

## ФОКУСИРОВКА АТОМНЫХ ПУЧКОВ ДИССИПАТИВНОЙ СИЛОЙ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И.Балыкин, В.С.Летохов, А.И.Сидоров

Экспериментально продемонстрирована фокусировка пучка атомов натрия диссипативной силой светового давления лазерного излучения. Показана возможность создания оптики пучков нейтральных частиц.

1. Одной из активно разрабатываемых проблем атомной физики в последние годы стало изучение воздействия сил резонансного светового давления на движение атомов. Экспериментально реализовано продольное замедление и охлаждение атомных пучков, их коллимация за счет поперечного охлаждения (см. <sup>1, 2</sup>). Фокусировка атомного пучка с использованием градиентной потенциальной силы продемонстрирована в работе <sup>3</sup>. В настоящей статье представлена экспериментальная реализация фокусировки атомного пучка спонтанной (диссипативной) силой светового давления. Использование спонтанной силы светового давления радикально изменяет ситуацию, так как при одной и той же мощности лазерного излучения спонтанная (диссипативная) сила превышает градиентную в отношении  $F_{сп}/F_{гр} \approx a/\lambda$ , где  $a$  – диаметр лазерного луча,  $\lambda$  – длина волны излучения. Это в свою очередь позволяет в-первых, работать с атомными пучками с большой апертурой ( $\approx 1$  см) и значительной начальной расходимостью ( $\Delta\varphi_0 \approx 0,1$  рад), и во-вторых, сделать область взаимодействия атомов с полем достаточно локализованной, т. е. создать "лазерную линзу" для пучков нейтральных частиц.

2. Одной из простейших конфигураций светового поля, фокусирующей атомный пучок, может быть конфигурация, образованная четырьмя расходящимися лазерными гауссовыми лучами, распространяющимися в направлениях  $\pm x$ ,  $\pm y$  прямоугольной системы координат. Каустики лучей расположены на одинаковых расстояниях от центра координат. При этом атомный пучок распространяется вдоль оси  $z$ . Положим, что частота лазерного излучения настроена в резонанс с частотой атомного перехода. Тогда, как показано в работах, посвященных анализу световых ловушек нейтральных атомов <sup>4, 5</sup>, на атом, удаляющийся от оси симметрии (оси атомного пучка  $z$ ), действует спонтанная сила светового давления, возвращающая атом к оси. Физической причиной возникновения возвращающей силы является разбаланс интенсивностей лазерных лучей и, следовательно, сил светового давления при смещении атома от оси симметрии линзы. Для случая пучка малой расходимости (соответствует параксиальным световым пучкам в оптике) фокусное расстояние лазерной линзы определяется выражением

$$F_{л} = \frac{1}{\omega^2} \frac{v_{\parallel}^2}{L_{л}} \frac{1}{G_0}, \quad (1)$$

где  $\omega^2 = 4\hbar k \gamma \frac{l}{b^2} \frac{q_0^2}{q^2}$ ,  $b = 2kq_0^2$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $2\gamma$  – естественная ширина линии поглощения,

$l$  – расстояние от каустики лазерных лучей до центра линзы,  $q_0, \bar{q}$  – размеры лучей в каустике и в центре "линзы",  $L_{л}$  – размер лазерной линзы вдоль оси атомного пучка,  $v_{\parallel}$  – продольная скорость атомов, резонансно взаимодействующих с полем,  $G_0$  – параметр насыщения атомного перехода в центре линзы. Для случая тонкой лазерной линзы ( $L_{л} = v_{\parallel} t_{вз} \ll v_{\parallel}/\omega$ , где  $t_{вз}$  – время взаимодействия атомов с излучением) формула лазерной линзы сводится к формуле обычной линзы

$$\frac{1}{F_{л}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L},$$

где  $S$  и  $L$  – расстояния от лазерной линзы соответственно до источника атомного пучка и до его "изображения".

