

集成原子光学: 原子芯片*

何明[†] 王谨 涂鲜花 谌维浩

江开军 周欣 李若虹 李可 詹明生

(中国科学院武汉物理与数学研究所 波谱与原子分子国家重点实验室 武汉 430071)

摘要 原子光学是当前研究得比较热的学科,由于原子激光冷却技术和纳米技术的成熟,原子光学朝着微型化和集成化的方向发展.文章主要介绍了当前集成原子光学的一个焦点——原子芯片及其最新实验进展:包括不同形式的原子导引方式,当前原子芯片的实验工作,原子芯片在玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)研究中的应用,以及原子芯片在其他方面的应用前景.

关键词 原子光学,原子芯片,激光冷却,量子信息

Integrated atom optics: atom chips

HE Ming[†] WANG Jin TU Xian-Hua CHEN Wei-Hao

JIANG Kai-Jun ZHOU Xin LI Ruo-Hong LI Ke ZHAN Ming-Sheng

(Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract Atom optics is a maturing field of research. As a result of rapid progress in laser cooling and microfabrication technology, atom optics has seen great development with regard to miniaturization and integration. We review the latest experimental advances in atom chip fabrication, a main focus of integrated atom optics, including various types of atom guides, improvement of the atom chips, application of the chips in Bose-Einstein condensate future potential applications.

Key words atom optics, atom chips, laser cooling, quantum information

1 引言

利用中性原子的波动性质及外场和中性原子的相互作用,可以控制原子的运动,从而在一定情况下可以表现出类似光学中光的某些特性,我们可以称之为原子光学.与普通光学相比,原子光学中有着一些类似的元件,如原子透镜、反射镜、分束片、干涉仪等;除此之外,原子光学还有着一些特有的“耗散”元件,如减速器或冷却器等.1929年, Stern O 及其同事利用金属和晶体表面演示了对原子的反射和衍射,从而开创了原子光学的先河.虽然最初关于原子光学的实验开展的很早,但由于中性原子与电磁场的作用力比较小,难以控制,而且原子本身很难穿透

物质,相比其他粒子光学,如电子光学、中子光学等,原子光学的发展是比较滞后的.

随着近几十年实验技术的进步,特别是微结构技术和可调谐激光技术的发展,原子光学的实验手段得到了很大的完善.这种发展也是由于原子本身的许多优点,如原子容易成束,其精细结构可以被用来和共振激光及静电磁场相互作用,利用光谱技术可精确测量原子的速度和位置,利用激光冷却中

* 中国科学院创新项目(批准号:KJ9X2-W7)和国家自然科学基金(批准号:10074272, 10104018)资助项目

2002-07-09 收到初稿,2003-01-21 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: ninghehu@wipm.ac.cn

性原子可以获得严格准直、同速的原子束等. 近年来, 基于冷原子物理, 尤其是玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 实验的进展, 原子光学有了飞速的发展. 人们设计了形形色色的原子光学器件, 如原子开关、原子反射镜、原子透镜、原子分束器等.

为了提高实验本身的可靠性、稳定性, 需要将这些较大尺寸的分立原子光学器件微型化, 另一方面, 随着冷原子物理实验的进一步深入, 对于冷原子这样一个可控制的量子体系, 人们需要建立相应的介观系统, 如原子的量子阱、量子线、量子点、量子网络等. 正如在电子学中将电子元件微型化而实现了集成的电子芯片, 人们也期望能实现集成的原子光学器件——原子芯片.

在介观量子电动力学中, 控制电子在半导体芯片里运动的势场的尺度, 使其至少在某一维的方向上是和电子的德布罗意波长相匹配. 如果利用纳米技术在一表面上形成带电和载流的微结构, 使其势场的尺度与原子的德布罗意波长相匹配, 也可以使得中性原子在表面上做与半导体中电子类似的微运动. 这样能够控制原子运动的微结构表面, 即形成了原子芯片. 当前方兴未艾的激光冷却原子技术和日益成熟的纳米技术和微电子技术, 使得原子芯片的设想成为现实.

