

ОТРАЖЕНИЕ АТОМНОГО ПУЧКА ОТ ГРАДИЕНТА СВЕТОВОГО ПОЛЯ

В.И.Балыкин, В.С.Летохов, Ю.Б.Овчинников, А.И.Сидоров

Впервые экспериментально обнаружено зеркальное отражение теплового атомного пучка от градиента лазерного поля. Коэффициент отражения "атомного зеркала" близок к 100%.

В неоднородном электромагнитном поле на атом действует сила, пропорциональная навесному дипольному моменту атома и градиенту напряженности поля. Впервые внимание на возможность воздействия градиента светового поля на движение атомов было обращено в работе ¹. Опубликованы предложения по использованию градиентной силы для захвата атомов в узлах стоячей световой волны ², а также в поле острософокусированного лазерного луча ³. В работе ⁴ была продемонстрирована фокусировка атомного пучка градиентной силой. Авторы работы ⁵ предложили использовать градиент светового поля для отражения атомов.

В настоящей работе впервые экспериментально продемонстрировано зеркальное отражение теплового атомного пучка от градиента лазерного поля. Для создания "атомного зеркала" использовалось полное внутреннее отражение лазерного луча от границы диэлектрик – вакуум ⁵ (рис. 1). Поле в вакууме затухает на расстоянии $\sim \lambda/2$. При этом создается огромный градиент напряженности электрического поля. Отражение атома от "зеркала" можно рассматривать как движение атома в потенциальном поле ⁶

$$U_{\text{град}}(x) = \frac{1}{2} \hbar (\Delta - kv_{\parallel}) \ln \{ 1 + G/[1 + (\Delta - kv_{\parallel})^2/\gamma^2] \}, \quad (1)$$

где $\Delta = \omega - \omega_0$ – положительная расстройка лазерной частоты ω относительно частоты атомного перехода ω_0 , 2γ – естественная ширина линии поглощения, v_{\parallel} – продольная скорость атомов, $G(x) = I(x)/I_s$ – параметр насыщения атомного перехода, I_s – интенсивность насыщения перехода, $I(x)$ – интенсивность лазерного излучения. С помощью закона сохранения энергии можно доказать возможность зеркального отражения атома от такого потенциала.

В том случае, когда атом при движении в потенциальном поле все же достигнет поверхности диэлектрика, то вместо зеркального должно быть обычное диффузное отражение от диэлектрика. Это накладывает ограничение на максимальную поперечную скорость

$$v_x^{\text{max}} = \left[\frac{2 U_{\text{град}}(0)}{M} \right]^{1/2} = \left\{ \frac{\hbar (\Delta - k v_{\parallel})}{M} \ln \left[1 + \frac{G(0)}{1 + (\Delta - kv_{\parallel})^2/\gamma^2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

Для типичных параметров, например, атомов Na и перестраиваемого лазерного излучения: $M=4 \cdot 10^{-23}$ г, $v_{\parallel} = 6 \cdot 10^4$ см/с, $\gamma/2\pi = 5$ МГц, $k = 10^5$ см $^{-1}$, $P_{\text{л}} = 1$ Вт, $G=10^5$, $\Delta/2\pi=2,6$ ГГц можно получить значение $v_x^{\text{max}} = 410$ см/с, соответственно, максимальный угол скольжения $\alpha_{\text{max}} = v_x^{\text{max}} / v_{\parallel} = 7 \cdot 10^{-3}$ рад.

В эксперименте пучок атомов натрия формировался отверстием диаметром 0,4 мм в источнике и расположенной на расстоянии 220 мм от пушки прямоугольной щелью с размерами 0,1 мм по горизонтали и 0,4 мм по вертикали. На расстоянии 15 мм от щели находилось "атомное зеркало", которое отражало атомы в горизонтальной плоскости. Оно представляло из себя плоскопараллельную пластину из плавленного кварца толщиной 0,4 мм и длиной 25 мм, в которую через скошенную грань направлялось лазерное излучение. Диаметр лазерного луча был равен 0,4 мм по уровню I/e . В пластинке использовалось многократное полное внутреннее отражение лазерного луча. Мощность лазерного излучения была равна 650 мВт. Давление остаточного газа в вакуумной камере было не хуже $5 \cdot 10^{-6}$ торр.

