

# ВЛИЯНИЕ ПУЧКА, НАПРАВЛЯЕМОГО В ЗЕЕМАНОВСКИЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ, НА ЗАХВАТ АТОМОВ КРИПТОНА МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКОЙ

*С. Сингх<sup>\*</sup>, В. Б. Тивари, С. Р. Мишра, Х. С. Рават*

*Отделение прикладной лазерной физики, Центр прогрессивных технологий им. Раджи Раманни  
452013, Индаур, Индия*

Поступила в редакцию 12 апреля 2017 г.

(Перевод с английского)

## EFFECT OF ZEEMAN SLOWER BEAM ON LOADING OF A KRYPTON MAGNETO-OPTICAL TRAP

*S. Singh, V. B. Tiwari, S. R. Mishra, H. S. Rawat*

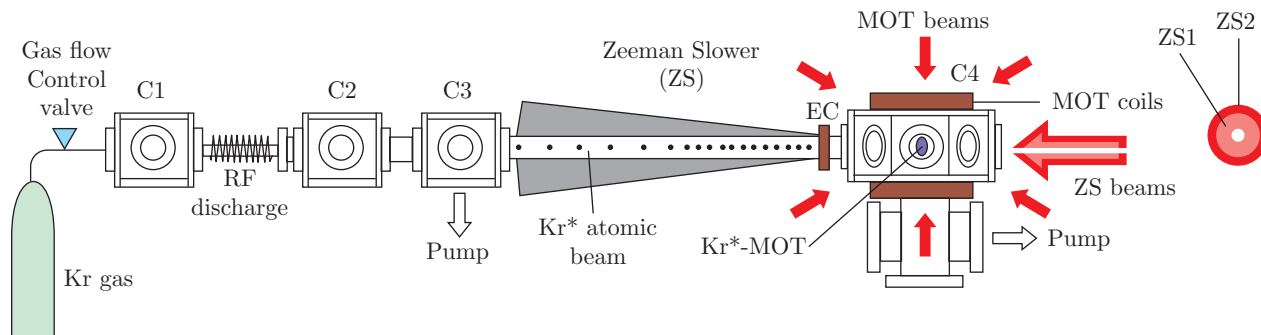
Исследуется влияние мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, на скорость захвата и потери атомов за счет столкновений в атомном пучке криптона, попадающем в магнитооптическую ловушку. Результаты показывают, что увеличение мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, сначала увеличивает скорость захвата магнитооптической ловушкой и уменьшает потери атомов за счет фоновых столкновений, а это увеличивает число холодных атомов в магнитооптической ловушке до оптимального значения. При дальнейшем увеличении мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, число холодных атомов в магнитооптической ловушке уменьшается из-за увеличения потерь атомов за счет фоновых столкновений и уменьшения скорости захвата атомов ловушкой. При этом наблюдалось, что при изменении мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, потери атомов за счет столкновений с холодными атомами сохраняются. Таким образом, настоящее исследование подчеркивает необходимость оптимизации мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, для захвата максимального числа холодных атомов из атомного пучка в магнитооптической ловушке.

DOI: 10.7868/S0044451018040016

Охлажденные лазером атомы благородных газов с высокой внутренней энергией, такие как криптон, представляют собой полезные объекты для исследований, связанных со столкновениями с холодными атомами [1, 2], физикой ионизации [3, 4], нанолитографией [5], анализом следовых количеств атомов, удерживаемых в ловушке (АТТА) [6], и обнаружением темной материи [7]. Охлаждение и захват атомов криптона, а также других благородных газов в основном состоянии представляются сложным из-за отсутствия лазеров, излучающих в области вакуум-

ного ультрафиолета. Поэтому обычно используются атомы криптона в первом возбужденном состоянии, отстоящем приблизительно на 10 эВ от основного состояния. Охлаждение и захват атомов криптона возможны в метастабильном состоянии  $4p^5 5s[3/2]_2$  (время жизни около 40 с) путем возбуждения атома в лежащее выше состояние  $4p^5 5p[5/2]_3$  с помощью облучения лазером с длиной волны 811.5 нм. Метастабильное состояние атомов криптона (обозначенное как  $Kr^*$ ) может быть получено методом радиочастотного разряда [8]. До захвата магнитооптической ловушкой метастабильные горячие атомы криптона ( $Kr^*$ ), образующиеся в радиочастотном разряде, предварительно охлаждаются в зеемановском замедлителе [9]. В зеемановском замед-

