

引用本文: 林海伟, 樊昕昱, 何祖源. 基于单光子探测器阵列的光谱测量系统[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 59–63.

基于单光子探测器阵列的光谱测量系统

林海伟, 樊昕昱*, 何祖源

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对目前商用光谱仪无法在极微弱光测量环境下实现光谱探测的问题, 提出一种基于单光子探测器阵列的光谱测量系统。利用单光子探测器在极微弱光环境下的探测能力, 将虚像相位阵列(VIPA)和反射式衍射光栅构成的二维色散结构与单光子探测器阵列相结合, 并通过实验测试得出系统的二维分光效果、相对光谱透射比曲线以及单光子探测性能。实验结果表明: 该系统不仅灵敏度高, 还实现了 0.006 nm 的波长分辨率; 与目前普遍采用的基于时间相关单光子计数的光谱测量系统相比, 该系统具有更优的波长分辨率和更大的测量带宽。

关键词: 单光子计数器; 虚像相位阵列; 二维光谱; 淬灭电路; 相对光谱透射比

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0059-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spectral measurement system based on single photon detector array

LIN Haiwei, FAN Xinyu*, HE Zuyuan

(School of Electronic Information and Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In view of the problem that commercial spectrometers can not realize spectral detection in the extremely weak light measurement environment, this paper puts forward a kind of spectral measurement system based on single photon detector array, using the single photon detector in a very weak light environment detection ability, the virtual image phase array (VIPA) and reflective diffraction grating of two dimensional dispersion structure are combined with single photon detector array. The two dimensional effect, relative spectral transmittance curve and single photon detection performance of the system are obtained by experimental test. The experimental results show that the system not only has high sensitivity, but also achieves wavelength resolution of 0.006 nm. Compared with the widely used spectral measurement system based on time-dependent single photon counting, the proposed system has better wavelength resolution and larger measurement bandwidth.

Key words: single photon counter, virtual image phase array, two dimensional spectrum, quenching circuit, relative spectral transmittance

0 引言

光谱测量作为观测物质发光和吸收特性的一种方法, 在科学研究领域具有非常重要的作用。虽然采用扫描光栅光谱仪和探测阵列光栅光谱仪能够满足

目前大部分光谱探测实验的需求, 但由于使用的电荷耦合元件(CCD)探测器存在响应速度较慢、时间分辨率较低以及灵敏度受限的问题, 无法实现对极微弱光的探测, 因此限制了光谱仪在较大衰减的室外环境中的应用。单光子探测器是目前在极微弱光环境下的可靠探测器件, 单个光子就能产生响应, 而且响应速度极快, 故被广泛应用于物质的荧光寿命测量领域^[1]和量子测量领域^[2]。

基于单光子探测器的光谱测量系统具有极高的探测灵敏度, 该特性使其具有很好的应用前景, 并已有较多相关研究。与传统光谱仪结构不同, 基于单光子计数器的光谱测量系统大多采用时间相关单光子计数(TCSPC)^[3]技术和离散傅里叶变换(DFT)^[4]来实现

收稿日期: 2021-11-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61775132、61735015、61620106015)资助。

作者简介: 林海伟(1997—), 男, 硕士研究生, 现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子与通信专业, 主要研究方向为单光子探测和基于单光子计数的光谱测量等, 致力于提升光谱测量系统的灵敏度和分辨率。