2 集成原子光学

随着冷原子物理和原子光学的逐步融合, 怎样导引冷原子的问题引起了人们广泛的兴趣. 在原子光学中, 原子导引(atom guide)可以形象地看作是一个传递原子的“水管”, 将原子导引至平常方法所难以到达的地方. 对于集成原子光学, 原子导引可以用来传递相干的德布罗意物质波, 其应用将是基本而又关键的, 因此原子导引在当前集成原子光学领域受到了普遍关注, 并有着广阔的应用前景.

2.1 原子导引

2.1.1 光场导引原子

最初的原子导引是利用红失谐的激光射入中空的光纤实现的^[1, 2], 然而用光纤中的红失谐激光场实现对原子的导引有一个很大的缺点: 光纤的尺寸很难做到微米的量级, 离集成原子光学中要求的介观体系的尺寸还有着比较大的差距. 为了克服光纤的限制, 人们也试图直接利用红失谐的激光束来实现对原子的导引^[3], 但和光纤实现的导引一样, 目前还不便于和其他的原子光学器件结合起来.

2.1.2 磁场导引原子

为了实现微型化的原子导引, 人们将目光转向用微结构来对冷原子进行操纵. 冷原子的德布罗意波长可以达到 100nm 或更长, 现有的纳米技术是比较容易设计出这样的微结构的. 给这样的微结构加上电压或通以电流, 即可以得到操纵中性原子的微型势场, 而且这些势场可以和一些传统的原子光学器件如原子反射镜及耗散光场等结合起来, 从而组成新的微结构原子光学器件. 这些微结构还可以进一步组合, 形成更加复杂的结构, 如相干原子分束器和微观原子干涉仪等^[4].

在原子光学中, 通常是将原子与宏观物体尽可能地分离, 以便于获得比较纯粹和分立的量子体系. 在文献[5]中, 作者利用一直径为 150 μm 的钨丝对热 Na 原子进行了导引. 随着激光冷却和囚禁技术的完善, 人们开始设想着将原子和宏观物体相互拉近, 以获得比较微型化的原子光学元件. Denschlag 等人利用一直径为 50 μm 的钨丝对冷原子实现了导引^[6]. 他们演示了两种简单通用的微型化原子导引. 一种为开普勒导引 (Kepler-guide), 如图 1 所示, 此时原子的磁矩 u 与载流导线的磁场 B 平行, 原子围绕着导线作开普勒轨迹运动.

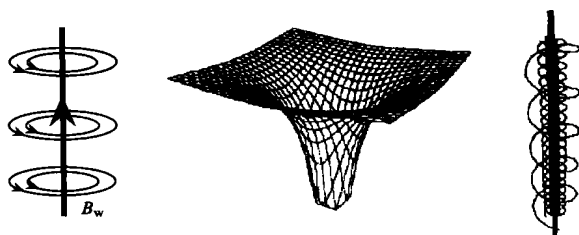


图1 利用开普勒导引对冷原子进行导引

另一种为边导引 (side-guide), 即在载流导线附近加上一个均匀的偏置磁场 B_b , 使导线附近形成一个“通道”, 其中心的磁场强度最小. 如果原子的磁矩 u 与载流导线的磁场 B 反平行, 则原子会被束缚在这个“通道”内, 并沿着载流导线运动, 如图 2 所示. 类似的微型磁导引还包括 Key 等人的工作^[7], 作者利用直径为 261 μm 、间距为 522 μm 的四根载流导线, 形成一个微型原子导引.

2.1.3 电场导引原子

一个极化率为 α 的中性原子在一个带电导线形成的电场中受到一个总为吸引的 $\frac{1}{2} \frac{\alpha}{r^2}$ 势场 (其中 r 为原子到带电导线轴心的距离)^[8]. 虽然原子在该势场中运动没有稳定的轨道, 但其中存在着一系列

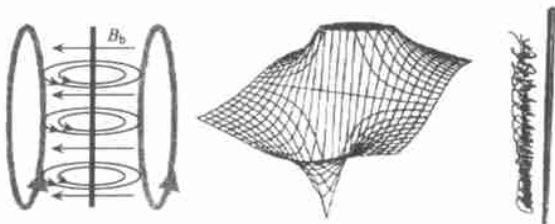


图2 利用边导引对冷原子进行导引

的经典轨道,如果原子绕带电导线的角动量满足一定的条件,原子最终会趋向一个奇点.实验上先利用磁光阱(MOT)制备出冷原子,再将冷原子放置到带电导线处.冷原子在与导线表面碰撞及沿热散射的轨道运动造成一定数目损失之外,还会有相当大的一部分原子会趋向这个奇点,从而在沿带电导线的方向上形成一个原子导引.

