

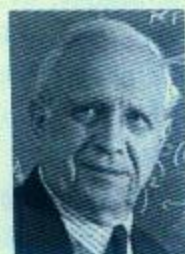
现代量子光学的发端和物理学精密测量的新巅峰 ——2005年诺贝尔物理学奖成果介绍

Beginning of Modern Quantum Optics and New Highlight of Physical Precision Measurements —— Introduction to Achievements of Nobel Prize for Physics for 2005

李师群 / LI Shi-qun

清华大学物理系, 北京 100084

Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China



Roy J. Glauber



John L. Hall



Theodor W. Hänsch

[摘要] 瑞典皇家科学院决定, 授予路易·格劳伯 (Roy J. Glauber)、约翰·霍尔 (John L. Hall) 和提阿多·汉斯 (Theodor W. Hänsch) 2005 年度的诺贝尔物理学奖。格劳伯是因为他在光相干的量子理论方面的贡献, 霍尔和汉斯则是因为他们在发展激光精密光谱学, 包括光频梳 (optical frequency comb) 技术方面的贡献, 而分别获此殊荣的。按历史进程简单评述了现代量子光学的发端, 给出了现代量子光学的内容概要, 较详细地介绍了汉斯和霍尔是如何发展光频梳技术以精确测量光频的。

[关键词] 2005 年度诺贝尔物理学奖, 光相干的量子理论, 量子光学, 激光精密光谱学, 光频梳, 原子钟, 光钟

[中图分类号] O431.2, O433.1, O433.5+4

[文献标识码] C

[文章编号] 1000-7857(2005)12-0012-04

Abstract: The Royal Swedish Academy of Science has decided to award the Nobel Prize for Physics for 2005 to Roy J. Glauber for his contribution to the quantum theory of optical coherence, and to John L. Hall and Theodor W. Hänsch for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique. The beginning of modern quantum optics is briefly reviewed according to history, and an outline in this field was presented. It was introduced in detail how Hänsch and Hall developed the optical frequency comb technique for precision measurement of optical frequency.

Key Words: Nobel Prize for Physics for 2005, quantum theory of optical coherence, quantum optics, laser-based precision spectroscopy, optical frequency comb, atomic clock, optical clock

CLC Numbers: O431.2, O433.1, O433.5+4

Document Code: C

Article ID: 1000-7857(2005)120012-04

2005 年 10 月 4 日瑞典皇家科学院宣布, 美国哈佛大学的路易·格劳伯 (Roy J. Glauber)、美国国家标准和技术研究所 (NIST) 的约翰·霍尔 (John L. Hall) 和德国马克斯-普朗克量子光学研究所 (MPQ) 的提阿多·汉斯 (Theodor W.

Hänsch) 共同获得 2005 年度的诺贝尔物理学奖^[1]。授予格劳伯该奖是为了表彰他在 40 多年前建立光相干的量子理论方面所做的奠基性工作, 而授予霍尔和汉斯该奖则是为了表彰他们多年来在发展激光精密光谱学, 包括近年来的光频梳 (optical

frequency comb) 技术方面做出的杰出贡献。

3 位获奖者做出杰出贡献的工作都属光学领域。路易·格劳伯是量子光学的奠基者; 约翰·霍尔是激光光谱学和精密光学计量的专家; 提阿多·汉斯是激光光谱

收稿日期: 2005-11-22

作者简介: 李师群, 男, 北京海淀区清华大学物理系, 教授, 主要研究方向为量子光学与原子光学、光子学物理、纳米光学;

E-mail: lishq@mails.tsinghua.edu.cn

学、量子光学、冷原子物理专家(汉斯和肖洛——1981年诺贝尔物理学奖得主之一——1975年提出的激光冷却原子的物理思想^[2]、开创了激光冷却和囚禁原子的技术发展方面)。

纵观近10年来诺贝尔物理学奖的授奖领域,属光学或与光学紧密相关的已有2次(1997年的激光冷却和囚禁原子,2001年的玻色—爱因斯坦凝聚),因此,2005年的诺贝尔物理学奖可以说是近10年来对光学的再次关注和聚焦。

1 现代量子光学的发端

现代量子光学是基于量子理论研究光的相干性和统计性,以及光和物质相互作用的量子性质的光学的一个分支。1963年路易·格劳伯在Phys. Rev. Lett. 和 Phys. Rev. 上发表了3篇文章^[3-5],将量子理论引入光学讨论光的相干性,为现代量子光学的发展奠定了基础。