* **通信作者:** 樊昕昱(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤传感。



林海伟,樊昕昱,何祖源:基于单光子探测器阵列的光谱测量系统

对光谱的测量。其中,TCSPC 是利用单光子探测器和时间-数据转换器(TDC),将统计时域信号的到达时间经过时间-波长转换后还原出原始光谱。DFT 是采用光学元件或光学结构的色散特性将光信号的波长(或光频)信息映射到时域。常用的光学色散元件有单模光纤(SMF)^[5]、色散补偿光纤(DCF)^[6]、多模光纤(MMF)^[7]以及啁啾光纤布喇格光栅(CFBG)^[8-9]。这些色散元件存在一些缺点,例如:SMF 在通信波段色散系数非常低,而长距离光纤在提高总色散的同时也会带来较大损耗;DCF 仅能适用于通信波段;MMF 存在模间色散会降低光谱的分辨率;CFBG 在短近红外波段需要较高成本才能实现大色散及大带宽。除此之外,文献[10-11]分别提出了由多个光学元件组合而成的带宽大、色散效果好的光辐射源连续切片结构(SCISSORS)和自由空间角啁啾增强延迟(FACED)结构,能有效克服单个色散元件受工作波段的限制,但对各元件的位置提出了非常高的精度要求。

基于TCSPC 的光谱测量系统的波长分辨率主要取决于色散元件的色散值和单光子探测模块的时间抖动,因此对色散元件及单光子探测模块的性能参数要求非常高,目前最高的波长分辨率为 55 pm^[9]。为了达到更高的波长分辨率与更大的光谱探测带宽,本文采用二维空间色散结构与单光子探测阵列相结合的方式,提出一种基于单光子探测器阵列的光谱测量系统。

1 基于单光子探测器阵列的光谱测量系统

1.1 系统结构

基于单光子探测器阵列的光谱测量系统如图 1 所示。该系统替代传统光谱分析仪(OSA)进行光谱测量。系统由光源、二维色散结构、单光子阵列探测器以及数据处理模块组成。光源为中心波长在 852 nm 附近的分布式布喇格反射(DBR)激光器,通过温度控制模块调节激光器的工作温度可以线性调节输出单频光的波长,其波长温度调节比 $\Delta\lambda/\Delta T=0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。出射

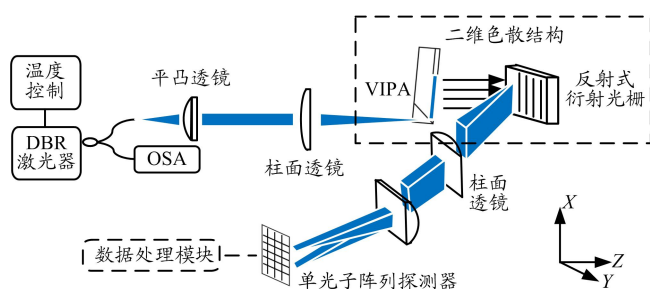


图1 基于单光子探测器阵列的光谱测量系统

光经过平凸透镜($f=8 \text{ mm}$)的准直和柱面透镜($f=200 \text{ mm}$) 在 X 方向会聚后进入由虚像相位阵列(VIPA)和反射式衍射光栅组成的二维色散结构。VIPA 与 X 方向夹角为 1.34° ,其厚度 t 为 1.687 mm,在 852.11 nm 处内部材料折射率 n 为 1.45,前表面反射率 R 为 1,后表面反射率 r 为 0.95,自由光谱范围(FSR)为 60 GHz;反射式衍射光栅的刻线密度为 1200 mm,光进入光栅的入射角 θ_i 为 64° ,光从 VIPA 出射的出射角 θ_0 为 50° 。不同波长的光经过二维色散结构将从 X-Y 平面的不同位置出射,经过柱面透镜会聚到单光子阵列探测器中。单光子探测阵列包含 80×60 个像素,每个像素面积为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,而感光面积则为 $12.88 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$,填充因子 C_{fi} 为 32.9%,光子探测效率 η 为 0.98%,死时间 t_{dead} 为 20 ns,可以探测的最小光功率低于 -70 dBm 。数据处理模块对探测器探测的光进行光子数提取并进行光子数向光功率的转换,进一步通过计算还原出最终的光谱。

