

基于频谱迁移的红外探测研究进展 (特邀)

周志远, 史保森*

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 传统的红外探测主要基于铟镓砷、锑碲汞等半导体光子型探测器, 然而这类探测器在常温下具有灵敏度低和噪声较大的缺点, 高灵敏探测还需要深制冷, 相对于成熟的硅探测器性能差距非常大。因此, 将不易探测的红外波段转迁移至硅探测器的工作波段, 并且利用高性能的硅基探测器进行有效探测是一种可行的路径。基于这种思想, 目前发展了一种有效的频谱迁移探测方法, 即通过非线性和频上转换过程将红外光子的频谱迁移到硅探测器的探测波段, 从而实现高效的探测。文中系统介绍了基于频谱迁移红外探测的基本原理、主要参数和最新研究进展, 最后对潜在的研究趋势和应用前景进行了展望。

关键词: 红外探测; 频谱迁移; 量子效率; 噪声; 频率带宽; 视场

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230165

0 引言

在整个电磁波谱中, 300~1 100 nm 紫外、可见和近红外波段光学技术发展时间最长, 该波段光的产生、调控和探测技术最成熟。随着硅 CMOS 工艺和 CCD 技术的发展, 300~1 100 nm 波段探测技术非常成熟, 所使用的探测器具有效率高、灵敏度高及视场大的优点, 且系统简单、价格低廉。然而, 随着科技发展和人类认知的不断进步, 人们发现仅仅通过可见/近红外光探测去认知物质世界是远远不够的, 大量的物质信息与红外光谱息息相关, 因此, 发展红外探测技术就成为认识和改造自然界的重要途径。红外波段包括近红外 (0.7~2.5 μm)、中红外 (2.5~25 μm) 和远红外 (25~300 μm), 这些光谱与构成物质的分子和原子的本征光谱紧密关联, 其中近红外、中红外和远红外光谱主要由电子跃迁、振动能级跃迁和转动能级跃迁产生^[1-2]。因此红外探测具有广泛的应用场景, 比如在中红外波段的应用场景包括: 医学诊断^[3-5]、环境监测^[2,6-9]、地质学中的矿物鉴定^[10], 以及食品行业^[11]等。中红外光谱探测技术具有如此广泛应用的原因

体现在以下三个方面: (1) 中红外可以覆盖几乎所有气体分子的吸收带, 这些吸收带是由分子的振动能级决定的。通过测量振动能谱, 可以有效地鉴别食物或者肌肉中的复合分子; (2) 中红外可以有效地与气体分子相互作用, 通过气体光谱可以检测温室气体, 如 CO_2 、 CH_4 、 NO_x 、 SO_x 。与此同时, 该波段覆盖了多个低损耗大气窗口, 也可以用于自由空间光通信; (3) 室温物体可以辐射中红外光场, 为物体探测提供了一种有效的热成像手段。

综上所述, 近年来红外探测研究受到广泛关注, 成为一个热点研究领域。制约该技术发展和应用的瓶颈是如何实现高效、高灵敏的红外探测。目前常用的红外探测系统主要分为两类: 一类是热感应体系, 如微测热辐射计和热电感应器; 另一类是基于半导体的光子探测系统, 如 AsGaIn、PbS、MCT 等红外探测器。热感应体系的优点是体系简单、便宜, 缺点是响应速度慢、灵敏度低。而半导体系统虽然响应速度快、效率高, 但易受环境热噪声影响较大, 需要对探测器深制冷以降低背景热噪声的影响, 导致系统复杂且器件使用寿命较短。因此, 如何发展新的红外探测技

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (2022YFB3607700, 2022YFB3900027); 国家自然科学基金 (11934013, 92065101); 科技部科技创新 2030-量子科学与科技项目 (2021ZD0301100); 中国空间碎片研究项目 (KJSP2020020202)

作者简介: 周志远, 男, 副教授, 博士, 主要从事量子非线性光学和机构光场调控方面的研究。

通讯作者: 史保森, 男, 教授, 博士, 主要从事冷原子物理和量子光学方面的研究。

术,使之能够克服部分/全部直接红外探测器的缺点是日前红外探测技术发展的重要趋势,对促进该领域的发展具有重要的推动作用。

发展红外探测技术的传统途径是研制新的高性能红外响应材料。尽管这方面的研究取得了很大进步,但短期内仍然摆脱不了上述缺点。近年来,一种基于非线性和频上转换过程的间接探测方法受到了广泛关注:既然直接红外探测存在难以逾越的障碍,而硅探测器性能优越,可以通过非线性频率转换技术将红外光波长迁移到硅探测器的探测波段,利用高性能的硅探测器实现红外信号的检测,从而避免了直接红外探测器的诸多缺点——这就是近年来逐步受人关注的频谱迁移上转换探测技术(如图 1 所示)。该探测技术具有快速、室温下可工作、灵敏度高的优点^[12-13],已成为解决红外探测瓶颈的一种重要潜在手段。文中将系统介绍基于非线性过程红外探测的基本原理、主要参数和最新的研究进展,最后对潜在的应用和研究趋势进行展望。

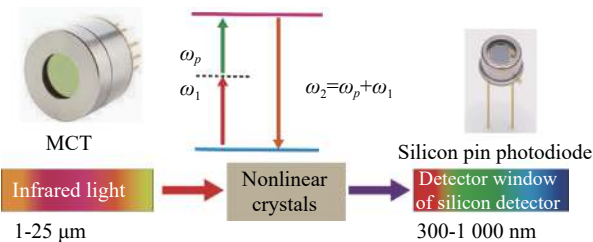


图 1 频谱迁移探测示意图

Fig.1 Simple diagram for spectrum transducing detection

1 频谱迁移探测基本原理

早在 1990 年, P. Kumar 就通过量子光学的方法构建了频谱迁移探测基本原理,在非线性和频过程中,湮灭一个信号光子和一个泵浦光子会产生一个和频光子,该过程的相互作用哈密顿量为^[14]:

$$H_I = i\hbar\kappa(\hat{a}_s^\dagger\hat{a}_{sFG}^\dagger + \hat{a}_s^\dagger\hat{a}_{sFG}) \quad (1)$$

