

自发参量下转换的研究及其在光学计量中的应用

李建军 郑小兵 冯瑜 盛建军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥 230031)

摘要 叙述了自发参量下转换辐射定标技术的发展历程,技术原理以及在光学计量学中的应用,并介绍了国外这一领域的进展。

关键词 参量下转换 光学计量 辐射定标 相关光子

The Research of Spontaneous Parametric Down-conversion and Its Application in the Optics Metrology

LI Jianjun ZHENG Xiaobing FENG Yu SHENG Jianjun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 201800)

Abstract The history of development of radiation calibration based on parametric down-conversion (PDC) was described, and its technology principles and use in the optics metrology were given, and foreign research progress of these fields were introduced.

Key words parametric down-conversion optics metrology radiation calibration correlated photons

1 引言

目前光辐射传感器的定标一般采用两种方法^[1],分别建立在标准辐射源和标准探测器的基础上。如图1所示,它们的共同之处是:首先需要建立高精度的初级标准,之后以不同精度等级的标准器建立传递链条,直至用户传感器。定标实际上就是逐级比较的过程。

精密控制温度的黑体通常用作初级标准辐射源,它的绝对辐射

度可以根据普朗克辐射定律和国际温度标准来确定。近十年来发展起来的低温辐射计^[2]是目前精度最高的探测器。它在极低的温度下利用电加热替代测量光电效应,来实现光辐射的绝对测量。由于精度较高,并且容易在各种平台上与传感器结合,基于探测器定标方法得到了空间遥感部门的大力推动,美、英、德等发达国家均在大力发展各波段的标准探测器技术。在国内,清

华大学^[3]和中国科学院安徽光机所^[4]均开展了这两种定标方法的研究,前者侧重于计量标准的建立和保持,后者致力于发展与我国空间遥感相适应的定标技术,目前在高精度定标方面居于国内领先地位^[5]。

标准传递链保证了各种传感器的响应都可以溯源到一个共同的基准,但它也限制了标准的工程可复现性和精度。光辐射传感器的应用领域和工作平台千差万别,往往需要设计不同的传递链,以满足从水下辐射计到卫星成像光谱仪的不同定标要求。这在增加定标系统设计难度的同时,不可避免造成精度随传递环节的增加而逐级降低。各级标准本身的误差会逐级传递,最终累积在用户传感器上。从国内外的研究结果看,标准传递过程

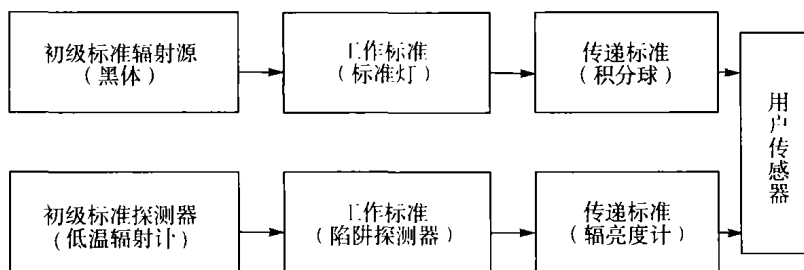


图1 目前辐射定标的两种标准传递链

收稿日期:2005-01-12;收到修改稿日期:2005-02-21

基金项目:国家自然科学基金(60378027)资助项目

作者简介:李建军(1980-),中国科学院安徽光学精密机械研究所读研究生,主要从事相关光子辐射定标方面的研究。

E-mail: jlli@aiofm.ac.cn。

是限制传感器精度有效提高的瓶颈之一,这在红外波段表现尤为突出。例如短红外波(1~2.5 μm)初级光谱辐亮度标准的精度可达到0.2%,但国内外空间传感器在这一波段的精度很难优于5%^[6]。

从提高精度的角度出发,我们希望光辐射传感器的定标建立在一种可在任何时间和地点都能准确重现的客观物理过程上,而不依赖于某个传感器或某种传递过程,自发参量下转换为实现“无标准传递”的辐射定标提供了极好的手段。

