

РАДИАЦИОННОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ И МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ ПУЧКА АТОМОВ НАТРИЯ ДО 1,5 К ВО ВСТРЕЧНОМ ЛАЗЕРНОМ ЛУЧЕ

*С.В. Андреев, В.И. Балыкин, В.С. Летохов,
В.Г. Миногин*

Экспериментально обнаружена скоростная монохроматизация пучка атомов натрия, замедляемого встречным резонансным лазерным излучением. При эффективной длине замедления 20 см достигнуто сужение продольного скоростного распределения атомного пучка в 19 раз, что соответствует понижению температуры относительного движения атомов до 1,5 К.

В последнее время активно разрабатываются методы лазерного охлаждения ионов [1] и атомов [2]. В экспериментальных исследованиях наибольшие успехи достигнуты при лазерном охлаждении ионов, локализованных в электромагнитных ловушках, для которых достигнута температура 10^{-2} К [3, 4]. Лазерное охлаждение движущихся нейтральных атомов, для которых пока не найдены способы пространственной локализации, является гораздо более сложной задачей.

Первое экспериментальное наблюдение лазерного охлаждения атомов было осуществлено в [5] измерением деформации скоростного распределения в пучке атомов натрия, облучаемом встречным лазерным излучением. В настоящей работе, используя более совершенную экспериментальную технику, мы впервые сообщаем о прямых исследованиях сужения скоростного распределения атомов натрия под действием интенсивного встречного двухчастотного лазерного излучения до температуры 1,5 К и о достижении степени монохроматизации $\mu \approx 19$.

Физической причиной скоростной монохроматизации является резкая резонансная зависимость силы светового давления от скорости, благодаря которой сила эффективно воздействует только на атомы, находящиеся в резонансе с волной (см. обзор [6]). При замедлении теплового атомного пучка предельная скоростная монохроматизация, определяемая отношением ширины начального скоростного распределения к ширине конечного распределения с нулевой средней скоростью, может достигать значений $\mu = (M\bar{v}/\hbar k)^{1/2} \approx 100$ [7, 8]. Это соответствует понижению температуры относительного движения атомов до $T = T_0 / \mu^2 \approx 10^{-4} T_0$, где $\hbar k$ — импульс фотона, M , \bar{v} — масса и средняя начальная скорость атомов.

На рис. 1 приведены основные элементы экспериментальной установки. Аргоновый лазер L_1 накачивал два лазера на красителе непрерывного действия, один из которых L_3 осуществлял замедление атомного пучка, а другой одночастотный сканируемый лазер L_2 (Spectra — Physics, Model 580 A) производил зондирование продольного скоростного распределения атомного пучка. Излучения обоих лазеров вводилось коллинеарно в вакуумную камеру навстречу основному атомному пучку. Наблюдение скоростного распределения атомов осуществлялось по сигналу флуоресценции $\Phi_{1,2}$ от зондирующего лазера. Для того, чтобы сигнал флуоресценции от сильного поля не мешал наблюдению слабого сигнала флуоресценции от пробного поля были приняты меры для отделения сигнала флуоресценции, вызванного зондирующим излучением, от сигнала флуоресценции, вызванного сильным замедляющим излучением. Для этого излучение силового лазера L_3 периодически прерывалось модулятором M_1 со скважностью 1:1 и регистрация флуоресценции от зондирующего излучения производилась только в те моменты времени, когда силовое поле было выключено. Периодическое включение регистрирующей аппаратуры осуществлялось с помощью стробвольтметра. Вспомогательный атомный пучок, который распространялся перпендикулярно лазерному лучу, служил для частотной калибровки сигнала флуоресценции от зондирующего излучения. Частота излучения силового лазера настраивалась по максимуму флуоресценции в пределах доплеровского контура перехода $3S_{1/2} - 3P_{3/2}$ ($\lambda = 5896 \text{ \AA}$).

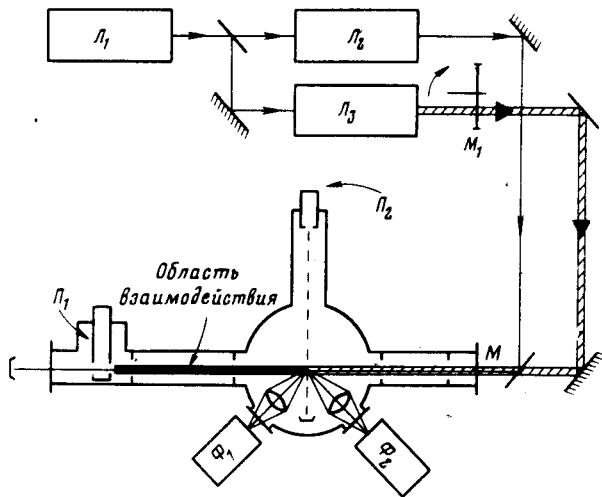


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (закрашена область взаимодействия интенсивного встречного луча с атомами в пучке): L_1 — аргонный лазер, L_2 — зондирующий лазер, L_3 — двухчастотный силовой лазер, Π_1, Π_2 — соответственно, источники параллельного и перпендикулярного атомных пучков, Φ_1, Φ_2 — фотоумножители, M_1 — механический прерыватель, M — полупрозрачное зеркало

