

Advanced Time-Correlated Single Photon
Counting Techniques

高级时间相关单光子 计数技术

〔德〕 W. Becker 著
屈军乐 译



科学出版社
www.sciencep.com

Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques

高级时间相关单光子计数技术

〔德〕 W. Becker 著

屈军乐 译

高峰 校

科学出版社

北 京

图字:01-2008-1069 号

内 容 简 介

本书系统论述了高级时间相关单光子计数(TCSPC)技术的基本原理、实现方法和系统组成,以及该技术在时间分辨激光扫描显微、单分子光谱、光子关联实验和生物组织扩散光层析中的最新应用,重点介绍了该技术所用的光子计数探测器的种类、特点、性能参数以及测量方法等。同时,本书还对如何建造 TCSPC 实验系统给出了实际的指导,包括选择和使用探测器、探测器的使用安全、预放以及 TCSPC 器件的控制特征和优化操作条件等。本书深入浅出,既把握了 TCSPC 的最新发展趋势,又从使用的角度介绍了很多宝贵的经验,对所有需要在皮秒和纳秒级范围内从事微弱光信号记录的研究和开发人员来说是必不可少的工具。

本书可供从事生物学、化学、医学、工学、理学等相关应用领域,尤其是从事生物医学光子学研究的学者、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考。

Translation from the English Language edition:
Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques by W. Becker
Copyright © 2005 Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Springer is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved.

图书在版编目(CIP)数据

高级时间相关单光子计数技术 / (德) 贝克尔(W. Becker)著;屈军乐译. —北京:科学出版社,2009

书名原文: *Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques*
ISBN 978-7-03-025170-1

I. 高… II. ①贝…②屈… III. 光电子技术 IV. TL84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 135018 号

责任编辑:余 丁 潘继敏 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张: 26 3/4 彩插 4

印数: 1—2 500 字数: 507 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

荧光显微技术是生命科学,尤其是细胞生物学研究的重要方法。利用细胞内源荧光团或对细胞进行荧光探针标记,可在亚微米甚至纳米尺度上对细胞内蛋白质或其他生物分子进行定位,研究其相互作用、表达及其构象状态等。近年来,随着生命科学的发展,人们对荧光显微技术也提出了越来越高的要求。而激光技术、荧光探针标记技术、新型荧光探测技术和成像手段的不断发展,产生了许多先进的测量和成像技术,如双光子激发荧光显微、荧光寿命成像、荧光共振能量转移、荧光相关光谱以及单光子荧光光谱等,极大地推动了生命科学研究的发展。

时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)技术具有非常高的探测灵敏度和皮秒量级的时间分辨率,目前成为荧光寿命成像和单分子荧光光谱等的主流研究方法,并在扩散光学层析、组织自体荧光成像、荧光相关光谱、时间分辨荧光显微等研究中获得了重要的应用。目前,TCSPC技术已经发展成为一种具有快速和多维信号记录能力的新技术,但有关这方面的书籍却很少,这对于普及TCSPC技术及其应用非常不利,也阻碍了我国在相关应用领域的研究。另外,TCSPC技术及其应用涉及很多专业知识,它要求研究人员既要对光学有深入的了解,还要对电子学、生物学有一定的认识。尽管该领域的很多研究人员致力于荧光显微成像技术的研究,但他们普遍遇到的困难是难以将多学科领域的知识结合起来,而且很难收集到足够的、系统的文献来指导他们的应用研究工作。

《高级时间相关单光子计数技术》是我非常喜欢的一本书,书的作者 Wolfgang Becker 博士是国际知名公司 Becker & Hickl GmbH(德国)的创立人及高级研究人员,长期从事TCSPC技术的研究与开发,取得了很高的成就。该书不仅概述了TCSPC的原理和组成,介绍了TCSPC在许多领域的应用,也提供了实际的操作方法,甚至很多在实验中需要注意的事项也多有提及。我个人在阅读这本书的时候也受益匪浅。本书译者屈军乐博士长期从事生物光子学研究工作,在基于TCSPC技术和扫描相机技术的荧光寿命显微成像等方面具有丰富的经验。从2006年起,由深圳大学光电子学研究所和德国Becker & Hickl联合主办光学方法高级研讨会,对普及TCSPC技术的知识、介绍TCSPC技术的最新应用起到了很好的作用。相信由屈军乐博士翻

译的《高级时间相关单光子计数技术》一书对相关领域的研究工作者,尤其是刚刚进入这个领域的科研人员和研究生有极大的帮助。

中国工程院院士 牛憨笨

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '牛憨笨' (Niu Hanben).

