

НАБЛЮДЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СВОБОДНЫХ АТОМОВ НАТРИЯ В РЕЗОНАНСНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ СО СКАНИРУЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.И.Мишин

Используя лазер непрерывного действия со сканируемой частотой излучения и оптическую накачку атомов осуществлено охлаждение атомов Na в атомном пучке.

В настоящей работе представлены результаты первых экспериментов по наблюдению радиационного охлаждения атомов натрия в резонансном лазерном поле. Этот эксперимент инициирован работами [1, 2]. В работе [1] высказана идея о радиационном охлаждении атомов при многократном поглощении направленных фотонов и изотронном их излучении, а в работе [2] предложен и рассчитан метод адиабатического охлаждения атомов в резонансном лазерном поле со сканируемой частотой.

В работах [3, 4] продемонстрировано охлаждение ионов Ba^+ и M^+ лазерным излучением, предварительно локализованных в электромагнитных ловушках.

Радиационное охлаждение атомов достигается при облучении атома встречной резонансной световой волной. На двухуровневый атом, находящийся в резонансе с лазерным излучением; действует сила спонтанного светового давления определяемая выражением

$$F_{сп} = \frac{1}{2} \left(\frac{\hbar k}{\tau} \right) \left(1 + \frac{1}{f} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $\hbar k$ – момент количества движения фотона, τ – время жизни возбужденного состояния, f – отношение средних заселенностей возбужденного и основного состояний (при сильном насыщении перехода $f = 1$). Под действием силы спонтанного светового давления встречной волны происходит замедление атома и частота поглощения его выходит из резонанса с лазерным полем. Если непрерывно подстраивать частоту лазерного излучения под резонансную частоту замедляющегося атома, то можно получить глубокое охлаждение атома [2]. Такой режим охлаждения называется адиабатическим.

Идея эксперимента заключается в наблюдении контура резонансной флуоресценции атома натрия во встречной лазерной волне со сканируемой частотой. При темпе сканирования частоты лазерного излучения близком к темпу охлаждения атома должно наблюдаться уменьшение доли быстрых атомов и возрастание доли медленных атомов, т. е. заметная деформация контура линии флуоресценции при сканировании частоты. В другом режиме сканирования (очень медленном или очень быстром) такого искажения контура не должно быть.

При очень быстром сканировании скорость изменения частоты лазера превышает скорость изменения частоты поглощения атома из-за уменьшения скорости его движения и частота лазерного излучения выходит из резонанса с частотой поглощения атома. При медленном режиме сканирования частота атомного перехода находится в резонансе с частотой лазерного излучения, однако в таком режиме сканирования длина пути взаимодействия будет возрастать и будут охлаждаться только медленные атомы, так как длина пути взаимодействия в эксперименте ограничена.

Несмотря на простоту этой идеи, осуществить ее экспериментально непросто, так как необходимо обеспечить многократное ($10^3 \div 10^5$ раз) циклическое возбуждение с лазерным полем одного и того же атома, имеющего сверхтонкое расщепление уровней (рис. 1, а). В настоящей работе эта трудность преодолена предварительным оптическим ориентированием атома в поляризованном по кругу σ^+ лазерном излучении.

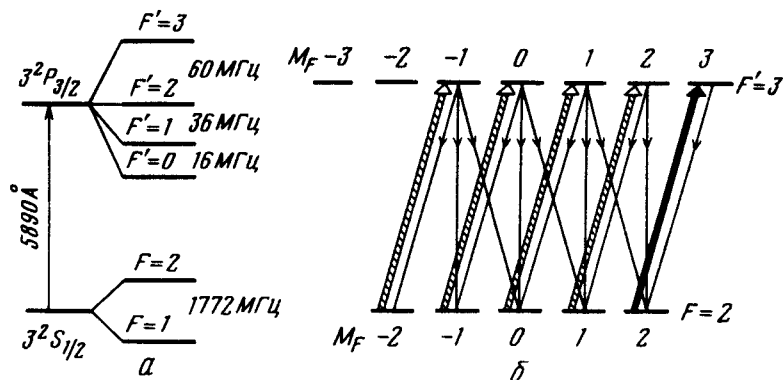


Рис. 1. а – Энергетическая диаграмма сверхтонкой структуры линии атома натрия; б – оптическая ориентация атома. На лазерном излучении поляризованном по кругу (σ^+)

Для этого поляризованное по кругу излучение лазера настраивалось в резонанс с переходом атома $^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow ^2P_{3/2}, F'=3$ рис. 1, б. Интенсивное лазерное излучение возбуждает переходы с изменением магнитного квантового числа $\Delta m = 1$. В результате этих и спонтанных переходов атом оказывается на подуровне $F=2, m_F=2$. При мощности лазерного излучения, превышающей мощность насыщения ($P_H = 10 \text{ мВт/см}^2$) время, в течение которого происходит оптическая ориентация равно 2 мксек, что составляет малую часть от полного времени взаимодействия атома с излучением, необходимого для охлаждения (1 мксек).

