

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 44



光学参量下转换的动力学 及其产生的光在演示 EPR 佯谬中的理论研究

- 作者：赵超樱
- 专业：无线电物理
- 导师：谭维翰 周世平



G643/217

上海大学出版社

001289220

2006年上海大学博士学位论文 44



光学参量下转换的动力学 及其产生的光在演示 EPR 佯谬中的理论研究

- 作者：赵超樱
- 专业：无线电物理
- 导师：谭维翰 周世平



贵阳学院图书馆



GYXY1289220

055885100

上海大学图书馆

2006 年上海大学博士学位论文

图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 1 辑/博士学位论文
编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-81118-511-9

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—
2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162521 号



2006 年上海大学博士学位论文
——第 1 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 264.75 字数 7 376 千

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—400

ISBN 978-7-81118-511-9/G·513 定价: 1000.00 元(50 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

上海大学

**Theoretical investigation of light
generated by optical parametric
down-conversion and its application
in the demonstration of the EPR paradox**

Candidate: Zhao Chaoying

Major: Wireless Physics

Supervisors: Tan Weihan Zhou Shiping

Shanghai University Press

• Shanghai •

答辩委员会 上海大学 的评语

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任: 林福成	研究员, 上海光机所	201800
委员: 林尊琪	研究员, 院士, 上海光机所	201800
傅恩生	研究员, 上海光机所	201800
董传华	教授, 上海大学	200444
施耀铭	教授, 上海大学	200444
导师: 谭维翰	教授, 上海大学	200444
周世平	教授, 上海大学	200444

总的来说,该论文为一篇优秀的博士论文,选题具有创新性,讨论的问题和得到的物理结论很有价值,理论分析严谨,研究成果有较高水平,表明作者具有扎实的理论基础和

学大博士

合份方面, 查审员委补全会员委候答登文印本

求要量测文印份学士科学大博士

评阅人名单

彭堃辉	教授(院士), 山西大学光电研究所	030006
李师群	教授, 清华大学物理系	100084
林尊琪	研究员(院士), 上海光机所	201800

评议人名单

林福成	研究员, 上海光机所	201800
傅恩生	研究员, 上海光机所	201800
董传华	教授, 上海大学	200444
施耀铭	教授, 上海大学	200444
郭奇志	副教授, 上海大学	200444

答辩委员会对论文的评语

量子纠缠是量子信息科学的核心和物理基础,光学参量下转换是产生纠缠态的重要物理过程。该论文分成两部分:

一、通过求解 Fokker-Planck 方程,从理论上讨论了存在损耗情况下,非简并光学参量放大器的动力学行为,并对 EPR 量子关联特性进行了分析。

二、将近轴光学的 ABCD 定理推广到一般空间光线和非旋转对称情况。

两个部分的创新性都是明显的,主要表现在:(1)在计算方法上,将一个 NOPA 等价于两个参数不同的 DOPA,再以后者为基础求解前者,获得了某些与过去不同的结果;(2)发展了可应用于 QPM 技术的计算相位不匹配 Fokker-Planck 方程的解的方法;(3)发展出计算非线性 Fokker-Planck 方程,含时 Fokker-Planck 方程的方法,可用于讨论泵浦耗尽的光学参量下转换过程,用于研究 EPR 佯谬时得到一些有价值的结果;(4)在解释 EPR 佯谬实验的理论中,论文分析结果较前文的结果与 Z. Y. Ou 的实验符合程度有了很大幅度的提高;(5)把近轴光学理论推广到轴外,可适用于实际光学系统中传输时的象差分析。

总的来说,该论文为一篇优秀的博士论文,选题具有创新性,讨论的问题和得到的物理结论很有价值,理论分析严谨,研究成果有较高水平,表明作者具有扎实的理论基础和

对所研究领域的专门知识,且每个章节都对应有文章发表,成果丰硕。该论文已经达到博士论文水平,答辩中能正确回答所提问题。经答辩委员会讨论,一致通过论文答辩,建议授予她博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过赵超樱同学的博士学位论文答辩,建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席: **林福成**

2006 年 5 月 19 日

摘 要

参量下转换是物理上常用来产生非经典态的一种很有用的方法。

1986 年,吴令安等人首次在实验上通过参量下转换过程产生单模正交压缩光。1988 年, M. D. Reid 和 P. D. Drummond 率先在理论上提出了通过非简并参量下转换过程可实现两连续变量的 EPR 双光子对。1992 年, Z. Y. Ou 等利用阈值以下的非简并参量下转换过程首次在实验上实现了连续变量的 EPR 双光子对。1997 年,奥地利的一个研究小组用参量下转换的方法产生 EPR 关联粒子。参量下转换产生的光子纠缠态也是量子信息与通讯的基础。近年来关于参量下转换的研究广泛和迅猛地发展。在阅读了大量的有关参量下转换的理论和实验文献的基础上,我们主要在对参量下转换的动力学理论上做了一些工作:

