集成碳纳米管单光子源并在室温下工作的光子波导电路

Clement Deleau，[1] Chee Fai Fong，[1,2,3] Finn L. Sebastian，[4] Jana Zaumsel，[4] 以及 Yuichiro K. Kato[1,2]1量子光电子学研究团队，*RIKEN*先进光子学中心，日本2纳米尺度量子光子学实验室，*RIKEN*开创性研究所，日本3光子学-电子学集成研究中心，*AIST*，日本4物理化学研究所，海德堡大学，德国

arXiv:2601.02758v1 [physics.optics] 6 Jan 2026

光子集成电路需要稳健的室温单光子源，以实现可扩展的量子技术。单壁碳纳米管（CNT）具有独特的激子性质和化学可调性，是颇具吸引力的候选材料，但将其集成到光子电路中仍然具有挑战性。在本研究中，我们展示了将功能化碳纳米管作为室温单光子发射体集成到光子腔和波导电路中。(6,5)碳纳米管带有芳基sp^3 缺陷，通过滴涂随机沉积，或利用实时光致发光监测引导的蒽辅助转移法，确定性地定位在光子腔上。光致发光光谱揭示了腔增强发射，而二阶自相关测量证实了单光子通过光子集成电路的传播，凸显了碳纳米管在可扩展室温量子光子学应用中的潜力。

关键词：碳纳米管、光子集成电路、单光子发射器、量子应用、室温、光子自相关、光子腔、波导。

一、引言

光子集成电路（PIC）处于众多新兴技术的前沿，可为广泛的应用提供适合大规模制造、稳定且紧凑的光学解决方案 [1, 2]。基于光子集成电路的环境监测和电信系统已实现商业化 [1] ，且有充分证据表明，集成量子光子学应用很快也将走上同样的发展道路 [3, 4]。然而，要实现此类量子电路，需要高效的片上单光子源，而在室温下实现其可扩展集成仍是一项重大挑战。

外延量子点具有高性能的发射特性，但存在空间生长随机、在室温下容易受到热猝灭影响，以及由于与许多光子集成电路平台材料不兼容而需要复杂异质集成等问题 [5, 6]。胶体量子点虽然得益于其溶液加工性，更易集成到器件中，但受到发射不稳定、光漂白和中等单光子纯度的限制 [7]。过去几年中，人们提出了更多新颖的方法。原生氮化硅发射体与氮化硅光子平台完全兼容，已被证明能够在室温下实现单光子产生，但同样受到自发因而具有随机性的发射体位置影响，且其发射机制仍未得到充分理解 [8, 9]。最近，研究人员通过激光直写，将转移到波导上的六方氮化硼薄片中的基于缺陷的发射体引入其中，展示了一种相对简便的确定性实现环境条件下工作的发射体的方法，但仍面临单光子纯度低以及发射位于电信波段之外等挑战[10, 11]。

由于具有一维结构和异常稳定的激子态，单壁碳纳米管（碳纳米管）已成为集成光子学领域颇具潜力的单光子发射体。它们具有优异的光稳定性，有望抵抗光漂白和闪烁效应，并可通过手性选择和缺陷工程在电信波段（1100–1600 nm）内调谐发射 [12]。尤其是，通过分子缺陷工程引入激子俘获位点，能够使碳纳米管在室温下以高纯度发射单光子 [12, 13]。原始碳纳米管还已实现电驱动光致发光（PL） [14, 15] ，并已集成到光子腔结构 [16–18] 以及在低温下运行的量子光子学电路中 [19]。这些特性使碳纳米管成为可扩展量子光子学应用的有力候选者；然而，由于对单光子产生、耦合和引导提出了严格要求，要在室温下将其应用于功能性片上电路仍然面临挑战。

本研究旨在通过提出单根碳纳米管随机与确定性谐振腔集成策略，并展示其在室温下高效耦合至光子集成电路，为基于碳纳米管的量子光子集成电路应用提供一个平台。我们首先介绍单壁（6,5）碳纳米管的功能化过程与制备方法，并概述其光致发光特性，如图1a所示，以说明其后续在光子集成电路中的应用。随后，我们聚焦于光子集成电路的开发，详细介绍低荧光铌酸锂（LN）波导平台的洁净室制备工艺，该平台可直接用于未来的电光调制。接下来，我们将介绍光子设计以及实验

