

在芯片表面囚禁冷极性分子的多功能静电阱

李胜强

盐城师范学院新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224051

摘要 提出了一种用一对金属平板电容器和 4 根半埋入绝缘介质的杆电极组成的用于囚禁处于弱场搜寻态的冷极性分子的静电表面阱方案。用有限元软件计算了单阱囚禁时的空间电场分布,发现芯片表面上方 2.2 mm 左右形成了一个三维封闭的静电阱。选用重氨(ND_3)分子作为测试分子,用经典的蒙特卡罗方法模拟了 ND_3 分子被装载和囚禁的动力学过程。模拟结果表明,当 ND_3 分子束中心速度为 13 m/s、装载时刻为 0.576 ms 时,最大装载效率可达 53%,被囚禁的冷极性分子的温度约为 35 mK;如果继续增大平板电极的电压,则原先的单阱将对称分裂为两个阱,两个阱中的分子数目比为 1:1;通过改变中间两个杆电极的电压,可实现非对称分裂,以此来调节两阱中囚禁分子数目比;可实现在 0%~100% 范围内左阱和右阱的分子数目占总分子数目的比例的调节。该方案为进一步研究三维囚禁型冷极性分子静电表面干涉仪打下基础,对于精密测量和研究物质波干涉有着重要的意义。

关键词 原子与分子物理学;冷极性分子;静电表面阱;蒙特卡罗模拟;有限元分析

中图分类号 O561 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0602001

Versatile Electrostatic Well for Trapping Cold Polar Molecules on Chip Surface

Li Shengqiang

School of New Energy and Electronic Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224051, China

Abstract An electrostatic surface well scheme for trapping cold polar molecules in weak-field-seeking state is proposed, and the electrostatic surface well is composed of a pair of metallic parallel-plate capacitors and four charged rods part-embedded in insulating medium. Spatial distribution of electric field is calculated with the finite element software in the trapping process in the case of single well trapping, and we find that a three-dimensional enclosed electrostatic well which is 2.2 mm above the chip surface is obtained. Ammonia molecule (ND_3) is chosen as the test molecule and the dynamic processes of loading and trapping are simulated by the classical Monte Carlo method. Simulation results indicate that when the velocity of ND_3 molecular beam center is 13 m/s and the loading time is 0.576 ms, the loading efficiency as high as 53% can be obtained, and the corresponding temperature of trapping cold molecules is about 35 mK. When the voltage applied to the flat electrode is increasing, the single well will split into two symmetrical wells, and the ratio of the molecules in the two wells is 1:1. Unsymmetrical split of the single well can be realized when we adjust the voltages of the two pole electrodes in the middle, and the ratio of trapping molecules in the two wells can be controlled. The ratio of molecules in the left well or the right well to the total molecules can be adjusted from 0% to 100%. This method lays a foundation for the three-dimensional trapping cold polar molecule electrostatic surface interferometer, and it is helpful for the studies about precision measurement and matter wave interference.

Key words atomic and molecular physics; cold polar molecules; electrostatic surface well; Monte Carlo simulation; finite element analysis

OCIS codes 020.1335; 020.6580; 020.7010

1 引 言

近年来,关于利用冷分子在非均匀场中受到的偶极梯度力实现对冷分子的操控方面的研究取得了很大

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11504318)

作者简介: 李胜强(1984—),男,博士,讲师,主要从事原子分子光学方面的研究。E-mail: lishengqiang_2007@126.com

的进展,例如可实现冷分子的减速^[1-7]、分束^[8-9]、反射^[10]、导引^[11-12]和囚禁^[13-16]等。被囚禁的冷分子可以用于诸多方面的研究,例如量子计算和量子信息处理^[17-18]、冷碰撞和冷化学^[19-21],以及测量电子和振动激发态寿命^[22-23]等。值得一提的是,对于囚禁在芯片表面的分子,还可以研究一些有趣的现象,如分子与芯片的相互作用会导致囚禁寿命的缩短,囚禁寿命与温度以及囚禁中心与芯片表面的距离之间存在一定的关系^[24]。2007年, Ma 等^[25]提出了利用芯片表面的一个带电金属环来实现冷极性分子囚禁的方案。接着,为了提高静电表面阱的性能,又陆续提出了几个囚禁方案^[26-28],但是这些方案只能形成静电单阱。在冷原子的研究中,磁阱的分裂和合并,在研究物质波干涉以及构造导引型和囚禁型原子干涉仪方面有着重要应用^[29-38]。原子干涉仪有着广阔的应用前景,如可应用于基本常数的精密测量^[39-42]、引力波的探测^[43]、广义相对论的验证^[44]、航空航天探测^[45]和地质探矿^[39]等。冷极性分子的静电分束器的提出对于二维波导型表面分子干涉仪有着重要意义^[8-9]。