2 自发参量下转换研究的历史回顾

参量下转换(PDC)在计量学中的研究已经很久了,在1961年被Louisell等预言^[8],在1970^[9]年Burnham和Weinberg等在实验中观察到相关光子符合,并用符合方法测量了光电倍增管的量子效率,将测量结果与标准灯比对,结果显示30%的偏差。由此他们推断两种测量方法在系统误差20%以内是一致的,奇怪的是这种方法没有得到推广。七年后,Klyshko^[10]提出PDC可以用来测量光电探测器的量子效率。在1981年Malygin等^[11]接受了这个提议,标定了PMT的量子效率。显然他们的工作仅仅是实验的一种论证而已,还不是真正意义上的计量工作,因为他们没

有报道实验的不确定度或者没有与传统定标方法做比较。

20世纪80年代末,几个小组在实验中利用PDC技术定标光子计数探测器。在1986年Bowman等^[12]用雪崩光电二极管(APD)作为光子计数探测器验证了PDC定标技术。他们报道了测量不确定度大约为10%,但没有与传统方法作比较。在1987年Rarity等^[12]用APD做了一个定标实验,在他的实验中将PDC的测量结果与经中性滤光片衰减的He-Ne激光光源测量结果做了比较,验证了这种方法的有效性(报道的不确定度为10%)。在1991年Penin和Sergienko^[13]用一个3%统计的误差报道了PMT早期的定标实验,但没有指明测量的不确定度。1993年Ginzberg等^[14]测量PMT量子效率有10%的不确定度,但没有与传统方法做比较。1994年Kwiat等^[15]对PDC定标技术作了更深入的研究,系统地分析了实验,最终得出3%的不确定度。1995年Migdall等^[16]做出了几个更好的结果,他们定标了PMT,并且将定标的结果与NIST传统定标结果做了比较,测量的不确定度为2%。五年后Brid等^[17-18]将PDC定标结果与硅陷阱探测器定标的结果做了比对,实验中他们考虑到光学元件的损耗,得到了0.5%的不确定度,这是目前报道的最小不确定度。

3 自发参量下转换的基本理论^[19]

假设入射光场为一单色平面波,电场强度的振幅为 E_0 ,波矢为 k_0 ,频率为 ω_0 ,则

$$E(\mathbf{r},t)=E_0\exp[i(\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r}-\omega_0t)]$$

自发参量下转换场用波矢分别为 k_1 和 k_2 ,频率分别为 ω_1 和 ω_2 的平面模展开^[21]:

$$E_1^{(+)}(\mathbf{r},t)=\sum_{k_1,s_1}i\left(\frac{\eta\omega_1}{2\varepsilon_0L^3}\right)^{1/2}a_{k_1,s_1}\times\exp[i(\mathbf{k}_0\cdot\mathbf{r}-\omega_0t)]$$

$$E_2^{(+)}(\mathbf{r},t)=\sum_{k_2,s_2}i\left(\frac{\eta\omega_2}{2\varepsilon_0L^3}\right)^{1/2}a_{k_2,s_2}\times\exp[i(\mathbf{k}_2\cdot\mathbf{r}-\omega_2t)]$$

其中 $a_{k_i,s_i}(i=1,2)$ 为依赖于波矢 k_i 和偏振方向 s_i 的光子湮灭算符。在光学参量过程中,三波相互作用的哈密顿 H_I 可以写为

$$H_I(t)=\frac{1}{2}\int_V\mathbf{P}_I^{(2)}(\mathbf{r},t)\mathbf{E}_I(\mathbf{r},t)dV$$

其中 V 为非线性介质的体积, $\mathbf{P}_I^{(2)}$ 为二阶非线性极化强度,由二阶非线性极化率 $\chi_{ijk}^{(2)}$ 定义,在相互作用绘景中,由态函数 $|\psi\rangle$ 满足的薛定谔方程得

$$|\psi(t)\rangle=\exp\left[\frac{1}{i\hbar}\int_0^t\hat{H}_I(t')dt'\right]|\psi(0)\rangle,$$