表征波导、耦合器和谐振腔的过程，这些器件通过定制的自动化测试装置进行测量。随后，我们将同一平台集成到光致发光测量系统中，并对其进行调整，以分析碳纳米管与电路的耦合。借助图1b所示的光纤耦合配置，我们展示了碳纳米管发射高效耦合至单共振波导耦合光子腔（图1c），并获得增强且光谱线宽变窄的光致发光。最后，我们报告了室温下的单光子发射、波导传输和路径路由，并通过自相关测量予以验证。本研究首次展示了在环境条件下利用碳纳米管单光子发射的光子集成电路，为实现基于碳纳米管的室温量子应用迈出了关键一步。

II. 碳纳米管功能化与光学表征

由于(6,5)单壁碳纳米管在各种碳纳米管种类中广泛可得，且其激子性质已得到充分表征，包括光谱特征、寿命、偏振、亮度和自相关特性，因此选用(6,5)单壁碳纳米管进行功能化并集成到光子电路中。在本研究中，我们首先在甲苯中用芳基 sp^3 缺陷对手性分选的(6,5)碳纳米管进行功能化。将PFO-BPy包覆的(6,5)单壁碳纳米管与2-碘苯胺在强有机碱叔丁醇钾存在下进行处理，选择性地生成具有 E_{11}^{*-}结合构型 [21], 的缺陷，密度约为每 μm^{-1} [22]个碳纳米管1–2个缺陷。

功能化后，通过表面活性剂辅助处理将碳纳米管转移至水分散液中。该策略能够在保留碳纳米管光学性质的同时，对集成技术中使用的聚合物基底进行涂覆；这些基底对大多数有机溶剂敏感。转移过程包括将样品过滤至聚四氟乙烯膜（Merck Millipore JVWP，孔径为0.1 μm），随后用热甲苯反复清洗（6×1 h，80℃），再在含1%（w/v）脱氧胆酸钠（DOC, Sigma-Aldrich，$>$98.0%）的水溶液中水浴超声分散（1.5 h）。离心（2×45min，60,000 $\times$ g）后，收集上清液并稀释50倍。

随后，使用自行搭建的自由空间装置进行光致发光测量。该装置由光学元件、Princeton Instruments Acton 2300i光谱仪以及一台在连续波模式下以850 nm运行的Coherent Mira 900激光器组成，激发功率为 1 μW。图1a展示了单个带有单个缺陷的功能化(6,5)碳纳米管发射体和碳纳米管聚集体的发射光谱，并显示了单个碳纳米管的激发偏振依赖性。这些功能化碳纳米管的 E_{11}^{*-} 发射峰位于约1250–1300 nm，与大多数光子电路材料的透明窗口以及受益于零色散光纤的主要电信波长范围相吻合

III. 光子集成电路技术发展

针对量子光子学应用，人们提出了多种不同的材料平台 [3, 4], ，每种平台在元件密度、传播损耗、有源光学元件以及本征光子源可用性等关键电路特性方面各具性能特点。评估了多种材料后，我们选择铌酸锂作为电路技术的开发材料，因为它兼具高光学调制效率和近红外范围内极低的发射；这两项特性对于量子通信等应用 [23] 以及处理来自功能化碳纳米管的单光子至关重要。尤其是铌酸锂的低发射特性，得到了对多种绝缘体衬底薄膜进行比较测量的支持；这些薄膜在近红外范围内的光致发光光谱见图 S-1。

首先在 Lumerical 中对光栅耦合器（GC）、波导和谐振腔进行仿真，并生成数百种不同几何结构的布局变体，以全面应对制造和材料公差（补充信息，第 S-II 节）。具体而言，采用 2.5D 时域有限差分法对光栅光子腔进行仿真，并进行设计，使其在 1260 至 1310 nm 之间、碳纳米管发射峰附近呈现共振。图 2a、b 分别展示了谐振腔和光栅耦合器的仿真场分布。

电路制备采用图 2c 所示的标准工艺。首先，在从 Innosemitech 购买的氧化物晶圆上沉积 300 nm 厚的 $LiNbO_3$ 薄膜，然后涂覆 Zeon ZEP520A光刻胶，并使用高分辨率 Advantest F7000S-VD02 电子束光刻系统对波导电路进行图案化。经 Zeon ZED-N50溶液显影并用水冲洗后，在芯片上溅射沉积 70 nm 厚的铬层，并通过轮廓测量法验证其厚度。由于铌酸锂具有很强的抗干法刻蚀能力，对有机光刻胶的刻蚀选择比较低，因此使用铬作为硬掩模。沉积铬层后，使用二甲基乙酰胺溶剂并通过超声处理进行剥离工艺。随后进行干法刻蚀，交替执行 SF_6 等离子体刻蚀与 C_4F_8 钝化，持续 55 分钟，速率为每分钟 30 个周期。最终测得铌酸锂刻蚀深度为 240 nm，形成脊型波导。之后，将样品浸入铬蚀刻液并超声处理 20 分钟，以去除残留铬。许多光子集成电路平台通常会在波导上覆盖氧化物或有机层，而此处的波导在沉积后保持裸露，以便与碳纳米管耦合。