(1) 求得理想情况下一个非简并参量放大系统的 Fokker-Planck 方程的解析解,一个非简并参量放大系统可以看成是由两个参数分别为 $(\frac{\epsilon}{2}, \frac{k}{\sqrt{2}})$ 和 $(-\frac{\epsilon}{2}, 0)$ 的简并参量放大系统所共同构成的。相对于简并参量放大系统,压缩度提高了一倍;

(2) 求得相位不匹配情况下 Fokker-Planck 方程的一个新的解析解,并将结果应用于以 LiNbO_3 晶体作为 QPM 参放晶体的装置中,得出损耗系数 k 对压缩态特性的影响。当 $k=0$

时, Langevin 方程和 Fokker - Planck 方程对求解简并光学参量放大和非简并光学参量放大的量子特性均适用, 但当 $k \neq 0$ 时, 只能采用 Fokker - Planck 方程。由于准相位匹配的性质决定了阈值处的压缩稍逊于相位匹配时的。当损耗很小时, 接近于理想压缩。当损耗很大时, 接近于真空起伏。随着损耗逐步增加压缩呈减小的趋势;

(3) 将一个在 P 表象中的非线性简并参量放大 Fokker - Planck 方程转换为一个含时线性驱动的 Fokker - Planck 方程并求其解, 在阈值以下或阈值附近, 含时驱动 Fokker - Planck 方程的解与线性理论或阈值附近的微扰理论预言的基本相符。但在阈值以上, 解的短时行为也与线性近似解相近。但当 τ 增大后的长时行为压缩度为 $1/2$ 完全区别于线性理论的结果。这些特点提供了获得最大压缩最大参量输出选择参数的依据;

(4) 给出了考虑泵浦吃空后的简并参量放大系统的 Fokker - Planck 方程的一个通解, 若略去与 η (损耗与增益之比) 成正比的项, 则通解很自然过渡到线性近似解; 计及与 η 成正比的项后, 其解与 Drummond 的微扰论的稳态解的结果相比较, 发现微扰稳态解只适用于阈值附近的情况, 但在远离阈值处就不适用了。我们的理论在阈值附近及离阈值较远的整个区域均成立。非线性理论的压缩曲线稍高于线性理论的压缩曲线。当 (泵浦功率与阈值之比) $\mu \rightarrow 0$ 时起伏, 趋近于真空起伏; 而 $\mu \gg 1$ 时, 压缩增大, 趋近 $\frac{1}{1+\mu}$ 线性理论;

(5) 利用非简并参量放大系统中 Fokker - Planck 方程的解计算实现 EPR 佯谬的最佳值。其值随着相对损耗 η 的减小

而减小,而此处的最佳压缩 r 随着相对损耗 η 的减小而增大。实现 EPR 佯谬的最佳压缩并不是最大压缩,而是相对于每一个有限 k 都有一个适当值。Reid 研究了不考虑损耗时的特殊情况,当压缩很大时, $V = \frac{1}{2ch(\epsilon r)}$ 给出最佳值。当 η 分别取 0, 0.1, 1, 2 时,这可以从压缩曲线的变化趋势中看出。该结果与 Z. Y. Ou 实验符合程度有了很大幅度的提高;

(6) 给出了含时线性驱动的非简并光学参量放大系统的 Fokker - Planck 方程的解析解,获得了压缩特性以及 EPR 纠缠。

所以,我们说通过对光学参量下转换过程中非线性动力学研究,包括色散效应(相位失谐)、损耗、泵浦吃空、驱动场含时等对量子起伏与纠缠的影响以及在量子测量和量子信息领域的应用,为实际中的应用提供了理论基础。综上所述,本论文对参量下转换的全量子理论作出了较全面的研究,所涉及的一系列工作是国内理论工作中获得最系统的结果。

关键词 简并(非简并)光学参量放大器,量子起伏, EPR 佯谬

Abstract

The parametric down-conversion is a useful method to obtain non-classical state in quantum optics. (1) The analytical solution of the Fokker - Planck equation of Non-degenerate Optical Parametric Amplification (NOPA) for generation of squeezed light is presented. The maximum intra-cavity compression of squeezed light derived from the analytical solution is $1/16$ (vacuum fluctuations $1/4$). To compare it with that of the previous result $1/8$ of Degenerate Optical Parametric Amplification (DOPA), it seems that the squeezing for NOPA is superior to the squeezing for DOPA. (2) An analytical solution of the phase-mismatched Fokker - Planck equation and the amplitude quantum fluctuation after passing through the periodically inverted quasi-phase-matched (QPM) device are obtained. The calculated results for QPM device, conform to that of the Langevin equation in the case of no loss $k = 0$, in the noise case $k \neq 0$, mainly resorts to the solution of F - P equation. From which we can derive the knowledge about the dependence of squeezing on the loss coefficient k . The squeezing is nearly perfect for small loss $k = 0.2 \times \epsilon_0$, make a comparison between the QPM device and phase matched device at threshold $k = \epsilon_0$, our result $1/6.7$ shows slightly ineffective than that of $1/8$ in phase-matched

