

Semenov Alexsey Evgen'evich

Tranzas-Vijn.

E-mail: Alexey.E.Semenov@transas.com.

54, Maliy pr., St. Petersburg, 199178, Russia.

Phone: 88123253131.

Kryukov Evgeniy Vasil'evich

E-mail: Evgeny.Kryukov@transas.com.

Rikovanov Dmitriy Pavlovich

E-mail: Dmitriy.Rykovanov@transas.com.

Semenov Dmitriy Alekseevich

E-mail: Dmitriy.Semenov@transas.com.

УДК 537.534.71

М.Д. Бавижев, М.А. Лайпанов, Н.В. Кот**УПРАВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ АТОМОВ
В МИКРОКАПИЛЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ**

На основе модели каналирования атомов в микрокапилляре рассмотрена модель поперечного охлаждения атомов в поле поверхностной световой волны внутри стеклянного капилляра. Проведена оценка коэффициента затухания для поперечных колебаний атома в микрокапилляре и рассчитана длина эффективного охлаждения атома до энергии $\hbar^2 k^2 / 2M$. Создана трехмерная модель.

Атомы в микрокапилляре; модель поперечного охлаждения атомов; коэффициент затухания.

M.D. Bavizhev, M.A. Laipanov, N.V. Kot**TRANSVERSAL MOTION ATOMS CONTROL IN MICROCAPILLARY
SYSTEM**

On the basis of channeling phenomena atoms in a microcapillary the model of cross-section cooling of atoms in a field of a superficial evanescent light wave inside of a glass capillary is considered. The estimation of factor of attenuation for cross-section fluctuations of atom in a microcapillary is lead and the length of effective cooling of atom up to energy is calculated. The three-dimensional model is created.

Atoms in a microcapillary; the model of cross-section cooling of atoms; factor of attenuation.

Введение. Создание наноразмерных структур имеет большую практическую значимость для электроники, поскольку это позволит увеличить плотность размещения транзисторов в одном чипе.

Наиболее перспективным для нанотехнологии является оптика нейтральных атомов, которая занимается проблемами формирования, контроля и управления нейтральными атомными пучками. В настоящее время существует несколько подходов для управления потоками нейтральных атомных пучков. Эти подходы отличаются различными типами полей используемых для фокусировки нейтральных атомных пучков. Идея использования оптических полей очень привлекательна, поскольку потенциал взаимодействия атома с оптическими полями гораздо выше, чем в случае статических полей.

Поверхностная волна. Известно, что лазерный луч, испытывающий полное внутреннее отражение от границы раздела диэлектрик – вакуум, образует в ва-

кууме тонкую поверхностную волну, интенсивность которой равна первоначальной интенсивности излучения [1]. Интенсивность поверхностной волны резко затухает в вакууме на расстояниях, сравнимых с длиной световой волны, при этом создается громадный градиент напряженности электрического поля, сила которого способна повернуть траектории приближающихся к поверхности атомов.

Использование поверхностной световой волны для управления нейтральными пучками имеет много преимуществ по сравнению с прямым отражением от поверхности. Потенциал поверхностной световой волны при определенных условиях является отталкивающим для атомов, тогда как поверхностные атомные потенциалы стремятся притягивать атомы за счет сил Ван-дер-Ваальса. Важно при этом, что использование поверхностной световой волны позволяет предъявлять менее строгие требования к качеству поверхности элементов управления.

Охлаждение атомов. В работах [2, 3] рассмотрен механизм охлаждения щелочных атомов при отражении от поверхностной световой волны. Процесс охлаждения связан с оптической накачкой атома между подуровнями сверхтонкой структуры его основного состояния. Энергия атома в состояниях 1 и 2 определяется следующими выражениями [4]:

$$U_1(z) = \frac{2}{3} \frac{\hbar \omega_R^2(z)}{4\delta}, \quad (1)$$

$$U_2(z) = \frac{2}{3} \frac{\hbar \omega_R^2(z)}{4(\delta + \delta_{hf_s})} \quad (2)$$

где ω_R – резонансная частота Раби, $\delta = \omega - \omega_0$ – расстройка лазерной частоты ω относительно частоты атомного перехода ω_0 . При наличии спонтанных распадов атом из одетого состояния $|1, n\rangle$ может перейти в одно из состояний $|i, n-1\rangle$ со скоростями распада, которые в случае больших отстроек (1) имеют вид $\Gamma_{11} \cong q\Gamma s/3$, $\Gamma_{12} \cong (1-q)\Gamma s/3$, $\Gamma_{13} \cong \Gamma(s/3)^2$, где $q = 0,72$ коэффициент связи возбужденного состояния с подуровнем $|F=1\rangle$. Амплитуды потенциалов состояний $|1, n\rangle$ и $|2, n-1\rangle$ существенно отличаются из-за разной отстройки поля по отношению к переходам $|F=1\rangle \rightarrow |e\rangle$ и $|F=2\rangle \rightarrow |e\rangle$. Спонтанный переход $|1, n\rangle \rightarrow |2, n-1\rangle$ из более глубокого потенциала в менее глубокий сопровождается отбором у атома кинетической энергии $\Delta E_{\perp} = U_1(y) - U_2(y)$.

Движение атомов в микрокапилляре. В первом приближении процесс каналирования атома в микрокапилляре в поле поверхностной световой волны может быть рассмотрен следующим образом.