2009年4月16日

译者序

时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)技术是一种具有非常高的探测灵敏度、皮秒量级的时间分辨率以及很高准确度的测量技术,在荧光寿命成像、荧光相关光谱、扩散光学层析以及单分子光谱中得到了广泛的应用,但有关这方面的书籍却很少问世。本书原著是译者多年来从事荧光显微、时间分辨光谱以及荧光寿命成像研究工作中所见到的最好的专著之一。虽然世界上有许多与 TCSPC 相关的科学论文,其中也不乏对 TCSPC 的论述。但是像这样完整的、系统的、深入浅出的著作却从未有过。

Wolfgang Becker 博士是国际著名企业 Becker & Hickl GmbH(德国)的创始人和高级研究人员,国际著名的 TCSPC 专家,长期从事 TCSPC 技术的研究与开发,Becker & Hickl GmbH 公司也是国际上知名的 TCSPC 设备及技术供应商。多年的研究与实践使得他具备了完成本书的基础。本书阐述了 TCSPC 的基本原理和相关技术,对 TCSPC 的典型生物医学应用进行了详细介绍,并讨论了许多相关的技术问题;此外,本书还介绍了探测器、探测器参数,这些参数对 TCSPC 测量的影响以及所选探测器的性能等内容;最后,本书给出了建立并使用 TCSPC 系统的一些实用技巧,包括光学元件与系统、电子学系统、电磁屏蔽问题、TCSPC 系统参数的优化以及校准等。全书的内容不仅涉及物理学和电子学,还涉及生物、化学等相关领域,信息量大,体现了交叉学科的研究特点,能够满足不同学科领域科研人员的需求。

本书译者及课题组在国内较早开展了 TCSPC-FLIM 技术的研究,并和 Wolfgang Becker 博士合作,从 2006 年起,在深圳大学联合举办光学方法高级研讨会,迄今已举办了三届,主要目的是致力于传播 TCSPC 的基本知识,介绍 TCSPC 技术的最新进展以及生物医学应用,取得了很好的效果,也为翻译本书打下了很好的基础。

Wolfgang Becker 博士对本书的翻译提供了大力支持,并为中文版写了序言。本书的翻译得到了很多单位和朋友的支持与帮助。中国工程院院士、著名光电子学专家、深圳大学光电子学研究所所长牛憨笨研究员在百忙之中审阅了全书,并为本书作序。天津大学高峰教授审校了译稿。同时感谢国家自然科学基金委员会信息科学部多年来对我们课题组的大力支持,以及傅便翔老师、何杰处长、潘庆主任的帮助。

课题组的部分人员也参加了本书的翻译或整理工作,他们是林丹樱、赵羚伶、

陈丹妮、齐璟、许改霞、刘夏、于凌尧、杜杨、王成、王岩和蔡传良等。

本书是我翻译的第一本著作,希望本书的出版能对我国荧光显微检测及成像等相关领域的发展有所帮助,由于能力有限,翻译中的不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

屈军乐

深圳大学光电工程学院(光电子学研究所)

2009年3月16日

中文版序

时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)技术是一项具有惊人灵敏度的技术,在记录低强度的光信号时可以达到皮秒量级的时间分辨率,并且准确度极高。TCSPC 技术是 20 世纪 60 年代晚期开始出现的,最早发源于对原子核激发态的测量。在很长一段时间里,TCSPC 技术主要用于记录溶液中有机染料的荧光衰减曲线。然而,在七八十年代,由于光源的强度和重复频率低,而且电子学领域发展缓慢,TCSPC 的信号采集需要很长的时间。更重要的是,传统的 TCSPC 技术本质上是一维的,也就是说,TCSPC 只能记录周期性光信号的波形。

近十年来,TCSPC 技术取得了惊人的发展。基于新的转化原理,信号采集时间已经比原来缩短了 100 倍。而且,先进的 TCSPC 技术将信号视为一个多维的光子分布,这个分布的自变量可以是多种不同的参数,例如相对于激发脉冲的时间、空间坐标、波长、偏振,或者相对于实验开始的时间等。光子的这些参数可以在一个较长的时间内进行积累,也可以逐个光子进行记录和分析。

