
超薄范德华晶体3R-WS₂纠缠光子源

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29105.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

超薄范德华晶体3R-WS₂纠缠光子源。近日，新加坡国立大学仇成伟教授团队与中国科学技术大学任希锋教授团队合作，提出了一种基于三方相硫化钨晶体（3R-WS₂）通过自发参量下转换（SPDC）过程，产生可调偏振纠缠光子对的新方法。该纠缠光子源实现了超过800的信噪比、31 Hz的亮度，以及两种偏振纠缠的贝尔态，其保真度高于0.93。研究指出，三重旋转对称性（C₃）和空间反演对称性破缺是SPDC过程中实现偏振纠缠的普适机制，这为纠缠光子源的小型化提供了新思路。

这项成果以Polarization-entangled photon-pair source with van der Waals 3R-WS₂ crystal为题发表在eLight。新加坡国立大学凤建岗博士、中国科学技术大学吴贇琨博士和南洋理工大学段瑞焕博士为论文的共同第一作者；新加坡国立大学仇成伟教授、中国科学技术大学任希锋教授和吴贇琨博士为论文的共同通讯作者。

纠缠光子源是量子科学和现代量子技术的核心基础，在量子计算、量子通信和量子计量的发展中起着至关重要的作用。通过二阶非线性晶体中的SPDC过程产生纠缠光子对，是实现光子纠缠的重要方法。经过数十年的研究，科学家已经能够在偏振、路径、空间模式、时间-能量等多个维度上实现光子纠缠。然而，传统的块体非线性晶体在光量子系统的小型化和功能集成化方面存在局限性，难以满足未来量子技术的需求。

近年来，由于具有超高的二阶非线性系数和亚波长厚度，范德华（vdW）晶体在非线性光学和集成量子光学领域受到了广泛关注。例如，六方相（2H）单层过渡金属硫族化合物（TMDC）晶体的二阶非线性系数可高达1 nm/V。然而，2H-TMDC的偶数层具有中心对称结构，这导致非线性转换效率无法随着厚度的增加而累积，从而限制了其实际应用。

为了解决上述问题，本文提出了一种通用的超紧凑偏振纠缠光子源的设计规则：

- （1）破缺空间反演对称性，以确保非线性转换效率能够随材料厚度的增加而累积；
- （2）晶体具有C₃对称性，以保证SPDC过程能够产生偏振纠缠光子对；
- （3）利用泵浦光与材料电子跃迁之间的共振效应，可增强材料的二阶非线性系数。

基于以上规则，论文作者选取了3R-WS₂晶体，其层间堆积方式使得晶体在任意厚度下都表现出空间反演对称性破缺。此外，晶体层内的C_{3v}对称性使得二阶非线性过程遵循特定的选择定则：在圆偏振光泵浦的条件下，产生的上转换或下转换光子将具有相反的圆偏振。因此，在SPDC过

程中，使用右旋R 和左旋L 的圆偏泵浦光，可以分别生成LL 和RR 态的光子对。进一步，利用偏振态为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|R\rangle + e^{i2\alpha}|L\rangle)$ 的线偏泵浦光，可以产生形式为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|LL\rangle + e^{i2\alpha}|RR\rangle)$ 的纠缠光子对，其中 α 表示线偏光与3R-WS2扶手椅方向的夹角（图1）。当偏振角 α 为 0° 时，产生的纠缠态为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|LL\rangle + |RR\rangle)$ ，对应的贝尔态为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle - |VV\rangle)$ 。当偏振角为 90° ，纠缠态变为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|LL\rangle - |RR\rangle)$ ，对应的贝尔态为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle + |VH\rangle)$ 。因此，该研究基于C3对称性成功实现了偏振纠缠的可调性。