本文提出了一种新型的针对弱场搜寻态冷极性分子的表面囚禁方案。该方案可以实现静电单阱和双阱,它们可相互转化,并且可以方便地调节被囚禁在双阱中的分子数目比。这些对于三维囚禁型静电表面分子干涉仪有重要意义。

2 静电表面囚禁方案

该方案的原理如图 1 所示。最下方的不锈钢金属板接地,其上方为聚四氟乙烯(相对介电常数 $\epsilon_r = 2.1$) 介质层,厚度为 b 。4 个带电圆柱电极半嵌入绝缘介质层中,每个圆柱电极的长度为 l 、直径为 D 。

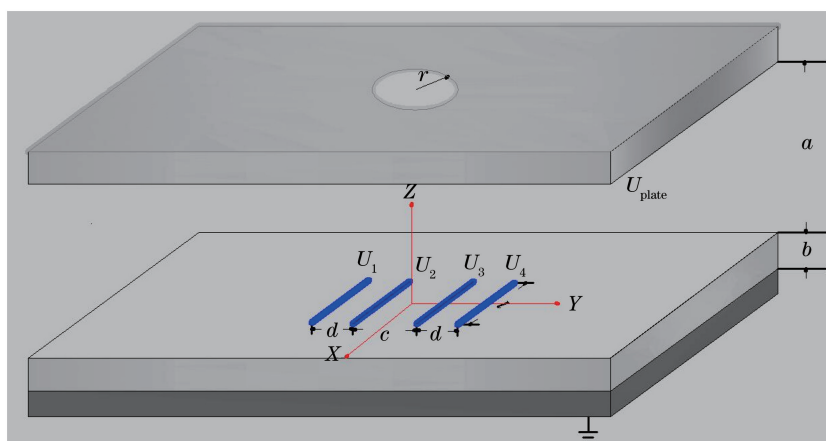


图 1 由 4 个半埋入介质层的圆柱电极和一对平行板电容器组成的囚禁装置原理图

Fig. 1 Schematic of trapping device composed of four cylinder electrodes part-embedded in dielectric layer and a pair of parallel-plate capacitors

为了方便说明,将 4 个圆柱电极从左往右依次命名为柱 1、柱 2、柱 3 和柱 4, 四者互相平行。柱 1 和柱 2、柱 3 和柱 4 的间距均为 d , 柱 2 和柱 3 的间距为 c 。平板电极的下表面与芯片上表面的间距为 a , 平板电极上所加的电压为 U_{plate} 。4 个圆柱电极上所加的电压依次为 U_1, U_2, U_3, U_4 。分子的入射方向为 $-Z$ 轴方向, 为了方便分子入射到阱中, 上面的平板电极设有一个半径为 2 mm 的孔。

3 单阱的数值模拟和结果

选择 $|J, K, M\rangle = |1, 1, -1\rangle$ 态的重氨(ND_3)分子作为测试分子, 其斯塔克势可表示为^[46]

$$W_{\text{Stark}} = \sqrt{\left(\frac{W_{\text{inv}}}{2}\right)^2 + \left(-\mu E \frac{KM}{J(J+1)}\right)^2} - \left(\frac{W_{\text{inv}}}{2}\right), \quad (1)$$

式中 W_{inv} 为反演分裂势, μ 为分子电偶极矩, E 为电场强度, J 为转动量子数, K 为 J 在分子轴方向的投影, M 为 J 在外电场方向的投影。