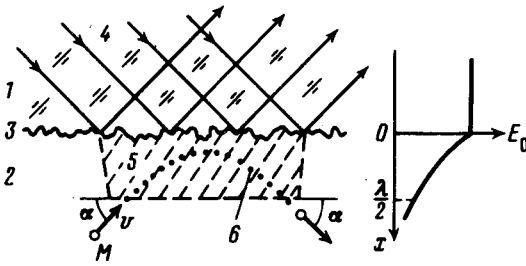


Рис. 1

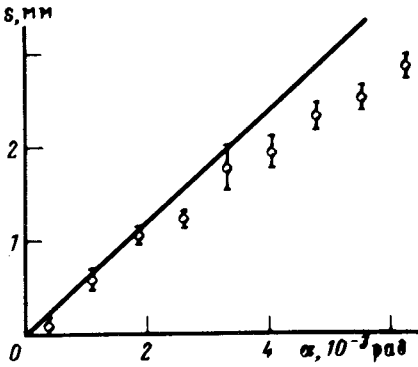


Рис. 3

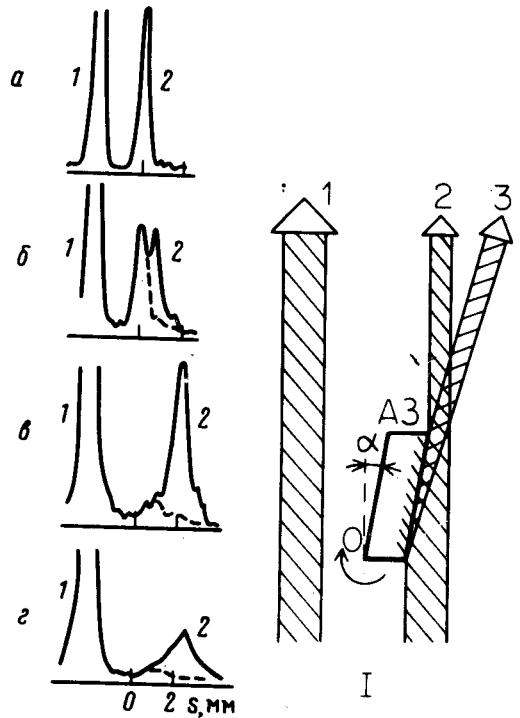


Рис. 2

Рис. 1. Схема "атомного зеркала": 1 – диэлектрик, 2 – вакуум, 3 – граница раздела, 4 – лазерное поле в диэлектрике, 5 – лазерное поле в вакууме, 6 – траектория движения атома в лазерном поле

Рис. 2. I – Траектории атомных пучков в эксперименте по зеркальному отражению атомов: 1 – калибровочный атомный пучок, 2 – пучок атомов, проходящих мимо зеркала, 3 – отраженный атомный пучок, АЗ – "атомное зеркало", О – ось вращения "зеркала", α – угол скольжения. II – Профили калибровочного (1), прошедшего мимо "зеркала" (2) и отраженного (3) атомных пучков в зоне регистрации. Пунктиром обозначен профиль атомного пучка при $P_{\text{л}} = 0$. Параметры лазерного излучения и атомного пучка: $P_{\text{л}} = 650$ мВт, $\Delta = 2,6$ ГГц, $v_{\parallel} = 4 \cdot 10^4$ см/с. Углы скольжения α : а – 0 рад, б – $1,1 \cdot 10^{-3}$ рад, в – $3,3 \cdot 10^{-3}$ рад, г – $5,5 \cdot 10^{-3}$ рад

