

时间拉伸CARS信号的传输与探测分析

李 岗¹, 龙 钰¹, 刘 军¹, 杨康文^{1,2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²香港大学电气与电子工程系, 香港

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, CARS)是一种非侵入、无标记的光学检测技术, 广泛用于生物成像和化学分析。时间拉伸方法可展宽CARS信号, 提高光谱采集速度。然而, 光纤长度影响信号的功率衰减和时域展宽, 探测端的上升沿和噪声也影响信噪比和光谱分辨率。因此, 优化光纤长度和探测系统的时间响应特性至关重要。本研究首先测得了二甲基亚砜的CARS光谱, 然后采用数值模拟的方法, 分析了CARS信号在不同光纤长度下的功率衰减、展宽及色散引起的延时变化, 并结合雪崩光电二极管响应特性, 模拟了非共振背景和噪声对信噪比的影响。成功模拟得到了时间拉伸后的CARS信号, 并进一步分析了上升沿与光纤长度对光谱分辨率的影响。研究表明, 光纤长度与非共振背景噪声强度及探测系统的时间响应特性均显著影响CARS的信号质量和探测精度。本研究为CARS信号的光纤传输优化及高性能探测系统设计提供了理论支持。

关键词

相干反斯托克斯拉曼散射, 时间拉伸, 光纤传输

Transmission and Detection Analysis of Time-Stretched CARS Signal

Gang Li¹, Yu Long¹, Jun Liu¹, Kangwen Yang^{1,2*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) is a non-invasive and label-free optical detection

*通讯作者。

technique widely utilized in biological imaging and chemical analysis. The time-stretching approach can broaden CARS signals, enhancing spectral acquisition speed. However, the optical fiber length affects signal power attenuation and temporal broadening, while the detector's rise time and noise influence the signal-to-noise ratio (SNR) and spectral resolution. Therefore, optimizing the fiber length and the temporal response characteristics of the detection system is crucial. In this study, the CARS spectrum of dimethyl sulfoxide (DMSO) was first obtained. A numerical simulation was then conducted to analyze the power attenuation, broadening, and dispersion-induced delay variation of CARS signals at different fiber lengths. Furthermore, the response characteristics of the avalanche photodiode (APD) were incorporated to simulate the influence of the non-resonant background and noise on the SNR. The time-stretched CARS signal was successfully simulated, and the effects of the detector rise time and fiber length on the spectral resolution were further examined. The results demonstrate that fiber length, non-resonant background noise intensity, and the temporal response characteristics of the detection system significantly impact CARS signal quality and detection accuracy. This study provides theoretical support for optimizing optical fiber transmission of CARS signals and designing high-performance detection systems.

Keywords

Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, Time Stretching, Fiber Transmission

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相干拉曼散射技术(Coherent Raman Scattering, CRS)是一种高灵敏度、无标记、非侵入的非线性光学检测技术,包括受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)和相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, CARS),其在显微成像[1]、生物医学[2] [3]、材料分析[4] [5]、实时检测[6] [7]、单细胞探测[8]等领域具有重要应用。在 CARS 信号的产生中, CARS 系统的性能在很大程度上取决于光源的特性。相比于传统的固体激光器,全光纤激光器有成本低,体积小的优点[9],已经逐步应用于 CARS 实验。近年来,孤子自频移(Soliton Self-Frequency Shift, SSFS) [10]、光纤参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO) [11]以及被动同步(Synchronization) [12]等非线性光学机制在优化 CARS 光源方面起到了关键作用。本课题组围绕 CARS 光源的优化开展了一系列研究:2018年,本课题组使用 OPO 作为种子光源,实现了 C-H 振动带的 CARS 信号探测[13];2020年,利用全保偏被动同步双色光纤激光器,成功获取了新鲜小鼠耳组织的 CARS 成像[14];2022年,进一步基于被动同步 Er 和 Yb 掺杂光纤激光器,实现了可调谐双色脉冲,并获得了更清晰的 CARS 成像[15]。然而,仅优化光源并不足以满足 CARS 技术在高速光谱探测中的需求。探测端的性能同样是决定 CARS 信号质量的关键因素,特别是在实时光谱分析中,如何高效获取高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的 CARS 信号仍然面临挑战。

时间拉伸技术为 CARS 信号的快速探测提供了一种有效方案[16],它可以通过光纤的色散效应将频域信号映射为时域信号,再采用示波器、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)等高速采样设备,可以实现更高探测效率。然而,在实际应用中,过长光纤带来的损耗、非共振背景(Non-Resonant Background, NRB)的存在、探测器的时间响应特性以及不可避免的噪声等因素均可能降低信号质量和探测精度。因此,光纤长度的选择与 APD 的优化成为提高 CARS 信号探测性能的关键。

近年来,时间拉伸技术已在 CRS 领域取得了一定进展。2016年 Francesco Saltarelli 首次采用光纤作

为时间展宽器,实现了时间拉伸的 SRS,即 500 cm^{-1} 的探测范围和 10 cm^{-1} 的光谱分辨率,但有效信号强度仅为 5% [17]。2017 年, Alexis Bohlin 采用毫焦量级单脉冲能量的飞秒脉冲,实现了氮气、氢气相干拉曼散射信号的探测,但过高的峰值功率脉冲难以直接应用到生物样品[18]。2024 年,日本的 Takuro Ideguchi 课题组,实现了 1000 cm^{-1} 范围、 14 cm^{-1} 光谱分辨率的拉曼光谱探测,将时间拉伸相干拉曼散射光谱检测的速度提升到 50 M 光谱/秒 [16]。然而,目前尚缺乏关于 CARS 信号随光纤长度和探测器上升沿以及 NRB 变化的系统性研究,尤其是这些因素对 CARS 光谱分辨率和 SNR 的影响仍未充分探讨。而这一研究对于设计高速相干拉曼检测系统,推广时间拉伸非线性光谱至关重要。

本研究采用数值模拟方法,分析了 CARS 信号在光纤传输过程中的功率衰减,以及色散引起的展宽,并结合 APD 响应特性,研究了 APD 的上升沿和噪声对信号的影响。此外,进一步探讨了光纤长度和 APD 响应特性对信号质量的影响,并优化了光纤长度与 APD 的选择。同时分析了 NRB 强度对 SNR 的影响。研究结果为 CARS 信号的光纤传输优化及高性能探测系统的设计提供了理论支持,对时间拉伸 CARS 技术在高速光谱检测中的应用具有重要意义。