如果量子场的初始态 $|\psi(0)\rangle$ 为真空态,即

$$|\psi(0)\rangle=|Vac\rangle=|Vac\rangle_s|Vac\rangle_i, \quad |\psi(t)\rangle=\exp\left[\frac{1}{i\hbar}\int_0^t\hat{H}_I(t')dt'\right]|Vac\rangle_s|Vac\rangle_i,$$

将指数函数展开,取一阶近似,只保留前两项,有:

$$|\psi(t)\rangle=\exp\left[\frac{1}{i\hbar}\int_0^t\hat{H}_I(t')dt'\right]|Vac\rangle_s|Vac\rangle_i=|Vac\rangle_s|Vac\rangle_i+\frac{i\sqrt{\omega_1\omega_2}}{4\varepsilon_0}\chi_{ijk}^{(2)}\frac{1}{L^3}\sum_{k_1,s_1,k_2,s_2}(\varepsilon_{k_1,s_1}^*)_i(\varepsilon_{k_2,s_2}^*)_jE_0\exp[-i(\mathbf{k}_1+\mathbf{k}_2-\mathbf{k}_0)\cdot\mathbf{r}_0]$$

$$\prod_{m=1}^3\frac{\sin(\mathbf{k}_1+\mathbf{k}_2-\mathbf{k}_0)_m L/2}{(\mathbf{k}_1+\mathbf{k}_2-\mathbf{k}_0)_m/2}\exp[i(\omega_1+\omega_2-\omega_0)t/2]\frac{\sin(\omega_1+\omega_2-\omega_0)t}{(\omega_1+\omega_2-\omega_0)/2}|k_1,s_1\rangle_s|k_1,s_1\rangle_i$$

其中 $|k_1, s_1\rangle_s |k_1, s_1\rangle_i$ 为双光子福克(Fock)态, 在上面的推导过程中, 已经假设了与信号光子和空闲光子对应的模是不同的, 而且它们的希尔伯特(Hilbert)空间没有重叠, 用 $[k_1, s_1]$ 代表一系列的信号光子模, 用 $[k_2, s_2]$ 代表一系列的空闲光子模。

此过程须满足能量守恒定律和动量守恒定律(即位相匹配条件)

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2, \quad \kappa_0 = \kappa_1 + \kappa_2$$

对参量下转换过程可以解释为: 当频率 ω_0 的光子入射到非线性晶体上时, 处于基态的晶体分子吸收该光子后, 受激跃迁到能量为 $h\omega_0$ 的能级, 之后又自发跃迁到某一中间能级, 并辐射出能量为 $h\omega_1$ 的光子, 最终又返回基态, 再辐射出能量为 $h\omega_0 - h\omega_1 = h\omega_2$ 的光子。由于分子能级可视为连续分布, 所以下转换双光子场为从抽运波频率一直到晶格共振频率的宽谱分布。在整个下转换过程中, 由于物质的能态本身没有变化, 而仅仅是光场发生了变化, 因而属于参量过程。

由于晶体的双折射导致不同偏振的光在晶体内的折射率不同, 同时晶体的色散作用使得在某些晶体中可以满足上述位相匹配条件。

根据晶体位相匹配的类型, 可将参量下转换分为 I 型和 II 型, 下面以负单轴晶体为例分别介绍这两种类型。

对于 I 型参量下转换, 其中过程可以表示为 $e \rightarrow o + o$, 也就是产生的双光子偏振方向相同, 且均垂直于抽运光偏振方向。产生的参量光的空间分布是以抽运光为轴成锥状分布, 如图 2 所示, 这种类型产生的是在时间、空间和频率上纠缠的双光子态。图 2 表示非频率简并、非共线的情况。当频率简并时, 下转换光子对在空间上呈对称分布。与 I 型下转换相反, II 型下转换可表示为 $e \rightarrow e + o$, 即产生的双

光子对偏振方向互相垂直。II 型下转换通常采用频率简并情况, 这时可产生偏振纠缠双光子对。如图 3 所示, 参量光在非共线匹配时的分布为两个圆锥, 图 3 中右边上半圆为 e 光, 下半圆为 o 光, 而其交叉的两点则可能是 e 光也可能是 o 光, 但如果其中一个为 e 光, 则另一个为 o 光, 这样在这两方向上的一对光子形成偏振纠缠的双光子态。