式中: $\hat{a}_s^\dagger(\hat{a}_s)$ 和 $\hat{a}_{sFG}^\dagger(\hat{a}_{sFG})$ 为信号与和频光子的产生(湮灭)算符,是与非线性晶体的非线性系数 $\chi^{(2)}$ 、泵浦光场 E_p 以及晶体的折射率和长度有关的常数。信号与和频光子湮灭算符的海森堡演化方程为:

$$\frac{d\hat{a}_s}{dt} = -\kappa\hat{a}_{sFG}, \quad \frac{d\hat{a}_{sFG}}{dt} = \kappa\hat{a}_s \quad (2)$$

该方程的解析解为^[15]:

$$\hat{a}_s(L) = \cos(\kappa L)\hat{a}_s(0) - \sin(\kappa L)\hat{a}_{sFG}(0) \quad (3)$$

$$\hat{a}_{sFG}(L) = \sin(\kappa L)\hat{a}_s(0) + \cos(\kappa L)\hat{a}_{sFG}(0) \quad (4)$$

从公式 (3) 和 (4) 可知,当泵浦功率满足 $\kappa L = \pi/2$ 时,一个输入的信号光子可以 100% 转换为一个和频光子。该过程的转换效率定义为 $\eta = N_{sFG}(L)/N_s(0)$,其中 $N_i = \langle \hat{a}_i^\dagger\hat{a}_i \rangle_T$ 为时间 T 内测量的光子数。当输入的和频光子为 $N_{sFG}(0) = 0$ 时,转换效率 $\eta = \sin^2(\kappa L)$ 。以上理论构成了量子频谱迁移探测的基础,在此基础上开展了一系列针对量子态的频率转换探测研究工作。

上述理论具有一定的指导作用,但是对于实际的非线性转换过程,也可以通过耦合波方程来进行计算和分析。在三波混频过程中,参与相互作用的三束光场在缓变振幅近似下满足如下耦合波方程^[16]:

$$\begin{cases} \frac{dE_p}{dz} = \frac{2id_{eff}\omega_p}{n_p c} E_{sFG}E_s^* \exp(-i\Delta kz) \\ \frac{dE_s}{dz} = \frac{2id_{eff}\omega_s}{n_s c} E_{sFG}E_p^* \exp(-i\Delta kz) \\ \frac{dE_{sFG}}{dz} = -\frac{2id_{eff}\omega_{sFG}}{n_{sFG} c} E_pE_s \exp(i\Delta kz) \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_p 、 E_s 、 E_{sFG} 分别为泵浦光、信号光与和频光; d_{eff} 为有效非线性系数; $\Delta k = k_{sFG} - k_s - k_p$ 为相位失配。该方程可以系统地模拟高斯光泵浦下的光场转换规律。当考虑图像或高阶光场的频率转换时,需要对上述方程进行修改,考虑到光场衍射后的耦合波方程表达式为^[17-18]:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_p}{\partial z} = \frac{2id_{eff}\omega_p}{n_p c} E_{sFG}E_s^* \exp(-i\Delta kz) + \frac{i}{2k_p} \left(\frac{\partial^2 E_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_p}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} = \frac{2id_{eff}\omega_s}{n_s c} E_{sFG}E_p^* \exp(-i\Delta kz) + \frac{i}{2k_s} \left(\frac{\partial^2 E_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_s}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial E_{sFG}}{\partial z} = -\frac{2id_{eff}\omega_{sFG}}{n_{sFG} c} E_pE_s \exp(i\Delta kz) + \frac{i}{2k_{sFG}} \left(\frac{\partial^2 E_{sFG}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{sFG}}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

以上分别介绍了频谱迁移探测的量子光学描述和麦克斯韦方程描述,基于这两种描述方式可以全面地分析量子光场以及经典光场的频谱迁移转换过程。

2 频谱迁移探测的主要指标和参数

在利用频谱迁移进行探测的过程中,有一些关键的指标参数衡量该复合探测系统的性能,这些关键的指标参数包括量子效率、系统噪声、频率带宽和空间

带宽。下文针对这些参数的定义和依赖因素进行详细的描述。

2.1 量子效率

量子效率定义为一个输入信号光子被上转换到和频光子的概率大小。根据前述理论描述, 频谱迁移的量子效率的一般表达式为^[15, 19]:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{\max}}}\right) \quad (7)$$

式中: P 为实际泵浦功率; P_{\max} 是达到量子效率为 100% 的泵浦功率。对于实际的频率转换过程通常有两种方式: 第一种是体块晶体; 第二种是非线性介质波导。对于体块晶体, 其最佳的泵浦功率表达式为^[19]:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon_0 c n_s n_{sFG} \lambda_p \lambda_s \lambda_{sFG}}{16\pi^2 d_{eff}^2 L h(0, \xi)} \quad (8)$$

式中: c 为真空中的光速; ε_0 为真空介电常数; λ_p 、 λ_s 、 λ_{sFG} 分别为泵浦光、信号光与和频光的波长; n_s 、 n_{sFG} 为信号光与和频光的折射率; d_{eff} 为有效非线性

系数; $h(0, \xi)$ 为聚焦因子, 具体表达式参考文献 [19]; L 为晶体长度。只要确定了具体的晶体参数、聚焦条件和输入功率, 通过公式 (8) 即可确定和频转换的量子效率。

对于非线性波导, 其最佳泵浦功率的表达式为^[20]:

$$P_{\max} = \frac{\pi^2}{4\eta_{\text{mom}} L^2} \quad (9)$$

式中: $\eta_{\text{mom}} = v^2 \kappa_1 \kappa_2$; $\kappa_i = \sqrt{\frac{8\pi^2 d_{eff}^2}{n_1 n_2 n_3 c \varepsilon_0 \lambda_i^2}}$ ($i = 1, 2, 3$); v 为模式交叠系数, 其平方的倒数是有效模式面积; L 为波导的相互作用长度。

2.2 量子噪声

频率转换过程中的主要噪声因素包括环境噪声和由泵浦光引起的自发拉曼噪声、自发参量噪声、泵浦光倍频后产生的自发辐射噪声, 噪声和三束光的关系如图 2 所示^[20]。泵浦光引起的噪声取决于晶体材料本身的特性和晶体的工作温度, 噪声的强度大小可以通过单色仪和单光子探测器精确地测定。