3. Схема экспериментальной установки по фокусировке атомного пучка показана на рис. 1. Основные свойства лазерной линзы наиболее просто исследовать на примере одномерной лазерной линзы. В эксперименте такая лазерная линза была образована при отражении гауссового лазерного луча (4) от конического зеркала (3). При этом коническое зеркало было разрезано на две одинаковые части в плоскости, проходящей через ось симметрии конуса и перпендикулярной рисунку, и обе части симметрично раздвинуты на равные расстояния (2 мм) от оси. Каустики лазерных лучей после отражения от разрезанного и разнесенного конического зеркала показаны в верхней части рис. 1. Длина области взаимодействия атомов с излучением равна 35 мм. В эксперименте использовался пучок атомов натрия, который формировался двумя диафрагмами. Диафрагма на источнике представляла собой круглое отверстие диаметром  $d = 1$  мм, другая диафрагма была в виде прямоугольной щели с размерами  $l_1 = 3,7$  мм,  $l_2 = 0,25$  мм. Расстояние между диафрагмами равно  $L = 125$  мм. Для циклического возбуждения атомов натрия использовалось двухчастотное лазерное излучение<sup>6</sup> и четырехуровневая схема возбуждения<sup>7</sup>. При этом одна частота настраивалась в резонанс с переходом атома натрия  $3S_{1/2}, F = 1 \rightarrow 3P_{3/2}, F' = 2$ , а другая —  $3S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 3P_{3/2}, F' = 3$ .

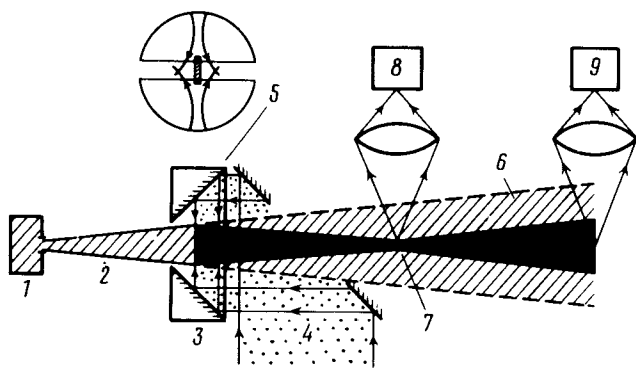


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по фокусировке атомного пучка лазерным излучением: 1 — источник атомного пучка, 2 — атомный пучок, 3 — разрезанное коническое зеркало, 4 — фокусирующее лазерное излучение, 5 — каустика лазерных лучей внутри конического зеркала, 6 — первоначальный атомный пучок, 7 — атомный пучок после его фокусировки, 8, 9 — фотоумножители

В эксперименте распределение интенсивности атомов в пучке от поперечной координаты регистрировалось по сигналу флуоресценции от одночастотного зондирующего излучения, сканируемого по пространству. Частота пробного излучения настраивалась на переход  $3S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 3P_{3/2}, F' = 3$  и устанавливалась в определенную часть доплеровского контура атомного пучка, тем самым выбирались атомы пучка с определенной продольной скоростью. Диаметр пробного излучения в зоне регистрации равен по уровню  $1/e^2$  0,4 мм.

На рис. 2, а представлены профили атомного пучка до и после его взаимодействия с лазерным излучением в плоскости "изображения" источника пучка. Расстояние от лазерной линзы до плоскости изображения  $L_1 = 170$  мм. На рис. 2, б расстояние от лазерной линзы до места регистрации профилей пучка  $L_2 = 470$  мм. На обоих рисунках кривые 1 соответствуют первоначальному атомному пучку, 2 — профилю после включения фокусирующего лазерного излучения, кривая 3 представляет собой профиль пучка после его фокусировки, рассчитанный по формулам (1) и (2) геометрической оптики атомных пучков. Мощность лазерного излучения составляла  $P_{\text{л}} = 8$  мВт, все измерения проведены с атомами, имеющими продольную скорость  $v_{\parallel} = 3,8 \cdot 10^4$  см/с при низкой плотности, когда столкновения отсутствуют. Из сравнения кривых 2 и 3 рис. 2, а можно сделать вывод о том, что лазерная линза осуществляет достаточно точное построение "источника" атомов. Ширина атомного пучка за плоскостью изображения также совпадает с шириной атомного пучка, построенного по формулам геометрической оптики. Были проведены численные расчеты фокусировки атомного пучка с учетом конкретного вида лазерного по-