4 自发参量下转换在计量学中的应用

4.1 绝对测量光电探测器的量子效率

光学计量是自发参量下转换双光子场的一个重要应用领域。利用自发参量下转换光子的频率和方向, 不但可以预言另一个下转换光子的存在, 而且可以确定它的频率、方向和计数时间, 根据这一原理

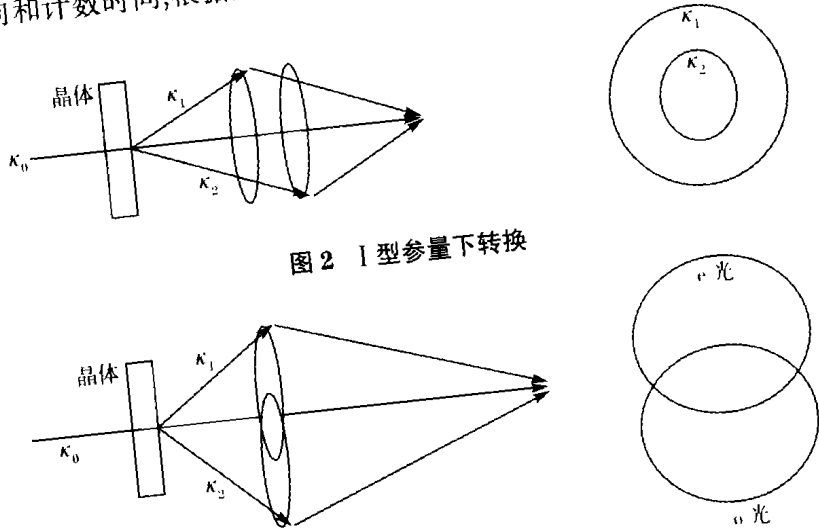


图 2 I 型参量下转换

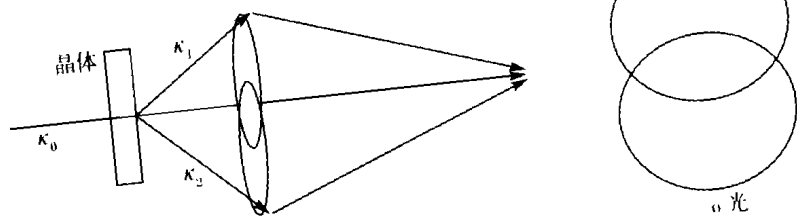


图 3 II 型参量下转换

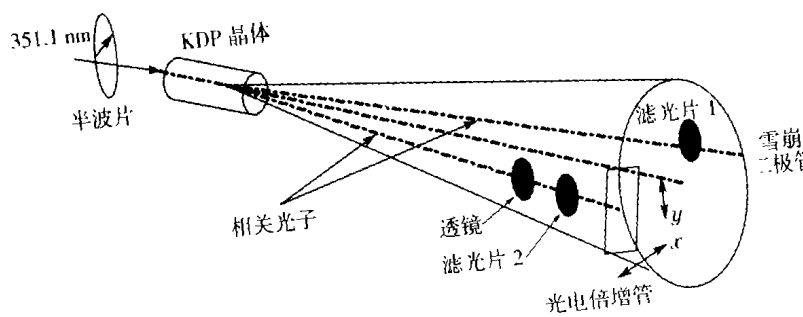


图 4 PMT 在 $x-y$ 方向移动时测量 PMT 量子效率变化示意图

可以绝对测量光电探测器的量子效率。美国的 Migdall 小组^[7]和意大利的 Brida 小组^[8]利用 351nm 氩离子激光分别抽运了 KDP 晶体和 LiIO_3 晶体, 产生了可见-近红外光子对, 定标了光电倍增管和雪崩二级管的量子效率。如图 4 所示, 用一块 I 型切割的 KDP 晶体作为下转换晶体, 一台氩离子激光器输出的中心波长为 351nm 作为抽运光, 光电倍增管和雪崩二极管分别用于探测产生的信号光和空闲光光子, 并由符合设备进行符合计数。实验时在 $x-y$ 方向上移动 PMT 的位置可以得出 PMT 量子效率空间变化曲线, 并且将结果与用硅光电二极管标定 PMT 做了比较, 显示差异约为 0.6%, 从而证实了这种方法的有效性。

