

Экспресс-метод определения температуры газа в магнито-оптических ловушках

© А.А. Калинин, Е.Н. Борисов, А.В. Поволоцкий, Т.Ю. Иванова, Д.А. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ivanov-den@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 14 января 2016 г.)

Рассмотрен простой метод оценки температуры газа в магнитооптической ловушке (МОЛ), основанный на перекрытии лишь одного из трех лазерных пучков МОЛ. В результате свет, рассеянный атомами из других пучков, позволяет наблюдать разлет атомов в реальном времени без дополнительных источников лазерного излучения. Проведенный эксперимент и последующая обработка показали убедительное согласие результатов измерения и теоретических оценок. Метод может быть полезен для быстрого анализа режима работы МОЛ, не требующего высокой точности.

Подавляющее большинство экспериментов с ультра-холодными газами начинаются с приготовления предварительно охлажденного ансамбля атомов в магнитооптической ловушке (МОЛ) [1]. Устройство МОЛ позволяет не только охлаждать частицы до сотен микроКельвин, но и обеспечить их пространственную локализацию вблизи центра ловушки.

Современные технологии позволяют создавать компактные и стабильные в эксплуатации МОЛ с характеристиками, достаточными не только для студенческой лаборатории, но и для современных спектроскопических и даже некоторых атомно-механических экспериментов. К таким МОЛ относится используемая в настоящей работе и собранная на основе miniMOT фирмы ColdQuanta установка.

Одной из основных характеристик МОЛ является достигаемая там предельная температура газа, которая определяется множеством факторов, в их числе отстройка частоты рабочего лазера от частоты атомного перехода, интенсивность рабочего лазера, давление фонового газа. Как правило, эта температура оказывается не ниже доплеровского предела [2]. Имеют место различные режимы работы МОЛ. Например, при повышении плотности охлаждаемого газа существенным становится эффект поглощения излученного в ансамбле фотона другим атомом того же ансамбля [3], что повышает температуру газа. Работает ли МОЛ именно в таком режиме или перепоглощением можно пренебречь заранее сказать сложно из-за совместного влияния множества не точно известных факторов. Таким образом, теоретическая оценка температуры газа в МОЛ не всегда возможна и требуется экспериментальное определение температуры.

Существует ряд методов измерения температуры ультра-холодных ансамблей, среди которых наиболее часто применяются метод времени пролета [4] и метод „освобождение–захват“ [6]. Каноническая реализация этих методов позволяет получить точные значения температуры, но требует дополнительного оборудования, интегрированного в установку, — лазеров подсветки и электронных систем синхронизации.

Мы предлагаем простой аналог метода времени пролета, который не требует сложного дополнительного оборудования и легко интегрируется в установку. Суть метода состоит в перекрытии лазерных пучков МОЛ лишь вдоль одного из пространственных направлений. В результате ни потенциальная, ни диссипативная силы МОЛ не будут действовать вдоль этого направления и будет наблюдаться свободный разлет. При этом свет поперечных пучков будет продолжать рассеиваться и может быть зарегистрирован. Тем самым имеется возможность наблюдать разлет атомного облака в одном измерении и по скорости разлета определить начальную температуру.

Стоит отметить, что предлагаемый метод заведомо менее точен, чем стандартный метод времени пролета, в котором выключается все лазерное излучение и магнитное поле, а для получения изображения разлетающегося облака используется дополнительный резонансный лазер подсветки. Тем не менее, как будет показано ниже, в области параметров, где возможны теоретические оценки, полученное в эксперименте значение температуры хорошо согласуется с этими оценками.

Исследуемая МОЛ включает в себя ячейку с атомами рубидия (смесь ^{85}Rb и ^{87}Rb), помещенную в магнитное поле, создаваемое парой катушек (coil на рис. 1) с противоположно направленными токами, так что в центре ловушки магнитное поле равно нулю. В эксперименте градиент магнитного поля в центре ловушки 2.4 G/cm. В трех взаимно перпендикулярных направлениях ячейка облучается встречными лазерными пучками с противоположной круговой поляризацией. Для простоты на рисунке показано одно пространственное направление (вертикальное), вдоль которого производилось перекрытие пучка.