<sup>\*</sup> E-mail: surendra@rrcat.gov.in



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки зеемановского замедлителя, замедляющего метастабильные атомы криптона перед захватом их магнитооптической ловушкой. EC, C1, C2, C3 и C4 — соответственно катушка экстракции, камера выпуска газа, камера анализа, камера накачки и магнитооптическая ловушка метастабильного криптона

лителе лазерный пучок (называемый ниже пучком, направляемым в зеемановский замедлитель), который распространяется в направлении, противоположном направлению атомного пучка из радиочастотной разрядной трубки, используется для замедления атомов в присутствии пространственно-неоднородного магнитного поля соленоида. Частота излучения пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, настраивается таким образом, что доплеровский сдвиг частоты лазера зеемановского замедлителя для движущихся атомов компенсируется зеемановским сдвигом атомной частоты перехода. Это приводит к резонансному взаимодействию лазерного пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, с быстро движущимися атомами на всем протяжении длины соленоида. Благодаря большому потоку атомов и возможности замедлять атомы до скоростей меньших, чем скорость захвата атомов магнитооптической ловушкой, зеемановские замедлители стали очень популярны и широко используются для захвата магнитооптической ловушкой. Основной упор при этом делался на оптимизацию конструкции зеемановского замедлителя для улучшения захвата магнитооптической ловушкой [10, 11]. Цель настоящей работы — показать, что на динамику захвата ловушкой может также существенно влиять мощность пучка, направляемого в зеемановский замедлитель.

В настоящей работе исследуется влияние мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, на скорость захвата и потери атомов за счет столкновений в атомном пучке метастабильного криптона, попадающего в магнитооптическую ловушку. Полученные нами экспериментальные результаты четко показывают, что мощность пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, может

изменять скорость захвата ловушкой так же, как потерю атомов за счет фоновых столкновений. Для получения максимального числа атомов в магнитооптической ловушке существует оптимальное значение мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, которое приводит к увеличению скорости захвата магнитооптической ловушкой и уменьшению фоновых потерь захваченных атомов за счет столкновений.

Схематическое изображение криптоновой магнитооптической ловушки, используемой в настоящей работе, показано на рис. 1. Эта установка аналогична используемой в нашей более ранней работе [12]. Атомы, замедленные пучком лазера, направляемым в зеемановский замедлитель, охлаждаются и захватываются в камере магнитооптической ловушки тремя парами встречных циркулярно поляризованных лазерных пучков в присутствии квадрупольного магнитного поля. Если частота излучения лазерного пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, настроена близко к резонансной частоте, то захваченный атом может быть выбит из магнитооптической ловушки [13]. Во избежание этого, мы использовали пучок, направляемый в зеемановский замедлитель, состоящий из пары концентрических полых пучков разных диаметров. Это увеличило захват холодных атомов за счет меньшего разрушения облака холодных атомов в магнитооптической ловушке. Использование полого пучка большего диаметра также улучшило захват магнитооптической ловушкой благодаря лучшему охлаждению атомов, не лежащих на оси пучка, выходящего из зеемановского замедлителя. Холодное атомное облако было сформировано в темной центральной области полых пучков, направляемых в зеемановский замедлитель. Диаметр темного пятна, используемого для генера-

ции первого полого пучка, был приблизительно равен 1 мм. Второй полый пучок был сгенерирован с использованием пары аксионов с диаметром от пика до пика приблизительно 7 мм и шириной кольца приблизительно 1.5 мм. Число холодных атомов максимизировали путем изменения мощности первого полого пучка, при этом мощность второго полого пучка сохранялась равной 5 мВт при всех измерениях.

Слабый зондирующий лазерный луч от лазера ECDL (DL 100L, Toptica, Германия) пропускали через камеру магнитооптической ловушки в направлении, перпендикулярном направлению распространения атомного пучка. Индуцированное лазером флуоресцентное излучение от атомного пучка регистрировалось на калиброванном фотодиоде для оценки числа атомов  $^{84}\text{Kr}^*$ . Число атомов  $^{84}\text{Kr}^*$  в атомном пучке дается формулой

$$N_a = \frac{4\pi}{hc} \frac{\lambda}{\Omega} \frac{P_f}{\gamma_{sc}},$$

где  $P_f$  — мощность флуоресценции, регистрируемая на откалиброванном фотодиоде,  $h$  — постоянная Планка,  $\lambda$  — резонансная длина волны,  $c$  — скорость света,  $\Omega$  — телесный угол, стягиваемый поверхностью детектора в центре атомного пучка. Концентрация частиц  $^{84}\text{Kr}^*$  ( $n_a$ ) оценивалась посредством деления числа атомов  $^{84}\text{Kr}^*$  на объем области пересечения атомного пучка и зондирующего лазерного луча.