1.1 1963年前的光学

在格劳伯做出他的这些开创性工作之前,光学已经历了漫长的发展过程,光线光学(几何光学)、波动光学、电磁光学都已形成了各自的理论框架,有着各自的应用范围。特别是电磁光学以麦克斯韦电磁场理论为核心,成功地解释了几乎所有光的传播现象,包括诸如成像、干涉、衍射、散射等。同时,20世纪初因研究黑体辐射,普朗克引入了能量子的概念,接着爱因斯坦提出了光子假说,量子论进入了光学。但较之20世纪30、40年代发展起来的量子电动力学和稍后粒子物理领域的量子场论,当时的光学基本还属经典物理学的范畴,还没有产生形成了体系的量子光学。

20世纪50年代及60年代初,两个重要的实验研究促成了现代量子光学的诞生。一个是1956年的哈百尼·布朗(Hanbury Brown)和瑞斯(Twiss)的强度—强度相关实验^[6],另一个是辐射的受激放大实验,即1954年汤斯(C. Towns)的氨分子的微波激射器^[7](MASER—Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)和1960年梅曼(T. Maiman)的红宝石激光器^[8](LASER—Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)。哈百尼·布朗和瑞斯实验(H. B. — T. 实验)是对同一辐射场源(光源)照射的2个探测器的强度信号的涨落间的相关检测。他们在射频区(1954)和光频区(1956)都进行过相似的实验,发展成射频强度干涉仪和光学强度干涉仪。这类实验一反通常干涉实验中探测振幅—振幅相关,将相关检测推进到探测强度—强度相关,因此很快推动了对光场的高阶相干性的研究^[11]。H. B. — T. 实验的另一重要物理结论是:通常热光源发射的光子趋向于统计上群聚(bunching)。

1960年激光器的出现极大地改变了光学的面貌,使历史悠久的光学重新变得生机勃勃。短短一二年中,除红宝石激光器外,还研究出了CaF₂激光器(1960)、氨—氘激光器(1960)、钕玻璃激光器(1961)、光纤激光器(1961)、砷化镓二极管激光器(1962),以及其它气体激光器(1962)等。与此同时,激光技术也迅速得到发展,如激光调Q技术(1961)、光学倍频技术(1961)、拉曼激光作用(1962)等等。激光是一种全新的光源,具有高亮度、高方向性、高单色性的明显特点。但激光器又是基于辐射的受激放大这种量子过程的量子电子学器件,激光与传统的热光源还有没有更深层次的不同?特别是在H. B. — T. 类型的新的相关实验中。这些新问题促使物理学家们尝试从量子的观念去重新审视光学,用量子电动力学、量子场论的方法去改造、发展光学。

1.2 格劳伯的光的量子相干理论的建立^[3-5]

20世纪60年代初,有人根据H. B. — T. 实验中光子的相关对于窄光谱带宽的光束显示得强一些而推断,激光(当时称“光学脉塞”, optical maser)光束将会有更大范围的强相关。而格劳伯认识到,在相关检测中,探测器的光电离过程用半经典模型处理对普遍的光场是不够的,即不能简单地将光束的行为看成经典的高斯随机过程,前述推断是对“光学脉塞”采用不合适的模型得出的,是一种误导;稳定的高斯随机过程完全取决于频率分量的功率谱,但同样谱分布的光束,可能显示完全不同的相关特性。

格劳伯因此将量子电动力学和量子场论的方法用于光学,在光场量子化的基础上,将光场的光电检测过程采用量子描述,得到光子被一个放置在空间位置 $\vec{r}$ 处的理想探测器,在 t 时刻单位时间内吸收的几率正比于

$$\langle i | E_{\mu}^{(-)}(\vec{r}, t) E_{\mu}^{(+)}(\vec{r}, t) | i \rangle \quad (1)$$

式中: $|i\rangle$ 是理想探测器原子的态矢, $E_{\mu}^{(-)}$ 是光场的电场算符的负频部分, $E_{\mu}^{(+)}$ 是正频部分。而两个理想探测器的情况,一个在 $\vec{r}$ 处, t 时刻,另一个在 $\vec{r}'$ 处, t' 时刻,单位时间内吸收光子的所谓符合检测(coincidence detection)几率正比于

$$\langle i | E_{\mu}^{(-)}(\vec{r}, t) E_{\mu}^{(-)}(\vec{r}', t') E_{\mu}^{(+)}(\vec{r}', t') E_{\mu}^{(+)}(\vec{r}, t) | i \rangle \quad (2)$$