1.2 系统实现原理

1.2.1 二维色散结构

基于单光子探测器阵列的光谱测量系统采用的二维色散结构最早由 XIAO S 等人^[12]提出。该结构中,VIPA 将不同波长的光周期性地以不同角度出射,经过凸透镜准直到 X 方向的不同位置;周期性与 FSR 相关,波长间距为 FSR 倍数的光会以相同的角度出射;准直后无法在 X 方向进行分辨,因此需要后接衍射光栅将这些在 X 方向无法分辨的光在 Y 方向中分离开,达到二维色散分辨的效果。

VIPA 的工作原理如图 2 所示,其本质是改进型法布里-珀罗(F-P)腔。入射光以入射角 θ_i 进入 VIPA,在前后 2 个平行平面内多次反射,不断有小部分光从后表面出射,形成了无数强度逐渐减小而相位不变的光波之间的干涉。这些发散光线以固定相位进行干涉形成平行光束,不同光束相位差与波长变化有关,波长不同时,光束出射角 θ_0 就会发生变化从而形成角度色散^[13]。入射到 VIPA 的光波长与出射角 θ_0 近似满足以下关系^[14]:

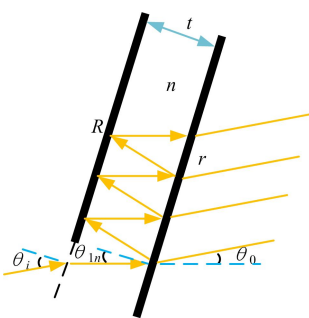


图2 VIPA 的工作原理示意图

$$\lambda_p - \lambda_0 = -\lambda_0 \left[\frac{\tan \theta_m \cos \theta_i}{n \cos \theta_m} \cdot \theta_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \theta_0^2 \right] \quad (1)$$

其中, λ_0 为输入光的中心波长,其对应的出射角 $\theta_0=0$, 满足 $m\lambda_0=2tnc\cos\theta_m$, m 为干涉级次, t 为 VIPA 的厚度; λ_p 为出射角 θ_0 时具有强度分布峰值的波长; θ_m 为光束到达 VIPA 后表面的入射角,满足 $\theta_m=\theta_0/n$ 。

经过 VIPA 的出射光强度与出射角、波长的关系近似满足以下关系:

$$I(\theta_0, \lambda) \propto \exp(-2\frac{f_c^2 \theta_0^2}{W^2}) \frac{1}{(1-Rr)^2 + 4(Rr)\sin^2(\frac{k\Delta}{2})} \quad (2)$$

其中, f_c 为放置在 VIPA 前柱面透镜的焦距, W 为准直平凸透镜出射光束半径, k 为波矢, $\Delta=2tnc\cos\theta_m-2t\tan\theta_m\cos\theta_0$, $t\frac{\cos\theta_m}{n}$ 是 VIPA 的色散参数。由式(2)

可知, 经过 VIPA 的出射光强度随入射光波长呈周期性变化。

用于 Y 方向分辨的光栅为闪耀刻线衍射光栅,其遵守的光栅方程为

$$a(\sin\theta_m + \sin\theta_0) = m\lambda \quad (3)$$

其中, a 为刻线间距, θ_0 为光进入衍射光栅光束的入射角, θ_m 为光束从光栅出射的出射角。该光栅能够在干涉级次 $m=1$ 时产生最大光栅效率。

1.2.2 单光子探测器的光功率转换

若采用单光子探测阵列代替传统 CCD 探测阵列进行光谱测量, 必须进行光子计数与光功率的转换。目前, 针对光子计数与光功率的转换问题已经有相应的数学理论模型支撑, 例如麻痹性探测器模型和饱和探测器模型^[15-16], 前者适用于输入连续光且单光子探测器采用无源淬灭电路的情况, 后者适用于输入连续光且单光子探测器采用有源淬灭电路的情况。

本次实验采用适合使用麻痹性探测器模型的连续输入光和无源淬灭电路, 该模型可以较为准确地描述无源淬灭电路对光子计数的影响。但是, 连续的光子到达会导致单光子雪崩二极管 (SPAD) 频繁地触发淬灭, 延长死时间, 从而降低光子计数率。