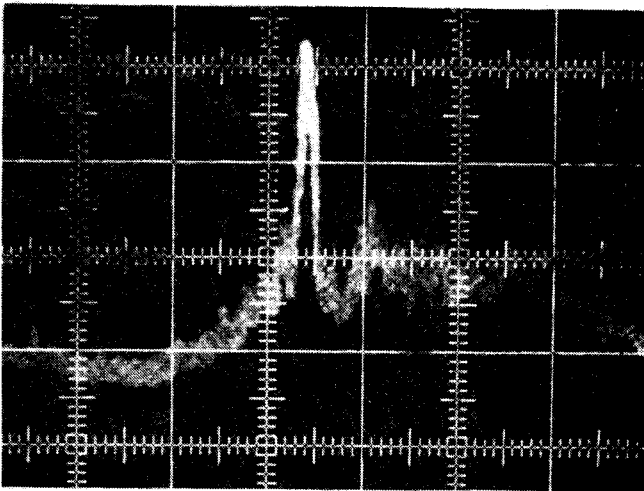


Рис. 2. Экспериментальный профиль скоростного распределения (а) и расчетная зависимость (б) деформации скоростного распределения $W(v)$ пучка атомов натрия. Пунктирная кривая представляет профиль начального распределения при температуре 573 К. Одно деление на рис. 2 (а) соответствует 420 МГц

Поскольку основное состояние атома натрия расщеплено на два подуровня сверхтонкой структуры с расстоянием между ними $\Delta\nu = 1772$ МГц, то для обеспечения цикличности взаимодействия атомов с излучением была осуществлена генерация лазера L_3 одновременно на двух частотах с расстоянием между ними 1770 МГц. Такой режим генерации достигался использованием трех эталонов Фабри — Перо внутри резонатора лазера для предварительного сужения спектра, выбором длины резонатора и подбором расстояния от струи красителя до "глухого" зеркала резонатора так, чтобы минимизировать конкуренцию между

парами аксиальных мод, расстояние между которыми равно 1772 МГц [9]. Частота зондирующего лазера сканировалась вдоль доплеровского контура перехода $3S_{1/2} - 3P_{3/2}$. Плавность сканирования частоты лазера контролировалась как по флуоресценции в парах натрия, так и по флуоресценции атомного пучка в отсутствие сильного поля.

Температура источника параллельного атомного пучка равнялась 300°C . Вакуумная камера откачивалась до давления $(3+5)\cdot 10^{-6}$ тор. Диаметр сильного лазерного луча вблизи выходного отверстия источника атомов равнялся $d_c^0 = 1,1$ мм, в области регистрации $d_c'' = 1,3$ мм; соответственно, диаметры зондирующего луча равнялись $d_3^0 = 0,65$ мм; $d_3'' = 0,6$ мм. Геометрическая длина области взаимодействия составляла 40 см.

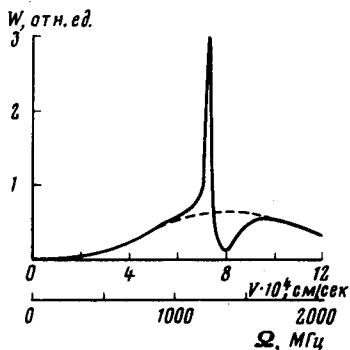


Рис. 2,б (см. подпись к рис. 2).

На рис. 2,а приведена осциллограмма сигнала флуоресценции от зондирующего излучения при сканировании его частоты вдоль деформированного сильным лазерным излучением контура скоростного распределения. Осциллограмма ясно показывает сужение продольного скоростного распределения атомов в области, меньшей резонансной скорости. Следует особо подчеркнуть, что поскольку регистрация флуоресценции производится только в моменты времени, когда сильное поле отсутствует (перекрывается модулятором M_1), то характерные провал и пик на контуре не могут быть вызваны совместным действием (например, совпадением частот в некоторые моменты времени) обоих лазерных лучей. Для приведенной на рис. 2,а осциллограммы мощность излучения силового лазера в обоих модах составляет величину 12 мВт, мощность излучения зондирующего лазера 0,1 мВт, а диаметры лучей 1,3 и 0,6 мм, соответственно.

Ширина пика распределения составляет 70 МГц (в единицах скорости — $4,1\cdot 10^3$ см/сек), что при начальной температуре пучка в 573 К соответствует степени монохроматичности $\mu = \Delta\nu_0 / \Delta\nu_{\text{кон}} \approx 19$ или эффективной температуре относительного движения 1,5 К. Смещение максимума пика относительно резонансной частоты составляет 150 МГц, что находится в хорошем согласии с простым расчетом на основе уравнения Ливилля, который дает для сдвига максимума пика 130 МГц (рис. 2,б).

В заключение подчеркнем, что деформация контура скоростного распределения была осуществлена при эффективной длине замедления 20 см. Как показывают оценки, увеличение длины взаимодействия до

~1 м позволит замедлить и монохроматизировать значительную долю атомов до нулевых скоростей.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
7 сентября 1981г.

Литература

- [1] *Wineland D.J., Dehmelt H.G. Bull. Am. Phys. Soc., 20, 1975, 637; Dehmelt H.G. Nature, 262, 1976, 777.*
 - [2] *Hänsch T.W., Schawlow A.L. Optics Comm., 13, 1975, 68.*
 - [3] *Neuhauser W., Hohenstatt M., Toschek P.E., Dehmelt H.G. Phys. Rev., 22, 1980, 1137.*
 - [4] *Wineland D.J., Itano W.M. Phys. Lett., 82A, 1981, 75.*
 - [5] *Балыкин В.И., Летохов В.С., Мишин В.И. Письма в ЖЭТФ, 29, 1979, 614; ЖЭТФ, 78, 1980, 1376.*
 - [6] *Letokhov V.S., Minogin V.G. Physics Reports, 73, 1981, 1.*
 - [7] *Краснов И.В., Шапарев Н.Я. ЖЭТФ, 77, 1979, 899.*
 - [8] *Зуева Т.В., Летохов В.С., Миногин В.Г. ЖЭТФ, 81, 1981, 84.*
 - [9] *Hertel V.I., Stamanovic A.S. IEEE J. Quant. Electr., QE-11, 1975, 210.*
-