然而,先进的 TCSPC 技术的这种多维特性还没有普及开来,因此其应用也尚未被有效开发。本书旨在帮助现有的和潜在的 TCSPC 用户更好地了解他们的设备,设计新的实验,从而获得新的科研成果。

在此,我要感谢我的朋友——深圳大学的屈军乐教授将本书翻译成中文。屈教授是生物光子学技术方面的专家,他使用 TCSPC 技术已有多年的经验。因此,我确信本书的翻译水平很高。

Wolfgang Becker

2008 年 3 月

Preface to Chinese Edition

Time-correlated single photon counting (TCSPC) is an amazingly sensitive technique for recording low-level light signals with picosecond resolution and extremely high precision. TCSPC originates from the measurement of excited nuclear states and has been used since the late 60s of the last century. For many years TCSPC was used primarily to record fluorescence decay curves of organic dyes in solution. Due to the low intensity and low repetition rate of the light sources and the limited speed of the electronics of the 70s and 80s the acquisition times were extremely long. More important, classic TCSPC was intrinsically one-dimensional, i. e. limited to the recording of the waveform of a periodic light signal.

In the last 10 years TCSPC made an amazing development. Due to new conversion principles the acquisition times have become more than 100 times shorter. Moreover, advanced TCSPC techniques consider the signal as a multi-dimensional photon distribution over several parameters, such as time after an excitation pulse, spatial coordinates, wavelength, polarisation, or experiment time. The parameters of the photons can be accumulated over a longer period of time, or recorded and analysed photon by photon.

The multidimensional features of advanced TCSPC are still not commonly known, and, consequently, efficiently exploited. This book helps existing or potential TCSPC users to better understand their instruments, devise new experiments, and thus obtain novel scientific results.

I am indebted to my friend Prof. J. L. Qu of University Shenzhen who translated this book into Chinese. Prof. Qu is an expert in biomedical optical techniques, and has been a TCSPC user for many years. I am thus convinced that this translation is of exceptional quality.

Wolfgang Becker

March 2008

原 书 序

1984 年,Desmond O'Connor 和 David Phillips 合作出版了《时间相关单光子计数》一书,对时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)技术做了详细的介绍。当时,TCSPC 技术主要用于记录试管中染料溶液的荧光衰减函数。从诞生伊始,TCSPC 技术就具有惊人的灵敏度和准确性,且时间分辨率很高。然而,在 20 世纪 70 年代和 80 年代初期,受光源重复频率低和电子学系统速度慢的限制,TCSPC 技术的采集时间相对较长。此外,TCSPC 技术本身是一维的,也就是说,TCSPC 技术只限于记录周期性光信号的波形。不过,即使存在这些限制,TCSPC 技术仍旧可以称得上是一项卓越的技术。

20 多年过去了,电子学和激光技术取得了令人瞩目的发展。每 18 个月,单个芯片上可集成的晶体管的数目增加大约一倍,从而导致芯片的复杂性和处理速度成上千倍的提高。与此同时,脉冲光源的重复频率和功率也相应地获得了显著提高。

或许有人会认为,在过去 20 年当中,TCSPC 技术已经落后了,但事实并非如此。相反,激光和电子学的发展推动了 TCSPC 技术不断发展壮大,并取得了很大的进步。它已经从一种慢速、一维的荧光寿命测量技术,发展成为一种快速、多维的光学信号记录技术。现在,高级的 TCSPC 技术已被广泛地用于单分子光谱、荧光相关光谱、时间分辨激光扫描显微和扩散光学层析等领域。然而,近 10 年来与 TCSPC 技术相关的书籍却很少问世。

Desmond O'Connor 和 David Phillips 在《时间相关单光子计数》一书的序言中曾写到:“这种想法也许有些过于自大,但我们相信,使用这种技术的新用户未必都能充分理解这种设备所具有的优点和缺陷,以及使用这种设备所必需的曲线拟合过程。”TCSPC 技术的优点和某些缺陷今天仍然存在着,伴随着它的不断发展,也出现了新的优点,同时不可避免地出现了一些缺陷。把一台设备当作一个黑匣子来操作,也许能得到令人满意和准确的测量结果。然而,如果使用得当,利用先进的 TCSPC 技术不仅会得到更好的测量结果,还能解决一些相当复杂的问题。本书旨在帮助那些正在使用和打算使用 TCSPC 技术的人更好地理解和使用 TCSPC 技术的最新特性。