利用有限元软件 Maxwell 计算了平板电极和圆柱电极所产生的空间电场分布。利用公式将电场对极

性分子的影响换算为囚禁能量,而温度(T)是表示能量的一种方式,斯塔克囚禁势 W_{Stark} 和温度的关系为 $W_{\text{Stark}} = k_b T$ (k_b 为玻尔兹曼常数)。图 2(a)、(b)分别为 ND_3 分子在装载和囚禁时,沿着 Z 轴方向的电场强度和相应的斯塔克囚禁势。如图 2(a)所示,沿着 Z 轴方向的电场是非对称的,可最大程度地降低阱上方的势垒,以使冷极性分子束进入阱中。冷极性分子沿着一 Z 轴方向运动时,因受到一个与其运动方向相反的偶极梯度力的作用而减速,这里将分子波包中心分子(以下简称中心分子)运动情况作为决定装载和囚禁两个过程切换时刻的依据。合理地选择中心分子的速度,最理想的情况是中心分子装载至阱中心时,分子速度减为 0,然后切换电极电压,将分子囚禁在静电阱中。在装载过程中,参数设置如下: $a = 10 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$, $c = 6 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$, $D = 1 \text{ mm}$, $U_{\text{plate}} = 0 \text{ kV}$, $U_1 = U_3 = -20 \text{ kV}$, $U_2 = U_4 = 20 \text{ kV}$;囚禁过程中的参数设置为: $U_{\text{plate}} = -17 \text{ kV}$, $U_1 = U_4 = 20 \text{ kV}$, $U_2 = U_3 = -20 \text{ kV}$ 。参数 a, b, c, d 的设置依据如下: a 的取值大,形成静电阱的阱深变浅,阱对冷极性分子的束缚能力减弱; a 的取值小,光学通道几乎封闭,不利于实验探测;综合考虑,取 $a = 10 \text{ mm}$ 。其他条件一定时, b 的取值大小将影响阱的深浅和形态,具体表现为: b 的取值小,在 Y 轴方向单阱分裂为双阱; b 的取值大,在 Z 轴方向单阱分裂为双阱。这里取 $b = 3 \text{ mm}$,得到所需的单阱。 c 取值小,虽然阱会变深,但是阱的体积会变小; c 取值大,单阱会沿 Y 轴方向分裂为双阱。为了得到体积尽可能大的单阱,取 $c = 6 \text{ mm}$ 。 d 的取值大,在 Y 轴方向单阱分裂为双阱; d 取值小,阱虽变深,但外侧和内侧柱电极电势差不宜过大,否则会增加实验难度,所以取 $d = 4 \text{ mm}$ 。之所以不取 $c/2 = d = 4 \text{ mm}$,是因为这时得到的为双阱。

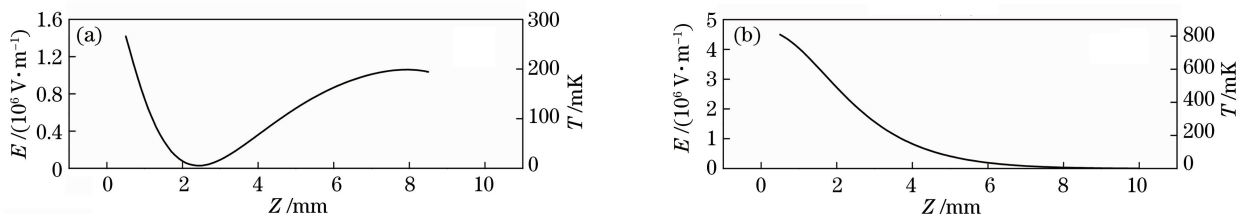


图 2 冷极性分子(a)装载和(b)囚禁时沿 Z 轴的电场分布及 ND_3 分子的斯塔克囚禁势

Fig. 2 Electric field distribution and Stark trapping potential of ND_3 molecules along Z axis when cold polar molecules are (a) loaded and (b) trapped

可以看出,芯片表面上方 2.2 mm 左右处形成了一个三维封闭的静电阱。图 3(a)~(c)分别为 XOY , YOZ , XOZ 3 个平面中电场的等高线分布以及被囚禁的冷极性分子的空间位置分布情况。在模拟中用了 10^5 个分子,囚禁时间为 100 ms。

图 4(a)给出了分子束在 3 个不同的入射速度下,装载效率与装载时间 t_{load} 之间的关系。图中黑色实方块、红色实圆圈、绿色实三角分别表示入射分子束的中心速度 v 为 12, 13, 14 m/s。从图 4(a)中可以看出,当