对于电路测试，我们搭建了一个表征平台，

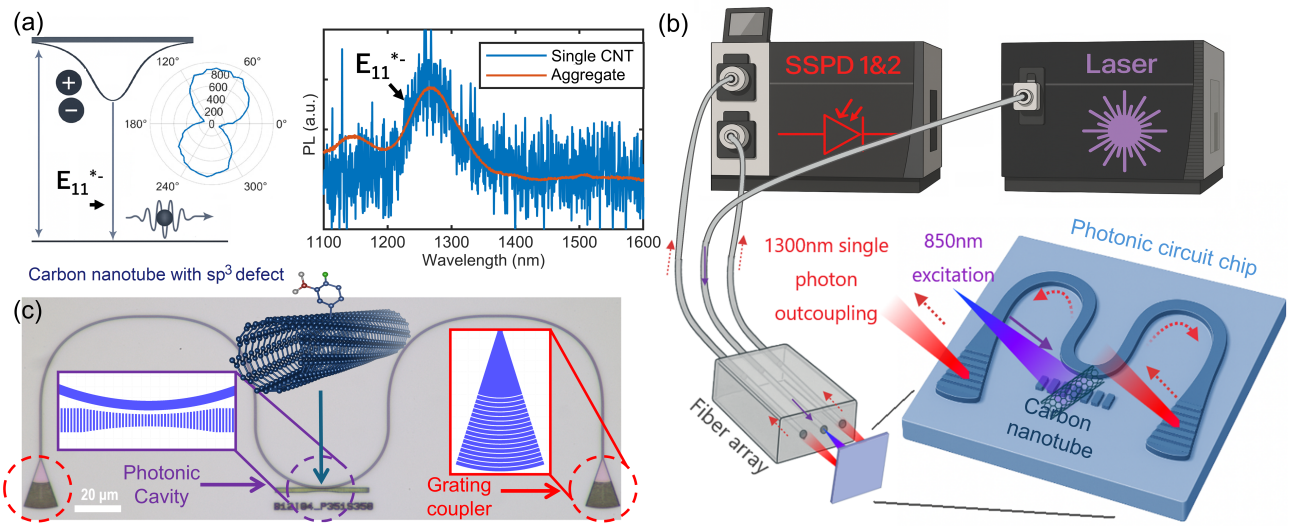

图 1. (a) 限域于碳纳米管缺陷态中的激子的能级图、基底溶液涂覆后单根 (6,5) 碳纳米管发射体和碳纳米管聚集体的归一化发射光谱，以及单根碳纳米管发射体的偏振激发依赖性。(b) 拟议的光学装置示意图：利用光纤阵列、可见光激光激发和超导单光子探测器，演示碳纳米管发射单光子的腔耦合和波导传输。(c) 制备的基础设计电路的光学显微镜图像，以及空腔和光栅布局示意图。碳纳米管图像由 [20] 生成。

该平台采用光纤V形槽阵列、中心波长约为1300 nm的 Santec TSL-550 可调谐激光器、光电二极管，以及由定制 LabVIEW 算法控制的线性平移台（图1b）。实验装置见补充信息第S-III节。光纤阵列（FA）可高精度对准多根光纤，通常用于实现与光子芯片的高效耦合。光通过集成在波导末端的铌酸锂光栅耦合器注入和收集，从而实现基于衍射的面外光耦合。这种配置使FA只需悬置于芯片表面上方，即可有效开展光子集成电路表征。通过使光栅耦合器布局与FA的几何结构相匹配，该设计支持同时进行多通道耦合。测量流程通过 LabVIEW 软件实现全自动化，该软件可直接与设计布局进行交互。

测得 1280 nm 处的光栅耦合效率约为每个耦合器 –9 dB，带宽为 70 nm，覆盖了 E_{11}^{*-} 发射峰。尽管这种耦合损耗相当显著，但据参考文献 [24] 报道，通过采用包层、底部反射器、亚波长光栅和啁啾轮廓，有望大幅改善耦合效率（降至 1.42 dB）。