本书从光信号记录技术开始,简要介绍了最普通的光子计数技术,并解释了 TCSPC 技术的一般性原理;然后,介绍了多维 TCSPC 技术、多探测器技术、时序记录、成像技术和时间标签记录等相关原理;接着,介绍了高级 TCSPC 技术的典

型应用,并讨论了与这些应用相关的一些技术问题;此外,本书还概要介绍了探测器、探测器参数、这些参数对 TCSPC 测量的影响以及所选探测器的性能等;最后,本书给出了建立并使用 TCSPC 系统的一些实用技巧,包括光学元件与系统、电子学系统、电磁屏蔽问题、TCSPC 系统参数的优化以及校准等。

本书没有包括 TCSPC 技术的数据分析方面的内容。多光谱 TCSPC、扩散光层析或荧光相关测量实验数据的分析方法,在很大程度上与传统的荧光衰减数据分析方法不同,而且还有许多分析问题尚未完全解决。笔者认为,TCSPC 技术的数据分析完全可以作为另一本书的主题,这项工作留给那些更加熟悉数据分析的人来完成。

我要感谢 Heidrun Wabnitz 鼓励我写这本书,并提供了大量帮助以及有益的讨论。我也要感谢我的合作者为发展 TCSPC 技术所做出的工作。我尤其要感谢 Helmut Hickl 为发展数字信号处理技术所做出的贡献,Stefan Smietana 在设计仪器软件方面所做的大量工作,还有 Axel Bergmann 在数据分析方面的工作以及他将 TCSPC 技术推广到更具前景的应用领域方面的孜孜不倦的努力。

我还要感谢那些敢于尝试将高级的 TCSPC 技术应用到新领域的研究小组。我尤其要感谢 Karsten König,他首次在双光子显微镜中使用了快速 TCSPC 扫描技术;感谢 Dietrich Schweitzer,他建立了首台时间分辨眼科成像装置;感谢 Herbert Rinneberg、Britton Chance 和 Rinaldo Cubeddu 及其合作者,他们将 TCSPC 技术引入扩散光层析技术中;感谢 Michael Prummer、Markus Sauer 和 Claus Seidel,他们将 TCSPC 技术推广到单分子应用领域;感谢 Hans-Erich Wagner、Ronny Brandenburg 和 Kirill Kozlov,他们将多维 TCSPC 技术应用到气体放电实验中。我还要感谢 Christoph Biskup 将 TCSPC 技术应用到活细胞 FRET 上所做的工作;感谢 Ammasi Periasamy、Rory Duncan、Brian Bacskai、Enrico Gratton、John White、Dennis Fan、Damain Bird 和 Peter So 在 TCSPC 的显微应用方面所做的工作。同时我还要感谢 Advanced Research Technologies(ART)、Biorad、Leica Microsystems 和 Zeiss 等公司所提供的合作。

非常感谢我以前的导师 Siegfried Dähne 和 Edgar Klose 教授的支持,以及他们为 TCSPC 技术早期发展所营造的高效的工作氛围。

最后,我要感谢 Sarah Smith 为本书在英文表述方面所做的改进工作。

Wolfgang Becker

2005 年 1 月于柏林

术语及符号列表

ADC	analog-to-digital converter,模数转换器。
AOM	acousto-optical modulator,声光调制器。
APD	avalanche photodiode,雪崩光电二极管。利用雪崩效应实现载流子倍增以获得内部放大的二极管。
Ar ⁺ laser	argon ion laser,氩离子激光器。一种可以在蓝-绿光谱范围内发射多个波长的气体激光器。主动锁模时,氩离子激光器输出重复频率为 80~125MHz,脉宽为 100~300ps 的光脉冲。
BNC	一种同轴电缆连接器,用于中等带宽的电子系统中。
Boxcar	一种基于对重复输入模拟信号进行顺序采样的信号记录设备,它通过对大量的采样信号进行平均,从噪声背景中恢复出信号。
CCD	charge-coupled device,电荷耦合器件。载流子被捕获在金属氧化物半导体(MOS)结构形成的门中,然后通过器件中顺序转移。该技术用于图像传感器。
CFD	constant-fraction discriminator,恒比鉴别器。CFD 的触发延迟一般与输入脉冲的振幅无关。
CFP	cyan fluorescent protein,青色荧光蛋白。CFP 是绿色荧光蛋白 GFP 的衍生物。荧光蛋白是由发荧光的水母中提取出来的,细胞中的 DNA 或者整个组织经过处理后都可以产生这类蛋白。
C _j	半导体二极管结电容。
CLSM	confocal laser scanning microscope,共焦激光扫描显微镜。用聚焦激光束扫描样品,激发点发出的光通过针孔传输,此针孔置于与样品焦面共轭的面上,针孔可以抑制焦面外的光。
CMOS	complementary metal oxide semiconductor,互补金属氧化物半导体技术。将 N 通道和 P 通道金属氧化物半导体场效应管(MOS-FET)结合在同一芯片上,该技术是所有现代数字计算、存储以及逻辑电路的基础。
counting loss	计数损失,计数器在探测到前一个光子之后的死时间内的事件(比如光子)损失。
count rate	计数率,单位时间内的平均事件(如光子)数。探测计数率:单位时间内由探测器送出的光子脉冲数。记录计数率:单位时间内光