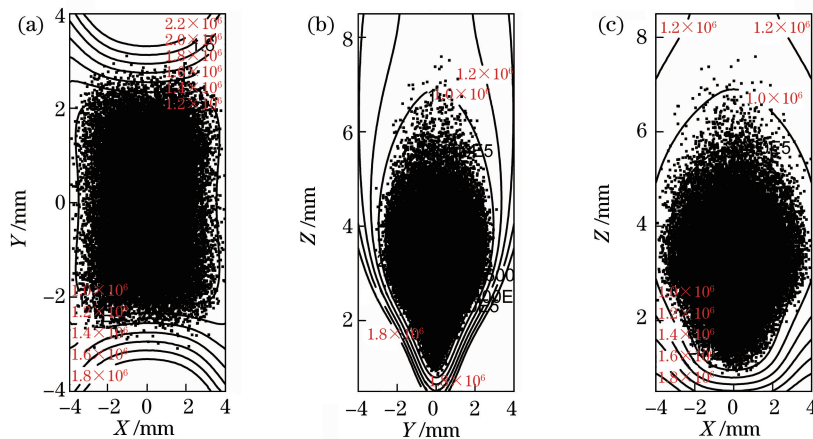


图 3 电场的等高线分布以及被囚禁的冷极性分子在(a) XOY 平面、(b) YOZ 平面和(c) XOZ 平面的空间位置分布

Fig. 3 Contour distributions of electric field and spatial location distributions of trapping cold polar molecules in (a) XOY plane, (b) YOZ plane and (c) XOZ plane

分子束入射的中心速度一定时,装载效率与装载时刻有关,且存在一个最佳的装载时刻,使得装载效率最大。当入射分子束的中心速度分别为 12,13,14 m/s 时,相应的最佳装载时刻分别为 0.598,0.576,0.533 ms,相应的最大装载效率分别为 51.2%、52.6%和 52.1%。基于不同入射速度下最大装载效率不同,研究了最大装载效率与入射分子束中心速度的关系,如图 4(b)所示。随着入射分子束中心速度的增加,最大装载效率先增大后减小。当入射分子束中心速度为 13 m/s 时,最大装载效率约为 53%。

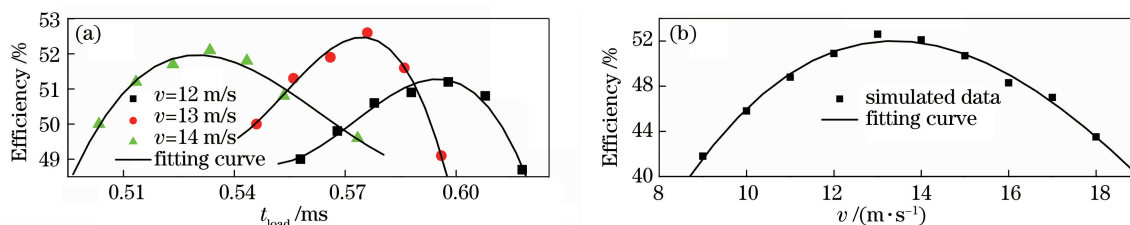


图 4 (a) 3 个不同分子束入射速度下装载效率与装载时间的关系;(b)最大装载效率与入射分子束中心速度的关系

Fig. 4 (a) Relationship between loading efficiency and loading time under three different incident velocities of molecular beam; (b) relationship between maximum loading efficiency and center velocity of incident molecular beam

图 5 分别给出了装载之前(初始)和囚禁之后分子波包在 X、Y、Z 轴 3 个方向上 ND₃ 分子的初始和最终速度分布。从图 5(a)、(b)可以看出,初始 ND₃ 分子束在 X、Y 轴方向的中心速度为 0 m/s,速度分布的半峰全宽为 3 m/s,Z 轴方向的初始速度为 13 m/s,速度分布的半峰全宽为 3 m/s,如图 5(c)所示。最终囚禁在静电阱中的分子波包在 X、Y、Z 轴 3 个方向的中心速度 V_x 、 V_y 、 V_z 均为 0,速度分布的半峰全宽分别为 8.98,8.96,9.06 m/s,被囚禁的冷极性分子的温度约为 35 mK。