为了证明参量下转换辐射定标方法固有的绝对性, Migdall 等

人^[21]将 NIST 和 LEN 实验室的结果做了一下比较,两个实验室得到的结果具有一致性,且 LEN 利用了如图 5 所示的实验方案定标了光纤耦合的雪崩二极管,提高了实验的精度。实验表明影响系统总的不确定度的是待定标探测器(DUT)的非均匀性引起的,并不是测量方法本身的问题。影响系统的不确定度有如下因素:(1)光学元件透过率的损耗,例如晶体材料本身的反射和折射,或者是光阑大小和探测器可接收的有效面积等等。光学元件透过率损耗可以用传统方法实现高精度地测量,非线性晶体的反射损耗也可以精确测量。(2)几何损耗。例如待定标的探测器的轴线与触发通道相关的光子中心不匹配。(3)相位匹配条件不一定严格的满足,即 $\Delta k \equiv k_1 + k_2 - k_0$ 不一定严格等于零。从而导致下转换光谱有一定的带宽。

由于在空间遥感等领域最为广泛应用的是诸如光电二极管, CCD 等电荷累积型的模拟探测器。1986 年 Sergienko 等^[22]用参量下转换方法定标了工作于模拟方式下的光电倍增管,图 6 即为定标工作于模拟方式下的光电倍增管的实验装置,测量的结果与厂家所给的数据做了比较,结果显示它们之间的相对误差低于 8~10%。绝大部分误差来源于电路参数的不稳定性。测量中他们还将结果与计数方式下的测量结果做了比较发现:电信号的统计起伏和 σ_m^2 变量的测量几乎一致。为了解决模拟相关运算问题,对相关器的要求是动态范围大,线性好,预计主要误差将来自电荷累计过程中电信号的统计起伏,增加信号的累计时间将会解决这一问题,从而让我们看到了应用的前景。

4.2 绝对测量红外光谱辐射

在自发参量下转换过程中,通

过调整抽运波矢 k_0 与晶体光轴方向(Z轴)的夹角,可以实现同时产生一个可见光子和一个红外光子,即可以用一个可见光子表示一个红外光子的存在,这就为绝对测量红外光源的光谱辐射功率奠定了基础。

用一束激光抽运一非线性晶体,产生一对相关的红外-可见光子对,如图 6 所示。

被测红外光源的辐射输出被成像在非线性晶体上,它一方面要与激光照明区域重叠,同时还要与下转换光子中的红外输出在空间,方向和光谱范围上完全一致。这一

附加在非线性晶体上的红外输入,使得抽运光束沿着这一方向的下转换光子分裂得到了增强,但由于分裂输出是成对出现的,因此在与之相关的另一方向上输出的可见光子数相应增加,尽管相关光子对只能以抽运激光作为输出时自发分裂产生的结果(这一自发分裂等于单位模式中一个光子光谱辐射的受激分裂),与原子系统类似,当有附加的红外光输入时,下转换光子的增加可以视为抽运光子受激分裂为相关光子对的结果。