多个探测器的情况依此类推。

进一步在采用密度算符 ρ 表示辐射场后,格劳伯定义了一系列相关函数:

$$G^{(1)}(\vec{r}_1, \vec{r}_1') = \text{tr} \{ \rho E^{(-)}(\vec{r}_1) E^{(+)}(\vec{r}_1') \} \quad (3)$$

$$G^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1', \vec{r}_2') = \text{tr} \{ \rho E^{(-)}(\vec{r}_1) E^{(-)}(\vec{r}_2) E^{(+)}(\vec{r}_2') E^{(+)}(\vec{r}_1') \} \quad (4)$$

$$G^{(n)}(x_1 \cdots x_n, x_{n+1} \cdots x_{2n}) = \text{tr} \{ \rho E^{(-)}(x_1) \cdots E^{(-)}(x_n) E^{(+)}(x_{n+1}) \cdots E^{(+)}(x_{2n}) \} \quad (5)$$

其中,二阶相关函数 $G^{(2)}$ 可用来描述H. B. — T. 型的强度—强度相关实验。

这些相关函数归一化后得到:

$$g^{(n)}(x_1 \cdots x_{2n}) = \frac{G^{(n)}(x_1 \cdots x_{2n})}{\prod_{j=1}^{2n} [G^{(1)}(x_j, x_j)]^2} \quad (6)$$

称为 n 阶相干度,描述了光场的 n 阶相干性, $|g^{(n)}|$ 就意味着光场是第 n 阶的相干场,完全的相干场是对所有的 n 都有的场。格劳伯指出,传统光学所说的相干性,是 $|g^{(n)}|$ 描述的一阶相干性,在“光学脉塞”出现之前的光场,缺乏二阶和高阶的相干,而“光学脉塞”产生的场是所有阶都相干的场。

格劳伯给出了光学相干的量子表达形式,并给出了光的相干性的普遍、严格的定义,以及光的相干性的物理测量途径,光的量子相干理论于是被建立起来了。

1.3 格劳伯的相干态(coherent states)^[3-5]

相干态的概念虽然早在1926年就被薛定谔涉及到(他当时称为“最小不确定态”),后来也有人研究过,但直到格劳伯认识到这类态及其表示特别适用于研究辐射场的量子统计性质并深入研究后,相干态理论才被系统化。“coherent state”这个术语也是格劳伯引入物理学的。如今,相干态及其表示已成为量子光学中描述量子辐射场的基本理论表达形式。

在将辐射场量子化后,格劳伯指出,相干态是场算符 $\hat{a}$ (湮

灭算符)的本征态,

$$\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle \quad (7)$$

α 一般应为复数。相干态用数态表象表示的展开式为:

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} \sum_n \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle \quad (8)$$

格劳伯研究了相干态的性质,指出相干态是最小不确定态,相干态下的光子统计分布是泊松分布,格劳伯还证明了相干态系组成一个非正交的、但是完备的基矢系,因之可用作一种表象(representation)去表示任意态和算符。对于表示辐射场的密度算符,可得到所谓对角表象的表达式:

$$\rho = \int P(\alpha) |\alpha\rangle \langle \alpha| d^2\alpha \quad (9)$$

现今这种表示又称之为P—表示,或Glauber-Sudarshan表示。上式中的复变函数 $P(\alpha)$ 描述了辐射场,不同性质的辐射场有不同的函数。进一步的研究表明, $P(\alpha)$ 虽然形式上占有分布函数的位置,但并非真正意义的分布函数。有些辐射场 $P(\alpha)$ 会比 δ -函数还要奇异,甚至不存在,或者为负,因之只能称之为量子准分布函数(quantum quasi-distribution function)。但只要 $P(\alpha)$ 存在,将有助于计算正序算符乘积的期待值,算符的运算转换成较为方便的普通复变函数(所谓C-数)的运算。

格劳伯还证明了,一个经典电流可以产生相干态的电磁场。现今,我们是用一个远高于阈值运转的单模激光器来产生相干态光场。

由于格劳伯的系统研究,相干态及其表示已成为量子光学的基本理论表达形式。如今已不限于光学,其它物理学领域也都广泛采用这种理论方法。

1.4 在格劳伯理论基础上量子光学的发展^[10]