	子计数器记录的光子数。
CW	continuous wave, 连续波。指无线电频率范围内的连续电信号或者是连续光信号。在光学中, 这一术语的使用并不统一, 尽管高重复频率锁模激光器发出的是脉冲序列, 但有时也称为 CW。
dB	相对电压和相对功率的对数单位, 对电压来说 $\text{dB} = 20\log(V_1/V_2)$; 对功率来说, $\text{dB} = 10\log(P_1/P_2)$ 。
dead time	死时间, 指计数器或探测器在探测完前一事件后, 不能接受新的输入事件的时间。
dichroic	双色性, 对不同波长的光具有选择性反射和透过, 双色镜用来将不同波长的光信号分开。
DOT	diffuse optical tomography, 扩散光学层析。DOT 通过测量不同方向的扩散反射光和透射光来重构高散射物体的内部结构。
DNL	differential nonlinearity, 微分非线性。表示模数转换器中的电压增量, 或光子计数器中时间通道的不均匀性。
dynode	打拿极, 光电倍增管(PMT)中的放大电极, 电子在光电倍增管中被加速轰击打拿极, 通过二次电子发射产生电子的倍增放大。
E	在不同的上下文中用于代表“效率”的符号。计数效率指的是为获得相同的标准方差, 用理想光学记录技术与实际的记录技术所需要的光子数的比值。荧光共振能量转移(FRET)的效率描述了通过荧光共振能量转移进行的供体-受体对的耦合。
e	(电子的)单位电荷, 即 $1.602 \times 10^{-19} \text{ As}$ 。
EB-CCD	electron-bombarded CCD, 电子轰击 CCD。一种基于光电阴极和 CCD 传感器芯片的真空图像管, 光电子经过加速后到达 CCD 芯片, 每个入射的电子在半导体内产生大量的电子-空穴对, 从而获得增益。
ECL	emitter-coupled logic, 发射极耦合逻辑。基于双极晶体管对的逻辑序列通过发射极连在一起。ECL 避免了晶体管的饱和, 并且其信号延迟与温度无关。ECL 速度非常快, 但能耗高。它常用于通信设备和快速定时电路中。
ECFP	enhanced cyan fluorescent protein, 增强型青色荧光蛋白, 见 CFP。
EMC	electromagnetic compatibility, 电磁兼容性。
EYFP	enhanced yellow fluorescent protein, 增强型黄色荧光蛋白, 见 YFP。
EROS	event related optical signal, 事件相关光信号。大脑受刺激后, 吸收和散射系数的迅速改变。
F	品质因数的符号。指用理想的和实际的记录技术分别测量到的