2. 实验与模拟方法

2.1 实验装置与模拟流程

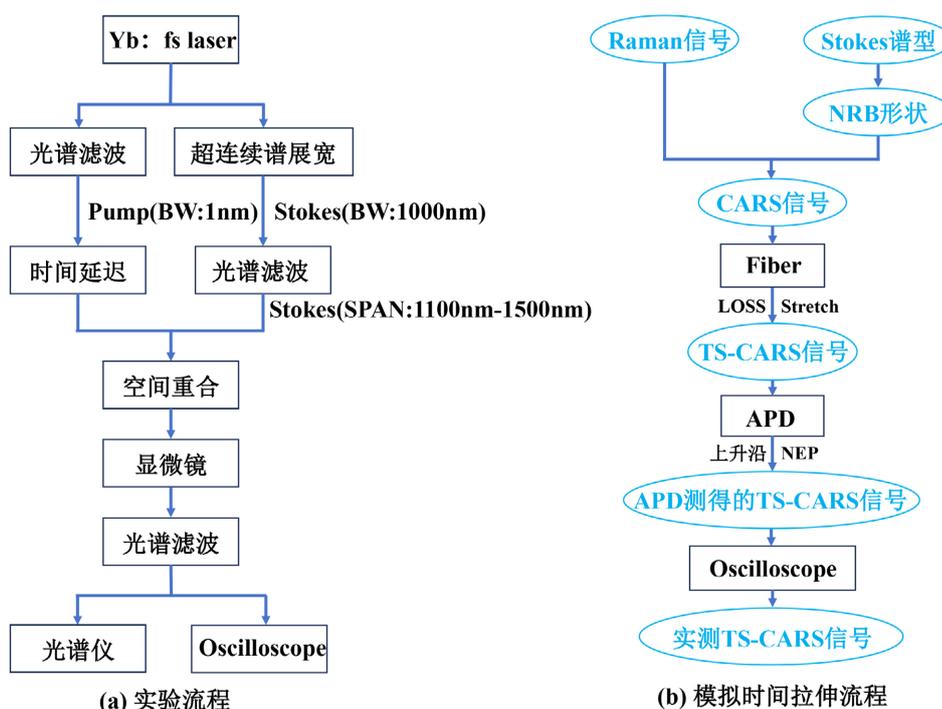


Figure 1. Experimental setup and subsequent simulation process
图 1. 实验装置图与后续模拟流程

本研究采用激光诱导 CARS 信号探测技术,其实验流程如图 1(a)所示[19]。实验中,中心波长 1048 nm 、光谱宽度 6 nm 、脉冲宽度 350 fs 、光斑直径 2 mm 、重复频率 1 MHz 的激光通过偏振光束分离器(PBS)分成两束。其中,一束光经过光栅分光,并使用狭缝选择波长,最终可以获得中心波长 1048 nm 、带宽 1 nm 的光作为泵浦光(Pump),且在此光路中添加了可调延迟系统,用于调节泵浦光的时间延迟。另一束激光经过钇铝石榴石(Yttrium Aluminum Garnet, YAG)晶体,产生波段覆盖 $500\sim 1500\text{ nm}$ 的超连续谱光[20],

并通过 1100 nm 的长通滤光片仅保留 1100~1500 nm 范围的斯托克斯光。两束光经过透 1100 nm、反 1048 nm 的二向色镜(DM)后重合在一起。此时,通过调节泵浦光(Pump)的时间延迟,确保泵浦光和斯托克斯光的时间重合,最终形成时空重合。这两束时空重合后的光进入成像系统,此时,光束通过成像系统聚焦至 DMSO 样品中,在样品内部发生四波混频作用,生成 CARS 信号。在成像系统后加入 1000 nm 的短通滤波片,用于滤除漏过的泵浦光和斯托克斯光,最终将 CARS 信号的光收集到光纤中,得到了大概 1000 nW 的信号,并通过光谱仪(OSA)检测得到 CARS 信号的光谱。为分析时间拉伸对 CARS 信号的影响,采用图 1(b)的流程来逐步模拟光纤损耗、光纤时间展宽、APD 的上升沿、噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)对于时间拉伸 CARS 信号的影响。

2.2. CARS 信号的产生与光纤传输模拟

基于上述图 1(b)的流程,首先根据 DMSO 的拉曼光谱绘制波数图,并标记四个特征峰(图 2(a))。随后,模拟了中心波长为 1048 nm、带宽为 1 nm 的 Pump 光谱(图 2(b)),以及 1100~1500 nm 的 Stokes 光谱(图 2(c))。基于四波混频的计算公式,可以得到理论 CARS 信号(图 2(d)),由于 pump 光的带宽为 1 nm,所以在理论 CARS 信号的基础上建立了 1 nm 的卷积,并叠加 NRB 得到更符合实际的 CARS 信号(图 2(e))。

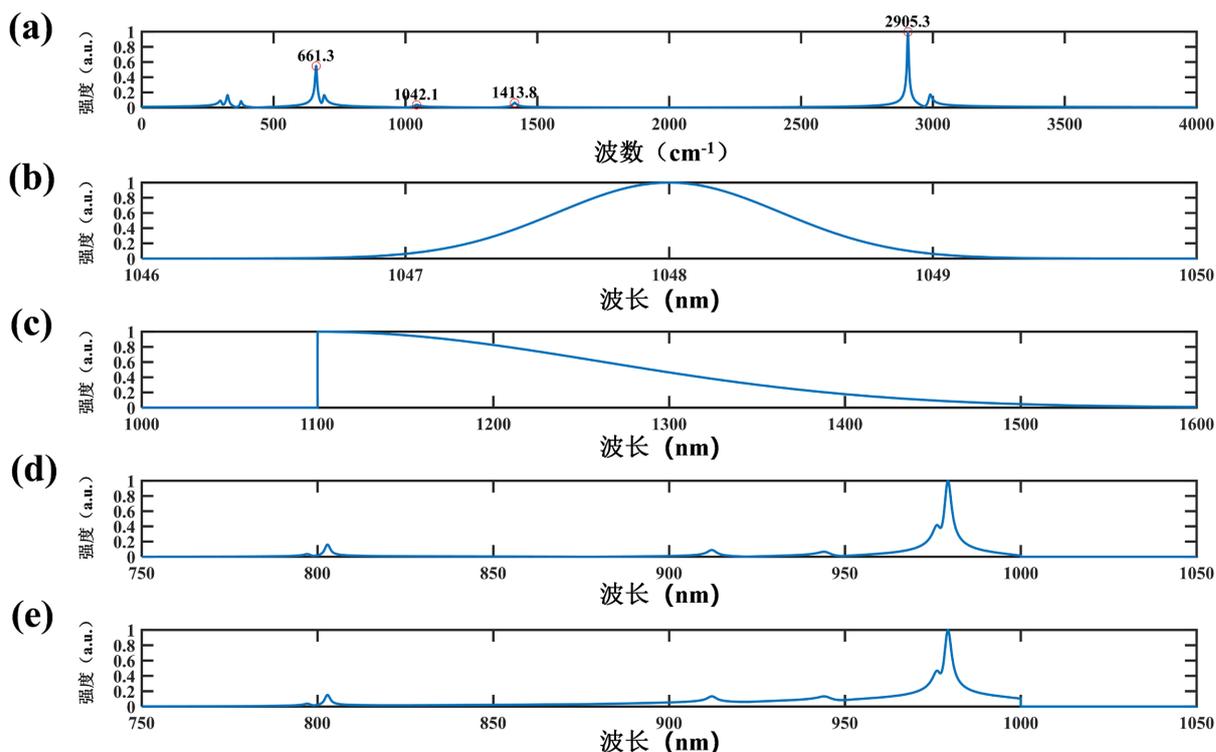


Figure 2. Theoretical simulation of DMSO's CARS signal: (a) Raman spectrum of DMSO; (b) Pump spectrum; (c) Stokes spectrum; (d) Simulated CARS spectrum; (e) CARS spectrum with non-resonant background

图 2. 理论模拟 DMSO 的 CARS 信号: (a) DMSO 的拉曼光谱; (b) Pump 光谱; (c) Stokes 光谱; (d) 模拟的 CARS 光谱; (e) 叠加了非共振背景的 CARS 光谱