ля и конечного размера атомного пучка. Профиль атомного пучка по результатам этого расчета представлен на рис. 3, б (кривая 2). Кривая 2 на рис. 3, а показывает профиль пучка после его фокусировки при оптимизации параметров лазерной линзы. Из сравнения двух кривых можно сделать вывод о том, что крылья профиля объясняются неидеальностью лазерной линзы (сферическая абберация).

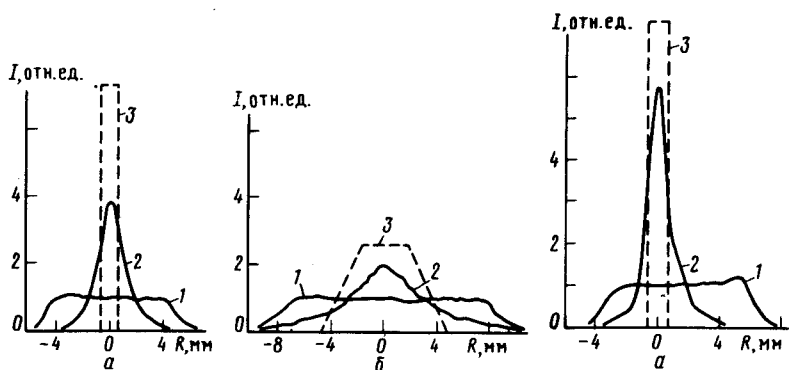


Рис. 2

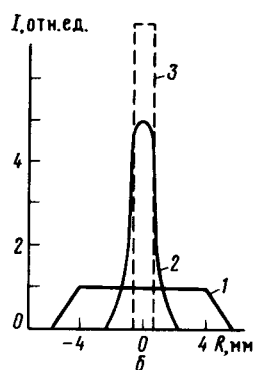


Рис. 3

Рис. 2. а – Профили атомного пучка в плоскости "изображения" источника пучка: 1 – первоначальный профиль пучка, 2 – профиль пучка после его фокусировки, 3 – профиль атомного пучка, рассчитанный по формулам (1) и (2) геометрической оптики атомных пучков. Расстояние от "лазерной линзы" до плоскости изображения  $L_1 = 170$  мм; б – профили атомного пучка при  $L_2 = 470$  мм.

Рис. 3. Профили атомного пучка в плоскости изображения его источника (обозначения те же, что на рис. 2). а – 2 – профиль, измеренный при оптимизации условий эксперимента; б – 2 – профиль, рассчитанный для условий эксперимента

Таким образом продемонстрированная в данной работе лазерная линза открывает возможности для целенаправленного управления такими параметрами атомных пучков как их плотность и расходимость.

Авторы благодарят В.Г.Миногина за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Балыкин В.И., Летохов В.С., Миногин В.Г. УФН, 1985, 14, 117.
2. Laser-Cooled and Trapped Atoms, ed. by W.D.Phillips. Progress in Quantum Electronics "Laser-Cooled and Trapped Atoms", 1984, 8.
3. Bjorkholm J.E., Freeman R.R., Ashkin A., Pearson D.B. Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 1361; Opt. Lett., 1980, 5, 11.
4. Ashkin A., Gordon J.P. Opt. Lett., 1983, 8, 511.
5. Minogin V.G. Opt. Lett., 1985, 10, 179.
6. Балыкин В.И., Сидоров А.И. Квантовая электроника, 1984, 11, 2001.
7. Balykin V.I., Letokhov V.S., Minogin V.G., Rogdestvensky Y.V., Sidorov A.I. JOSA B, 1985, 2, 1776.