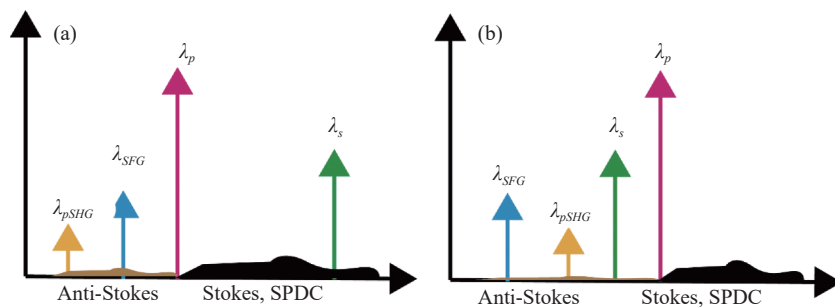


图 2 短波和长波泵浦下的噪声分布情况。(a) 短波长泵浦情况; (b) 长波长泵浦情况

Fig.2 Noise distributions under short wavelength and long wavelength pumping. (a) Under short wavelength pumping; (b) Under long wavelength pumping

通常可以使用质量较好的干涉滤波片滤除大部分噪声, 但是当泵浦光产生的自发参量噪声或自发拉曼噪声与信号光处于一个波段时, 这些噪声同样可以与泵浦光发生高效和频, 且频率变换后的二次噪声与和频信号也同处于一个波段, 很难滤除^[21]。一般倾向于利用波长更长的光当做泵浦光, 如图 2(b) 所示, 这样由泵浦光产生的较强的拉曼散射噪声和自发参量噪声波长更长, 所以这些噪声不会与信号光处于同一波段, 也就不会再与泵浦光和和频产生难以滤除的二次噪声。通常为了更好地滤除转换带来的噪声, 可以选择较低的晶体工作温度; 另外, 如果转换后的和频光带宽较窄, 选择带宽极窄的光栅滤波器可以极大地消

除泵浦光带来的噪声干扰。

2.3 频率带宽

频率带宽定义为在指定泵浦频率分布下, 改变信号光场的频率分布使转换效率下降一半时的信号光的频率改变大小。频率带宽与非线性晶体频率变换过程的相位匹配条件密切相关。对于二阶非线性过程, 其和频转换信号强度正比于 $\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)$, 其中 $\Delta k = k_{sFG} - k_s - k_p + 2\pi/\Lambda$ 。从公式可知接收带宽与晶体的相位失配和长度密切相关。一般通过改变晶体的相位失配和长度可以改变接收带宽, 其中晶体越短接收带宽越大; 另外, 通过改变晶体的温度分布、波长色散和极化周期分布可以按需设计满足要求的接收带宽。

2.4 空间带宽

空间带宽定义为转换器能够转换的空间频谱范围大小,对于图像探测器一般用视场角来表征。和频上转换光强度正比于 sinc^2 函数值,接收视场角由 sinc^2 函数值降低到一半时所对应的 $\frac{\Delta kL}{2}$ 的大小决定。相位失配因子 $\Delta k \approx \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} \Delta \theta$, 其中 $\Delta \theta$ 为信号光的入射方向与相位匹配角之间的夹角,它决定了接收视场角的大小。在实际场景应用中考虑弱聚焦,若图像边缘的入射角度小于接收角时,上转换过程的接收视场角的大小则依赖于非线性晶体的横截面和泵浦激光的束腰大小。当晶体的横截面小于光斑直径时,晶体横截面的大小直接决定了上转换接收视场角的上限。而当晶体横截面大于光斑直径时,接收视场角则由泵浦激光在晶体中的光斑所定义的软“光阑”的大小决定(如图 3 所示)。

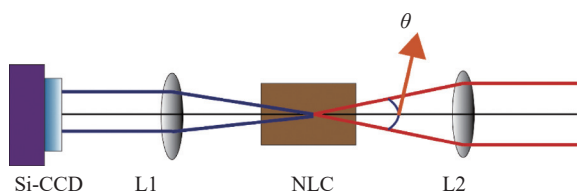


图 3 频谱迁移探测中接收视场角示意图

Fig.3 Detection field of view for image detection with spectrum transducing

3 频谱迁移探测的主要研究进展

频谱迁移探测经过多年的发展,其探测的光场从经典的激光到量子光场,从单个点探测器到面探测器,波长从近红外延伸到中红外波段。与此同时,针对频谱迁移探测的主要指标也进行了深入研究,推进相关指标的显著提升。下文首先介绍围绕频谱迁移探测关键指标提升的相关研究,然后介绍部分频谱迁移探测相关应用场景的研究进展。

3.1 频谱迁移探测关键指标研究及进展介绍

3.1.1 量子效率

频谱迁移过程的量子效率研究主要针对两种物理结构:一个是非线性波导体系,另一个是体块晶体体系(如图 4 所示)。波导体系相对于体块晶体由于模场面积小,功率密度高,在较低的功率下即可实现非常高的量子效率,通过优化波导的传输损耗和端面模式匹配,从进波导到出波导的总体量子效率高达 86.58% (内部转换效率 96.2%)^[22]。目前的主要波导结构包括质子交换的掩埋型波导和机械抛光的脊型波导,质子交换掩埋型波导的损伤阈值较低,脊型波导的损伤阈值较高,可以承受较大的泵浦功率(如图 4(c)所示)。对于周期性极化波导,最近石英上的铌酸锂

