаждения.

Магнитное охлаждение базируется на магнитно-тепловом эффекте, заключающимся в том, что в процессе намагничивания среды происходит выравнивание магнитных моментов и соответствующее выделение тепла; в процессе же размагничивания температура среды снижается. Недостатками этого метода является высокая стоимость установки и высокие требования к соблюдению технологических параметров в ходе магнитного охлаждения для исключения перегрева кубитов.

Перспективным направлением решения данных проблем является создание лазерных методов охлаждения, основанных на том, что атомы, поглощая фотоны лазерного излучения, теряют кинетическую энергию и, соответственно, снижают свою температуру. Для квантовых компьютеров наиболее эффективным методом является лазерное доплеровское охлаждение. Механизм доплеровского охлаждения состоит в следующем. Пусть атом представляет собой двухуровневую систему с возможными энергетическими уровнями E_1 и E_2 ($E_1 < E_2$) и резонансной частотой перехода между этими уровнями ν_{21} , причём $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ (рис. 1a). На атом воздействуют лазерным излучением с частотой ν_ϕ , которая немного меньше частоты ν_{21} . Для атома, движущегося с некоторой скоростью (с импульсом p_A) навстречу фотону $h\nu_\phi$ (с импульсом p_ϕ), излучение испытывает доплеровское смещение с увеличением частоты фотона ν_ϕ' до резонансной

частоты ν_{21} , вследствие чего фотоны поглощаются атомом и атом переходит в возбужденное состояние.

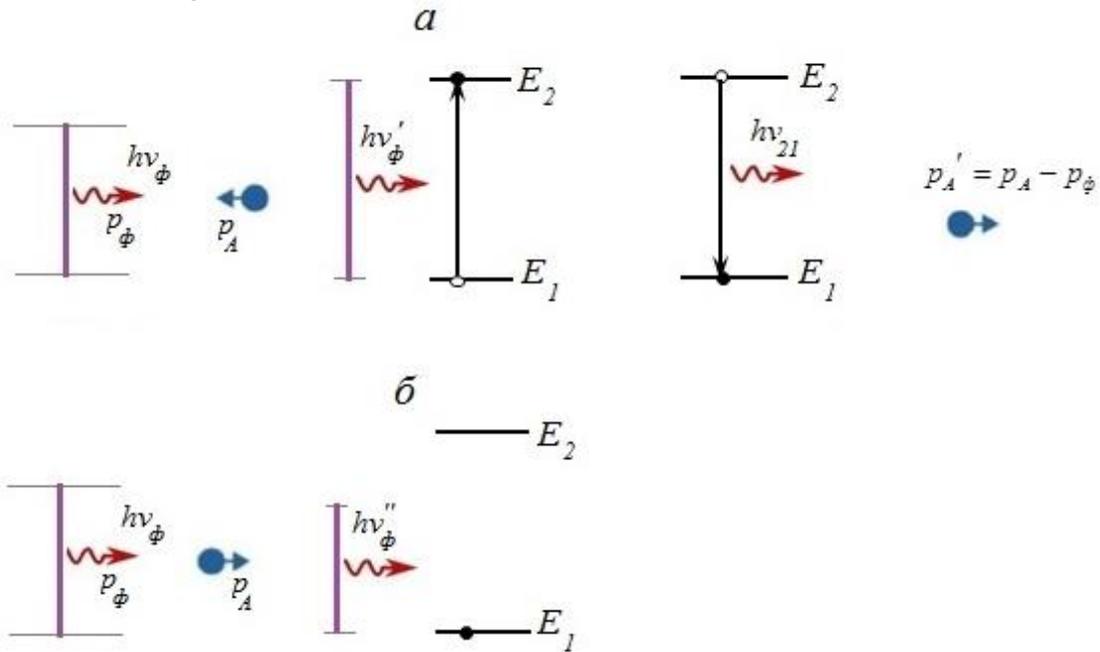


Рис 1. Схема доплеровского охлаждения: а – движение атома навстречу лазерному излучению; б – движение атома в направлении лазерного излучения

Возбуждённый атом в результате спонтанного перехода вернётся в основное состояние с испусканием фотона $h\nu_{21}$, энергия которого больше поглощенного фотона лазерного излучения $h\nu_\phi$. При этом импульс атома p'_A уменьшится на величину импульса фотона лазерного излучения согласно закону сохранения импульса: $p'_A = p_A - p_\phi$. Т.е. атом замедлится, его энергия теплового движения уменьшится, что приведет к охлаждению. Если же атом движется по направлению лазерного луча, то для него лазерное излучение испытывает доплеровское смещение с уменьшением частоты фотонов до ν_ϕ'' , ещё больше отдаляя её от резонансной, и поглощение фотона не произойдёт (рис.1б).

Процесс охлаждения не может продолжаться бесконечно, а имеет два принципиальных ограничения. Во-первых, когда атом спонтанно излучает фотон, он сам испытывает отдачу и по-прежнему обладает некоторой кинетической энергией. Никак невозможно охладить атом до температуры, меньшей «температуры отдачи», соответствующей этой энергии. Второе ограничение обусловлено тем, что если температура атомов меньше температуры, соответствующей ширине перехода, то исчезает разница

между атомами, движущимися вдоль и против лазерного излучения, – все они либо поглощают, либо не поглощают фотоны, и принцип охлаждения перестает действовать. Этот второй предел называется доплеровским. Он гораздо выше предела отдачи и составляет порядка десятков и сотен мкК.

Чтобы охладить атомы до температур ниже доплеровских, используют технологии «суб-доплеровского охлаждения». Одна из таких технологий реализована в магнитооптической ловушке. Суть её в том, что из-за быстрых изменений поляризации лазерных лучей удается добиться того, что атом по-прежнему поглощает только фотоны, движущиеся навстречу, даже когда его температура ниже доплеровской. Охлаждение с помощью магнитооптической ловушки успешно применялось для отдельных атомов, охлаждение же молекул осложняется более сложной структурой их энергетических уровней. Авторам статьи [3] впервые удалось решить эту задачу, охладив молекулы СаF до температур порядка 50 мкК, в то время как доплеровский предел был для них около 200 мкК. Это исследование открывает новые перспективы в охлаждении молекул, что может иметь важное практическое значение для разработки квантовых компьютеров.

Дальнейшее совершенствование лазерных методов охлаждения ускорит развитие базы квантовых компьютеров, повышение стабильности и надежности их работы.

Литература

1. Бетеров И. И. Квантовые компьютеры и ультрахолодные атомы / И.И. Бетеров // Природа. – 2023. – № 4 (1292). – С. 3–13.
2. Квантовые вычисления на основе одиночных ультрахолодных атомов в оптических ловушках / И. И. Рябцев [и др.] // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 5. – С. 72–80.
3. Laser cooling of optically trapped molecules / L. Anderegg [et al.] // Nature Physics. – 2018. – Vol.14. – P. 890-893.