波导传输损耗估计约为 3 dB/cm。通过优化金属掩模沉积和刻蚀工艺，还可以进一步改善；近期的研究已将铌酸锂波导的损耗降至 0.4 dB/cm[25]。优化后的腔结构周期约为 350 nm，占空比为 0.55，光栅宽度从 2.30 μm 到 1.15 μm 呈二次渐变，渐变范围为长度为 10 μm 的空腔。这种相对较大的空腔尺寸是为了便于碳纳米管耦合，但会导致出现第二个纵向腔模（图 2d，蓝色曲线）。为抑制这一非预期模式，外部光栅的周期略微减小了 5 nm。这一调整不仅清晰地消除了第二个模式，还略微提高了共振光学品质因数，最高达到 1200；这一点可从图 2d 中橙色曲线所示的波导透射测量结果中看出。

IV. 碳纳米管电路集成

我们探讨了将碳纳米管集成到光子芯片上的两种方法：直接滴涂碳纳米管水溶液，以及蒽辅助转移技术 [26, 27]。滴涂可用于初步测试，操作快捷，但碳纳米管定位不受控制，限制了其可扩展性。相比之下，本文所称的碳纳米管印章转印方法，能够将碳纳米管干净、精确地放置在光子腔上。

如图3(a)所示，碳纳米管印章转印过程主要分为三个步骤。首先，将一片厚度为A 4500 μm的Gel-Pak聚二甲基硅氧烷（PDMS）薄片切成一块1 mm^2 大小的方片，并放置在玻璃样品架的中央。随后，将定制生长的蒽晶体薄片小心地放置在聚二甲基硅氧烷方片上。为简化原有的多步方法 [27], ，我们直接在薄片上涂覆水基碳纳米管分散液，因为蒽在许多有机溶剂中均可溶解。

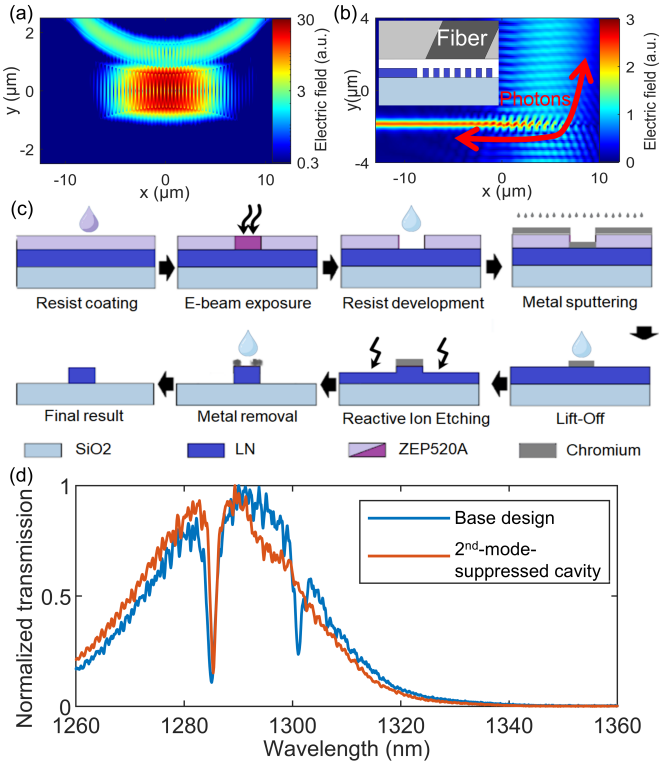

图 2. (a) 设计的谐振腔在接近共振波长处的俯视时域有限差分模拟光场分布；(b) 光栅耦合器在耦合波长处的模拟光场；(c) 铌酸锂光子集成电路的制造流程；(d) 基础设计光子腔（蓝色）和抑制二阶模式的光子腔（橙色）的实测透射光谱。

虽然以水为分散溶剂时，碳纳米管的光致发光量子产率低于以甲苯为分散溶剂时的量子产率 [22, 28], , 但DOC表面活性剂可减轻猝灭，并使碳纳米管充分单分散，从而便于转印。30秒后，通过毛细作用移除液滴，使薄片表面留下稀疏分布的功能化(6,5)碳纳米管，随后将印章样品安装在电动平移台上。详细的映射图像和装置照片见补充信息第S-IV节。