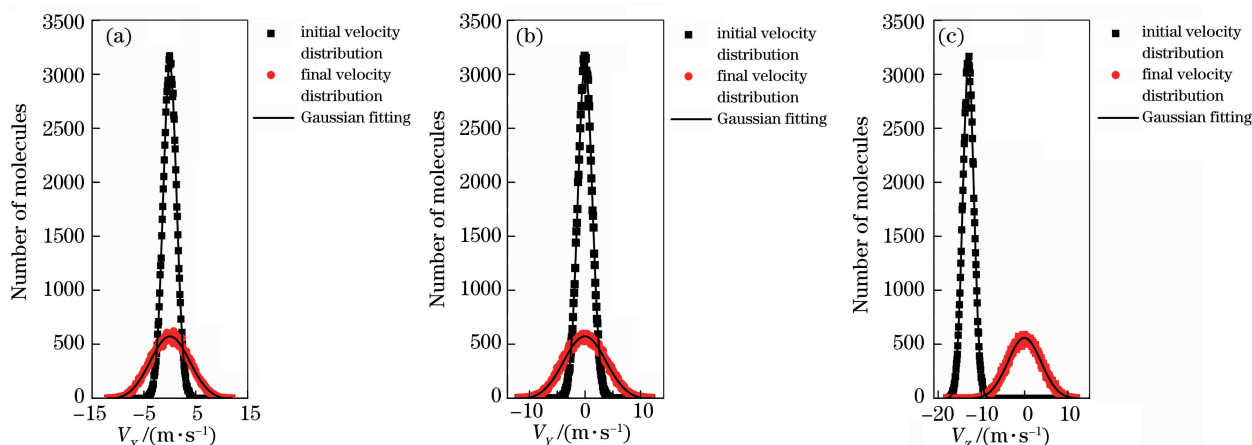


图 5 初始和囚禁后分子波包的速度分布。(a) X 轴方向;(b) Y 轴方向;(c) Z 轴方向

Fig. 5 Velocity distributions of incident and trapping molecular wave packets.

(a) X axis direction; (b) Y axis direction; (c) Z axis direction

4 双阱的数值模拟和结果

如果平板电极的电压 U_{plane} 进一步增大,单阱将演化为双阱。

4.1 对称双阱

单阱时,所用的参数为: $U_{\text{plate}} = -17$ kV, $U_1 = U_4 = 20$ kV, $U_2 = U_3 = -20$ kV。如果进一步增大 U_{plate} ,那么单阱将逐渐演化为对称双阱,这里取 $U_{\text{plate}} = -30$ kV。图 6(a)、(b)分别为被囚禁分子在 XOY 和 YOZ 平面内的空间分布。在蒙特卡罗模拟中,大约有 2.8×10^4 个分子被囚禁在双阱中,囚禁时间为 500 ms。如图 6 所示,分子主要积聚在两个势阱中,为了方便表述,将左、右两阱中的分子数目分别用 N_1 和 N_2 表示。此时, $N_1 / (N_1 + N_2) = N_2 / (N_1 + N_2) = 50\%$ 。

4.2 两种极端情况

可以通过调节 U_3 或 U_2 ,使得只有单阱存在,即只保留左阱或右阱。

如图 6(c)、(d)所示,当 U_3 从 -20 kV 减小到 0 kV 时,只有左势阱存在,分子只能被囚禁在左阱中。左阱中的分子数占总分子数的比例为 $N_1/(N_1 + N_2) = 100\%$ 。

与之相反,当 U_2 从 -20 kV 减小到 0 kV 时,只有右势阱存在,分子只能被囚禁在右阱中,如图 6(e)、(f)所示。左阱中的分子数占总分子数的比例为 $N_1/(N_1 + N_2) = 0\%$ 。