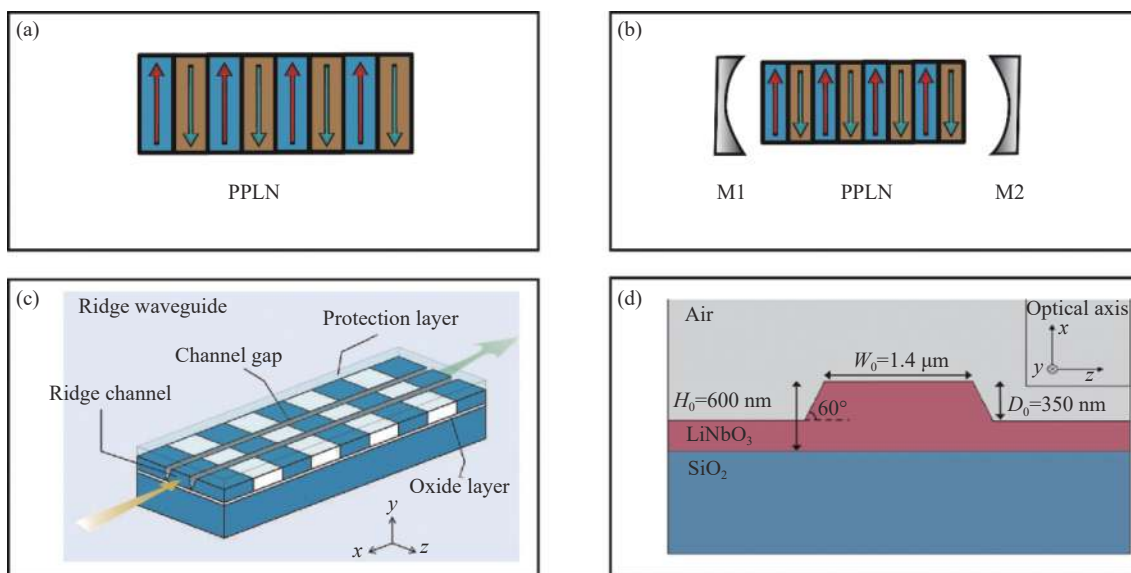


图 4 可用于实现频谱迁移探测的不同光学结构。(a) 体块晶体; (b) 谐振腔中的体块晶体; (c) 脊型波导结构 (图片来源: https://www.opt-ron.com/product/hcp_ppln-chips); (d) 纳米铌酸锂薄膜波导 (图片来源: <https://www.researching.cn/articles/OJ69ad0db15f1eb037>)

Fig.4 Optical configurations that can be used to realize spectrum transducing detection. (a) Bulk PPLN crystal; (b) Bulk PPLN crystal in cavity; (c) PPLN ridge waveguide (image is taken from: https://www.opt-ron.com/product/hcp_ppln-chips); (d) PPLN nano-film structure (image is taken from: <https://www.researching.cn/articles/OJ69ad0db15f1eb037>)

薄膜是一个比较热点的体系,由于薄膜厚度在几百纳米量级,波导的导模尺寸进一步减小,实现理想转换的泵浦功率可以进一步降低^[23](如图 4(d)所示)。由于铌酸锂薄膜中模场面积大幅度减小,其器件集成度将进一步增加,然而百纳米尺度波导的高效耦合问题是否能够突破是铌酸锂薄膜频谱迁移器件走向应用的关键。对于单点频谱迁移探测应用,非线性波导是一种比较理想的选择。

对于基于体块晶体的频谱迁移探测应用,为了提升转换的量子效率,通常有两种方式:第一种是通过谐振腔的方式增强泵浦光的功率,从而提升量子效率^[15,19](如图 4(b)所示);第二种是基于高峰值功率的脉冲激光获得高的量子转换效率^[24](如图 4(c)所示)。相对于波导结构,体块晶体可以用于带空间结构的光场或者图像的转换。对于一些结构光场或者图像的频谱迁移探测应用,可以选择体块晶体作为非线性转换介质。

3.1.2 量子噪声

针对频谱迁移过程中量子噪声的研究具有一系列的研究结果和进展,下面给出其中一些典型的研究结果。2008年,华东师范大学曾和平教授研究组通过 1561 nm 皮秒脉冲激光泵浦体块 PPLN 晶体用于实现 1.06 μm 光信号到 632.5 nm 的频率上转换探测,仅通过棱镜滤波和短通滤波器,在接近 100% 量子转换效率下暗计数率仅为约 150/s^[25]。2011年, J. S. Pelc 等人研究了长波长泵浦下 1550 nm 上转换探测器的性能表现,利用 PPLN 波导在 86% 的内部量子效率下,噪声光子计数率为 1000/s,在该工作中证明了噪声光子起源于泵浦激光的拉曼散射噪声,研究了不同泵浦波长和温度下的噪声光子特征,得出利用长波长泵浦可以极大地压低频率迁移探测中的量子噪声^[20]。

2013年,美国标准技术局 P.S. Kuo 等人研究了使用不同的滤波器对于频谱迁移探测中量子噪声的影响,对比了棱镜对滤波、透射式全息光栅滤波和高效率窄线宽体布拉格光栅滤波下的噪声大小,利用极窄的频谱滤波可以有效地压低噪声,最后在 70% 内部波导转换效率下,噪声计数为 600/s^[21]。结合长波泵浦和极窄滤波器,2013年,中国科学技术大学张强教授研究组在 28.6% 的系统探测效率下,暗计数率仅为 100/s^[26]。除了近红外波段的量子噪声研究,在中红外波段也开展了相应的研究。2018年,丹麦科技大学 A. Barh 等人研究了宽谱中红外上转换过程中热噪声对探测灵敏度的影响,构建了详细的热辐射模型,并且通过实验进行了验证,评估了不同晶体温度下的热辐射转换噪声大小^[27]。

3.1.3 频率带宽

对于部分应用场景,如雷达探测、定频光信号探测对于频率带宽无特别要求,反而较窄点的频率带宽有助于信噪比的提升。然而,对于大范围的光谱分析探测以及宽谱信号的检测,对于接收带宽是有要求的,大的接收带宽可以极大地提升频谱迁移探测器的工作波长范围以及探测宽谱信号的响应灵敏度。频率带宽的拓展主要依赖于相位匹配函数的设计,对于准相位匹配晶体,通常采用的手段主要有温度梯度法^[28]、啁啾极化^[29]和非共线准相位匹配方法^[30]。其中一些典型的研究进展包括:2008年,通过啁啾极化和绝热近似演化,在近红外通信波段实现了超过 140 nm 接收带宽的频谱迁移^[31](如图 5(a)所示);2017年, A. Barh 等人通过 PPLN 晶体中非共线相位匹配,在中红外波段实现了超过 1200 nm 的频谱迁移探测^[30]。另外,对于角度匹配晶体,可以通过角度调谐^[32]或者多块不同切割角晶体叠加的方式拓展频率