在格劳伯的奠基性工作之后,量子光学迅速发展起来,在20世纪的70、80年代,形成了一个系统的光学的现代分支。这些发展包括如下几个方面。

1)量子光学理论方法的进一步完善包括有量子准分布函数中的Q—表示、W—表示,光—原子相互作用的全量子理论(JC模型等),量子热库理论(quantum reservoir theory),其中有Fokker-Planck方程、量子Langevin方程、Monte Carlo波函数方法等。

2)非经典光场(nonclassical light)研究 特别是反群聚(anti-bunching)光场和压缩态(squeezed state)光场。其中

反群聚是按照格劳伯的量子相干理论,基于H.B.—T.实验中热光场的光子趋于群聚,而格劳伯已预言相干态光场二阶也是相干的,不应有类似效应(1966年被实验证实),因此人们很自然地设想可能有反群聚的光场,并于1976年终于在共振荧光实验中首次观察到。压缩态光场的研究是20世纪80年代的热点,利用压缩态技术人类已可实现低于量子极限噪声的光学检测。

3)激光器的全量子理论 它是激光器的3种理论(速率方程理论、半经典理论、全量子理论)中最完善的理论,除前两种理论可说明的激光增益饱和、调Q、光强动力学、选模、频率牵引、锁模等外,还可说明激光线宽及其量子统计性质。

4)超荧光(superfluorescence) 这是一种原子集体的合作自发辐射现象。

5)腔量子电动力学(cavity QED) 描述了谐振腔中原子的自发辐射会受到抑制或加强等新的量子电动力学特性,发展出单原子激光器(one-atom maser)、微激光器(micro-maser)等。

6)光子干涉 包括单光子干涉、双光子(bi-photon)干涉等,以及光子纠缠态(entanglement state)等新概念。

7)原子光学 将量子光学的基本方法用于研究原子物质波,在原子光学中,类似在光学中处理光子一样来处理原子。

8)量子信息、量子通讯、量子计算 基于量子力学,用量子态作为信息载体,遵循量子力学规律传输、处理信息。

9)量子基本理论的检验 包括波粒二象性、Bell不等式、量子力学非定域性等。

现代量子光学已形成非常系统的一个光学分支,而且还在蓬勃发展。格劳伯为其发展奠定了理论基础,他获得诺贝尔物理学奖是当之无愧的。

2 物理学精密测量的新巅峰

在物理学发展的每一阶段,精密测量都是发展中的重要研究课题。这是因为物理学从本质上讲是实验的科学,物理实验中物理量的测量精确与否对物理学至关重要。霍尔和汉斯在激光精密光谱学研究方面卓有建树,特别是在发展光频梳技术方面有重要贡献,使得频率测量的精度大大提高,物理学家因之能以空前的精度确定物质的量子结构和检验物理基本理论。

2.1 频率精密测量的意义和原子钟(atomic clock)

时间是最基本的物理量之一。采用国际单位制(SI)时,选定的7个基本物理

量分别为:长度——米(m),时间——秒(s),质量——千克(kg),电流——安培(A),热力学温度——开尔文(K),物质的量——摩尔(mol)和光强度——坎德拉(cd)。其中时间的测量(通过其倒数——频率测量)精度最高。1967年,国际计量局(BIPM)定义了时间的单位——秒(s):“秒是铯(Cs)原子的基态两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间”。这个定义被国际计量大会确认并已被国际物理学界采用。基于这个定义,在认定光速是299 732 458 m/s后,长度单位——米(m)被确定为:“米是光在真空中在1/299 732 458秒的时间间隔内的行程。”

频率的测量精度高是由于采用了极其稳定的原子内部的量子跃迁作为频率基准,建立了量子频标^[11]。研究者首先建立的是微波原子频标,用作时间标准时,即原子钟。1955年,英国的路易斯·爱森(Louis Essen)研制成功了世界上第一台铯原子钟,运转频率~9.2 GHz,精度达到1 s/300 y。振荡器和计数器是任何钟都应有的部分,振荡器用来产生周期性信号,计数器用来对周期性信号计数并给出信号脉冲输出。而原子钟则附加了第三个重要的部分:原子谐振装置。振荡器引出的频率的信号 f_{osc} (通常为MHz量级),经频率综合器(frequency synthesizer)提升到与原子谐振频率 f_{atom} 相近的频率 f_{ref} (通常在GHz量级),通过这两个频率的鉴频产生反馈信号,由电子电路回馈振荡器控制其高精度振荡。