Переходы $F=2 (m_F=2) - F'=2 (m_F'=-2, -1, 0, 1, 2)$ запрещены в нашем случае по правилам отбора. Таким образом атом на подуровне $F=2, m_F=2$ будет циклически взаимодействовать с лазерным излучением поляризованным по кругу.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Она состоит из следующих основных элементов: лазера на красителе непрерыв-

ного действия (модель 580А, фирмы "Спектра-Физикс" (1)), кюветы с источниками основного (2) и реперного (3) атомных пучков, системы регистрации сигнала флуоресценции от атомов (ФЭУ-79, осциллограф С1-70). Скорость сканирования частоты лазерного излучения периодически менялась. Максимальная скорость сканирования равнялась 370 Мгц/млсек. Кювета, в которой осуществлялось взаимодействие излучения с атомами, откачивалась до давления 5×10^{-6} тор. Основной пучок (4) коллимировался двумя диафрагмами $d_1 = 1,2$ мм, $d_2 = 2$ мм, расстояние между которыми равнялось 30 см. Область пересечения двух атомных пучков и лазерного излучения отображалась на катод фотоумножителя. Сигнал флуоресценции мог регистрироваться как от атомов основного пучка, так и от атомов реперного (3) или от обоих вместе.

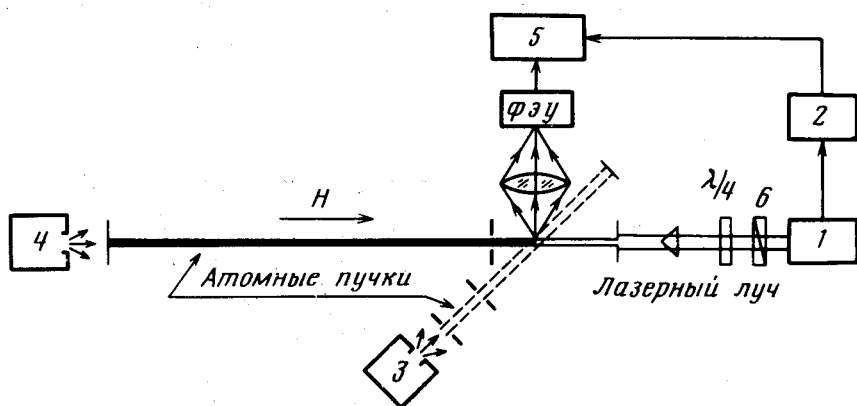


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: (1 — лазер на красителе непрерывного действия, 2 — блок управления частотой лазера, 3, 4 — печи атомных пучков, 5 — осциллограф С1-70, 6 — призма Глана)

Основной атомный пучок был коллинеарен с лазерным излучением, реперный атомный пучок — перпендикулярен лазерному лучу. Длина взаимодействия основного атомного пучка с лазерным излучением составляла 37 см и выбиралась равной рассчитанной длине пути атома со средней скоростью при его адиабатическом взаимодействии с лазерным излучением до его охлаждения.

На рис. 3 представлены результаты наблюдения контура линии поглощения атомов основного и реперного пучков при сканировании частоты лазера. Расстояние между компонентами сверхтонкой структуры составляет величину 1772 Мгц, доплеровское уширение в продольном атомном пучке при температуре печи равной 300°C равно 1340 Мгц.

На рис. 3, а приведен контур линии поглощения атомов в перпендикулярном пучке, который служит для калибровки частотной шкалы. Два максимума поглощения соответствуют сверхтонкому расщеплению основного состояния атомов Na. Положение максимума F_2 (\perp) на частотной шкале соответствует частоте поглощения атомов из параллельного пучка с нулевой скоростью.