在获得初始的 CARS 信号后,进一步模拟其在光纤传输过程中的功率衰减及信号响应特性。

光纤长度的变化会导致信号在时间域上的展宽效果不同,这一效应主要由光纤的色散特性决定。根

据延时与波长的关系，有如下公式[17]：

$$T(\lambda) = T(\lambda_0) + \int_{\lambda_0}^{\lambda} D(\lambda') \cdot L \cdot d\lambda' \quad (1)$$

其中群速度色散(GVD)引起的延时取决于波长 λ 、光纤的色散系数 D 以及光纤长度 L 。其中， D 为 Hi-1060 光纤的色散系数，其数值与波长 λ 相关，而 λ_0 则为色散系数为零时对应的波长。图 3 为 Hi-1060 光纤色散系数与波长的关系，其中，黑色曲线为 Hi-1060 光纤色散与波长的实际对应关系，红色曲线为拟合曲线。

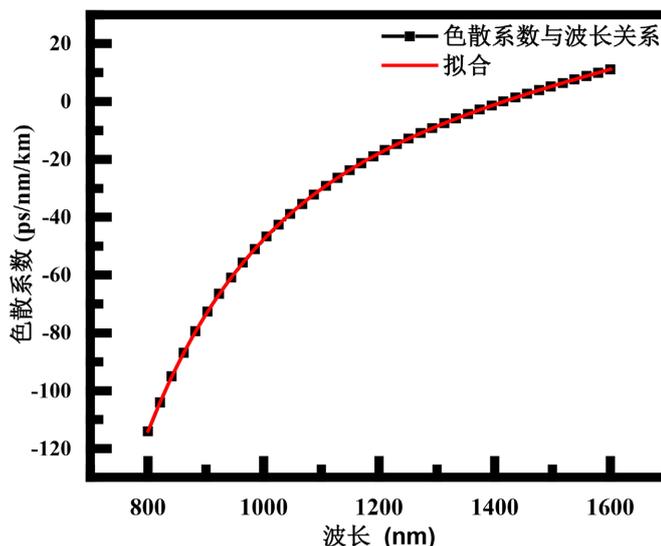


Figure 3. Dispersion coefficient as a function of wavelength
图 3. 色散系数与波长关系

根据拟合曲线可以得出色散系数与波长的关系式：

$$D(\lambda) = -5575.97 + 2220.12^{1-e^{-\lambda/4450.58}} + 5510.00^{1-e^{-\lambda/193.17}} \quad (2)$$

根据式(2)可以得到 D 为零时对应的零色散波长， λ_0 为 1415 nm，该波长下对应的延时 $T(\lambda_0)$ 为 0 ns。基于上述图 2(e)，得到宽带 CARS 信号光谱范围为 750~1050 nm，根据公式(1)与公式(2)可以得到经过 Hi-1060 光纤的长度与宽带 CARS 信号不同波长产生的延时的关系(图 4)。

进一步地，由平均功率可以推导出相应的峰值功率。由于 APD 的响应系数随波长变化(在 800 nm 时响应系数最高，为 2.5×10^4 V/W)，因此需要结合其响应曲线来精确计算不同波段下的响应系数。如图 5 所示为 APD 的响应曲线，蓝色圆圈为 APD 的原始数据点，红色曲线为拟合曲线。

基于上述公式，可以计算出不同频谱范围内的信号在光纤传输过程中产生的延时。在本研究中选取 750 nm 至 1050 nm (即频谱宽度为 300 nm)作为计算范围，以此求解不同光纤长度下该频谱范围内的延时差，并据此绘制光纤长度与对应频谱宽度延时差的关系曲线(图 6(a))，可以看到，光纤长度从 1 km 增加到 6 km，时间展宽从 23 ns 增加到 130 ns。根据初始 CARS 信号的平均功率为 1000 nW，并考虑 HI-1060 光纤的损耗系数为 2.1 dB/km，计算了 CARS 信号经过不同光纤长度后的平均功率。并绘制了光纤长度与平均功率的关系曲线(图 6(b))，可以看到，受光纤损耗的影响，随着光纤长度从 1 km 增加到 6 km，信号的平均功率从 600 nW 降低到 70 nW。根据拟合曲线与 800 nm 时，APD 响应系数为 2.5×10^4 V/W 以及经过不同光纤长度后宽带 CARS 信号的平均功率可以得到峰峰值电压，对应示波器上的强度。最终绘制

了光纤长度对峰值功率及峰峰值电压的影响(图 6(c)), 该图包含两条曲线, 其中蓝色曲线表示峰值功率, 红色曲线表示峰峰值电压, 直观反映了经过不同长度后的 CARS 信号强度在示波器上的变化趋势, 随着光纤长度从 1 km 增加到 6 km, 峰值功率从 $30 \mu\text{W}$ 降低到 $0.5 \mu\text{W}$, 信号在示波器上的强度从 350 mV 降低到 5 mV。值得注意的是, 在 4 km 至 6 km 区间内, 两条曲线逐渐靠近并发生重叠, 使得难以区分峰值功率和峰峰值电压的变化趋势。因此, 本文在图 6(c)中添加了一个插图, 对 4 km 至 6 km 区间的曲线进行了局部放大, 以便更清晰地展示该区间内的变化特性。

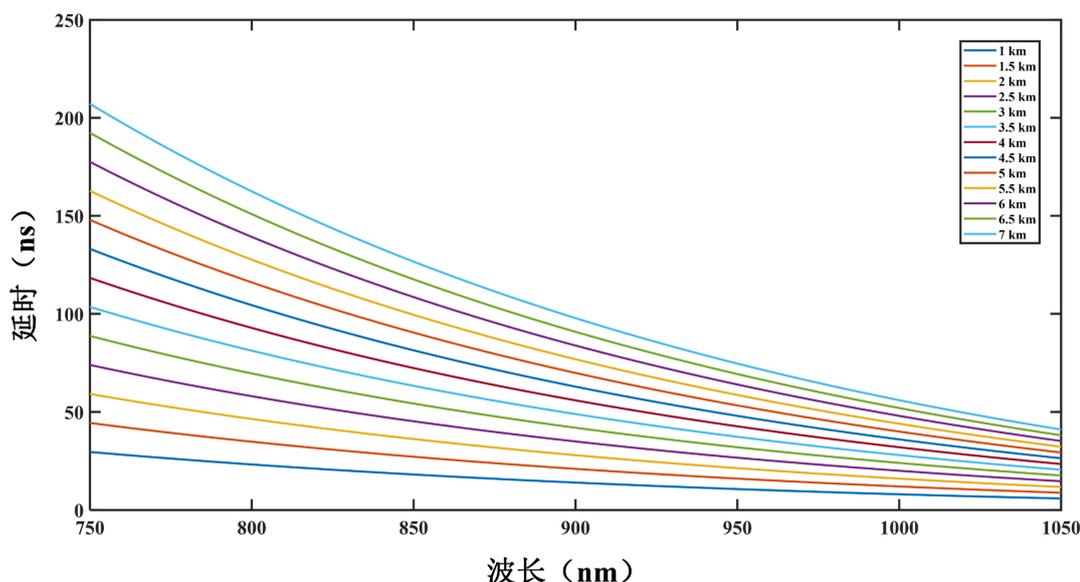


Figure 4. Wavelength-dependent time delay after transmission through HI-1060 fibers of different lengths
图 4. 不同波长的 CARS 信号经过不同长度 HI-1060 光纤传输后产生的延时