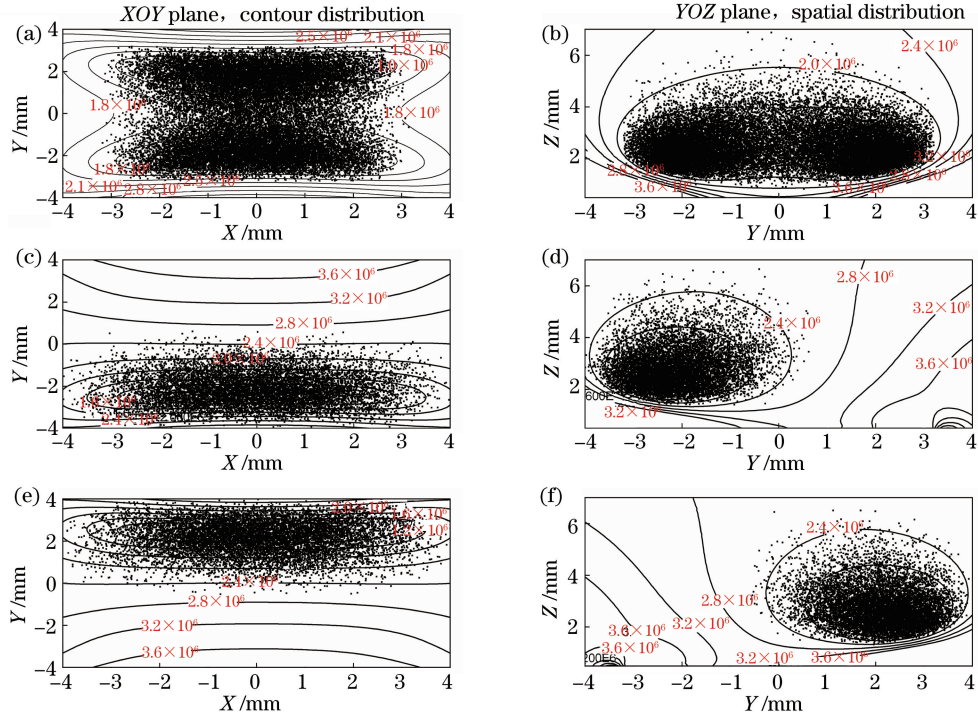


图 6 电场等高线分布和被囚禁的冷极性分子空间分布。(a)(b)冷极性分子被囚禁在双阱;
(c)(d)冷极性分子被囚禁在左阱;(e)(f)冷极性分子被囚禁在右阱

Fig. 6 Contour distributions of electric field and spatial distributions of trapping cold polar molecules.

(a)(b) Cold polar molecules trapped in double wells; (c)(d) cold polar molecules trapped in left well;

(e)(f) cold polar molecules trapped in right well

4.3 两个不同的阱

两个不同的阱介于两个对称双阱和只有极端的单阱之间。通过改变 U_2 和 U_3 , 可实现对两个阱中所囚禁的冷极性分子数目比进行调节。先保持 $U_3 = -20$ kV, 将 U_2 从 0 kV 增加到 -20 kV; 然后保持 $U_2 = -20$ kV, 将 U_3 从 -20 kV 减小到 0 kV。

设左阱和右阱中囚禁的分子数和总分子数之比为 R 。如图 7 所示, 将电压差 $\Delta U = |U_2| - |U_3|$ 设置为 $-15, -14, -13, -12, -11, -8, 8, 11, 12, 13, 14, 15$ kV, 那么对应的 $N_1/(N_1 + N_2)$ 分别为 $0.4\%, 7.5\%, 24.1\%, 32\%, 36.3\%, 44.3\%, 55.7\%, 63.7\%, 68\%, 75.9\%, 92.5\%, 99.6\%$, 相对应的 $N_2/(N_1 + N_2)$ 分别为

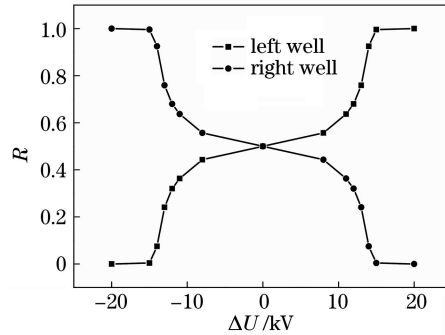


图 7 R 随 ΔU 的变化

Fig. 7 Variation in R with ΔU

99.6%, 92.5%, 75.9%, 68%, 63.7%, 55.7%, 44.3%, 36.3%, 32%, 24.1%, 7.5%, 0.4%。通过合理地调节 U_1 和 U_2 , 可以使 $N_1/(N_1+N_2)$ 从 0% 变化到 100%; 与之对应, $N_2/(N_1+N_2)$ 可从 100% 变化到 0%。