	荧光寿命的标准偏差的比值。
FCS	fluorescence correlation spectroscopy, 荧光关联谱。FCS 测量少量受激分子荧光强度扰动的相关性。
FET	field-effect transistor, 场效应晶体管。结型 FET 利用反向偏压结中的压敏耗尽区产生的导通通道横截面的变化, MOSFET 利用加在金属氧化物半导体 (MOS) 结构上的电压来调节导通通道中的载流子密度。
FIDA	fluorescence intensity distribution analysis, 荧光强度分布分析。利用在连续时间单元内测得的少量分子的荧光强度的分布。参见 PCH。
FILDA	fluorescence intensity and lifetime distribution analysis, 荧光强度和寿命分布分析。利用在连续时间单元内测得的少量分子的荧光强度和荧光寿命分布。
FIFO	first-in-first-out, 先进先出。是数据缓冲器中所采用的原理。送入 FIFO 缓冲器入口的连续数据字, 按照进入时的顺序在出口处读出。FIFO 在数据速率变动的系统中用作临时数据缓冲器。
FLIM	fluorescence lifetime imaging, 荧光寿命成像。利用荧光寿命构成图像。
<i>f</i> number	<i>f</i> 数, 指光学系统的等效焦距与入瞳直径之比。
FPGA	field-programmable gate array, 现场可编程门阵列。可编程的逻辑设备。半导体芯片上大量的逻辑门由程序控制模块相连从而形成一个复杂的数字逻辑系统, FPGA 有一次性可编程和可重复编程两种形式。
FRET	fluorescence resonance energy transfer, 荧光共振能量转移, 或 förster resonance energy transfer, Förster 共振能量转移。FRET 发生在供体荧光团的发射谱与受体荧光团的吸收谱重叠的系统中, 供体分子被激发后, 能量直接传递给受体分子, 受体分子发射荧光。FRET 仅在供体和受体分子相距几个纳米时才会发生。
FWHM	full width at half maximum, 半高全宽。用来定义电和光脉冲的宽度。
GaAs	gallium arsenide, 砷化镓。一种半导体材料, 用于高频半导体器件、近红外光电二极管以及在近红外波段高效的光电阴极。
GaAsP	gallium arsenide phosphide, 砷化镓磷化物, 或镓砷磷。用于可见光波段的高效光电阴极材料。
GFP	green fluorescent protein, 绿色荧光蛋白。GFP 来自一种发荧光

	的水母,细胞中的 DNA 或者整个组织经过处理后都可以产生 GFP。
GND	地线。电子电路中的参考电位。
HEK cell	human embryonic kidney cell, 人胚胎肾细胞。培养细胞,常用于细胞水平上的生物实验。
HV	high voltage, 高压。
I	表示电流和光强度的符号。
ICG	indocyanine green, 吲哚花青绿。一种荧光造影剂,吸收和发射均处于近红外波段。
IR	infrared, 红外光。对应波长范围大约 750nm~1mm。
IRF	instrument response function, 仪器响应函数。在探测系统中, IRF 是对一个无限短的输入脉冲得到的脉冲波形。在荧光寿命系统中, IRF 是从一个荧光寿命无穷短的样品中探测到的脉冲波形。
jitter	光或电信号的时间或振幅的不确定性或抖动。
KDP	potassium dihydrogen phosphate, 磷酸二氢钾。KDP 晶体用于产生激光的二次谐波信号。
LED	light-emitting diode, 发光二极管。
LSM	laser scanning microscope, 激光扫描显微镜。
M_1	分布的一阶矩。光子随时间分布的 M_1 表示光子的平均到达时间。
macro time	宏时间,时间相关单光子计数中所用的术语。对每一个光子,从实验开始的时间,即宏时间,和信号周期内的时间,即微时间,都被记录下来。
MCA	multichannel analyser, 多通道分析器。记录输入脉冲频率随振幅变化的直方图。
MCP	microchannel plate, 微通道板。由一些平行的、垂直于表面的微通道组成,微通道内壁镀有导电层,当微通道板两端加上电压时,这些通道相当于电子倍增器。MCP 用于光电倍增管和像增强器中。
MCP-PMT	利用微通道板进行电子倍增的光电倍增管(PMT)。
MCS	multichannel scaler, 多通道计数器。一种对事件,如光子进行计数,并存入到快速存储器连续通道内的设备。
MCX	电子学中使用的连接器系统。
micro time	微时间,时间相关单光子计数中所用的术语。对每一个光子,从实验开始的时间,即宏时间,和信号周期内的时间,即微时间,都被记录下来。
N	表示测量结果中或测量结果的某个确定时间间隔内的光子数的