Рис. 3. Зависимость смещения s отраженного атомного пучка в зоне регистрации от угла скольжения α падающего атомного пучка

В эксперименте использовался также второй, калибровочный атомный пучок, относительно которого измерялось смещение отраженного пучка и число отраженных атомов. Зона регистрации находилась на расстоянии 330 мм от щели. Профили атомных пучков регистрировались с помощью пробного одночастотного излучения, настроенного по частоте на переход $3S_{1/2} \rightarrow 3P_{3/2}$. Пробный луч составлял угол 83° с осью пучка по вертикали и сканировался по пространству. Мы настраивались частотой зондирующего луча в определенную часть доплеровского контура ($\Delta\nu_D \sim 250$ МГц) и регистрировали флуоресценцию от атомов с определенной продольной скоростью.

На рис. 2 представлены профили калибровочного и отклоненных атомных пучков при частотной расстройке силового поля $\Delta = 2,6$ ГГц. Зондируемые атомы имели продольную скорость $4 \cdot 10^4$ см/с. Рис. 2, а соответствует случаю, когда "атомное зеркало" параллельно оси пучка и атомы пролетают мимо зеркала. При небольшом угле наклона α (рис. 2, б) часть атомного пучка проходит мимо "зеркала", а часть отражается от него, что приводит к появлению второго пика справа. При увеличении угла наклона (рис. 2, в) "зеркало" перекрывает полностью атомный пучок. Число отраженных атомов растет, увеличивается и смещение отраженного пучка. При дальнейшем увеличении угла наклона (рис. 2, г) число отраженных атомов падает, так как атомы достигают поверхности зеркала и диффузно от нее отражаются.

На рис. 3 представлен график зависимости смещения отраженного пучка s в зоне регистрации от угла скольжения α . Сплошная прямая представляет зеркальное отражение атомов. При больших значениях угла скольжения α наблюдается заметное отличие хода экспериментальных точек от расчетной прямой. Это отличие объясняется тем, что расходимость атомного пучка ($\Delta\varphi = 2,3 \cdot 10^{-3}$ рад) сравнима с углом α . Атомы с большими поперечными скоростями достигают поверхности и диффузно отражаются, поэтому поперечное скоростное распределение обрывается со стороны больших скоростей. Угол отклонения атомов становится меньше расчетного.

Важным параметром любого зеркала является его коэффициент отражения. При малых углах скольжения "атомное зеркало" по нашим измерениям имеет коэффициент отражения, близкий к 100%. По мере увеличения угла α все большее число атомов достигает поверхности и диффузно отражается от нее, поэтому коэффициент отражения падает и при $\alpha = 6,3 \cdot 10^{-3}$ рад становится равным 10%.

Таким образом, полученные результаты показали, что "атомное зеркало" пригодно для отражения тепловых атомных пучков. Увеличение угла отклонения атомов, и молекул может быть достигнуто применением мощных импульсных лазеров, либо путем увеличения числа отражений атомов от зеркала. Отметим также возможность фокусировки теплового атомного пучка вогнутым "атомным зеркалом". Так как время взаимодействия атомов с излучением мало, то скоростная диффузия из-за спонтанного переизлучения фотонов также мала. Поэтому атомный пучок можно сфокусировать в размеры, сравнимые с длиной волны де Бройля атома. Данная работа открывает новые возможности создания оптики нейтральных атомов.

Литература

1. Аскарьян Г.А. ЖЭТФ, 1962, 42, 1567.
2. Летохов В.С. Письма в ЖЭТФ, 1969, 7, 348.
3. Ashkin A. Phys. Rev. Lett., 1978, 40, 729.
4. Pearson D.B., Freeman R.R., Bjorkholm J.E., Ashkin A. Appl. Phys. Lett., 1980, 36, 99.
5. Cook R.J., Hill R.K. Opt. Comm., 1982, 43, 258.
6. Миногин В.Г., Летохов В.С. Давление лазерного излучения на атомы. М.: Наука, 1986.