美国国家标准与技术研究院

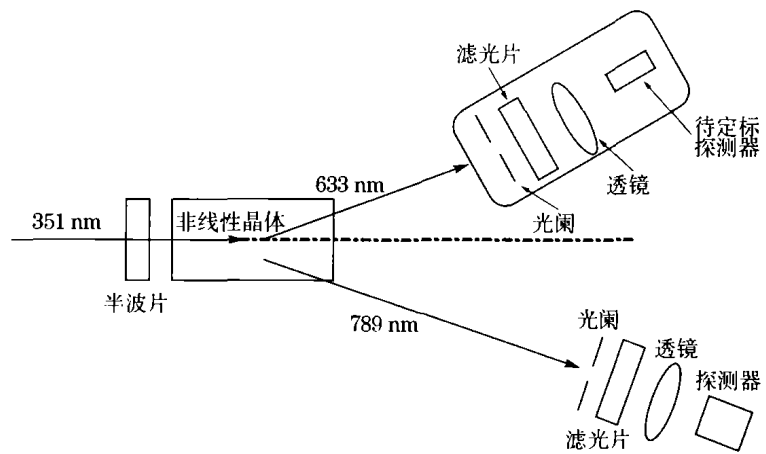


图5 绝对量子效率测量的实验装置

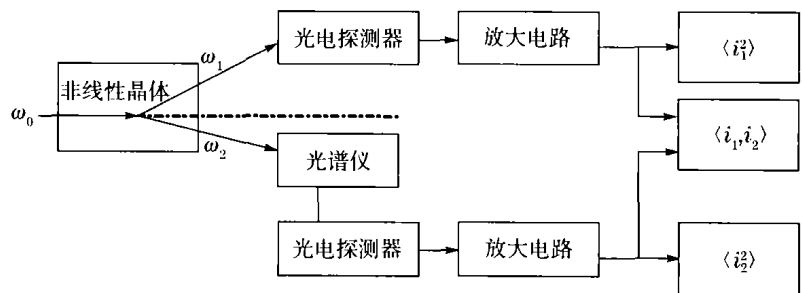


图6 绝对定标模拟探测器的实验装置示意图

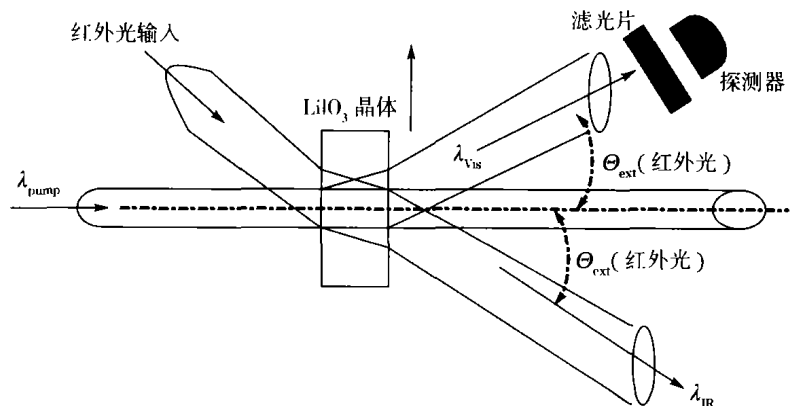


图7 参量下转换双光子绝对测量红外光谱辐射的原理图

的技术人员^[23]基于上述方法建立了用自发参量下转换双光子绝对测量红外光辐射的装置,并对高温氙弧灯进行了实际测量。测量结果与标准黑体比对测量结果在3%以内符合,从而证明了基于自发参量下转换双光子场绝对测量红外光源光谱辐射方法的可靠性。

5 结论

参量下转换辐射定标方法建立在任何时间和地点都能准确重现的客观物理过程上,它不依赖于某个标准器或某种传递过程,可以

用来直接测量光电探测器的量子效率,同辐射源或探测器定标方法相比,参量下转换辐射定标方法的独特优点在于:(1)建立在可以准确重现的物理过程上,本身是绝对的,无需标准传递链。(2)根据位相匹配条件,参量下转换的光谱和出射方向是连续分布的,两个探测器可以工作在相关的不同波段,因此可用现有的高精度可见波段探测器去定标红外波段的探测器。(3)所有的分光元件均可置于参考通道,并且无需知道其透过率。(4)参考探测器的量子效率对定标结果没有

影响。参量下转换辐射定标方法在原理上摆脱了标准传递这一局限,虽然其技术还不如现有的两种方法成熟,精度也有待提高,但它代表着辐射定标的发展方向。

基于以上分析,我们相信随着实验设备的不断完善和实验精度的不断提高,参量下转换辐射定标方法一定会在计量领域发挥其独特的一面,并且最终会应用到光谱范围更加广泛的模拟定标方面,很有可能这种方法将广泛用于定标雪崩二极管,微通道光电倍增管以及其他光电探测器中。