5 结 论

提出了一种针对弱场搜寻态冷极性分子的表面囚禁新方案。利用有限元软件进行建模, 计算了在装载和囚禁过程中的空间电场分布情况。为了得到一个更直观的图像, 用经典的蒙特卡罗方法模拟了静电单阱装载和囚禁冷极性分子的动力学过程。结果表明, 装载效率和装载时刻都与入射分子束的中心速度有关。装载时刻存在最佳值, 装载过程过早或过晚切换到囚禁过程均不能最大限度地囚禁更多的冷极性分子。入射分子束的中心速度也存在最佳值。在一定的电场强度下, 分子束的中心速度过小, 分子还没有到达阱中心位置, 分子束的中心速度就减小为 0, 这时切换电压, 所囚禁的冷极性分子数目较少。如果分子束的中心速度过大, 可能到达阱中心位置时分子束的中心速度还不为 0, 或是分子束的中心速度减为 0 时早已不在阱中心, 这时切换电压, 能捕获的冷极性分子数目较少。模拟表明, 当 ND_3 分子束的中心速度为 13 m/s、装载时刻为 0.576 ms 时, 最大装载效率约为 53%, 最终囚禁在阱中的分子波包温度约为 35 mK。若继续增大平板电极电压, 单阱将对称分裂为两个阱。如果合理调节 U_2 和 U_3 , 可以形成极端情况下的单阱, 或者形成不对称的双阱。左阱和右阱中的分子数目占总分子数目的比例均可在 0%~100% 范围内变化, 同时模拟了单阱对称分裂和不对称分裂的动力学过程。本方案弥补了以往表面囚禁方案只能形成静电单阱的不足, 为接下来研究三维囚禁型冷极性分子静电表面干涉打下基础。物质波干涉在精密测量中有着重要作用, 被囚禁的冷极性分子也可用于研究激发态寿命和量子信息处理等。

参 考 文 献

- [1] Bethlem H L, Berden G, Meijer G. Decelerating neutral dipolar molecules[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(8): 1558-1561.
- [2] Bethlem H L, Berden G, Crompvoets F M, *et al.* Electrostatic trapping of ammonia molecules[J]. *Nature*, 2000, 406(6795): 491-494.
- [3] Dong G J, Lu W P, Barker P F. Decelerating and bunching molecules with pulsed traveling optical lattices[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(1): 013409.
- [4] Dong G J, Lu W P, Barker P F, *et al.* Cold molecules in pulsed optical lattices[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2005, 29(1): 1-58.
- [5] Fulton R, Bishop A I, Shneider M N, *et al.* Controlling the motion of cold molecules with deep periodic optical potentials[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(7): 465-468.
- [6] Hudson E R, Ticknor C, Sawyer B C, *et al.* Production of cold formaldehyde molecules for study and control of chemical reaction dynamics with hydroxyl radicals[J]. *Physical Review A*, 2006, 73(6): 063404.
- [7] Hou S Y, Li S Q, Deng L Z, *et al.* Dependences of slowing results on both decelerator parameters and the new operating mode: Taking ND_3 molecules as an example[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2013, 46(4): 045301.
- [8] Deng L Z, Yin J P. Beam splitter for guided polar molecules with a Y-shaped charged wire[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1695-1697.
- [9] Deng L Z, Liang Y, Gu Z X, *et al.* Experimental demonstration of a controllable electrostatic molecular beam splitter [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(14): 140401.
- [10] Wark S J, Opat G I. An electrostatic mirror for neutral polar molecules[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 1992, 25(20): 4229-4240.
- [11] Xia Y, Yin Y L, Chen H B, *et al.* Quadrupole like electrostatic guiding for cold polar molecules [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2008, 128(9): 094301.
- [12] Xia Y, Yin Y L, Chen H B, *et al.* Electrostatic surface guiding for cold polar molecules: Experimental demonstration [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(4): 043003.
- [13] Meek S A, Conrad H, Meijer G. Trapping molecules on a chip[J]. *Science*, 2009, 324(5935): 1699-1702.
- [14] Veldhoven J V, Bethlem H L, Schnell M, *et al.* A versatile electrostatic trap[J]. *Physical Review A*, 2006, 73(6): 063408.