2.2 微型磁阱

前面我们知道,由载流导线加上偏置磁场所组成的“边导引”可以实现对中性原子在一维方向(沿导线轴线方向)上的囚禁和导引.如果将这样的边导引弯曲,即可以形成三维空间上的微型磁阱^[9].利用弯曲的载流导线和一个均匀的偏置磁场,可以得到两种简单而又通用的磁阱——“U”型磁阱和“Z”型磁阱,如图3所示.

在文献[9]中,给出了一个由导线组成的“Z”型磁阱的外观图[图4(a)],通过改变导线上的电流和偏置磁场,可以改变磁阱的大小和位置,从而可以控制微型磁阱中的中性原子[图4(b)].从图中可以看到,在相同载流的情况下,磁阱本身的大小和磁阱中心离金属线的距离都随着偏置磁场的增大而减少;在相同偏置磁场的情况下,磁阱本身的大小和磁阱中心离金属线的距离都随着导线上电流的增大而减少.

3 原子芯片

3.1 原子芯片

在实现了越来越多的诸如原子导引、微型磁阱等原子光学器件后,人们开始设想将其微型化并把这些微小结构集成到一个芯片上,形成真正意义上的原子芯片.人们首先想到的是在一个芯片表面上实现原子导引.在芯片表面上实现的原子导引的原理类似于前面所介绍的“边导引”,只是利用光刻技术^[10]在芯片上形成的金属细线尺度更小(可以达到150nm),所形成的磁场梯度更大^[11,12],而且固定

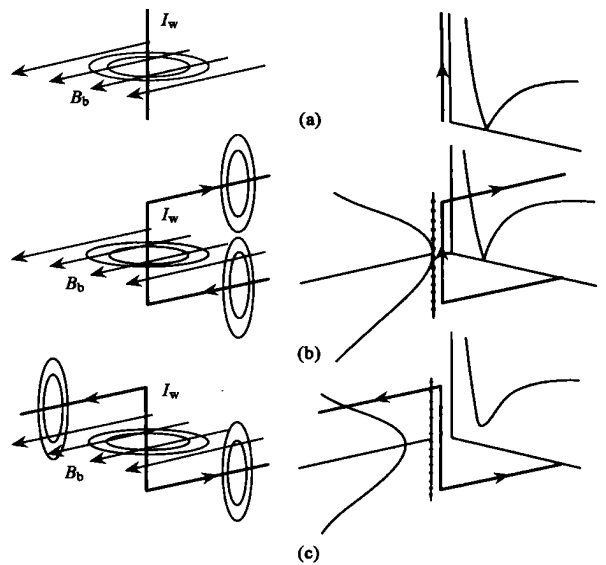


图3 利用弯折的载流导线所形成的微型磁阱,图中右侧为沿径向和轴向的磁场分布图

(a)边导引:一根载流导线加上一个均匀的偏置磁场;(b)“U”型微型磁阱:上下两端折向同一方向,加上偏置磁场可在中间导线附近形成一个四极磁阱;(c)“Z”型微型磁阱:上下两端朝向相反,加上偏置磁场可在中间导线附近形成一个 Ioffe-Pritchard 磁阱