第二步，通过透明的聚二甲基硅氧烷和玻璃，使用连续波激发光束进行光致发光成像，以定位碳纳米管。成像时，激发光束采用垂直偏振，以优先定位与腔模偏振方向对齐的碳纳米管，从而避免在印章转印前旋转样品。虽然可以通过光子自相关测量评估碳纳米管的单光子发射特性，但通常会避免进行这类测量，因为长时间脉冲激发存在光漂白风险。相反，人们更倾向于快速进行寿命测量，以定性判断是否存在单量子发射体；与碳纳米管聚集体相比，单量子发射体通常具有更长的衰减时间，如 [29] 所示。确定合适的碳纳米管后，第二个承载光子集成电路芯片的平移台会调整芯片，使空腔与激发光束对齐，并以此作为视觉参考；对齐至收集/激发光路的显微镜相机用于监控，确保碳纳米管和目标空腔均位于光轴中心。通过逐渐将光子集成电路芯片移向印章，并监测光致发光来确认对准情况。由于聚二甲基硅氧烷表面固有的不平整性，在接近过程中，通常需要根据碳纳米管光致发光强度的变化进行细微的位置调整，调整幅度一般为数微米。随后，将系统静置 30 分钟，再小心地分离印章。碳纳米管转移时可以带上薄片，也可以不带；通常需要尝试数次。基底黏附特性会显著影响印章转印良率。在大多数情况下，即使多次尝试，也只能完成部分转印。碳纳米管定位通常较为简单，但聚二甲基硅氧烷回缩仍是最精细、最关键的步骤，目前也是该方法的主要瓶颈，整体成功率为 25%。目前正在探索表面处理策略，以提高黏附性和可重复性。

第三步是通过热电冷却器将芯片加热至 80°C，使蒽逐渐升华，从而让碳纳米管干净地留在空腔上。图3b-d展示了采用滴涂和印章转印制备的耦合腔电路的代表性光致发光和反射率映射图；补充信息的S-IV节还展示了其他印章转印映射结果。

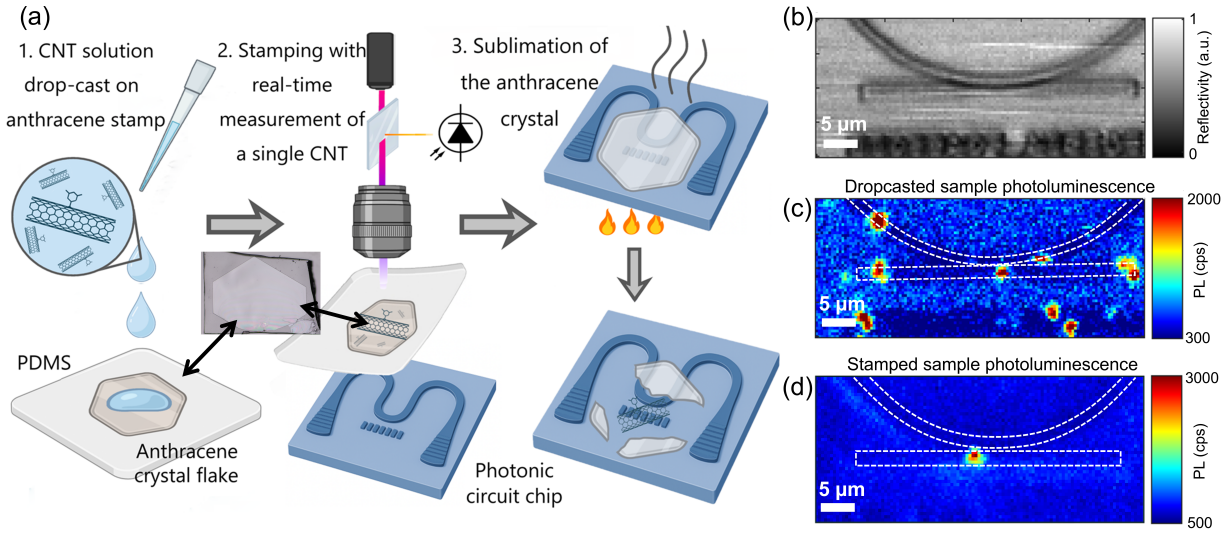

图 3. (a) 蒽辅助转移技术示意图；(b) 腔反射映射，以及 (c) 滴铸腔和 (d) 印章转印腔样品的光致发光映射，激发功率为 780nm-1.5 μ W。

V. 结果

将碳纳米管放置在芯片上后，我们使用基于光纤阵列的表征平台，展示了碳纳米管与波导电路的高效耦合。如图1b所示，采用了连续排列的三个光纤阵列通道：中央通道用于激发碳纳米管/空腔，两个外侧通道则连接至光栅耦合器。这样，在空腔中发射的碳纳米管光子便耦合进入波导电路，向任一光栅耦合器传播，随后传输至外部光纤阵列通道。该配置简化了对准和测试；由于耦合电路围绕光子腔对称，还天然提供了用于自相关测量的50/50分束器。由于光纤的模场直径较大，且输出端没有聚焦光学元件，芯片上的照明区域相对较宽，注入功率中约有1%与腔模重叠，因此需要更高的激发功率。