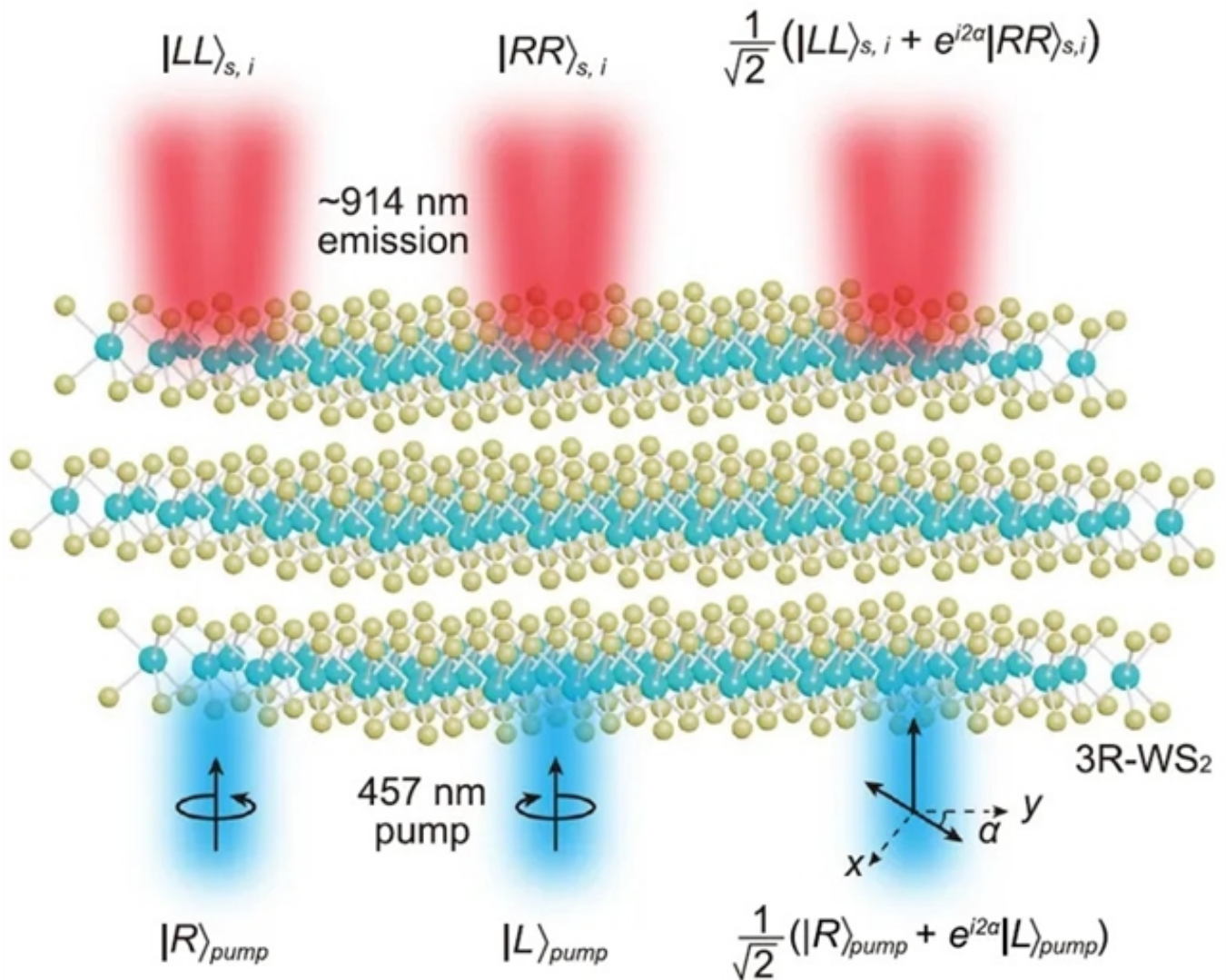


图1：基于3R-WS2的偏振纠缠光子源示意图

进一步，本文研究了材料中的电子能级跃迁对非线性系数的增强作用。研究人员通过二次谐波产生（SHG）实验，测量了3R-WS2晶体在不同波长下的非线性系数。结果显示，当SHG波长为457 nm时，3R-WS2的非线性系数 $\chi^{(2)}$ 达到最大值，为480 pm/V（图2）。进一步的吸收光谱测量表明，非线性系数 $\chi^{(2)}$ 的增强是由于非线性光学过程与材料中的C激子共振引起的。