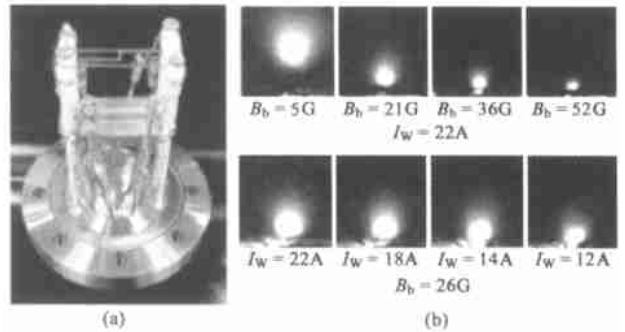


图4 (a)一个“Z”型磁阱的外观图;(b)通过改变导线上的载流和外加的偏置磁场可以改变磁阱的大小和位置,从而可以实现控制磁阱中的原子

在芯片表面上的金属细线在稳定性方面大大提高.如果一个原子光学元件在芯片表面上能成功地实现的话,也能够很容易地进行复制,并且不同的微型原子光学器件在芯片表面上可以更可靠地相互连接起来,从而形成复杂的原子光学回路. Dekker 等人首先在一个芯片表面上利用微结构的载流导线实现了原子导引^[13],其结构如图5所示.

Schmiedmayer 领导的小组也在芯片表面的微结构上实现了对中性原子的控制和导引^[14],其精巧的设计和漂亮的结果,使他们有理由自豪地将他们的芯片称为“原子芯片”,如图6所示.实验中所用的

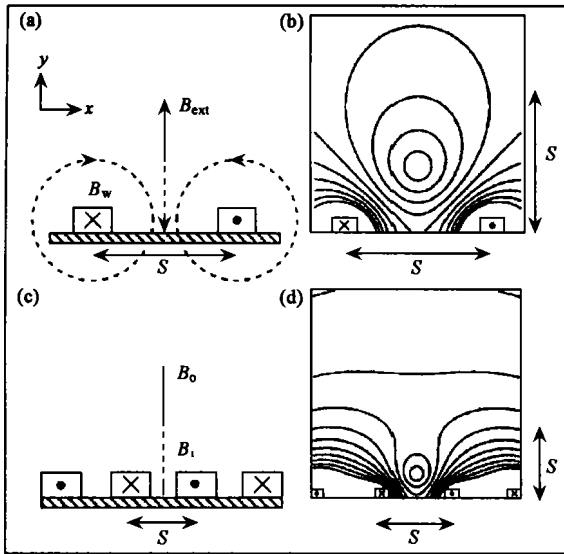


图5 (a) 由两根金属细线组成的原子导引: 其电流的方向相反, 并外加一个大小为 B_{ext} 的均匀偏致磁场; (b) 由两根金属细线组成的原子导引的磁场等势线分布; (c) 由四根金属细线组成的原子导引: 相邻细线的电流方向相反; (d) 由四根金属细线组成的原子导引的磁场等势线分布

原子芯片是先在一个厚度为 $600\mu\text{m}$ 的 GaAs 基片镀上一层 $2.5\mu\text{m}$ 厚的金膜, 然后通过纳米技术在金膜上刻出所需的精细结构, 最终在芯片表面上形成 $200\mu\text{m}$ 宽度的金属细线和 $10\mu\text{m}$ 宽度的金属细线. 根据实验需要, $10\mu\text{m}$ 的金属细线可以和 $200\mu\text{m}$ 的金属细线组合成不同的“U”型结构和“Z”型结构, 实验中再外加一个均匀的偏致磁场, 即可形成一个原子磁导引.

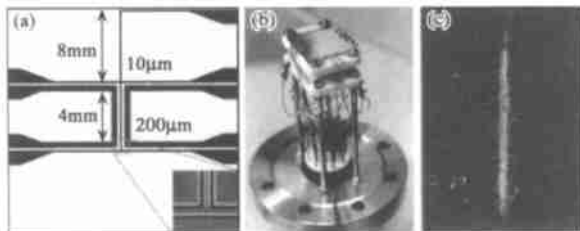


图6 (a) 原子芯片表面的设计示意图, 图中只显示了实验中所用到的 $200\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的金属细线, 左下角的插图为虚线部分在电子显微镜下的观察图像; (b) 原子芯片的外观图; (c) 在原子芯片上实现对冷原子的导引

文献[12]中所实现的原子芯片, 集成了一系列微型磁阱和磁导引, 而利用现有的纳米技术(小于 $1\mu\text{m}$) 可以制作出更精细的芯片, 从而为冷原子物理和集成原子光学提供了一个非常好的研究介观量子体系的平台.