首先，将任一外侧光纤阵列通道连接到光谱仪，采集光致发光耦合光谱。如图 4 所示，在透射光谱的共振谷位置可能出现尖锐的发射峰。我们观察到共振品质因数略有下降，并将其归因于碳纳米管包覆产生的残留聚合物增加了腔内损耗。根据碳纳米管定位或是否存在额外碳纳米管，可能会观察到不同的光谱轮廓，详见补充信息 S-V 节。

为评估波导中传输的光子的单光子发射特性，将两个外侧 FA 通道分别连接到 Sin- gle Quantum 的超导单光子探测器，再将探测器连接到 Qutools quTag 模块，以进行时间关联单光子计数——和事件标记。为抑制耦合进入波导的残余激发光，每条光纤线路均在一对准直器之间安装了一片 1200 nm 长通滤光片。由于碳纳米管的整体光致发光量子产率较低，连续波自相关测量耗时较长。尽管脉冲激射模式可能逐渐损伤碳纳米管，但为加快数据采集，仍将激光器切换至 76 MHz 锁模激发；因此，这种方式主要适用于低亮度下的概念验证实验。脉冲激发下还观察到闪烁行为增加，这也可作为单发射体特性的指标，尽管脉冲模式会对发射体的长期稳定性产生不利影响。

自相关测量得到性能最佳的印章转印样品和滴铸样品的 $g^{(2)}(0)$ 值分别为 0.08 ± 0.06 和 0.10 ± 0.06（图 5），表明室温下实现了洁净发射以及单光子的成功波导传输。平均而言，滴铸样品的单光子纯度往往较低，这可能是因为在波导附近的激发区域内，难以从周围的单根管中分离出单根耦合碳纳米管。还应注意，大多数测量中标记的符合事件总数仍然相对较少，主要是因为在持续脉冲激发下，碳纳米管会在数分钟至数小时后性能退化或停止发光。补充信息 S-VI 节展示了多个发射体闪烁和退化行为的实例。我们并不认为这些效应是由水分子的存在直接导致的，这一点可由将碳纳米管周围环境充满N_2时的测量结果证明。