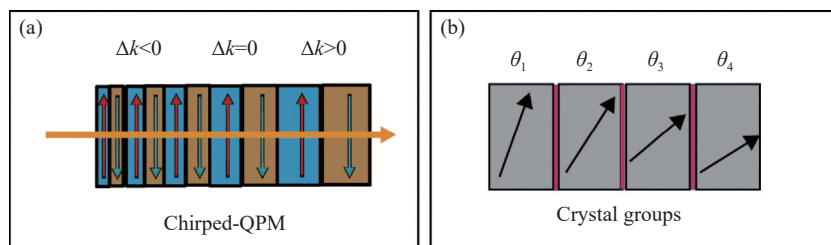


图 5 不同方式实现大接收带宽频谱迁移。(a) 啁啾极化晶体; (b) 多个不同切割角的晶体胶合在一起

Fig.5 Large frequency acceptance bandwidth in spectrum transducing detection based on different methods. (a) Chirped quasi-phase matching crystal; (b) A group of multi-crystals with different cutting angles

转换带宽^[33](如图 5(b) 所示); M. Mrejen 等人实现了宽谱多种颜色的中红外图像的频谱迁移成像^[34]。

3.1.4 空间带宽

对于结构光场或者图像的频谱迁移探测需要使用体块晶体。空间带宽主要受限于晶体横截面的尺寸和相位匹配函数。在晶体尺寸确定的情况下,增加空间带宽的主要手段是调控相位匹配函数。增加相位匹配函数对于入射角大小的容忍度即可增加空间

带宽,与增加频率带宽相似,主要方法也包括温度梯度法^[35]、宽谱泵浦方法^[17]、啁啾极化和非共线相位匹配^[34, 36]。主要进展包括:2018年, R. Demur 等人通过宽谱泵浦,相对于窄带单频泵浦,视场角提升了3倍多,有效像素点增加了10倍^[17];2022年,基于啁啾极化的方式,曾和平教授研究组在中红外波段实现了约30°的频谱迁移成像视场角(如图 6 所示)^[36]。

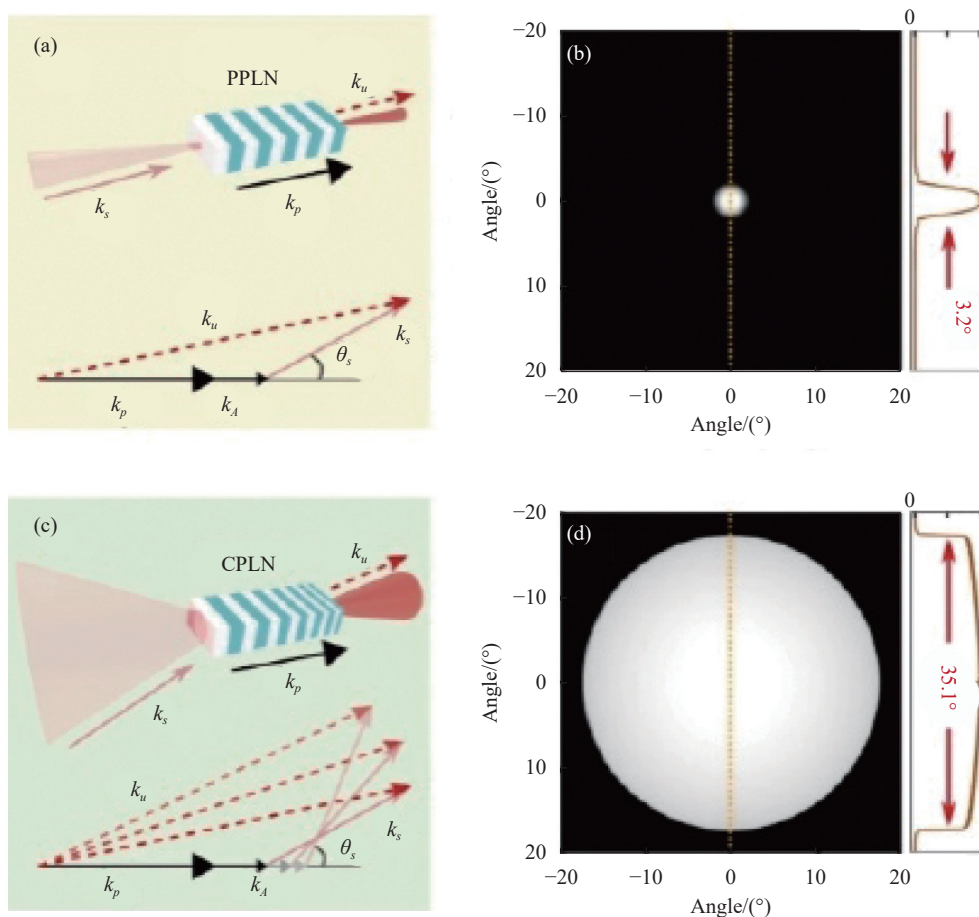


图 6 基于啁啾极化晶体实现大视场频谱迁移成像原理 (图片来源参考文献 [36])

Fig.6 The principle for realizing large field of view in spectrum transducing image based on chirped poling crystals (image is taken from reference [36])

3.2 频谱迁移探测的主要应用场景

频谱迁移探测对现有的直接探测是一种有效的补充手段,与此同时,在部分应用场景相对现有的直接探测器还能表现出一定的优势。频谱迁移探测的应用场景非常广泛,下文分别从频谱迁移在量子信息技术和在经典光学测量(如成像和光谱方面)的应用进行介绍。

3.2.1 频谱迁移探测在量子信息技术中的应用

频谱迁移探测在量子信息中的应用主要分为两个方面:一方面频谱迁移可以作为红外单光子探测手段,早期主要用于解决近红外波段尤其是通信波段缺乏高性能探测的问题,随着超导探测器和铟镓砷制冷探测器的性能水平提高,目前在通信波段频谱迁移单光子点探测器的应用需求迫切程度在大

幅度下降^[20-21, 26]。但是在更长的中红外波段, 目前还缺乏有效的单光子探测器, 频谱迁移单光子探测是现阶段的一种有效手段。丹麦科技大学研究组通过频谱迁单光子探测实现了一对中红外光子的符合测量^[37]。另一方面, 用于量子信息技术研究的不同物理系统往往工作在不同的波长, 为了实现量子态在不同物理体系间的传递和耦合需要弥补不同物理体系工作波长的差距, 频谱迁移具备改变量