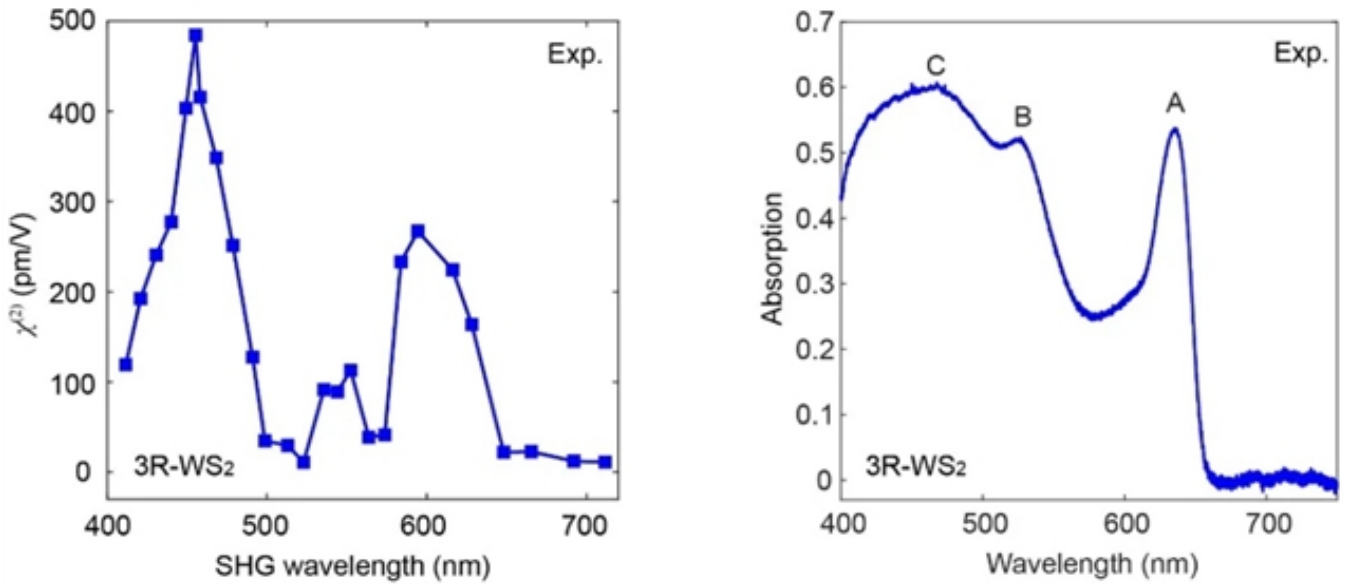


图2：3R-WS₂的二阶非线性系数和吸收光谱

基于以上结果，研究人员测量了厚度为350 nm的3R-WS₂晶体在457 nm泵浦光下的SPDC过程。实验结果表明，该光子源具有高信噪比（大于800）、高亮度（31 Hz，1.71 Hz/mW），并且遵循明确的选择定则（图3）。进一步，通过量子态层析技术，研究人员确认了两种贝尔态的产生，其保真度高于0.93，纠缠度（concurrence）高于0.97。