参 考 文 献

- 1 Blevin W R. Optical radiometry -one hundred years after Stefan and Boltzman, Precedings of the 2nd International conference held, eds., N. P. Fox, D. H. Nettleton. 1988. 1~9
- 2 Gentile T R, Houston J M, Hardis J E *et al.*. The NIST high accuracy cryogenic radiometer. *Appl. Opt.*, 1996, **35**: 1056~1068
- 3 姚和军. 陷阱式探测器的结构、性质及其在计量学中的应用. 博士论文, 清华大学电子工程系, 2001
- 4 Zheng Xiaobing, Haoyu Wu, Junping Zhang *et al.*. High-accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**: 2009~2012
- 5 郑小兵, 吴浩宇, 章骏平等. 不确定度<0.03%的高精度光谱辐射功率标准. *光学学报*, 2001, **21**(6): 749~752
- 6 King M, Greenstone R *et al.*. 1999 EOS Reference Handbook, EOS Project Science Office, NASA, 1999
- 7 Migdall A L, Datla R U, Sergienko A *et al.*. Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons. *Metrologia*, 1996, **32**: 479~483
- 8 Louisell W H, Yariv A, Siegman A E. Quantum fluctuations and noise in parametric processes. *Phys. Rev.*, 1961, **124**:1646~1649
- 9 Burnham D C, Weigberg D L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **25**: 84~87
- 10 Klyshko D N. Utilization of Vacuum Fluctuations as an optical brightness standard. *Soviet J. Quant. Electron.*, 1977, **7**: 591~599
- 11 Bowman S R, Shih Y H, Alley C O. The use of Geiger mode avalanche photodiodes for precise laser ranging at very low light levels: an experimental evaluation. *Proc. SPIE*, 1986, **663**: 24~32
- 12 Rarity J G, Ridley K D, Tapster P R. Absolute measurement of detector quantum efficiency using parametric downconversion. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 4616~4619
- 13 Penin A N, Sergienko A V. Absolute standardless calibration of photodetectors based on quantum two-photon fields. *Appl. Opt.*, 1991, **30**: 3582~3588
- 14 Ginzburg V M, Keratishvili N, Korzhenevich E L *et al.*. Absolute measurement of photodetector quantum efficiency based on the parametric down-conversion effect. *Opt. Eng.*, 1993, **32**: 2911~2914
- 15 Kwiat P G, Steinberg A M, Chiao R Y *et al.*. Absolute efficiency and time-response measurements of single-photon detectors. *Appl. Opt.*, 1994, **33**: 1844~1851
- 16 Migdall A L, Datla R U, Sergienko A *et al.*. Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons. *Metrologia*, 1995, **32**: 479~483
- 17 Brida G, Castelletto S, Degiovanni I P *et al.*. Quantum efficiency and dead time of single-photon counting photodiodes: a comparison between two measurement techniques. *Metrologia*, 2000, **37**: 625~628
- 18 Brida G, Castelletto S, Degiovanni I P *et al.*. Towards an uncertainty budget in quantum-efficiency measurements with parametric fluorescence. *Metrologia*, 2000, **37**: 629~632
- 19 Hong C K, Mandel L. Theory of parametric frequency down-conversion of light. *Phys. Rev. A*, 1985, **31**: 2409~2418
- 20 Brida G, Castelletto S, Novero C *et al.*. Quantum-efficiency measurement of photodetectors by means of correlated photons. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**: 1623~1627

(下转第11页)