子态的波长而不改变所加载的量子态信息的特点, 因此可以用于不同工作波长物理体系的量子态波长接口。在量子频率接口方面, 目前已实现了单光子量子比特^[38]、时间能量^[39-40]、偏振^[41]和轨道角动量纠缠态^[42]的量子波长接口。最近, 德国 H. Weinfurter 组基于冷原子体系产生的光子结合高效率量子波长接口, 实现了远距离的量子纠缠交换 (如图 7 所示)^[43]。

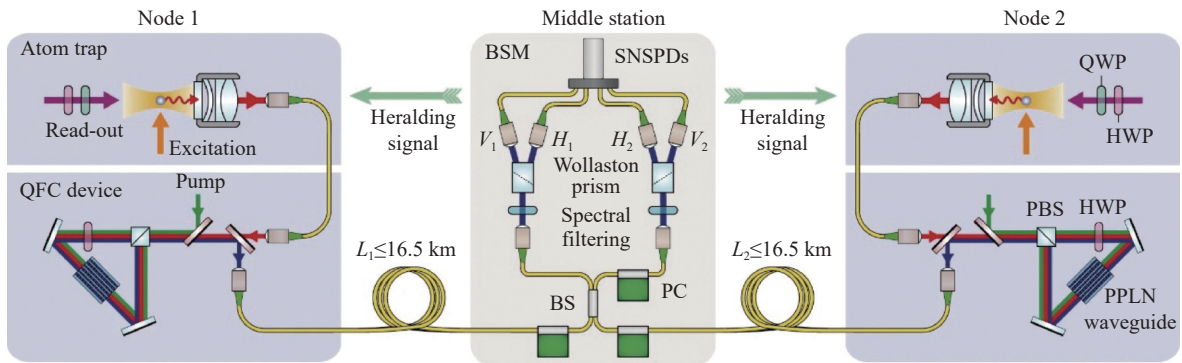


图 7 利用频谱迁移建立原子体系与通信波段信道之间的量子频率接口 (图片来源参考文献 [43])

Fig.7 Building up quantum frequency interface between atomic system and telecommunication channel based on spectrum transducing (image is taken from reference [43])

3.2.2 频谱迁移探测在经典光学测量中的应用

频谱迁移探测在经典光学的应用主要包括成像、光谱分析、激光雷达和通信等领域。在成像方面的典型应用包括: 通过频谱迁移实现了蜡烛火焰中红外成

分探测^[12]、大视场和高帧频低噪声的中红外成像^[36]、边缘增强成像^[44-46](如图 8 所示) 以及高帧频生物组织成像^[32]等。在光谱分析领域, 可以通过频谱迁移探测实现中红外光谱仪, 并且用于塑料和气体泄露

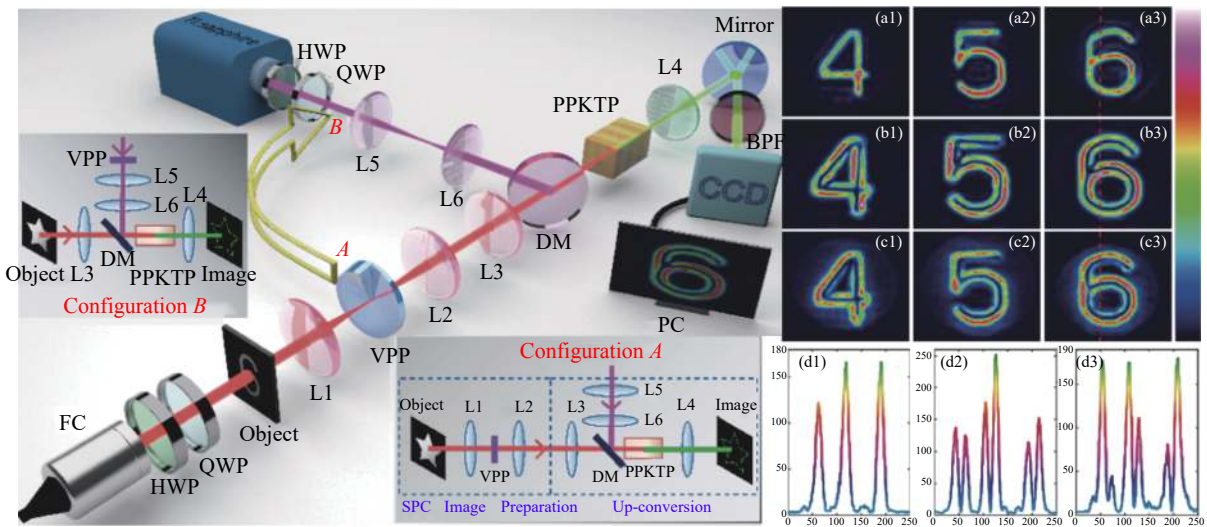


图 8 基于涡旋光泵浦在频谱迁移成像过程中实现图像边缘增强 (图片来源参考文献 [45])

Fig.8 Phase contrast imaging is realized in spectrum transducing imaging by pumping with vortex light (image is taken from reference [45])

分析^[33,47]。此外,通过频谱迁移探测还可以用于中红外激光雷达^[48]以及高速中红外光通信^[49],促进关键指标参数的提升。

4 讨论与展望

尽管频谱迁移探测经过几十年的发展在指标参数上取得了重要的进步,但是由于该系统中的部分指标参数间是相互制约的,比如噪声、频率带宽、空间带宽和转换效率之间,在具体的应用中需要平衡各参数之间的关系。在近红外波段 1.0~2.5 μm 的频谱迁移点探测器性能相对成熟,指标可以达到较高的水平,中红外波段的参数性能还有待于进一步挖掘和提升。在频谱迁移面阵探测方面,目前还未实现单光子级的成像探测演示,在激光主动照明探测上研究的较多,对于非相干光场,尤其是宽谱黑体辐射光场的探测方面还有诸多问题需要进一步解决。此外,针对频谱迁移探测系统的成像分辨率研究,虽然有初步工作^[50],但是对于该系统成像分辨率的主要限制因素和可改善的方法方面目前还是空白,值得进一步挖掘。总之,在频谱迁移探测方面还有一些值得挖掘和期待的研究可以开展,下面给出几个在未来值得探索的研究方向:(1)基于频谱迁移单光子探测可以用中红外波段的量子光学和量子光谱的研究,该方面目前还处于待探索的领域^[51-52];(2)将频谱迁移与干涉仪技术相结合可以发展出一些新的光学测量方法,比如非接触光子探测^[53-54]和光学相位放大^[55];(3)在频谱迁移的技术进一步成熟和小型化后,可以将大部分的光谱迁移到硅探测器的波段探测,这样可以有效地降低部分光学系统的探测复杂度,对于工程技术应用具有重要的潜在价值。