经过50年各国科学家的不断努力,量子频标或原子钟的准确度、稳定度、复现性都已大大提高。目前,美国NIST的铯原子喷泉(fountain)钟,准确度已达到 0.53×10^{-15} (6 000万年误差1 s),被称之为“世界上最好的钟”^[12]。

2.2 朝向光钟(optical clock)的努力

人们早就认识到,由微波原子频标走向光频标有着能大大提高精确度的好处。因为频标的精确度 $\sim \Delta f/f$,微波原子钟的工作频率在 10^9 Hz量级(Rb钟:6.834 682 614 $\times 10^9$ Hz, Cs钟:9.192 631 770 $\times 10^9$ Hz, H钟:1.420 405 751 $\times 10^{10}$ Hz),而可见光的频率在 10^{14} Hz量级;现代光频测量技术已可使光频区 Δf 的测量与微波区的达到相同水平,因此走向光频标可望精确度有几个数量级的提高。但是,人们也立即认识到由原子频标走向光频标有着不小的难处,即没有能找到一个物理过程,可以直接测量 10^{14} Hz这样高

的频率, 于是只有采用频率综合链 (frequency synthesis chain), 将光频与微波频率连接起来。

光钟中采用的光频振荡器是稳频的激光器, 而原子谐振装置是采用光频区的原子跃迁工作的。通过鉴频产生反馈信号, 由电子电路锁回控制稳频激光器, 使其高精度地工作, 这与微波原子钟情况相似, 只是工作频区在光频区。由于目前频率标准是 Cs 原子微波频标, 因之一般光频综合链与一个 Cs 原子频标锁相连接, 整个装置由 Cs 原子频标相位锁定。

实现光频标因此有两个基本问题还要解决, 一个是要有频率稳定的激光器, 一个是要有稳定工作的光频综合链。霍尔和汉斯以及他们的同事, 在这两个方面都卓有建树, 特别是采用锁相的飞秒锁模激光器形成的光频梳, 革命性地解决了综合链的难题, 直接实现了光频的精细测量。

在此之前的光频综合链一般都由多级组成, 每级包括非线性混频元件、高精度的参考频率源、起“接力”作用的高稳定激光器, 多级逐步锁相连接, 从微波区到中红外区, 再到可见区, 技术复杂, 系统庞大 (通常要很大的实验室), 运转稳定不易, 还只能对少数频率设计。汉斯和霍尔发展的光频梳技术, 克服了这些困难, 干净利落地实现了光频到微波频率的综合连接, 直接精密测量了光频。

2.3 飞秒锁模激光器和光频梳

飞秒锁模激光器发展于 20 世纪 80 年代, 采用宽增益带宽的激光介质 (染料、钛宝石等) 的激光器自由运转时, 允许有很多不同频率的激光模式振荡, 这些激光模式的频率等距排列, 而相位一般则是无规的。当采用锁模技术 (有主动锁模、被动锁模、克尔透镜锁模等) 锁定这些激光模式时, 激光器输出的将是时间上等距的短脉冲串列, 每个短脉冲的宽度可达到飞秒 (10^{-15} s) 量级。

这些在时域周期输出的光脉冲, 用付立叶变换到频域呈现等距的频谱 (见图 1), 在激光介质增益线型内形成“梳”状, 称“光频梳”。光频梳的“梳齿”间的频率间隔 $\Delta f = \frac{1}{T}$, T 是时域中光脉冲的周期, f 一般为几十到百兆周量级, 属射频范围。由于脉冲载波的相速度与脉冲包络的群速度的不一致, 整个光频梳的频率起点不是零, 而是有一个“偏置” (offset) 频率 f_0 , f_n 的数值应不超过 f_c , 因之也在射频范围。光频梳的任一“梳齿”的频率为:

$$f_n = nf_c + f_0 \quad (10)$$

当锁模激光器被稳定锁相后, 整个光频梳在频域将稳定住, 形成了一把可以测量光频的“尺子”, 每个“梳齿”即是这把“尺子”的刻度。在我们知道 f_c , f_0 和模序数 n (整数) 后, 若有一待测光频率落在两“梳齿”之间, 就可方便地用待测频率与“梳齿”频率之间的差拍准确确定这一待测频率。这就是汉斯建议的基本思想。 f_c 和 n 是容易测量的, f_c 由锁模激光器的调制频率测定, 而模序数 n 可以通过波长计初测 f_n 后, 微微抖动 f_c 后即可确定。问题是“偏置”频率 f_0 的测定。解决的途径是用所谓的“自参考” (self-reference) 的技术 (见图 2), 将第 n 个激光模的倍频与第 $2n$ 个激光模进行差频, 得到:

$$2f_n - f_{2n} = 2(nf_c + f_0) - (2nf_c + f_0) = f_0 \quad (11)$$

但是, 要在普通飞秒锁模激光器直接输出的光频梳内找到有一定强度的 f_n 和 f_{2n} 模是困难的, 霍尔等人用光子晶体光纤 (photonic crystal fiber) 中的自相位调制实现了频谱的展宽, 覆盖 500~1200 nm 的谱区, 解决了这一问题^[13]。