参 考 文 献

- 1 Zeldovich B. Ya, Popovichev V I, Ragulskii V V *et al.*. Connection between the wave fronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandelshtam–Brillouin scattering. *JETP Lett.*, 1972, **15**: 109~112
- 2 Pepper D M. Introduction to the special issue on nonlinear optical phase conjugation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(3):312
- 3 Kaiser W, Maier M. *Laser Handbook*. edited by Arecchi F T, Schultz–Dubois E O. Amsterdam: North–Holland, 1972. 2
- 4 Boyd R W, Rzazewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(9): 5514~5521
- 5 Alekseev V N, Vgolubev V. Investigation of wavefront reversal in a 12–cm output aperture. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1987, **17**(4): 455~458
- 6 Eichler H J, Haase A, Mehl O *et al.*. Serious arrangement for high power solid–state amplifiers with phase conjugating mirror. *Proc. SPIE*, 1996, **2788**: 148~156
- 7 Dane C B, Zapata L E, Neuman W A *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction–limited laser amplifier with SBS wavefront correction. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(1): 148~163
- 8 Mullen R A, Lind R C, Valley G C. Observation of stimulated Brillouin scattering gain with a dual spectral–line pump. *Opt. Commun.*, 1987, **63**: 123
- 9 Yoshida H, Nakatsuka M, Fujita H *et al.*. High–energy operation of a stimulated Brillouin scattering mirror in an L–Arginine phosphate monohydrate crystal. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7783~7787
- 10 周卫东, 余吟山, 洪玲等. 受激布里渊散射相位共轭镜产生高质量短脉冲 XeCl 激光. 光学学报, 1998, **18**(7): 845~849
- 11 Wang Jinsong, Tang Weizhong, Zhou Wen. Stimulated Brillouin scattering initiated by the thermally excited acoustic waves in absorption media. *Opt. Commun.*, 1996, **123**: 574~576
- 12 延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的阈值功率研究. 中国激光, 2000, **A27**(9): 790~794
- 13 Lehmborg R H. Numerical study of phase–conjugation in stimulated Brillouin scattering from an optical waveguide. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1983, **73**(5): 558~566
- 14 Yoshimura M, Mori Y, Sasaki T *et al.*. Efficient stimulated Brillouin scattering in the organic crystal deuterated L–Arginine phosphate monohydrate. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(1): 446~450
- 15 Eichler H J, Haase A, Liu B *et al.*. Design and construction of high power solid–state laser amplifiers with phase conjugation mirror. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 8~19
- 16 Dehn A, Eichler H J, Haase A *et al.*. Phase conjugation for improvement of solid–state and excimer laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3403**: 65~76
- 17 Haase A, Mehl O. Nd–oscillator with fiber Q–switch. *Proc. SPIE*, 1998, **3267**: 273~279
- 18 Eichler H J, Heinrich S, Schwartz J. Self–starting short–pulse XeCl laser with a stimulated Brillouin scattering mirror. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23): 1909~1911
- 19 Axel Heuer, Ralf Menzel. Phase–conjugating stimulated Brillouin scattering mirror for low powers and reflectivities above 90% in an internally tapered optical fiber. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 834~836
- 20 丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊放大光脉冲波形的研究. 物理学报, 2003, **52**(9): 2165~2169
- 21 葛传文, 张为俊等. 频带色散法改善宽线宽激光受激布里渊散射效果的实验研究. 光学学报, 2001, **21**(9): 1454~1457
- 22 何伟明, 吕志伟, 王骥等. 陡前沿根脉冲产生的受激布里渊散射稳定性研究. 光学学报, 1996, **16**(10): 1431~1436
- 23 Eichler H J, Dehn A, Haase A *et al.*. High–repetition–rate continuously pumped solid state lasers with phase conjugation. *Proc. SPIE*, 1998, **3265**: 200~210
- 24 Dehn A, Eichler H J, Haase A *et al.*. Phase conjugation for improvement of solid state and excimer laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3403**: 65~76
- 25 柳强, 鞠有伦, 王月珠等. 受激布里渊散射相位共轭腔及腔内光学参量振荡器. 光学学报, 1999, **19**(8): 1089~1093

~~~~~

(上接第 6 页)

- 21 Mandel L, Castelletto S, Degiovanni I P *et al.*. Intercomparison of a correlated–photon–based method to measure detector quantum efficiency. *Appl. Opt.*, 2002, **41**: 2914~2922
- 22 Sergienko A V, Penin A N. Absolute calibration of analog photodetectors with a biphoton field. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **12**: 328~331
- 23 Migdall A V, Datla R U, Sergienko A *et al.*. Measuring absolute infrared spectral radiance with correlated visible photons: technique verification and measurement uncertainty. *Appl. Opt.*, 1998, **37**: 3455~3463