如补充信息 S-VII 节所示，碳纳米管的光致发光衰减时间基本不随腔耦合而改变，这与通常预期的缩短相反

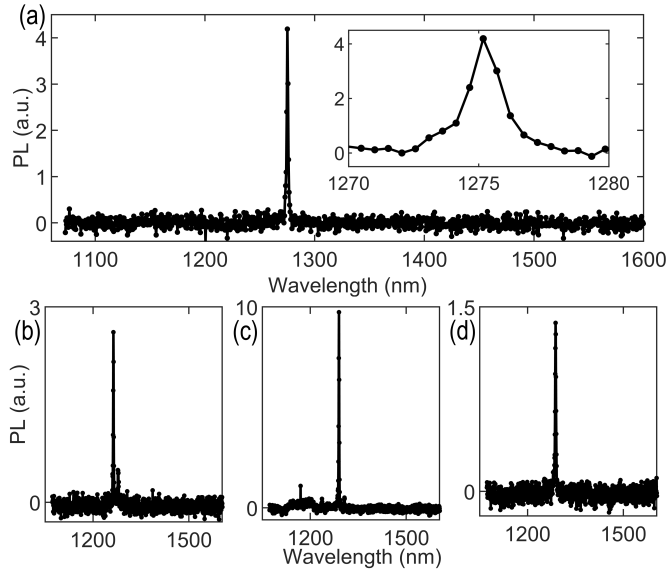

图 4. 激发功率为 780 nm-1.5 μW 时的腔耦合碳纳米管光致发光光谱。(c) 和 (d) 尚未确认是单光子发射体。

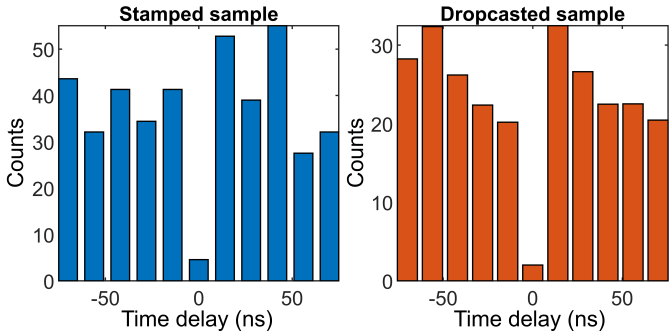

图 5. 印章转移和滴涂样品中表现最佳者的实测自相关结果。

这种缩短通常源于Purcell增强。这可归因于腔模：由于其介电性质，腔模限制了碳纳米管与光栅间隙的重叠；同时，腔模被设计为具有相对较大的模体积（1.16 λ^3/n^3，0.52 μm^3，，其中 λ为波长，$n = 1.71$为有效折射率），以便于进行碳纳米管压印。对于宽线宽发射体，Purcell因子可表示为

$$F_{\mathrm{P}} = \frac{3\lambda^3 Q_e}{4\pi^2 n^3 V}\,\xi,$$

其中，Q_e 为发射体品质因数，V为空腔腔模体积，ξ 表示空间重叠和偏振重叠 [30]。对于我们的耦合碳纳米管，假设空气间隙中的碳纳米管具有 ∼30%的模场重叠，则可得到最大值F_{P}∼0.34。结合氧化物衬底上功能化(6,5)碳纳米管较低的辐射效率（∼2.4%）[31]，，这解释了衰减时间几乎没有增强的原因。

考虑到未耦合器件测得的自由空间光致发光并对波导收集效率（−9dB）和最大 Purcell因子进行校正后，我们保守估计，∼30% 的碳纳米管发射耦合进入波导电路。潜在的性能改进包括使用模体积更小（最低可达 0.0237λ^3/n^3 [18]）的空气模腔，并改善与碳纳米管的空间重叠；这两项改进分别可使 Purcell因子提升 ∼50 倍和 ∼3 倍。综合而言，这些改进有望使总发射速率较当前设计提升 ∼150 倍。

VI. 结论

在本研究中，我们展示了室温下功能化碳纳米管的腔增强发射，以及其与光子集成电路中的单光子耦合。我们采用两种方法将单个碳纳米管集成到芯片上：随机溶液滴涂法，以及更具确定性的蒽辅助转移技术。在

这两种情况下，二阶自相关测量均证实了单光子发射和传播，$g^{(2)}(0)$值分别为0.08和0.10。通过采用精心设计的倏逝耦合单模光子谐振腔，碳纳米管原本较宽的发射光谱显著收窄至仅几纳米。尽管发射不稳定和沉积产率有限等挑战仍然存在，我们的研究结果明确证明了将碳纳米管发射体集成到光子电路中的可行性。这是基于碳纳米管发射体开发室温量子光子平台的重要进展。

致谢

工作得到日本学术振兴会（科研费 JP24KF0092、JP24K17627、JP25K21704 和 JP23H00262）、日本科学技术振兴机构（ASPIRE JPMJAP2310、CREST JPMJCR25A1）及日本文部科学省（ARIM JPMXP1224UT1073、JP- MXP1224UT1069）的支持。作者感谢理化学研究所先进制造支持团队提供技术协助。C.F.F. 得到理化学研究所特别博士后研究员计划的支持。F.L.S. 和 J.Z. 感谢德国科学基金会（DFG）通过 SFB 1225/3（Isoquant）提供经费支持。