device, the squeezing decrease continually for loss $k > \epsilon_0$, near the vacuum fluctuations for very large loss. (3) A detailed analysis of the quantum fluctuations in a DOPA is given when the pump depletion is present. we first deduce the time-dependent linearly driven Fokker - Planck equation of the Degenerate Optical Parametric Amplification (DOPA) in the generalized positive - P representation and evaluate its exact solution. Both the above-and below-threshold behavior is calculated. Our results below threshold or near threshold conform to that obtained by the linear theory or perturbation series expansion near threshold. Above threshold, the short-time behavior is close to the linearization approximation, whereas with the increase of τ , the long-time behavior shows squeezing is always 1/2 quite different from the linear theorem. These characteristics of squeezing provide a method of parameter control for the maximum squeezing. (4) An analytical solution of the Fokker - Planck equation of the nonlinear time-dependent degenerate optical parametric amplification (DOPA) in the P representation for generation of squeezed light under considering the pump depletion is presented, then, evaluate the quantum fluctuation near or far away from threshold. If neglect the term ($\propto \eta$), the ordinary solution transitions to the previous obtained linear approximate solution naturally. When consider of the term ($\propto \eta$), we compare our solution to that of Drummond et. al, our results conform to that obtained by the perturbation series expansion theory near threshold, and apply for the whole

region far away from threshold. When $\mu \rightarrow 0$, quantum fluctuation is close to vacuum fluctuation. While $\mu \gg 1$, the squeezing is near to the linear theory $1/(1 + \mu)$. (5) The solution of the Fokker - Planck equation for non-degenerate parametric amplification to deduce the condition of optimum realization of the EPR paradox is obtained. The numerical simulation shows that the optimum realization of EPR paradox can be achieved by adjusting the degree of squeezing and this is the limit to demonstration of the EPR paradox for a certain finite loss k . The squeezing for optimum realization EPR paradox is not the largest, but an appropriate value for each finite loss k . Obviously, the realization of EPR paradox studied by Reid belongs to the special case of no loss $k = 0$, in the limit of the squeezing ϵr very large, $V = 1/2ch(\epsilon r)$ gives the optimum realization. This can be seen from the trend of curve with $\eta = 0, 0.1, 1, 2$ shown in Squeezing curve. To a great extent, the result quite accords with the experiment, which done by Z. Y. Ou. (6) Based on (1) and (5), we use the solution of the time-dependent Fokker - Planck equation of non-degenerate optical parametric amplification to deduce the condition of demonstration of the EPR paradox. The analytics and numerical calculation show the influence of pump depletion on the error V in the measurement of continuous variables. And then achieve the optimum realization of EPR paradox by adjusting the parameter of squeezing. As a result, the curves belong to the time-dependent move up and left relative to the curves belong to

the time in-dependent case. The result shows that the optimum realization of EPR paradox can be achieved by adjusting the degree of squeezing and this is the limit to demonstration of the EPR paradox for a certain finite loss k .

By studying the non-linear effect of optical parametric down-conversion, including phase-mismatched, loss, pump depletion, we obtain the quantum fluctuation and entanglement and application them for quantum measurement and quantum information, these theoretical investigation provide base for the actual experimental. Sum up, we make a comprehensive and detail work about optical parametric down-conversion, which studying by full quantum machine, and the above results being integral system.

Key Words degenerate (non-degenerate) optical parameter amplification, quantum fluctuation, EPR paradox

目 录

第一章 参量下转换的简介	1
1.1 定义与分类	1
1.2 参量下转换理论	2
1.2.1 参量放大	2
1.2.2 参量振荡(双频共振与单频共振)	3
1.2.3 色散与调谐(位相匹配)	6
1.2.4 Kuwait 实验	8
1.2.5 P 表象与正 P 表象	9
1.3 参量下转换的应用	14
1.3.1 压缩态	14
1.3.2 纠缠态	16

第二章 由非简并光学参量放大系统获得压缩态光所满足的 Fokker - Planck 方程及其解	18
2.1 非简并参量下转换的 Fokker - Planck 方程	19
2.2 简并参量下转换系统的 Fokker - Planck 方程的求解	21
2.3 非简并参量下转换的量子起伏	26
2.4 本章小结	29

第三章 位相不匹配情形 Fokker - Planck 方程的解及其在准位 相匹配参量放大中的应用	31
3.1 位相不匹配情况下的 Fokker - Planck 方程的解	32
3.2 参量下转换的 Langevin 方程与解 Fokker - Planck 方程 中得出的 $B, \tilde{B}$ 方程	42
3.3 将位相不匹配的 Fokker - Planck 方程的解应用到 QPM 技术上	45
3.4 数值计算结果与分析	47
3.5 本章小结	52
第四章 含时的线性驱动简并参量放大系统的量子起伏	53
4.1 非线性简并参量放大与含时的线性驱动简并参量放大 Fokker - Planck 方程	54
4.2 含时的线性驱动 Fokker - Planck 方程的解	57
4.3 含时的线性驱动简并参量放大 Fokker - Planck 方程 的解	59
4.4 简并参量放大系统的量子起伏计算	62
4.5 本章小结	66
第五章 非线性简并光学参量放大系统的量子起伏	67
5.1 P 表象中非线性简并参量放大 Fokker - Planck 方程的 通解	68
5.2 线性近似解	73
5.3 非线性项修正	74
5.4 本章小结	80