3.2 原子芯片中的 BEC

给芯片表面的金属导线通上一个适度的电流,

即可以产生一个有着很大磁场梯度的微型磁阱, Ott 等人利用这样的磁阱实现了芯片表面的 BEC^[15]. 如图 7 所示, 其中 (a) 图为实验中所用微结构的电子扫描成像, (b) 图为最终获得的 BEC 的吸收成像.

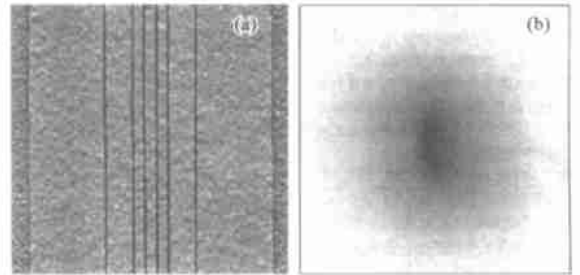


图7 (a) 芯片表面微结构的电子扫描成像, 图中金属导线的宽度分别为 $30\mu\text{m}$, $11\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$, 所有导线的厚度为 $2.5\mu\text{m}$; (b) 最终获得的 BEC 的吸收成像

随着刻蚀技术的发展, 人们已经可在一个表面上集成一系列的微型磁阱、导引和其他原子光学元件, 从而可以获得原子芯片^[12,14]. Hensel 等人利用原子芯片表面的微型磁阱同样也获得 BEC^[16]. 图 8 中 (a) 和 (b) 分别为实验中的原子芯片示意图及其在该芯片上最终所实现的 BEC.

利用芯片表面的微型磁阱实现 BEC, 展现了原子芯片一个潜在的优势: 通过芯片表面微细的导线结构设计, 可以实现许多很复杂的势场. 如图 8(a) 中, 在实现 BEC 的 C_1 区域的右方, 还有一个可以实现对原子进行传递的“磁传送带”^[5,17]. Hensel 等人在原子芯片表面实现 BEC 之外, 同时也在芯片表面实现了对 BEC 的传递, 如图 8(c) 所示.

在原子芯片表面实现 BEC, 这在当前集成原子光学领域可以称得上是里程碑性的工作. 从图 7 和图 8 可以看到, 基于原子芯片的实验设计非常简单和通用, 而相应的势场则非常精细, 可以预见将来原子芯片中的 BEC 实验还会取得更多丰硕的成果.

4 原子芯片的目前研究状态和前景

集成原子光学的巨大进展, 尤其是原子芯片的出现, 吸引越来越多的研究小组投入到这个热门的课题. 然而, 原子芯片的完善还有许多工作需要努力: (1) 要求更小尺寸的微结构(小于 $1\mu\text{m}$); (2) 目前原子芯片上的设计都是微细的金属平行线和折线的简单组合, 而复杂的原子芯片则需要设计相交金属细线的衔接装置; (3) 在原子芯片上实现对原子的存储; (4) 在原子芯片上实现对光路和其他有些设施