Лазерный пучок перекрывался с помощью механического затвора (shutter), помещенного в область общего фокуса конфокальной системы линз. В результате время срабатывания затвора (время полного перекрытия пучка) составляло около 1 ms. Свет горизонтальных пучков, рассеянный атомами в ходе эксперимента, детектировал-

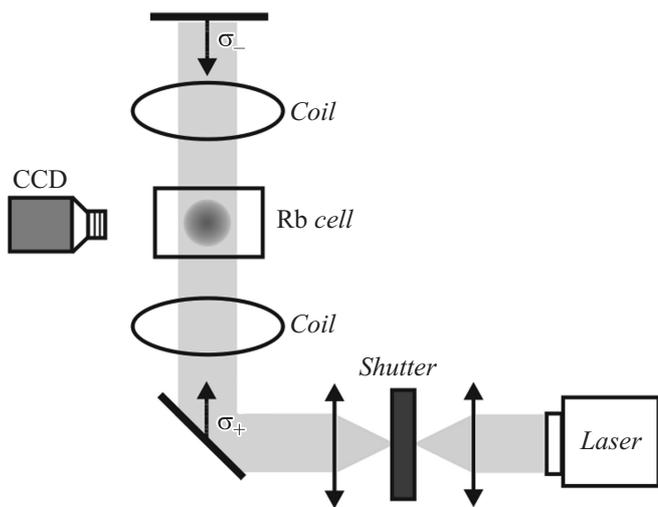


Рис. 1. Схема эксперимента.

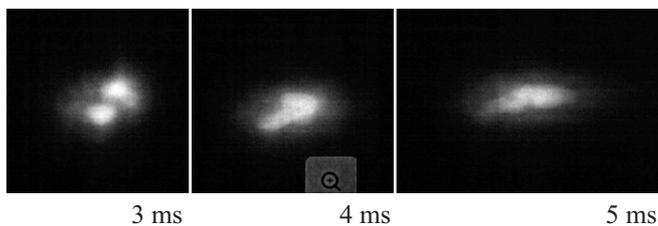


Рис. 2. Изображение атомного облака, полученное с помощью CCD-камеры, для трех последовательных моментов времени после выключения охлаждающего лазерного поля (слева направо 3, 4 и 5 ms).

ся с помощью скоростной камеры (CCD на рис. 1) с временным разрешением 1 ms.

В силу линейной пространственной зависимости возвращающей силы в МОЛ [6] пространственное распределение плотности атомов в облаке может быть описано гауссовой функцией $n(z) = n_0 \exp(-z^2/R_0^2)$, где R_0 — начальный радиус облака, определяемый на уровне $1/e$. В процессе баллистического разлета форма распределения остается гауссовой, а радиус меняется со временем по закону

$$R^2 = R_0^2 + (v_0 t)^2, \quad (1)$$

(1) где $v_0 = (2k_B T / m_{Rb})^{1/2}$ — наиболее вероятная скорость, T — температура газа, k_B — постоянная Больцмана, m_{Rb} — масса атома ^{85}Rb .

Пример полученного изображения атомного облака в МОЛ для 3 моментов времени, 3, 4 и 5 ms после начала разлета, приведен на рис. 2. Полученные таким образом изображения обрабатывались с помощью пакета SciPy для языка программирования Python. Сначала проводилось усреднение изображения по направлению, перпендикулярному направлению разлета, а затем осуществлялось приближение полученного одномерного профиля гауссовой функцией с помощью метода наименьших квадратов. Результатом приближения являлись значения

размера атомного облака $R(t)$ в различные моменты времени. Для получения более достоверного результата была проведена серия измерений при одинаковых условиях.

Эти данные, в свою очередь, использовались для определения параметра v_0 посредством приближения квадратичной функцией (1). Результат приближения и полученные на основе анализа изображений данные с соответствующими погрешностями представлены на рис. 3. Определение температуры из найденного таким образом среднего квадрата скорости v_0 дает следующее значение $T = 590 \pm 20 \mu K$.

При анализе этих данных принималось во внимание, что момент времени начала разлета облака определен лишь с точностью до временного интервала между кадрами — 1 ms. Кроме того, ввиду того, что время перекрытия сравнимо с интервалом между кадрами, начальная точка, соответствующая изображению самого начала разлета, не соответствует баллистическому режиму. Таким образом, эта начальная точка и еще одна были отброшены. Сравнительно медленное время срабатывания механического затвора является наиболее существенным фактором, ограничивающим точность определения температуры.

Теперь сравним полученное значение с теоретической оценкой. Для начала обратим внимание на то, что температура заметно превышает значение доплеровского предела для рубидия. Это связано с выбранным для эксперимента значением отстройки δ частоты рабочего лазера от циклического перехода атома $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5F_{3/2}$ и интенсивностью рабочего лазера. Уравнение, описывающее зависимость температуры МОЛ от параметров, имеет вид

$$T = \frac{\hbar \gamma^2 (1 + S + 4\delta^2 / \gamma^2)}{8k_B \delta}, \quad (2)$$

где $S = I/I_s$ — параметр насыщения, γ — скорость затухания возбужденного уровня, используемого для

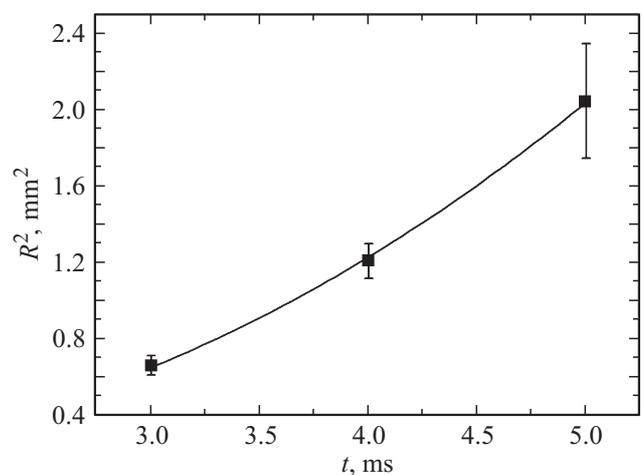


Рис. 3. Квадрат радиуса атомного облака как функция времени. Точки — экспериментальные данные, линия — приближение по формуле (1).