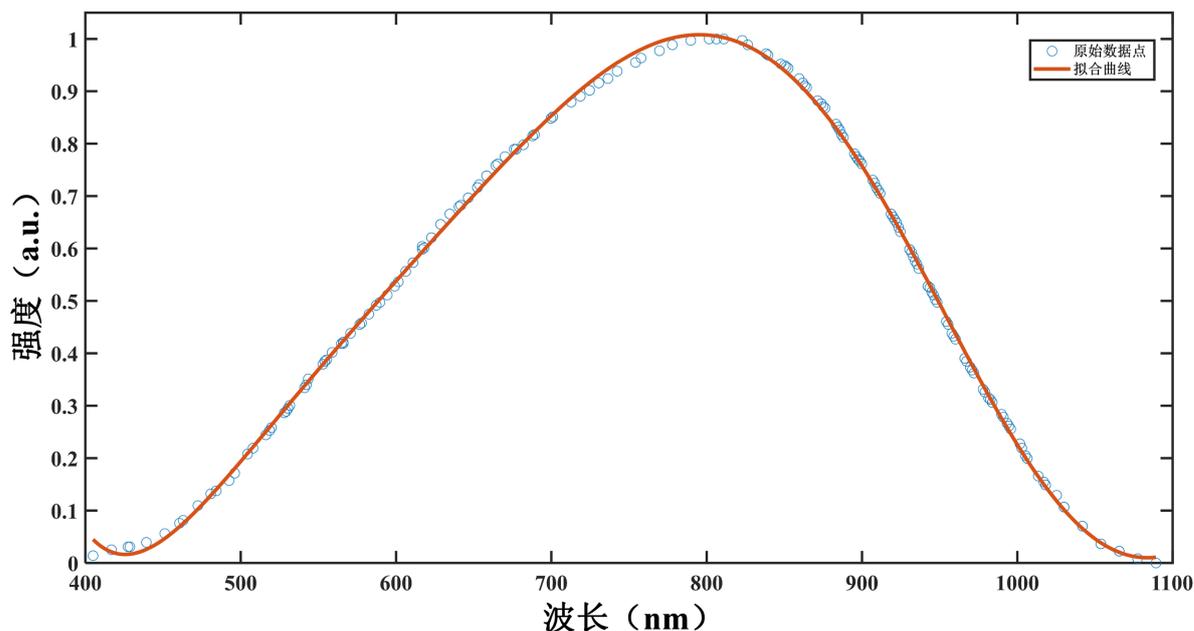


Figure 5. APD response curve
图 5. APD 响应曲线

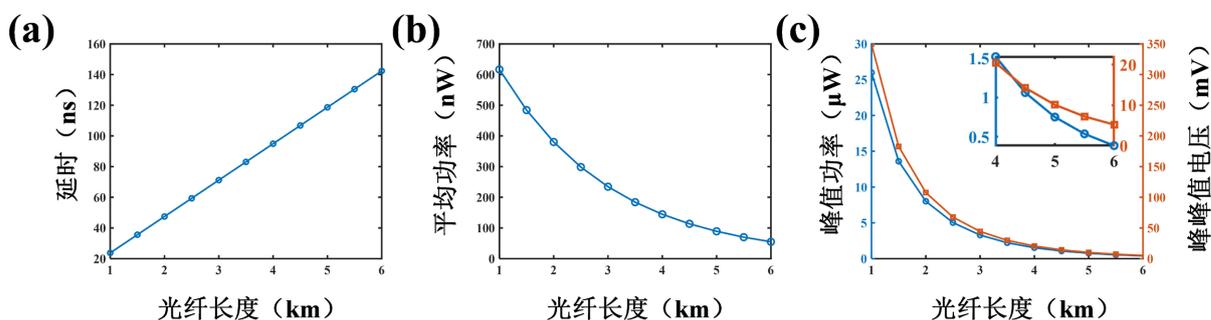


Figure 6. Effect of time-stretching on the intensity and delay of CARS spectral signals at fiber lengths of 1~6 km: (a) The variation of the time delay difference of the CARS spectrum width of 300 nm with the fiber length; (b) The variation of the average power of the CARS signal with the fiber length; (c) The variation of the peak power and peak-to-peak voltage of the CARS signal with the fiber length

图 6. 1~6 km 光纤长度下的时间拉伸对 CARS 光谱信号强度与延时的影响: (a) CARS 光谱宽度 300 nm 的延时差随光纤长度的变化; (b) CARS 信号平均功率随光纤长度的变化; (c) CARS 信号峰值功率与峰峰值电压随光纤长度的变化

2.3. APD 上升沿及噪声对信号的影响

基于峰峰值电压与公式(1)计算得到的延时, 还进一步模拟了 CARS 信号在不同光纤长度传输后的时域波形变化。具体而言, 以图 2(e)所示的 CARS 信号为初始光谱信号, 并结合经过不同光纤长度之后所计算得到的延时, 模拟其在时间域上的展宽, 进而获得经过时间拉伸后在示波器上的 CARS 信号波形(如图 7 所示)。

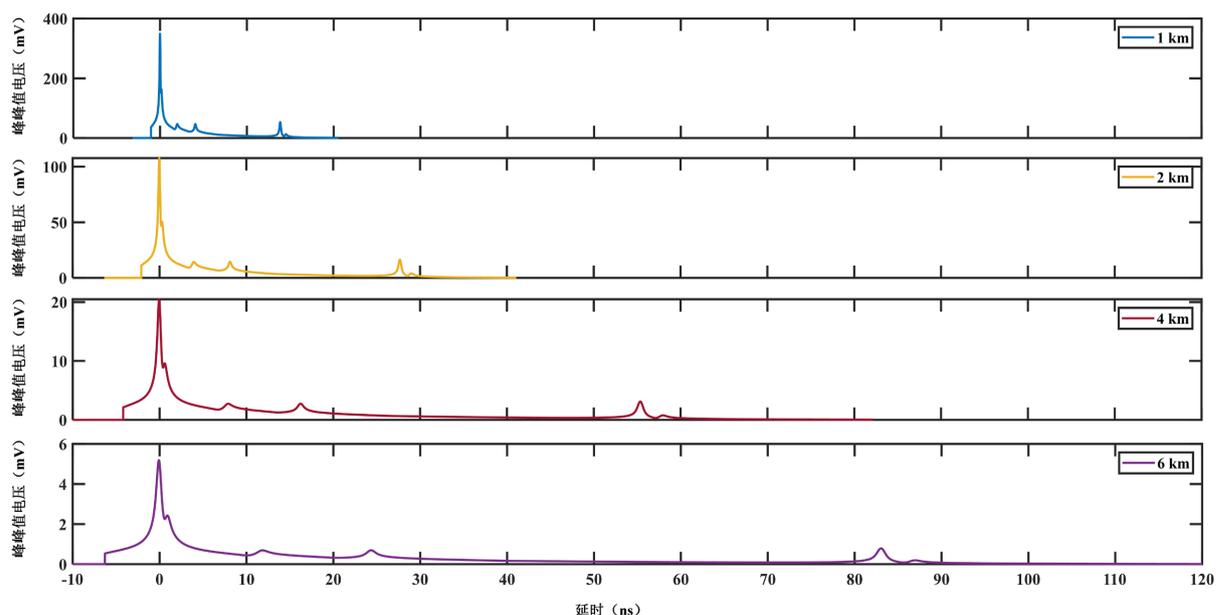


Figure 7. The time-stretch signals after passing through 1, 2, 4, and 6 kilometers of optical fiber