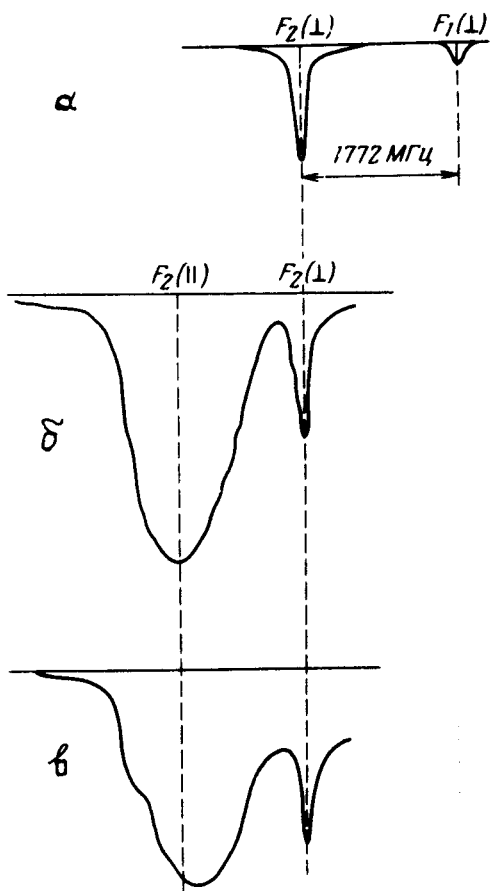


Рис. 3. Контуры линий поглощения атомов в параллельном и перпендикулярном атомных пучках: *а* – контур линии поглощения в перпендикулярном пучке; *б* – контур линии поглощения в параллельном и перпендикулярном атомных пучках. Скорость сканирования: 46 Мгц/млсек; *в* – скорость сканирования: 370 Мгц/млсек. Интенсивность лазерного излучения: 50 мВт/см²

На рис. 3, *б* представлены контуры поглощения атомов в параллельном и перпендикулярном пучках при медленной (46 Мгц/млсек) скорости сканирования частоты лазерного излучения, т. е. в режиме далеком от адиабатического. При такой скорости сканирования эффекты резонансного взаимодействия лазерного излучения не могут повлиять на движения атомов и кривые представляют собой совместный контур поглощения атомов в обоих пучках.

На рис. 3, *в* изображены контуры линии поглощения атомов в обоих пучках при скорости сканирования (370 Мгц/млсек) близкой по нашим оценкам к адиабатическому взаимодействию атомов, имеющих скорости $v \leq 0,5v_0$, где v_0 – наиболее вероятная скорость атомов. Отчетливо заметна деформация контура линии поглощения в параллельном пучке при увеличении скорости сканирования частоты. Наблюдается: 1) смещение максимума контура поглощения в область частот, соответствующей более медленным атомам; 2) увеличивается сигнал флуоресценции на частотах, соответствующих медленным атомам. Такую деформацию контура мы объясняем перераспределением атомов по скоростям в область меньших скоростей, т. е. их торможением. Деформация контура в основном связана с торможением атомов со скоростями меньшими средней скорости атомов в пучке. Это объясняется тем, что максимальная скорость сканирования, которую можно было получить в эксперименте была недостаточна для того, чтобы заметно затормо-

зять атомы со скоростями бoльшими v_0 . Эти атомы за время сканирования успевают только несколько сместиться в область меньших скоростей.

Наши первые наблюдения адиабатического охлаждения свободных атомов в резонансном лазерном поле показывают, что возможно прямое управление скоростью движения атомов лазерным излучением. Следующий шаг заключается в реализации глубокого адиабатического охлаждения атомов с любыми скоростями из теплового распределения при сканировании частоты лазера вплоть до окрестности центра линии и последующей ее стабилизации на частоте $(\omega_0 - \Gamma)$, где Γ — радиационная ширина линии [2]. При таком режиме управляемого сканирования частоты можно будет охладить атомы до гораздо более низких температур.

Авторы благодарны В.Г.Миногину за обсуждение результатов работы, А.Н.Рубинову, Б.Я.Когану, А.В.Бутенину за предоставление некоторых элементов лазера на красителе.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 марта 1979 г.

Литература

- [1] T.W.Hänsch, A.L.Schawlow. Opt. Comm., 13, 68, 1975.
 - [2] V.S.Letokhov, V.G.Minogin, B.D.Pavlik. Opt. Comm., 19, 72, 1976; В.С.Летохов, В.Г.Миногин, Б.Д.Павлик. ЖЭТФ, 72, 1328, 1977.
 - [3] W.Neuhauser, M.Hohenstatt, P.Toschek, H.Dehmelt. Phys. Rev. Lett., 41, 233, 1978.
 - [4] D.J.Wineland, R.E.Drullinger, F.L.Walls. Phys. Rev. Lett., 40, 1639, 1978.
-