参考文献:

- [1] Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. Mid-Infrared Coherent Sources and Applications [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] Abedin M N, Mlynzack M G, Refaat T F. Infrared detectors overview in the short-wave infrared to far-infrared for CLARREO mission [C]//Proc SPIE, 2010, 7808: 78080V1.
- [3] Bhargava R. Infrared spectroscopic imaging: the next generation [J]. *Appl Spectroscopy*, 2012, 66(10): 1091-1120.
- [4] Fernandez D C, Bhargava R, Hewitt S M, et al. Infrared spectroscopic imaging for histopathologic recognition [J]. *Nature Biotechnology*, 2005, 23: 469-474.
- [5] Travo A, Piot O, Wolthuis R, et al. IR spectral imaging of secreted mucus: a promising new tool for the histopathological recognition of human colonic adenocarcinomas [J]. *Histopathology*, 2010, 56: 921-931.
- [6] Hermes M, Morrish R B, Huot L, et al. Mid-IR hyperspectral imaging for label-free histopathology and cytology [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20: 023002.
- [7] Wang W, Liang S, He T, et al. Estimating clear-sky all-wave net radiation from combined visible and shortwave infrared (VSWIR) and thermal infrared (TIR) remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 167: 31-39.
- [8] Li J, Parchatka U, Königstedt R, et al. Real-time measurements of atmospheric CO using a continuous-wave room temperature quantum cascade laser based spectrometer [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7590-7601.
- [9] Houghton J. Global warming [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68: 1343-1403.
- [10] Meer D F, Werff H M A, Ruitenbeek F J A, et al. Multi and hyperspectral geologic remote sensing: A review [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 112-128.
- [11] Gowen A A, O'donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(12): 590-598.
- [12] Dam J S, Tidemand-lichtenberg P, Pedersen C. Room temperature mid-infrared single-photon spectral imaging [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 788-793.
- [13] Høgstædt L, Dam J S, Sahlberg A L, et al. Low-noise mid-IR upconversion detector for improved IR-degenerate four-wave mixing gas sensing [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5321-5324.
- [14] Kumar P. Quantum frequency conversion [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(24): 1476-1478.
- [15] Albota M A, Wong F N C. Efficient single-photon counting at 1.55 μm by means of frequency upconversion [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1449-1451.
- [16] Boyd R W. Nonlinear Optics [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [17] Demur R, Garioud R, Grisard A, et al. Near-infrared to visible upconversion imaging using a broadband pump laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13252-13263.
- [18] Ge Z, Yang C, Li Y H, et al. Up-conversion detection of mid-

- infrared light carrying orbital angular momentum [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31: 104210.
- [19] Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. Orbital angular momentum photonic quantum interface [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16019.
- [20] Pelc J S, Ma L, Phillips C R, et al. Long-wavelength-pumped upconversion single-photon detector at 1550 nm performance and noise analysis [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21445-21456.
- [21] Kuo P S, Pelc J S, Slattery O, et al. Reducing noise in single-photon-level frequency conversion [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1310-1312.
- [22] Leent T V, Bock M, Garthoff R, et al. Long-distance distribution of atom-photon entanglement at telecom wavelength [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124: 010510.
- [23] Wang C, Langrock C, Marandi A, et al. Ultrahigh-efficiency wavelength conversion in nanophotonic periodically poled lithium niobate waveguides [J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1438-1441.
- [24] Huang K, Wang Y, Fang J, et al. Mid-infrared photon counting and resolving via efficient frequency upconversion [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 259-265.
- [25] Dong H, Pan H, Li Y, et al. Efficient single-photon frequency upconversion at with ultralow background counts [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93: 071101.
- [26] Shentu G L, Pelc J S, Wang X D, et al. Ultralow noise up-conversion detector and spectrometer for the telecom band [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 13986-13991.
- [27] Barh A, Tidemand-lichtenberg P, Pedersen C. Thermal noise in mid-infrared broadband upconversion detectors [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3249-3259.
- [28] Choge D K, Chen H X, Xu Y B, et al. Broadening of the sum-frequency phase-matching bandwidth by temperature gradient in MgO: PPLN [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5459-5463.
- [29] Suchowski H, Porat G, Arie A. Adiabatic processes in frequency conversion [J]. *Laser Photonics Review*, 2014, 8(3): 333-367.
- [30] Barh A, Pedersen C, Tidemand-lichtenberg P. Ultra-broadband mid-wave-IR upconversion detection [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1504-1507.
- [31] Suchowski H, Oron D, Arie A, et al. Geometrical representation of sum frequency generation and adiabatic frequency conversion [J]. *Physical Review A*, 2008, 78: 063821.
- [32] Junaid S, Kumar S C, Mathez M, et al. Video-rate, mid-infrared hyperspectral upconversion imaging [J]. *Optica*, 2009, 6(6): 702-708.
- [33] Rodrigo P J, Høgstedt L, Friis S M M, et al. Room-temperature, high-SNR upconversion spectrometer in the 6–12 μm region [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2021, 15: 2000443.
- [34] Mrejen M, Erlich Y, Levanon A, et al. Multicolor time-resolved upconversion imaging by adiabatic sum frequency conversion [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2020, 14: 2000040.
- [35] Maestre H, Torregrosa A J, Fernández-pousa C R, et al. IR-to-visible image upconverter under nonlinear crystal thermal gradient operation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1133-1144.
- [36] Huang K, Fang J, Yan M, et al. Wide-field mid-infrared single-photon upconversion imaging [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1077.
- [37] Mancinelli M, Trenti A, Piccione S, et al. Mid-infrared coincidence measurements on twin photons at room temperature [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15184.
- [38] Liu S, Yang C, Xu Z, et al. High-dimensional quantum frequency converter [J]. *Physical Review A*, 2020, 101: 012339.
- [39] Tanzilli S, Tittel W, Halder M, et al. A photonic quantum information interface [J]. *Nature*, 2005, 437: 116-120.
- [40] Li Y H, Fang W T, Zhou Z Y, et al. Quantum frequency conversion for multiplexed entangled states generated from micro-ring silicon chip [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28429-28440.
- [41] Bock M, Eich P, Kucera S, et al. High-fidelity entanglement between a trapped ion and a telecom photon via quantum frequency conversion [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1998.
- [42] Zhou Z Y, Liu S L, Li Y, et al. Orbital angular momentum-entanglement frequency transducer [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117: 103601.
- [43] Leent T V, Bock M, Fertig F, et al. Entangling single atoms over 33 km telecom fibre [J]. *Nature*, 2022, 607: 69.
- [44] Qiu X D, Lif S, Zhang W H, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [45] Liu S K, Yang C, Liu S L, et al. Up-conversion imaging processing with field-of-view and edge enhancement [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 044013.
- [46] Wang Y, Fang J, Zheng T, et al. Mid-infrared single-photon edge enhanced imaging based on nonlinear vortex filtering [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2021, 15: 2100189.
- [47] Jahromi K E, Pan Q, Høgstedt L, et al. Mid-infrared supercontinuum-based upconversion detection for trace gas sensing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24469-24480.