图 7. 经过 1、2、4、6 km 光纤后的时域信号

在实际探测过程中, CARS 信号的获取受到探测器特性的影响。由于 APD 存在大概 0.5 ns 的上升沿时间, 因此, 该特性会对信号的时间分辨率产生影响。为了考虑这一因素, 在图 7 的基础上进一步模拟了 APD 上升沿对 CARS 信号的影响, 并得到包含 APD 响应特性的时域信号(图 8)。对比图 7 与图 8 可以看到, 由于上升沿的影响, 在光纤长度为 1~2 km 时, 一些信号峰不可分辨, 而在光纤长度为 4~6 km 时,

这些信号峰可分辨,这是因为光纤长度越长,展宽效果越好,所以受 APD 上升沿的影响更小。

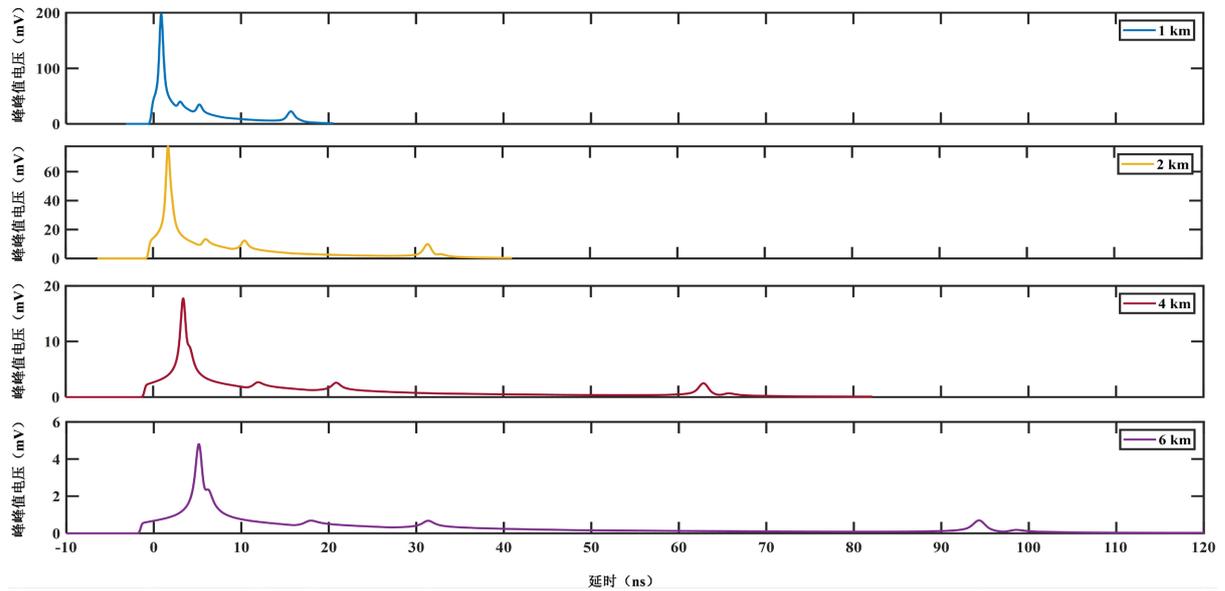


Figure 8. The time-stretch signal with a 0.5 ns rising edge is superimposed after passing through 1, 2, 4, and 6 km of optical fiber

图 8. 经过 1、2、4、6 km 光纤后并叠加 0.5 ns 上升沿的时域信号

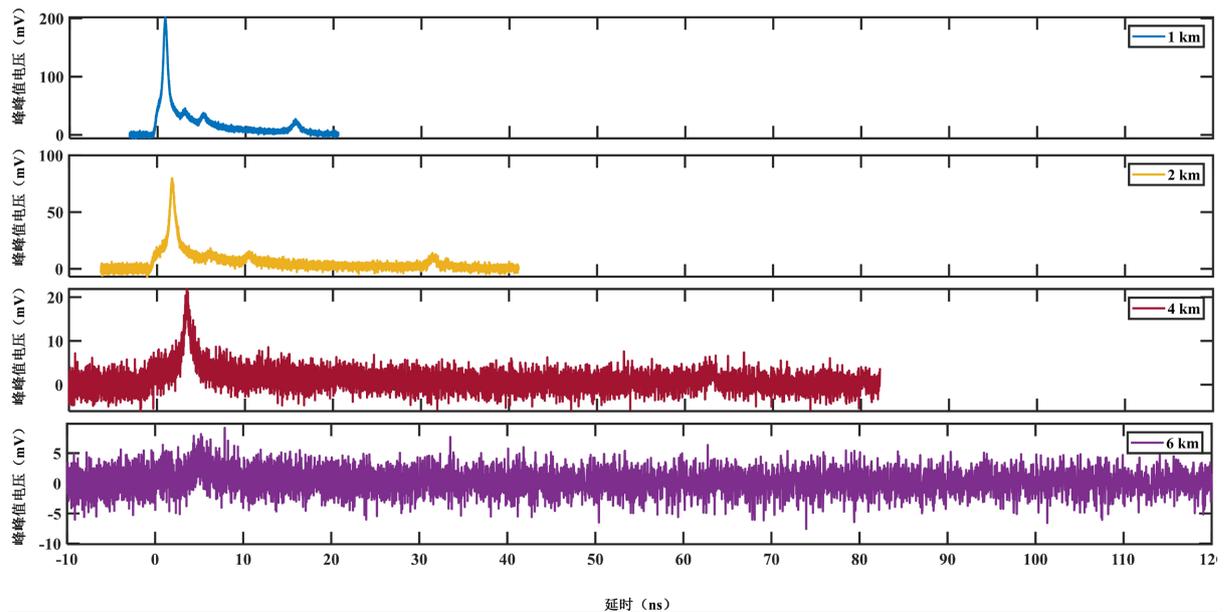


Figure 9. The time-stretch signal of 0.5 ns rising edge and non-resonant background noise is superimposed after 1, 2, 4, and 6 km fiber

图 9. 经过 1、2、4、6 km 光纤后并叠加 0.5 ns 上升沿和非共振背景噪声的时域信号

此外, APD 还会引入噪声,对信号的 SNR 产生影响。为了更加贴近实际检测情况,在包含 APD 上升沿影响时域信号的基础上,进一步叠加 APD 产生的噪声,噪声强度选择 5 mV,在 CARS 信号的延时范围内产生均值为 0、标准差为 1 的随机噪声,得到最终的信号波形(图 9)。可以看到在光纤长度 1~2 km 时,噪声的影响比较小,但是光纤长度为 4~6 km 时,噪声对 SNR 的影响是巨大的。这是因为光纤长度