在麻痹性探测器模型下, SPAD 每秒探测率 C_{SPAD} 与光子平均到达速率 r_{arr} 的关系满足

$$C_{\text{SPAD}} = r_{\text{arr}} \cdot e^{-r_{\text{arr}} \cdot t_{\text{dead}}} \quad (4)$$

而光子平均到达速率 r_{arr} 与输入连续光功率 P_s 的关系为

$$r_{\text{arr}} = \frac{C_{\text{eff}} \eta P_s}{h\nu} \quad (5)$$

其中, h 为普朗克常数, ν 为光频率。每帧的光子计数总数为 $m \cdot t_{\text{exposure}}$, 实验中单光子探测阵列每帧的曝光时间

t_{exposure} 为 3 ms。将前述实验参数代入该理论模型中可以得到连续光下每帧光子计数数量与输入光功率 P_s 的关系, 如图 3 所示。可以看出, 在连续输入光功率满足 $-65 \text{ dBm} \leq P_s \leq -55 \text{ dBm}$ 时, 每帧光子计数数量与输入光功率近似呈正比关系, 便于二者转化, 因此实验中将输入到单光子探测阵列的光功率控制在此范围。

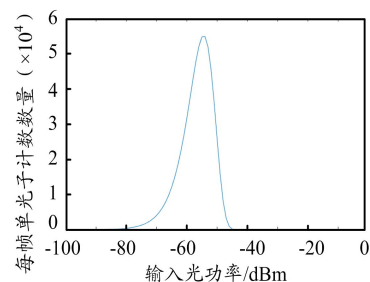


图3 每帧单光子计数与连续输入光功率对应关系

2 实验结果

2.1 系统的二维分光效果

在实验环境下, DBR 激光器的输出波长 λ 与工作温度 T 满足线性关系 $\lambda=0.062T+849.977$ 。图 4 为 DBR 激光器在不同工作温度下出射光经过二维色散结构后进入探测器阵列的位置分布图。实验针对每一温度采集了 80 帧单光子探测灰度图信息并取平均, 尽可能减小由于单光子计数波动带来的误差。DBR 激光器工作温度的线性增加代表了入射光波长的线性增加, 该系统实现了对不同波长光的二维分光效果。图 4 中 VIPA 的 3 个衍射周期对应 3 条拟合曲线, 同一周期相邻采样点的温度差为 0.2°C , 对应 0.0124 nm 的波长差, 由于采样点温度是由右下往左上递增的, 因此波长沿每条曲线右下往左上递增。在探测阵列上探测的光斑呈近似椭圆形, 长轴长约为 $120 \mu\text{m}$, 短轴长约为 $60 \mu\text{m}$, 利用 VIPA 在 X 方向上呈现出的较大色散特性, 系统波长分辨率可达到 0.006 nm 。

与传统采用时间相关单光子计数的光谱测量系统相比, 本文所提单光子探测器阵列的光谱测量系统

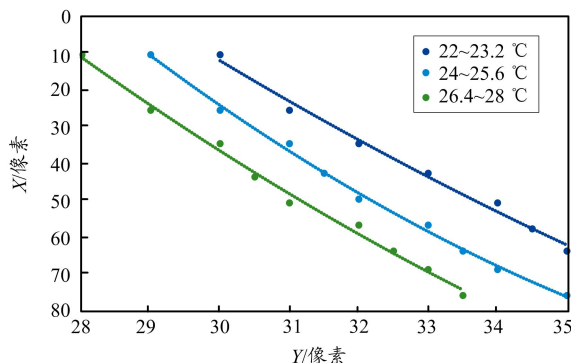


图4 DBR 激光器在不同工作温度下对应不同波长的光经过系统后在探测阵列上的位置分布

林海伟,樊昕昱,何祖源:基于单光子探测器阵列的光谱测量系统

的波长分辨率不受探测器时间响应性能和色散介质的色散性能的影响,在大幅降低器件要求的情况下获得了更高的波长分辨率。

2.2 系统的相对光谱透射比曲线

由于考虑到式(2)中 VIPA 出射光强度随入射波长的周期性变化关系,且系统对不同波长的透过效率并非均匀分布,因此需要测量整个系统对不同波长入射光的透过效率,得出系统的相对光谱透射比曲线,以便对未知光谱的测量结果进行修正。