- [48] Widarsson M, Henriksson M, Barrett L, et al. Room temperature photon-counting lidar at 3 μm [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(4): 884-889.
- [49] Gray A C, Berry S A, Carpenter L G, et al. Upconversion detection of 1.25 Gb/s mid-infrared telecommunications using a silicon avalanche photodiode [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34279-34289.
- [50] Pedersen C, Karamehmedović E, Dam J S, et al. Enhanced 2D-image upconversion using solidstate lasers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 20885-20890.
- [51] Cai Y, Chen Y, Xin X, et al. Mid-infrared single-photon upconversion spectroscopy based on temporal-spectral quantum correlation [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): 2614-2621.
- [52] Mukamel S, Freyberger M, Schleich W, et al. Roadmap on quantum light spectroscopy [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2020, 53: 072002.
- [53] Lemos G B, Borish V, Cole G D, et al. Quantum imaging with undetected photons [J]. *Nature*, 2014, 512: 409.
- [54] Chekhova M V, Ou Z Y. Nonlinear interferometers in quantum optics [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(1): 104-155.
- [55] Li W Z, Yang C, Zhou Z Y, et al. Harmonics-assisted optical phase amplifier [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 312.

Progresses in infrared detection based on spectrum transducing (*invited*)

Zhou Zhiyuan, Shi Baosen*

(CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract:

Significance In this paper, spectrum transducing detection of infrared light with silicon detectors is systematic reviewed. Traditional infrared detection is based on semiconductor photonic detectors, such as AsGaIn and HgCdTe. These detectors have low detection sensitivities and relatively high noise at room temperature, and deep cooling is required to get better sensitivity. While the detection performances of silicon detectors are much better than those of the infrared detectors. Therefore, an effective method to detect infrared light is to transfer the wavelength of the infrared light to the detection window of silicon detector. Based on this principle, spectrum transducing detection of infrared light with silicon detectors is developed by using frequency up-conversion via sum frequency generation. This new detection scheme has the potential to offer single photon detection sensitivity at room temperature, which is very promising to be used in remote sensing at infrared regime.

Progress The main progress for spectrum transducing detection of infrared light can be divided into two groups. The first group is aimed at improving the key parameters in frequency conversion, which are quantum efficiency, noise, frequency bandwidth and spatial bandwidth. The conversion efficiency in frequency transducing can be enhanced by using cavity and waveguide (Fig.4), both configurations are demonstrated to achieve near unity internal conversion efficiencies; Noise in frequency conversion is mainly caused by spontaneous Raman scattering and parametric down conversion of strong pump beam, which can be measured at different pump configuration, and some effective methods can be used to sufficiently reduce the noise. These methods include: long wavelength pump laser, narrow band filters and reduction of the operation temperature of the nonlinear crystals. The frequency bandwidth is strongly dependent on the phase matching conditions, therefore effective methods such as chirped poling and multi-angle cut crystal can be used to enhance the frequency bandwidth in frequency conversion (Fig.5). The spatial bandwidth is dependent on crystal dimensions and phase matching, crystals with large optical aperture and large phase matching angles are preferred for spectrum transducing detection of image with large field of view, about 30 degree field of view is realized in mid-infrared up-

conversion based on chirped PPLN crystal (Fig.6). The second groups of progresses aimed at applications of the spectrum transducing detection in different fields, these fields are: single photon detection at mid-infrared regime and quantum frequency interface (Fig.7) for applications in quantum information processing; classical optical imaging such as large field of view and high frame rate imaging in the mid-infrared regime, phase contrast imaging (Fig.8) and spectrum analysis for material sciences.

Conclusions and Prospects For the mutual restrictions between different key parameters in spectrum transducing detection, one need to balance between different parameters for specific applications. Though the performance of spectrum transducing detection at the near infrared regime is high enough for some mentioned applications, the performances at mid-infrared is still not satisfied for typical applications, great efforts should be taken to improve the performance at this wavelength regime. For imaging detection based on spectrum transducing plane detectors, most studies are focused on coherent illumination, many key problems for illuminating with large bandwidth incoherent blackbody radiations are still not solved yet. In summaries, there are still opportunities for researches in spectrum transducing detection, these opportunities are: (1) to extending quantum optics and quantum spectroscopy to mid-infrared regime; (2) by combining spectrum transducing in interferometers to realize detection of infrared signal with undetected photons and optical phase amplification; (3) to transduce all other spectrums to the detection windows of silicon detectors and greatly reducing the detection complexity in large optical systems.

Key words: infrared detection; spectrum transducing; quantum efficiency; noise; frequency bandwidth; field of view

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3607700, 2022YFB3900027); National Natural Science Foundation of China (11934013, 92065101); Innovation Program for Quantum Science and Technology (2021ZD0301100); Space Debris Research Project of China (KJSP2020020202)