越长, 信号幅度就越小, 受噪声的影响越大。

综上所述, 光纤长度在 4 km 左右, 300 nm 宽的光谱信号可以展宽到大概 90 ns, 最大信号的噪声比可以达到 20, 是比较理想的实验情况。

2.4. 信噪比与光谱分辨率分析

由于超连续谱所带来的 NRB 会造成 CARS 信号整体幅度的上升, 所以在上述信号时域演化的基础上进一步研究了光纤长度与 NRB 强度对 SNR 的影响。以 NRB 强度相对于 DMSO 拉曼光谱强度的比值标定 NRB 的强度, 选取了 0.1~1.0 这十个等级进行分析。如图 10 所示, 图 10(a)~(c)分别为 NRB 强度为 0.1、0.5、1.0 时对 CARS 信号的影响。可以看到随着 NRB 强度的升高, CARS 信号的整体幅度偏高, 会对 SNR 产生影响。

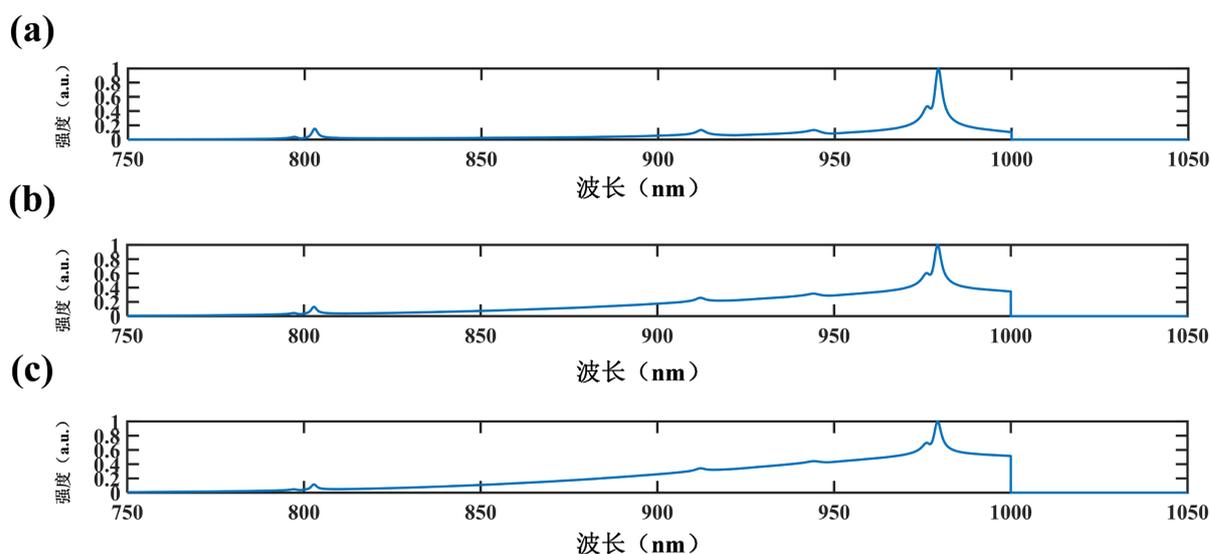


Figure 10. Effect of varying NRB intensities on CARS signals: (a) When the NRB intensity is 0.1; (b) When the NRB intensity is 0.5; (c) When the NRB intensity is 1.0

图 10. 不同强度 NRB 对 CARS 信号的影响: (a) NRB 强度为 0.1 时; (b) NRB 强度为 0.5 时; (c) NRB 强度为 1.0 时

为了直观分析光纤长度与 NRB 对 SNR 的影响, 还构建了光纤长度、NRB 强度与 SNR 之间的关系图(图 11)。其中, 横坐标表示光纤长度, 纵坐标表示 NRB 强度, 颜色深度用于表征 SNR 的大小。图 11 由四个子图(a)、(b)、(c)和(d)组成, 分别对应图 2(a)中 DMSO 拉曼光谱的四个主要特征峰。针对不同波数的拉曼峰, NRB 强度对 SNR 的影响具有不同的表现。在波数为 661 cm^{-1} 的拉曼峰上, 随着 NRB 强度从 0.1 增至 1.0, SNR 从 45 增加至 50。这是因为该拉曼峰的信号强度较大, SNR 的变化相对较小。这表明, 对于本身已经较强的拉曼信号, NRB 的增加对 SNR 的影响不显著; 对于波数为 1042 cm^{-1} 和 1414 cm^{-1} 的拉曼峰, SNR 从 10 增加至 30。其变化较为显著, 主要由于 YAG 晶体产生的超连续谱在靠近中心波长 1048 nm 的波段强度大, 在远离中心波长的强度小。所以在这些波段范围内, NRB 的分布较少, 因此随着 NRB 强度的增加, SNR 发生了明显的变化。这表明, 对于本身比较弱的拉曼信号且 NRB 分布较低的情况下, 其增长对 SNR 的改善具有较大的影响; 最后, 对于 2905 cm^{-1} 的拉曼峰, 尽管该峰信号较强, 但由于其对应的 Stokes 强度很小, 导致拉曼信号的总强度较低。因此, SNR 值较小, 随着 NRB 强度的增加, SNR 变化不大。这表明在信号较弱的情况下, NRB 的增加对 SNR 的改善效果有限。总体来看, 随着光纤长度的增加, SNR 呈现出预期的下降趋势。较长的光纤会导致信号的衰减和时间拉伸, 从而使