符号。

NA	numerical aperture, 数值孔径。光学系统的入射或出射光线所形成的最大锥形顶角的正弦值与锥形处的折射率的乘积。它表征了光学系统的光收集能力和分辨能力。
NDD	nondescanned detection, 非解扫探测。多光子激发激光扫描显微镜的一种探测方式,样品所发出的光通过物镜后,直接进入具有大的敏感面的探测器,而不经扫描装置或针孔。
Nd:YAG	neodymium-doped yttrium-aluminium garnet, 掺钕钇铝石榴石激光器。发射波长为 1064nm, 功率可高达几十瓦, 锁模后可产生重复频率为 50~100MHz 的皮秒脉冲。
NIM	nuclear instrumentation module, 核仪器模块。
NIR	near infrared, 近红外光, 波长范围大约 750nm~3 μ m。
OPO	optical parametric oscillator, 光学参量振荡器。利用晶体的非线性效应, 将泵浦光分为两束波长可调谐的相干出射光, 出射光波长倒数之和等于入射光波长的倒数。
PCB	printed circuit board, 印刷电路板。
PCH	photon-counting histogram, 光子计数直方图。包括在连续时间单位内测得的少量分子的荧光强度分布, PCH 是荧光强度分布分析(FIDA)的基础。
PIN diode	由正掺杂(P)层、无掺杂(I)层和负掺杂(N)层组成的二极管, 用于高频开关和衰减器以及高速光电二极管。
PDT	photodynamic therapy, 光动力疗法。
pile-up	堆积。在时间相关单光子计数中, pile-up 指探测到第一个光子后, 在同一信号周期内丢失掉对其他光子的探测, pile-up 会造成波形的失真和探测事件数的损失。在高能粒子探测中, pile-up 指在闪烁体、探测器或后置放大器的响应中对几个粒子的探测, pile-up 会造成所测能量分布的失真和探测到的粒子数损失。
PLL	phase-locked loop, 锁相环。一个由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器组成的电路, 鉴相器用来比较输入信号与振荡信号的相位, 压控振荡器使输入信号与振荡器信号保持为零相位差。
PMT	photomultiplier tube, 光电倍增管。由光电阴极和许多光电子倍增极组成的真空管。PMT 的增益达到 $10^6 \sim 10^8$, 可以探测单光子。
QE	quantum efficiency, 量子效率。荧光团的量子效率等于发射光子数与吸收光子数的比, 光电阴极或光电探测器的量子效率为光电子数或探测到的光子数与入射光子数之比。

RET	resonance energy transfer, 共振能量转移。见 FRET。
RG58, RG174	特征阻抗为 50Ω 的标准同轴电缆。
RF	radio frequency, 无线电频率。
RMS	root mean square, 均方根。对序列信号值平方后, 计算这些平方值的平均值, 然后再对这个平均值开方。均方根用来描述信号的不确定性, 探测器或电子系统定时的准确性, 或者光学表面与理想形状的偏差。
routing	路由, 多维时间相关单光子计数中所采用的方法。根据与光子探测同步读出的控制信号, 将每个光子“路由”至不同存储区中。路由可用来记录由多个探测器探测到的光子, 对不同激发波长或不同样品位置的测量结果进行多路复用, 或根据外部测量参量对光子进行分类。
router	路由器, 在一个时间相关单光子计数通道中控制多个探测器的设备, 它的工作原理是基于在每个信号周期内不可能探测到多个光子。路由器将所有探测器探测到的光脉冲送到一个公共的计时脉冲线中, 同时产生一个数字信号, 用以确定探测当前光子的探测器。
sequencer	序列发生器, 多维时间相关单光子计数器存储电路中的可编程逻辑模块, 用于记录和积累记录序列, 或在扫描装置中用于获取图像。
SER	single-electron response, 单电子响应。在探测器输入端产生单个光电子的输出脉冲。在大多数探测器中, SER 与探测到的单个光子产生的脉冲形状相同。
SHG	second-harmonic generation, 二次谐波产生。在非线性晶体中产生波长为入射激光波长一半的光。
SLIM	spectral lifetime imaging, 光谱寿命成像。在几个波段内同时测量寿命并成像。
SMA	同轴连接器系统, 用于电子学中的高带宽连接。
SMB	同轴连接器系统, 用于电子学中的中等带宽的连接。
SNR	signal-to-noise ratio, 信噪比。
SPAD	single photon avalanche photodiode, 单光子雪崩光电二极管。雪崩光电二极管 (APD) 工作在高于击穿电压的状态下, 探测到的光子导致二极管发生雪崩效应, 从而产生易于检测的电流脉冲。SPAD 的工作需要在 APD 整个区域内均匀击穿, 并小心对已触发的雪崩效应的淬灭, 从而避免破坏二极管。