实验中,本文同样通过线性调节 DBR 激光器的工作温度实现对波长的扫频。对每个波长采集 80 帧单光子探测灰度图并取平均,进一步得到光斑所在像素区域的光子计数总数。图 5 为实验测得入射光的系统相对透射比 η_{norm} 随入射光波长的变化曲线图。其中, η_{norm} 值在 DBR 激光器工作温度为 22.6 °C (波长为 851.38 nm) 时设置为 1,即 $\eta_{\text{norm}}=1$ 对应的光子计数总数与 DBR 激光器工作温度为 22.6 °C 时测得光斑的光子计数总数 N_{norm} 相同。其它波长下得到的 η_{norm} 值都是相对于该波长下的透过效率,即 $\eta_{\text{norm}}=N(\lambda)/N_{\text{norm}}$ 。

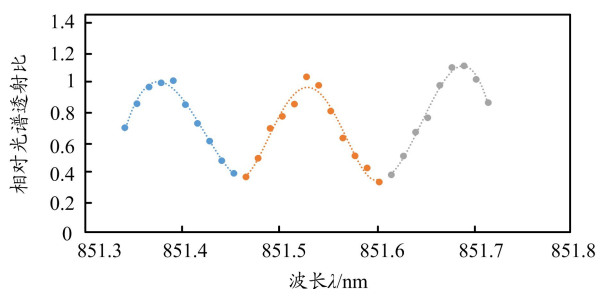


图5 入射光的系统相对光谱透射比随入射光波长 λ 的变化图

从图 5 中可以看出,系统对输入光波长的相对光谱透射比随波长呈周期性变化,对于每一周期都对应一个透过效率的极大值点,极大值点处的相对光谱透过效率近似为 1,与式(2)相符,说明整个系统的波长透过特性主要是由 VIPA 的光波长透过特性决定。

2.3 光功率与光子计数的关系

在输入系统光功率满足 $-65 \text{ dBm} \leq P_s \leq -55 \text{ dBm}$ 时,每帧光子计数数量与输入光功率的关系进行验证。

实验分别选取 2 个 DBR 激光器(对应波长分别为 851.26 nm、851.41 nm)来探究光子计数与光功率的关系,同一波长的光在不同输入功率下探测到的光子计数变化情况如图 6 所示。可以看出,SPAD 探测到的光子数与输入光功率几乎呈正比关系,且线性变化的斜率几乎不随波长变化而变化。实验系统的衰减约为 20 dB,因此入射到 SPAD 的光功率也处于 $-65 \text{ dBm} \leq P_s \leq -55 \text{ dBm}$ 范围内,实验结果与麻痹性探测器模型