得 SNR 值减小。尤其是对于 2905 cm^{-1} 的拉曼峰, 在光纤长度达到 3 km 后, SNR 降至最低值 1, 此时信号不可分辨。

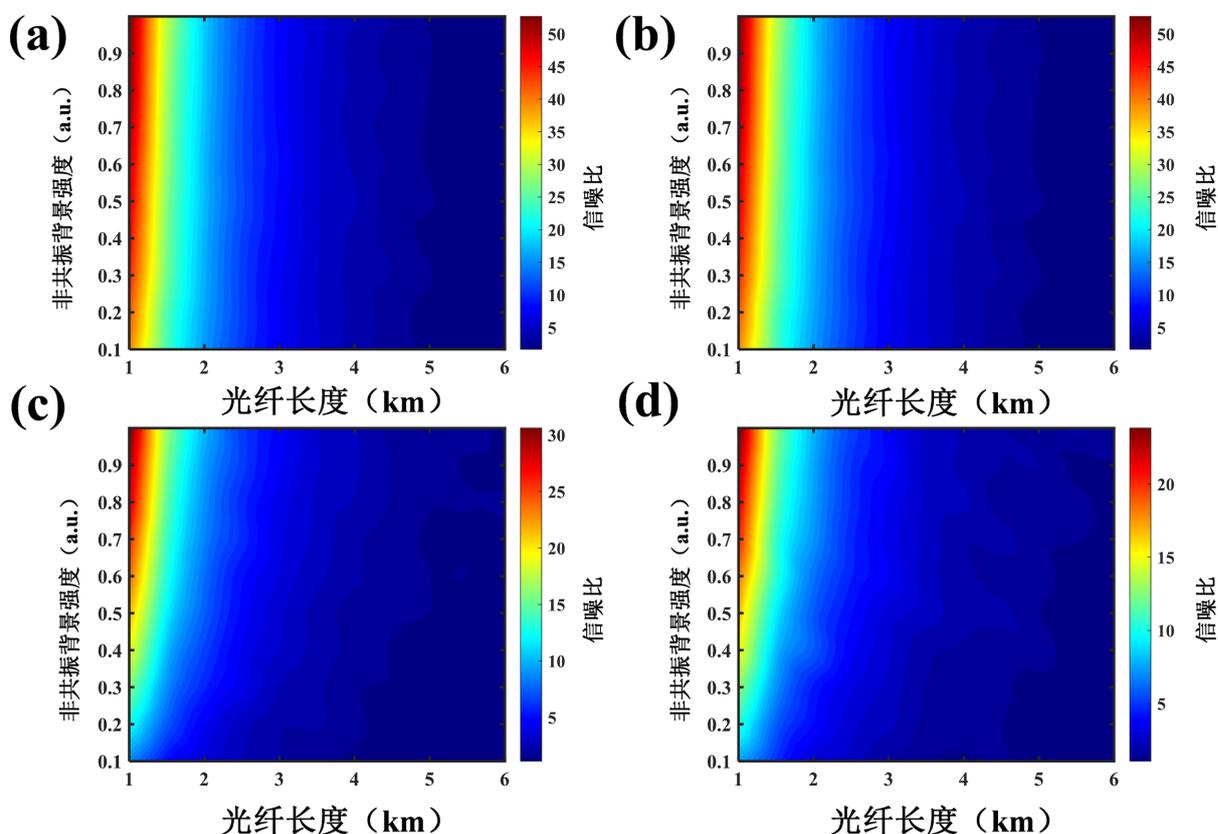


Figure 11. The signal to noise ratio of four wave number peaks at 1~6 km length and different non-resonant backgrounds: (a) Wave number at 661.3 cm^{-1} ; (b) Wave number at 1042.1 cm^{-1} ; (c) Wave number at 1413.8 cm^{-1} ; (d) Wave number at 2905.3 cm^{-1}

图 11. 1~6 km 长度和不同非共振背景下的四个波数峰信噪比: (a) 波数为 661.3 cm^{-1} 时; (b) 波数为 1042.1 cm^{-1} 时; (c) 波数为 1413.8 cm^{-1} 时; (d) 波数为 2905.3 cm^{-1} 时

在研究光纤长度与 NRB 对 SNR 的影响后, 本文还进一步分析了 APD 上升沿对光谱分辨率的影响。由于 APD 的上升沿决定了系统的时间响应特性, 因此其变化会直接影响 CARS 信号的光谱展宽, 从而影响光谱分辨率。

为了系统研究这一影响, 绘制了光纤长度与 APD 上升沿对光谱分辨率的关系图(图 12)。其中, 横坐标表示光纤长度, 纵坐标表示 APD 上升沿, 范围设定为 0.1 ns 至 1.0 ns, 颜色深度用于表征波数的分辨率。由于波数分辨率指的是能够区分相邻波数的能力, 所以波数分辨率越大说明分辨效果越不好。图 12 由四个子图(a)、(b)、(c)和(d)组成, 分别对应图 2(a)中 DMSO 拉曼光谱的四个特征峰。分析表明, 光纤长度、APD 的上升沿及拉曼峰的波数对分辨率的影响具有显著规律性。对于这四个拉曼峰, 其分辨率数值均随着光纤长度的增加而减小。这表明, 随着光纤长度的增加, 时间展宽效应增强, 使得信号在时间轴上拉开, 从而提高了分辨能力。此外, 分辨率数值随着 APD 的上升沿增大而增大。这是因为较长的上升沿会影响探测系统的时间响应能力, 导致信号的区分度下降, 影响拉曼峰的分辨精度。值得注意的是, 波数较小的拉曼峰整体分辨率数值较小。这一现象表明, 在相同的实验条件下, 低波数区域的拉曼峰具有更优越的信号保真度, 有利于高精度的拉曼光谱分析。

综上所述, 光纤长度的增加有助于提升信号的分辨能力, 而较长的 APD 上升沿会降低系统的分辨能力。此外, 低波数拉曼峰相对更容易分辨。因此, 在优化实验参数时, 应在保证信号强度的前提下适当增加光纤长度, 同时尽量选择上升沿较小的 APD, 以提高系统的分辨性能, 尤其是在高波数拉曼信号的检测中。

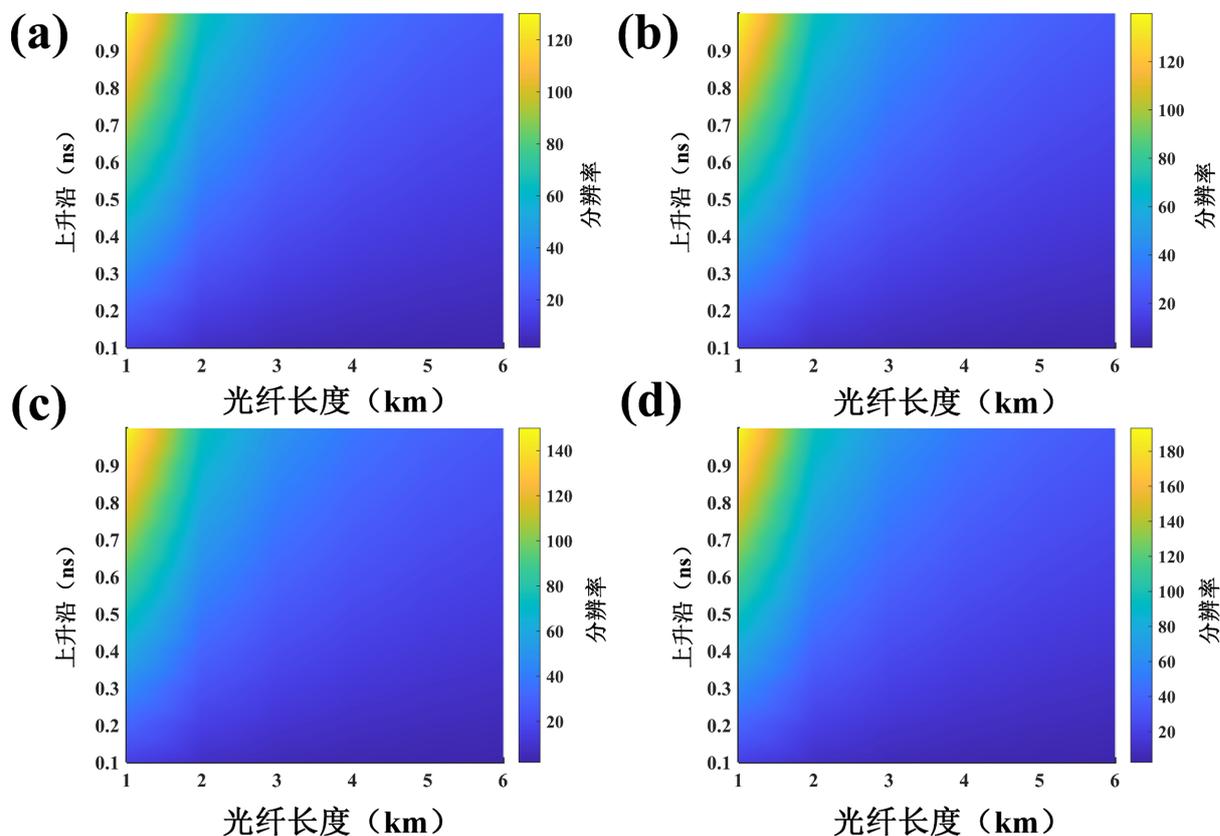


Figure 12. The signal to noise ratio of the four wave number peaks of 1~6 km length and different rising edges: (a) Wave number at 661.3 cm^{-1} ; (b) Wave number at 1042.1 cm^{-1} ; (c) Wave number at 1413.8 cm^{-1} ; (d) Wave number at 2905.3 cm^{-1}