При отражении от стенки капилляра атом теряет часть поперечной энергии E_{\perp} , относительная потеря энергии E_{\perp} отраженных атомов при этом составляет $\Delta E/E_{\perp} = 0,56$, а минимальная энергия, до которой можно охладить атомы в радиальной плоскости $E_{\min} = \hbar^2 k^2 / 2M$. Отсюда получаем поперечную энергию атома после 1-го отражения от стенки капилляра $E_{\perp 1} = E_{\perp 0} - E_{\perp 0} \times 0,56$,

$E_{\perp 1} = E_{\perp 0} \times 0,44$, тогда $E_{\perp n} = E_{\perp 0} \times 0,44^n$ после n -го отражения. Теперь можно вычислить сколько раз атом отразится от стенки капилляра прежде чем достичь минимальной энергии охлаждения E_{\min} :

$$n = \log(E_{\min}/E_{\perp 0})/\log(0,44). \quad (3)$$

Каждый раз после отражения от поверхностной световой волны атом теряет часть поперечной энергии и, следовательно, увеличивается его пролетное время между стенками капилляра, которое вычисляется следующим образом

$$t_i = \sqrt{\frac{M}{2}} \int_{-R_i}^{R_i} \frac{dx}{\sqrt{E_{\perp i} - U(x)}}, \quad (4)$$

где R_i – корень уравнения $U(x) - E_{\perp i} = 0$, $i = 0 \dots n$. Полное время необходимое для охлаждения атома до минимальной энергии есть $T = \sum_{i=0}^n t_i$. Зная продольную скорость атома и время требующееся для поперечного охлаждения находим оптимальную длину капилляра $L = v_z \times T$.

Исходя из формулы $E(t) = E_0 \exp(-2\lambda t)$, находим

$$\lambda = \frac{-1}{2T} \ln\left(\frac{E_{\min}}{E_{\perp 0}}\right). \quad (5)$$

С учетом потери энергии приходим к уравнению

$$x'' + 2\lambda x' + \omega^2 x = 0; \quad (6)$$

где $\omega^2 = \frac{1}{M} \frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2}$.

Решая уравнение (6) находим траекторию движения атома в капилляре (рис. 1).

Переходя к трехмерной системе координат с учетом $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ для потенциала поля поверхностной световой волны, получаем $U_{3D}(x, y) = U(\sqrt{x^2 + y^2})$.

Уравнения движения для атома в этом случае запишутся в виде системы двух дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} x'' + 2\lambda x' + \omega_x^2 x = 0 \\ y'' + 2\lambda y' + \omega_y^2 y = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\omega_x^2 = \frac{1}{M} \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2}$ и $\omega_y^2 = \frac{1}{M} \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial y^2}$. При движении атома вдоль оси z на него не действуют внешние силы, и уравнение движения записывается просто как $z(t) = z_0 + v_z t$. Решая систему (7) получаем траекторию движения атома в капилляре. Результат моделирования представлен на рис. 2.

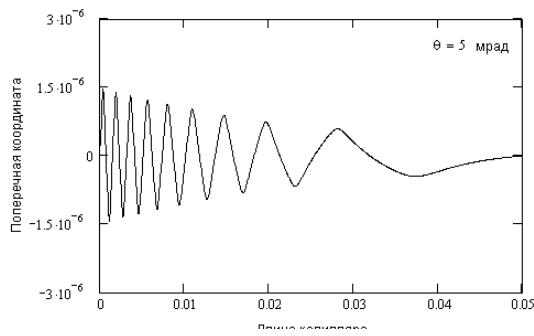


Рис. 1. Траектория атома в капилляре с учетом поперечного охлаждения

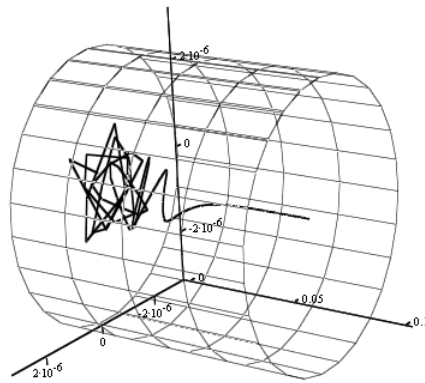


Рис. 2. Результат моделирования движения атома в капилляре

Очевидно, что подбирая соответствующим образом параметры лазера и капилляра можно создавать оптимальные условия для поперечного охлаждения атомных пучков целого ряда элементов, что позволит с успехом применять данную методику для параллельной фабрикации наноструктур. Использование же сборок с большим количеством капилляров может сделать данную методику еще и очень привлекательной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cook R.J., Hill R.K. // Opt.Comm. 1982. Vol.43. – P. 258.
2. Ovchinnikov Yu.B., Soding J., Grimm R., Pisma v ZhETF. – 1994. – Vol. 61. – P. 23-27.
3. Овчинников Ю.Б., Ларюшин Д.В., Балыкин В. И., Летохов В.С. // ЖЭТФ, 1995. – Т. 62. – С. 102.
4. J. Soding, R. Grimm, and Yu.B. Ovchinnikov, Opt. Comm. (in press).

Бавижев Мухамед Данильевич

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский государственный технический университет».

E-mail: bavizhev@ncstu.ru.

325028, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2.

Тел.: 88652560934; факс: 88652956808.

Лайпанов Магомед Аскербиевич

Тел.: 89283105104.

Кот Николай Валериевич

E-mail: nikolayncstu@rambler.ru.

Тел.: 89283896007.

Bavizhev Muxamed Danilevich

North Caucasus State Technical University (NCSTU).

E-mail: bavizhev@ncstu.ru.

2, Kulakova pr., Stavropol, 325028, Russia.

Phone: 88652560934; fax: 88652956808.

Kot Nikolay Valerievich

E-mail: nikolayncstu@rambler.ru.

Phone: 89283896007.

Laypanov Magomed Askerbievich

Phone: 89283105104.