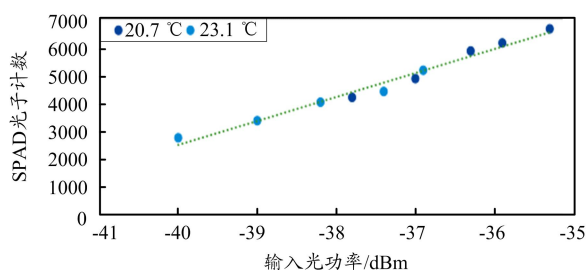


图6 不同输入光功率下 SPAD 光子计数变化

给出的结论基本相符。

光子计数数目与光功率呈线性关系会使光子数-光功率转换变得更加容易且准确,这将会提高该系统测量未知光谱的准确性。

2.4 填充因子对光斑光子的影响

由于单光子探测器阵列填充因子较小,即每个像素中光敏探测区域与单个像素面积的比值降低,在一定程度上降低了探测光子的效率。因此,一些研究者采用了许多方法来改善低填充因子对于探测的不利影响。DONATI S 等人^[17]采用在探测器阵列前置微透镜阵列的方法,通过每个像素前的平凸透镜将光束集中到光敏区域内,提高了填充因子。SHIN D 等人^[18]将 SPAD 阵列安装在反馈控制的两轴电动平移平台上,通过每次半个像素长度的微小位移达到延展探测区域,提高光敏区域覆盖位置的目的。除此以外,当入射到阵列的光斑大于光敏区域面积时,利用单光子探测器阵列对入射光进行光子计数也会受到低填充因子的影响,落在光敏区域之外的光子无法被探测和计数。

为了定量探究填充因子对光斑光子计数的影响程度,本文将落到探测器阵列上光斑范围内感光区域总的光功率与光斑实际总光功率之比表示为 e ,探究光斑在阵列上移动过程中 e 值的变化情况可以反映出填充因子对本实验测量结果的影响。

探测器阵列中光斑位置与感光区域分布示意图如图 7 所示。其中,长半轴

$b=60 \mu\text{m}$,短半轴 $a=30 \mu\text{m}$ 。实验中采用的探测阵列感光区域是长 $23 \mu\text{m}$ 、宽 $12.88 \mu\text{m}$ 的矩形构成的阵列,相邻感光区域矩形的中心间隔为 $30 \mu\text{m}$,光斑内光场强度满足椭圆高斯分布。随着光斑位置移动,光斑范围内感光区域面积与光斑面积的比值呈现周期性,所以 e 值也呈现周期性,

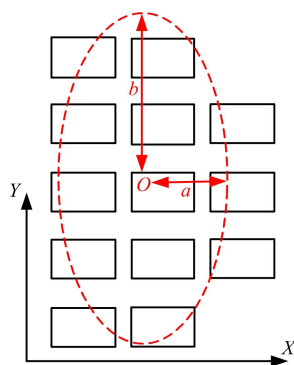


图7 探测器阵列中光斑位置与感光区域分布示意图

因此只需要探究在 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 正方形范围内光斑中心位置的变化即可。

光斑在阵列不同位置下 e 值的变化情况如图 8 所示。可以看出,在光斑移动过程中, e 的最大值与最小值分别为 0.4435、0.4158。通过计算得到 e 值的标准差 $\sigma=0.8\%$,感光区域受限导致的光功率探测误差仅约为光斑总功率的 0.8%,因此实验中基本可以忽略因填充因子导致的不同波长下 e 值不同而产生的误差。