- [15] Rieger T, Junglen T, Rangwala S A, *et al.* Continuous loading of an electrostatic trap for polar molecules[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(17): 173002.
- [16] Englert B G U, Mielenz M, Sommer C, *et al.* Storage and adiabatic cooling of polar molecules in a microstructured trap [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(26): 263003.
- [17] DeMille D. Quantum computation with trapped polar molecules[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(6): 067901.
- [18] André A, DeMille D, Doyle J M, *et al.* A coherent all-electrical interface between polar molecules and mesoscopic superconducting resonators[J]. Nature Physics, 2006, 2(9): 636-642.
- [19] Gilijamse J J, Hoekstra S, van de Meerakker S Y T, *et al.* Near-threshold inelastic collisions using molecular beams with a tunable velocity[J]. Science, 2006, 313(5793): 1617-1620.
- [20] Willitsch S, Bell M T, Gingell A D, *et al.* Cold reactive collisions between laser-cooled ions and velocity-selected neutral molecules[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(4): 043203.
- [21] Otto R, Mikosch J, Trippel S, *et al.* Nonstandard behavior of a negative ion reaction at very low temperatures[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(6): 063201.
- [22] van de Meerakker S Y T, Vanhaecke N, van der Loo M P J, *et al.* Direct measurement of the radiative lifetime of vibrationally excited OH radicals[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(1): 013003.
- [23] Gilijamse J J, Hoekstra S, Meek S A, *et al.* The radiative lifetime of metastable CO($a^3\Pi, v=0$) [J]. Journal of Chemical Physics, 2008, 127(22): 221102.
- [24] Buhmann S Y, Tarbutt M R, Scheel S, *et al.* Surface-induced heating of cold polar molecules[J]. Physical Review A, 2008, 78(5): 052901.
- [25] Ma H, Zhou B, Liao B, *et al.* Electrostatic surface trap for cold polar molecules with a charged circular wire[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(5): 1228-1230.
- [26] Wang Q, Li S Q, Hou S Y, *et al.* Electrostatic surface trap for cold polar molecules on a chip[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 013701.
- [27] Li S Q, Xu L, Xia Y, *et al.* Adiabatic cooling for cold polar molecules on a chip using a controllable high-efficiency electrostatic surface trap[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(12): 123701.
- [28] Wang Z X, Gu Z X, Deng L Z, *et al.* Cooling and trapping polar molecules in an electrostatic trap[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(5): 053701.
- [29] Mullin W J, Laloë F. Interference effects in potential-wells[J]. Physical Review A, 2015, 91(5): 053629.
- [30] Hänsel W, Reichel J, Hommelhoff P, *et al.* Trapped-atom interferometer in a magnetic microtrap[J]. Physical Review A, 2001, 64(6): 063607.
- [31] Hinds E A, Vale C J, Boshier M G. Two-wire waveguide and interferometer for cold atoms [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(8): 1462-1465.
- [32] Andersson E, Calarco T, Folman R, *et al.* Multimode interferometer for guided matter waves[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(10): 100401.
- [33] Shin Y, Saba M, Pasquini T A, *et al.* Atom interferometry with Bose-Einstein condensates in a double-well potential [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(5): 050405.
- [34] Shin Y, Sanner C, Jo G B, *et al.* Interference of Bose-Einstein condensates split with an atom chip[J]. Physical Review A, 2005, 72(2): 021604(R).
- [35] Kim S J, Yu H, Gang S T, *et al.* Controllable asymmetric double well and ring potential on an atom chip[J]. Physical Review A, 2016, 93(3): 033612.
- [36] Brugger K, Krüger P, Luo X, *et al.* Two-wire guides and traps with vertical bias fields on atom chips[J]. Physical Review A, 2005, 72(2): 023607.
- [37] Cronin A D, Schmiedmayer J, Prichard D E. Optics and interferometry with atoms and molecules[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(3): 1051-1130.
- [38] Chen Kang, Chen Tao, Qian Jun, *et al.* Symmetric matter wave splitting of magnetically insensitive states by standing wave Raman light[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0902001.
陈 康, 陈 涛, 钱 军, 等. 基于驻波拉曼光场的磁不敏态物质波对称分束[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0902001.
- [39] Snadden M J, McGuirk J M, Bouyer P, *et al.* Measurement of the earth's gravity gradient with an atom interferometer-based gravity gradiometer[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(5): 971-974.
- [40] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(11): 2046-2049.

-
- [41] Roberts T D, Cronin A D, Kokorowski D A, *et al.* Glory oscillations in the index of refraction for matter waves[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(20): 200406.
- [42] Ekstrom C R, Schmiedmayer J, Chapman M S, *et al.* Measurement of the electric polarizability of sodium with an atom interferometer[J]. Physical Review A, 1995, 51(5): 3883-3888.
- [43] Lorek D, Lämmerzahl C, Wicht A. Orientational atom interferometers sensitive to gravitational waves[J]. Physical Review A, 2010, 81(2): 023621.
- [44] Dimopoulos S, Graham P W, Hogan J M, *et al.* Testing general relativity with atom interferometry[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(11): 111102.
- [45] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. Precision rotation measurement with an atom interferometer gyroscope[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(11): 2046-2049.
- [46] van de Meerakker S Y T, Bethlem H L, Vanhaecke N, *et al.* Manipulation and control of molecular beams[J]. Chemical Reviews, 2012, 112(9): 4828-4878.