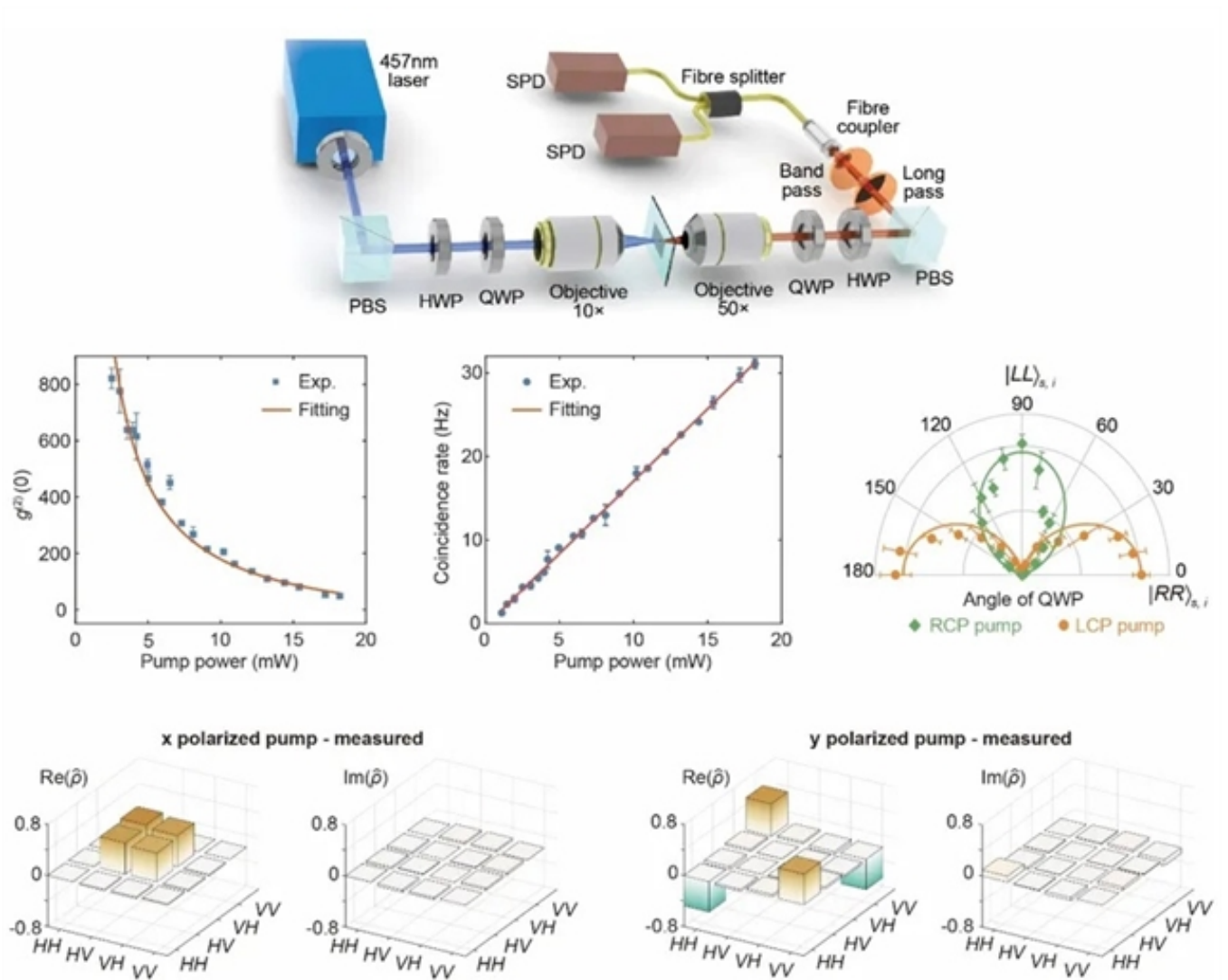


图3：SPDC测量和量子态层析

总结与展望

这项研究基于对称性规律，为筛选超紧凑SPDC纠缠光子源提供了一个通用规则。研究发现，3R-WS2晶体在信噪比、亮度和保真度这三项指标上，均在当前的薄膜SPDC纠缠光子源中处于领先地位。此外，通过引入光学结构，如共振超表面和光子晶体等，可以进一步增强光与物质的相互作用，提升纠缠光子源的亮度。超紧凑纠缠光子源将为片上量子计算、量子传感和超分辨量子成像等前沿领域提供重要的基础器件。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-024-00074-6>

作者：仇成伟等 来源：eLight

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发