图 12. 1~6 km 长度和不同上升沿的四个波数峰信噪比: (a) 波数为 661.3 cm^{-1} 时; (b) 波数为 1042.1 cm^{-1} 时; (c) 波数为 1413.8 cm^{-1} 时; (d) 波数为 2905.3 cm^{-1} 时

3. 结论

本研究基于时间拉伸技术对 CARS 信号进行了模拟分析, 探讨了光纤长度、APD 响应特性及 NRB 对信号强度、时间展宽、SNR 和光谱分辨率的影响。结果表明, 随着光纤长度的增加, CARS 信号的时间展宽效应增强, 有助于提升光谱分辨率, 但同时信号强度下降, 导致 SNR 降低。综合考虑, 当光纤长度为 4 km 时, SNR 可达 20, 且对于 300 nm 的光谱展宽, 对应的的时间展宽约为 90 ns, 更有利于 APD 的探测。进一步分析表明, APD 的上升沿对信号的时间分辨率具有显著影响, 较长的上升沿会降低系统的分辨能力。此外, 由于 NRB 的强度越靠近 1048 nm 波段越大, 所以低波数拉曼峰的信号保真度较高, 相对更易分辨。因此, 在实验优化过程中, 应综合权衡光纤长度与信号强度之间的关系, 同时选择上升沿较短的 APD, 以提高信号检测的精度和可靠性, 并优化系统的时间与光谱分辨能力。

基金项目

本研究受国家自然科学基金面上项目(12374402)、上海浦江人才计划资助。

参考文献

- [1] 敖建鹏, 黄静, 季敏标. 受激拉曼散射显微技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 9-27.
- [2] 李姿霖, 李少伟, 张思鹭, 等. 相干拉曼散射显微技术及其在生物医学领域的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 81-91.
- [3] 吴凡, 李商羽, 洪维礼, 等. 高光谱相干拉曼散射技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(6): 57-76.
- [4] 焦若男, 刘琨, 孔繁艺, 等. 近海微塑料含量的相干反斯托克斯拉曼光谱成像研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1022-1027.
- [5] 李典典, 毕思敏, 郝强, 等. 用于水分子相干拉曼散射成像的光纤光源研究[J]. 光学学报, 2023, 43(23): 349-353.
- [6] Zhang, Y., Lu, M., Wu, T., Chen, K., Feng, Y., Wang, W., *et al.* (2022) Delay-Spectral Focusing Dual-Comb Coherent Raman Spectroscopy for Rapid Detection in the High-Wavenumber Region. *ACS Photonics*, **9**, 1385-1394. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00136>
- [7] Lin, H., Liao, C., Wang, P., Kong, N. and Cheng, J. (2018) Spectroscopic Stimulated Raman Scattering Imaging of Highly Dynamic Specimens through Matrix Completion. *Light: Science & Applications*, **7**, Article 17179. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.179>
- [8] Wang, T., Jiang, J., Liu, K., Wang, S., Niu, P., Liu, Y., *et al.* (2022) Flexible Minimally Invasive Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) Measurement Method with Tapered Optical Fiber Probe for Single-Cell Application. *PhotonIX*, **3**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00058-0>
- [9] Yang, K., Zhou, Y., Ling, Y., Tsia, K.K., Zeng, H. and Wong, K.K.Y. (2024) Spectral Period Doubling and Encoding of Dissipative Optical Solitons via Gain Control. *PhotonIX*, **5**, Article No. 26. <https://doi.org/10.1186/s43074-024-00141-8>
- [10] 张永宁, 刘政, 陈科亦, 等. 基于孤子自频移效应的超短脉冲波长连续调谐[J]. 光电技术应用, 2023, 38(1): 28-35.
- [11] Leindecker, N., Marandi, A., Byer, R.L., Vodopyanov, K.L., Jiang, J., Hartl, I., *et al.* (2012) Octave-Spanning Ultrafast OPO with 26-61 μ m Instantaneous Bandwidth Pumped by Femtosecond Tm-Fiber Laser. *Optics Express*, **20**, 7046-7053. <https://doi.org/10.1364/oe.20.007046>
- [12] Wang, Z., Wu, W., Zhu, T., Hua, K., Chang, S., Wang, D.N., *et al.* (2021) High-Power Synchronous Multi-Wavelength Solitons from a Multimode Mode-Locked Fiber Laser System. *Optics Letters*, **46**, 118-121. <https://doi.org/10.1364/ol.412739>
- [13] Yang, K., Zheng, S., Wu, Y., Ye, P., Huang, K., Hao, Q., *et al.* (2018) Low-Repetition-Rate All-Fiber Integrated Optical Parametric Oscillator for Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy. *Optics Express*, **26**, 17519-17528. <https://doi.org/10.1364/oe.26.017519>
- [14] Yang, K., Shen, Y., Ao, J., Zheng, S., Hao, Q., Huang, K., *et al.* (2020) Passively Synchronized Mode-Locked Fiber Lasers for Coherent Anti-Stokes Raman Imaging. *Optics Express*, **28**, 13721-13730. <https://doi.org/10.1364/oe.389728>
- [15] Yang, K., Wu, J., Ao, J., Hao, Q., Yan, M., Huang, K., *et al.* (2022) Generation of Broadband Parabolic Pulses Based on a Pre-Chirper Free, Core-Pumped Nonlinear Fiber Amplifier for Coherent Anti-Stokes Raman Imaging. *Optics Express*, **30**, 7636-7646. <https://doi.org/10.1364/oe.448975>
- [16] Nakamura, T., Hashimoto, K. and Ideguchi, T. (2024) Broadband Coherent Raman Scattering Spectroscopy at 50,000,000 Spectra per Second. *Ultrafast Science*, **4**, Article ID: 0076. <https://doi.org/10.34133/ultrafastscience.0076>
- [17] Saltarelli, F., Kumar, V., Viola, D., Crisafi, F., Preda, F., Cerullo, G., *et al.* (2016) Broadband Stimulated Raman Scattering Spectroscopy by a Photonic Time Stretcher. *Optics Express*, **24**, 21264-21275. <https://doi.org/10.1364/oe.24.021264>
- [18] Bohlin, A., Patterson, B.D. and Kliever, C.J. (2017) Dispersive Fourier Transformation for Megahertz Detection of Coherent Stokes and Anti-Stokes Raman Spectra. *Optics Communications*, **402**, 115-118. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.04.049>
- [19] Vernuccio, F., Vanna, R., Ceconello, C., Bresci, A., Manetti, F., Sorrentino, S., *et al.* (2023) Full-Spectrum CARS Microscopy of Cells and Tissues with Ultrashort White-Light Continuum Pulses. *The Journal of Physical Chemistry B*, **127**, 4733-4745. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c01443>
- [20] 于凌尧, 尹君, 万辉, 等. 基于超连续光谱激发的时间分辨相干反斯托克斯拉曼散射方法与实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5406-5411.