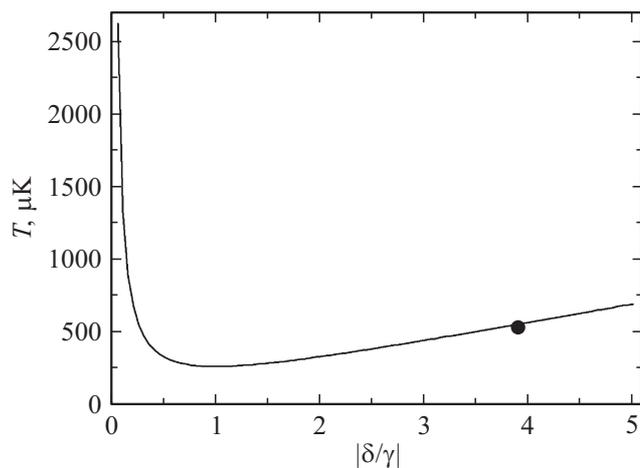


Рис. 4. Зависимость температуры газа от отстройки охлаждающего лазера для ^{85}Rb . Точкой показана отстройка, использованная в эксперименте.

охлаждения. В эксперименте использовались следующие значения параметров: скорость спонтанного распада уровня $5P_{3/2}\gamma = 2\pi \times 5.9 \text{ MHz}$, интенсивность насыщения $I_S = 1.64 \text{ mW/cm}^2$, интенсивность рабочего лазера $I = 4.78 \text{ mW/cm}^2$. Параметр насыщения имеет тогда значение $S = 2.9$. Зависимость температуры МОЛ при этих условиях от величины отстройки в соответствии с выражением (2) представлена на рис. 3.

Выбранная для эксперимента величина отстройки составляет $\delta = -3.9\gamma$, что соответствует 147 MHz . Положение этой частоты на рис. 4 отмечено черной точкой. Видно, что соответствующее данным параметрам значение температуры не является минимальным и составляет $550 \mu\text{K}$. С учетом погрешности данное значение температуры сравнительно неплохо согласуется с экспериментальным значением $T = 590 \pm 20 \mu\text{K}$. Тем не менее присутствует расхождение (порядка 4.5%), которое выходит за рамки случайного отклонения и имеет характер систематической погрешности метода. Основным источником систематической погрешности является сравнительно большое время перекрытия пучка, что несколько нарушает баллистический характер разлета атомов на начальном этапе и ограничивает применимость формулы (1). Однако, учитывая простоту реализации, можно предположить, что метод окажется полезным для предварительного анализа режима работы МОЛ.

В заключение был предложен простой экспресс-метод определения температуры атомов в МОЛ, не требующий интегрирования в экспериментальную установку и связанный с использованием минимального дополнительного оборудования. Эксперимент, проведенный на МОЛ, созданной на базе ячейки miniMOT фирмы ColdQuanta, показал, что метод дает удовлетворительную оценку температуры газа в МОЛ. Этот вывод делается на основании сравнения обработанных экспериментальных данных и теоретических оценок.

Эксперименты выполнены на оборудовании ресурсного центра СПбГУ „Оптические и лазерные методы исследования вещества“.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, грант 11.38.640.2013.

Список литературы

- [1] Raab E.L., Prentiss M., Cable A., Chu S., Pritchard D. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. 2631–2634.
- [2] Миногоин В.Г., Летохов В.С. Давление лазерного излучения на атомы. М.: Наука, 1986.
- [3] Townsend C.G., Edwards N.H., Cooper C.J., Zetie K.P., Foot C.J., Steane A.M., Szriftgiser P., Perrin H., Dalibard J. // Phys. Rev. A 1995. Vol. 52. С. 1423–1440.
- [4] Lett P.D., Watts R.N., Westbrook C.I., Phillips W.D., Gould P.L., Metcalf H.J. // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 61. С. 169–172.
- [5] Chu S., Hollberg L., Bjorkholm J.E., Cable A., Ashkin A. // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. P. 48–51.
- [6] Kowalski K., Cao Long V., Dinh Xuan K., Glodz M., Nguyen Huy B., Szonert J. // Comp. Methods in Science and Technology. 2010. Специальный выпуск (2). P. 115–129.