Число холодных атомов в магнитооптической ловушке оценивалось с помощью детектирования ПЗС-матрицей флуоресценции облака захваченных магнитооптической ловушкой атомов [12]. Число холодных атомов  $N$  в атомном облаке было определено по полученному ПЗС-матрицей изображению с помощью соотношения

$$N = \frac{8\pi \left[ 1 + 6 \frac{I}{I_s} + 4 \left( \frac{\Delta_L}{\Gamma} \right)^2 \right]}{\Gamma \left( 6 \frac{I}{I_s} \right) t_{exp} \eta \Omega} N_c, \quad (1)$$

где  $I_s$  — интенсивность насыщения,  $I$  — интенсивность каждого охлаждающего пучка в магнитооптической ловушке,  $\Gamma = 2\pi \cdot 5.56$  МГц — естественная ширина линии охлаждающего перехода для  $^{84}\text{Kr}^*$ ,  $\Delta_L$  — отстройка лазера,  $N_c$  — полное число отсчетов на ПЗС-матрице,  $\eta$  — квантовая эффективность ПЗС-матрицы,  $\Omega$  — телесный угол, стягиваемый поверхностью собирающей линзы, используемой для фокусировки изображения на ПЗС-матрице в течение времени экспозиции  $t_{exp}$ .

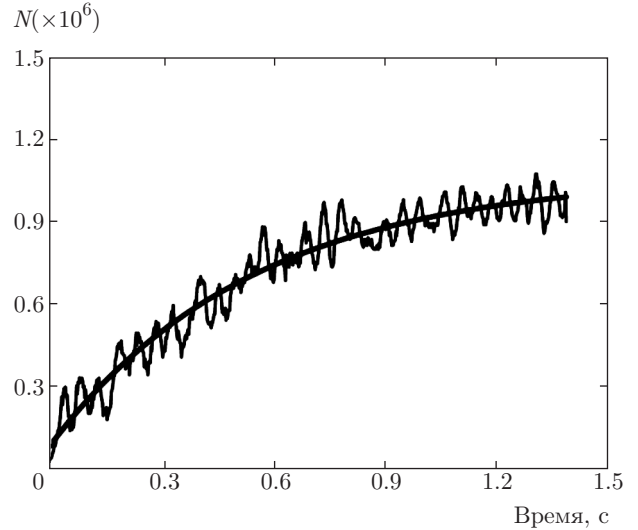


Рис. 2. Кривая захвата  $^{84}\text{Kr}^*$  в магнитооптическую ловушку для фиксированных мощностей пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, равных  $P_{ZS1} = 25$  мВт и  $P_{ZS2} = 5$  мВт. Кривая со случайными отклонениями — экспериментально наблюдаемый сигнал флуоресценции от облака магнитооптической ловушки, зарегистрированный с помощью фотодиода; гладкая непрерывная кривая — результат наилучшей подгонки наблюдаемых данных.  $\gamma = 1.35 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

Мы исследовали влияние мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель, на потери атомов, связанные со столкновениями в магнитооптической ловушке, анализируя кривые захвата магнитооптической ловушкой (как показано на рис. 2) для разных величин мощности пучка, направляемого в зеемановский замедлитель. Изменение во времени числа захваченных атомов ( $N$ ), в облаке атомов  $^{84}\text{Kr}^*$  в магнитооптической ловушке дается выражением

$$\frac{dN}{dt} = L - \gamma N - \beta \int n^2 d^3r, \quad (2)$$

где  $L$  — скорость захвата магнитооптической ловушкой,  $\gamma$  — коэффициент потери атомов из ловушки за счет столкновений с фоновыми атомами,  $n$  — концентрация атомов в облаке магнитооптической ловушки,  $\beta$  — коэффициент потери атомов из ловушки за счет парных столкновений с холодными атомами внутри облака магнитооптической ловушки.

Во время захвата магнитооптической ловушкой мы наблюдали линейный рост концентрации атомов в ней с увеличением числа атомов, захваченных магнитооптической ловушкой. Это указывает на то, что магнитооптическая ловушка работает в режиме постоянного объема. Тогда распределение concentra-