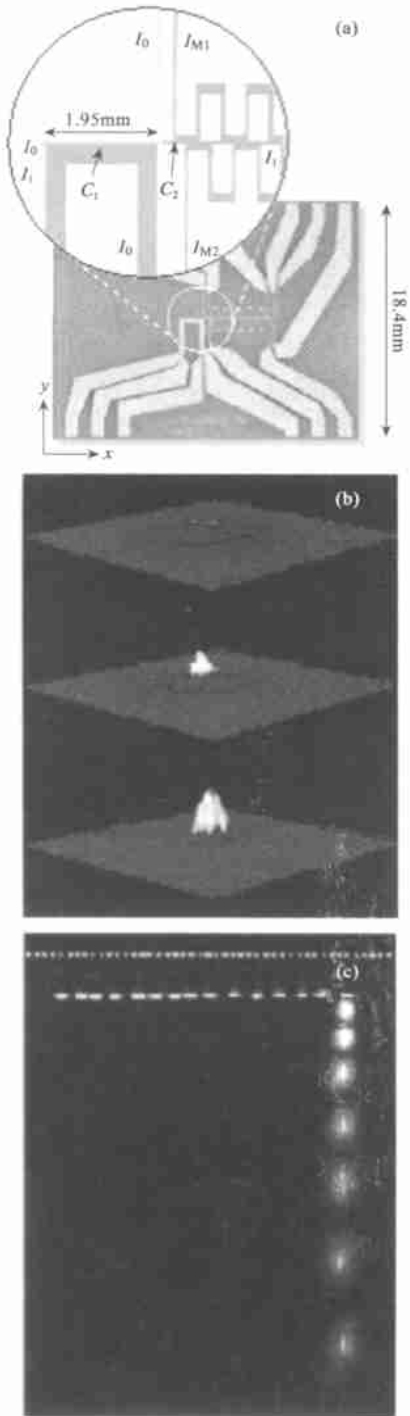


图8 (a) 芯片表面刻蚀的金属线的示意图, 其中插入的小框展示的是用来囚禁和传递的相关部分; (b) 冷原子弹性扩散后的 TOF 吸收成像, 可以看到在原子的动量分布中出现了各向异性的突起尖峰, 即为 BEC 的一个关键标志; (c) 在原子芯片表面利用“磁传送带”实现对 BEC 进行传递

的集成. 利用原子芯片对原子的相干性进行研究的工作也在开展, 在 Andersson 等人的工作中, 讨论了怎样利用已有的 Y 型原子分束器来实现物质波的多模干涉仪^[18].

原子芯片的出现和发展, 为原子光学和量子信息处理(quantum information procession) 的结合提供了契机. 我们知道单个中性原子的内态(超精细结构) 可以被看作为一个量子比特(qubit), 而利用中性原子做量子信息处理的一个很大的优越性就是便于操作. 由于偶极抑制效应(dipole blockade), 可以利用一个激光脉冲操纵一团原子中的单个原子, 从而实现中性原子团中的单个原子(qubit) 进行编码. 利用高里德伯态原子之间的偶极相互作用可以形成两个 qubit 的快速量子门^[19]. 通过触发微型阱, 控制阱中原子的振动, 同样也可以实现两个 qubit 量子门, 并可实现可控制的纠缠^[20].

原子芯片是实现单原子囚禁的一个比较理想的平台, 通过对微型阱中所囚禁的单原子加上外场(如激光, 电磁场) 作用, 即可以实现对原子 qubit 的量子位操作. 通过控制不同微型阱中原子之间的相互作用, 即可以实现原子 qubit 之间的纠缠. 当前在原子芯片上实现对原子的量子信息处理操作还存在着很大的困难: 如怎样在微型阱中导入单原子, 怎样对原子分别进行操作, 以及怎样对单个原子进行探测等. 尽管如此, 近两年在集成原子光学——原子芯片领域所取得的丰硕成果, 使我们有理由相信, 原子芯片不但在原子光学领域, 而且在量子信息处理方面也有着很广泛的应用前景.

参 考 文 献

[1] Renn M J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75: 3253
 [2] Renn M J *et al.* Phys. Rev. A., 1996, 53: R648
 [3] Wolschrijn B T *et al.* arXiv: physics/ 0201068 (2002)
 [4] Cassetari D *et al.* Appl. Phys. B, 2000, 70: 721
 [5] Schmiedmayer J. Phys. Rev. A, 1995, 52: R13
 [6] Denschlag J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 2014
 [7] Key M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84: B71
 [8] Denschlag J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 737
 [9] Haase A *et al.* Phys. Rev. A., 2001, 64: 043405
 [10] Drudié M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 72: 2906
 [11] Weinstein J D *et al.* Phys. Rev. A., 1995, 52: 4004
 [12] Thywiss J H *et al.* Eur. Phys. J. D., 1999, 7: 301
 [13] Dekker N H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 1124
 [14] Folman R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 4749
 [15] Ott H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 230401
 [16] H-nsel W *et al.* Nature, 2001, 413: 498
 [17] H-nsel W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 608
 [18] Anderson E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 100401
 [19] Jaksch D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 2008
 [20] Calamo T *et al.* Phys. Rev. A., 2000, 61: 022304