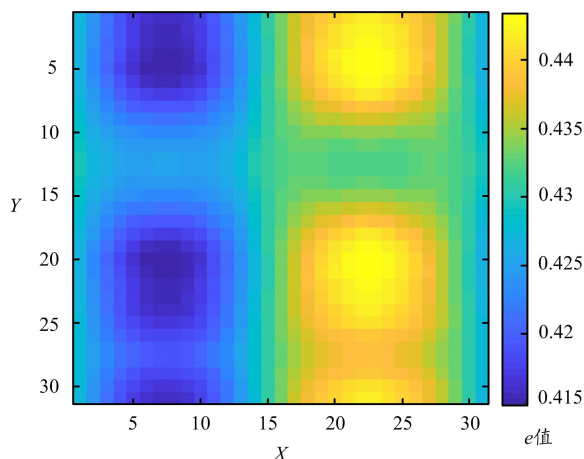


图 8 阵列不同位置上的 e 值分布图

3 结束语

针对极微弱光环境下的光谱测量应用,本文提出了基于单光子探测器阵列的光谱测量系统。在提高光谱测量灵敏度的前提下,采用二维色散结构和单光子探测器阵列结构进一步提高了光谱测量的波长分辨率和测量覆盖的波长范围,并从理论和实验两方面验证了光子计数与光功率的转换关系,有力地印证了单光子探测器阵列作为光谱末端探测器的可行性。但是,实验还存在许多需要提升拓展的地方,目前系统的实际测试带宽受到 DBR 激光源可调谱宽和单光子探测器阵列尺寸的限制,后续在条件允许的情况下可以使用短近红外波段的宽谱光源作为该光谱测量系统的光源,并使用更大阵列尺寸的单光子探测器对具体的光谱应用进行测量。

与现有的光谱仪相比,本系统探测灵敏度具有明显的优势;与传统的时间相关单光子计数光谱测量系统相比,本系统对器件性能要求低,波长分辨率也有显著提升,同时可探测的波长范围更大。本文的研究成果对后续单光子探测器阵列在光谱测量领域研究的开展具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] MOON S, WON Y, KIM D Y. Analog mean-delay method for high-speed fluorescence lifetime measurement [J]. Optics Express, 2009, 17(4): 2834–2849.
- [2] HADFIELD R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696–705.
- [3] WAHL M. Modern TCSPC electronics: principles and acquisition modes[M]. Springer: Cham, 2014.
- [4] GODA K, JALALI B. Dispersive fourier transformation for fast continuous single-shot measurements[J]. Nature Photonics, 2013, 7(2): 102–112.
- [5] MENG Z, PETROV G I, CHENG S, et al. Lightweight Raman spectroscope using time-correlated photon-counting detection[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(40): 12315–12320.
- [6] AVENHAUS M, ECKSTEIN A, MOSLEY P J, et al. Fiber-assisted single-photon spectrograph[J]. Optics Letters, 2009, 34(18): 2873–2875.
- [7] TOUSSAINT J, DOCHOW S, LATKA I, et al. Proof of concept of fiber dispersed Raman spectroscopy using superconducting nanowire single-photon detectors[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5078–5090.
- [8] DAVIS A O C, SAULNIER P M, KARPINSKI M, et al. Pulsed single-photon spectrometer by frequency-to-time mapping using chirped fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12804–12811.
- [9] WANG C, GODA K, IBSEN M, et al. Dispersive fourier transformation in the 800 nm spectral range[EB/OL]. [2021–11–08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6325378>.
- [10] POEM E, HIEMSTRA T, ECKSTEIN A, et al. Free-space spectro-temporal and spatio-temporal conversion for pulsed light[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4328–4331.
- [11] XU Y, MURDOCH S G. Real-time spectral analysis of ultrafast pulses using a free-space angular chirp-enhanced delay[J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3697–3700.
- [12] XIAO S, WEINER A M. 2-D wavelength demultiplexer with potential for ≥ 1000 channels in the C-band[J]. Optics Express, 2004, 12(13): 2895–2902.
- [13] SHIRASIKI M. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer [J]. Optics Letters, 1996, 21(5): 366–368.
- [14] XIAO S, WEINER A M, LIN C. A dispersion law for virtually imaged phased-array spectral dispersers based on paraxial wave theory [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(4): 420–426.
- [15] EISELE A, HENDERSON R, SCHMIDTKE B, et al. 185 MHz count rate 139 dB dynamic range single-photon avalanche diode with active quenching circuit in 130 nm CMOS technology[EB/OL]. [2021–11–08]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=71816dd5e4b8ef2f6f348a129a89fc28&site=xueshu_se.
- [16] LEE S H, GARDNER R P. A new G – M counter dead time model[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2000, 53(4–5): 731–737.
- [17] DONATI S, MARTINI G, RANDONE E. Improving photodetector performance by means of microoptics concentrators[J]. Journal of Light-wave Technology, 2010, 29(5): 661–665.
- [18] SHIN D, XU F, VENKATRAMAN D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1–8.