光频梳把光频测量转换成一系列射频 (f_c, f_0) 的测量, 完全取代了以前的庞大的光频综合链系统, 是实现光钟和光频精密测量的一次革命。

2.4 光频梳对科学技术发展的作用

光频梳的实现是物理基础研究方面的重大成就, 对科学技术的发展意义重大。

1) 光频标的实现, 可得到很高精度的新频率标准, 目前已报道的几个单离子光频标实验 ($^{199}\text{Hg}^+$, $^{40}\text{Sr}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$ 等) 都已达到 10^{-15} 的精确度, 进一步的发展有望达到 10^{-18} 。因此, 将来光频标将会取代目前的 Cs 原子微波频标。

2) 光频的精确测量是物理学精密测量的新巅峰, 人们因此能以从没有的精度去确定物质的量子结构, 检验物理学基本理论。另一方面, 光频测量仪也终将会进入普通实验室成为常规测量设备。

3) 精确度更高的时间测量, 将使全球定位系统更为准确可靠, 将使深度太空飞行更有保证, 使如大型天文望远镜阵列这类大型测量系统的同步运转更为准确。

4) 光频梳技术涉及超快光学、激光光谱学、测控电子学等多领域, 光频梳技术的发展将带动这些领域自身的发展及相应的应用。

在物理学的精密测量技术发展中,

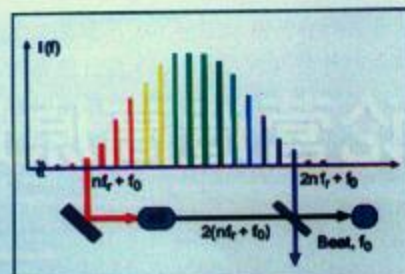


图 1 飞秒锁模激光器的频谱

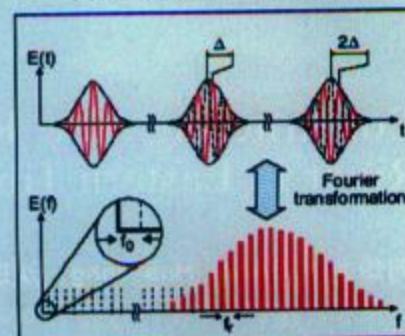


图 2 光频梳的“自参考”技术

汉斯和霍尔以及他们带领的研究组和研究团队, 始终处于研究的最前沿。在赞誉他们获得诺贝尔物理学奖表彰的丰硕成果时, 我们也不要忘记, 这些成果是建筑在他们常年扎实、深厚的实验技术进步的不断积累之上的。有了深厚的沃土, 科学之花终会盛开。

参考文献 (References)

- [1] <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005>.
- [2] T W HANSCH, A L SCHAWLOW, Opt. Commun [J], 1975 (13), 68.
- [3] GLAUBER R J, Phys. Rev. Lett [J], 1963 (10), 84.
- [4] GLAUBER R J, Phys. Rev [J], 1963 (130), 2 529.
- [5] GLAUBER R J, Phys. Rev [J], 1963 (131), 2 766.
- [6] BROWN R H, TWISS R W, Nature [J], 1956 (177), 27.
- [7] GORDON J P, ZEIGER H J, TOWNES C H, Phys. Rev [J], 1954 (95), 282.
- [8] MAIMAN T H, Nature [J], 1960 (187), 493.
- [9] WOLF E, Proc. of the Symposium on Optical Masers [J], 1963, 29.
- [10] SCULLY M O, ZUBAIRY M S, Quantum Optics [M], Cambridge: Cambridge Press, 1997.
- [11] 王义道, 等, 量子频标原理 [M], 北京: 科学出版社, 1986.
- [12] <http://www.physics.nist.gov>.
- [13] JONES D J, DIDDAMS S A, RANKA J K, STENT J A, WINDELE R S, HALL J L, CUNIFF S T, Science [J], 2000 (288), 635.

(责任编辑 胡春华)