[1] P. Dong, Y.-K. Chen, G.-H. Duan, 和 D. T. Neilson, 《纳米光子学》**3**，215（2014）。[2] L. Chrostowski 和 M. Hochberg, 《硅光子学设计：从器件到系统》（剑桥大学出版社, 2015）。[3] E. Pelucchi, G. Fagas, I. Aharonovich, D. Englund, E. Figueroa, Q. Gong, H. Hannes, J. Liu, C.-Y. Lu, N. Matsuda, J.-W. Pan, F. Schreck, F. Sciarrino, C. Sil- berhorn, J. Wang, 和 K. D. Jöns, 《自然·物理评论》**4**，194（2022）。[4] J. Silverstone, D. Bonneau, J. Brien, 和 M. Thompson, IEEE《量子电子学精选主题期刊》**22**，1（2016）。[5] P. Senellart, G. Solomon, 和 A. White, 《自然·纳米技术》**12**，1026（2017）。[6] M. Sartison, O. Camacho Ibarra, I. Caltzidis, D. Reuter, 和 K. D. Jöns, 《量子技术材料》**2**，023002（2022）。[7] A. H. Proppe, D. B. Berkinsky, H. Zhu, T. Šverko, A. E. K. Kaplan, J. R. Horowitz, T. Kim, H. Chung, S. Jun, 和 M. G. Bawendi, 《自然·纳米技术》**18**，993（2023）。[8] A. Senichev, Z. O. Martin, S. Peana, D. Sychev, X. Xu, A. S. Lagutchev, A. Boltasseva, 和 V. M. Shalaev, 《科学进展》**7**，eabj0627（2021）。[9] A. Senichev, S. Peana, Z. O. Martin, O. Yesilyurt, D. Sy- chev, A. S. Lagutchev, A. Boltasseva, 和 V. M. Shalaev, 《ACS光子学》**9**，3357（2022）。[10] D. Yamashita, M. Yumoto, A. Narazaki, 和 M. Okano，arXiv（2025）。[11] I. Abidi, N. Mendelson, T. Tran, A. Tyagi, M. Zhuang, L. Weng, B. Özyilmaz, I. Aharonovich, M. Toth, 和 Z. Luo, 《先进光学材料》**7**，1900397（2019）。[12] X. Ma, N. F. Hartmann, J. K. S. Baldwin, S. K. Doorn, 和 H. Htoon, 《自然·纳米技术》**10**，671（2015）。[13] X. He, N. F. Hartmann, X. Ma, Y. Kim, R. Ihly, J. L. Blackburn, W. Gao, J. Kono, Y. Yomogida, A. Hirano, T. Tanaka, H. Kataura, H. Htoon, 和 S. K. Doorn, 《自然·光子学》**11**，577（2017）。[14] T. Mueller, M. Kinoshita, M. Steiner, V. Perebeinos, A. A. Bol, D. B. Farmer, 和 P. Avouris, 《自然·纳米技术》**5**，27（2010）。[15] N. Higashide, M. Yoshida, T. Uda, A. Ishii, 和 Y. K. Kato, 《应用物理快报》**110**，191101（2017）。[16] F. Pyatkov, V. Fütterling, S. Khasminskaya, B. S. Flavel, F. Hennrich, M. M. Kappes, R. Krupke, 和 W. H. P. Pernice, 《自然·光子学》**10**，420（2016）。[17] R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, 和 Y. K. Kato, 《应用物理快报》**101**，141124（2012）。[18] R. Miura, S. Imamura, R. Ohta, A. Ishii, X. Liu, T. Shi- mada, S. Iwamoto, Y. Arakawa, 和 Y. K. Kato, 《自然·通讯》**5**，5580（2014）。[19] S. Khasminskaya, F. Pyatkov, K. Słowik, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, F. Hennrich, M. M. Kappes, G. Gol'tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, 和 W. H. P. Pernice, 《自然·光子学》**10**，727（2016）。[20] （2011），tubeGen 3.4（网页界面, http://turin.nss.udel.edu/research/tubegenonline.html），J. T. Frey 和 D. J. Doren，特拉华大学，特拉华州纽瓦克，2011年。[21] S. Settele、F. Berger、S. Lindenthal、S. Zhao、A. Ali、E. Yumin、N. Zorn、A. Asyuda、M. Zharnikov、A. Högele 和 J. Zaumseil, 《自然·通讯》**12**，2119（2021年）。[22] F. L. Sebastian、N. F. Zorn、S. Settele、S. Lindenthal、F. J. Berger、C. Bendel、H. Li、B. S. Flavel 和 J. Za- umseil, 《物理化学快报》**13**，3542（2022年）。[23] F. Labbé、Ç. Ekici、I. Zhdanov、A. L. Muthali、L. K. Oxenløwe 和 Y. Ding, 《先进光子学》**7**，044002（2025年）。[24] S. Kang、R. Zhang、Z. Hao、D. Jia、F. Gao、F. Bo、G. Zhang 和 J. Xu, 《光学快报》**45**，6651（2020年）。[25] I. Krasnokutska、J.-L. J. Tambasco、X. Li 和 A. Pe- ruzzo, 《光学快报》**26**，897（2018年）。[26] N. Fang、Y. R. Chang、D. Yamashita、S. Fujii、M. Maruyama、Y. Gao、C. F. Fong、K. Otsuka、K. Na- gashio、S. Okada 和 Y. K. Kato, 《自然·通讯》**14**，8152（2023年）。[27] K. Otsuka、N. Fang、D. Yamashita、T. Taniguchi、K. Watanabe 和 Y. K. Kato, 《自然·通讯》**12**，3138（2021年）。[28] F. J. Berger、J. Lüttgens、T. Nowack、T. Kutsch、S. Lin- denthal、L. Kistner、C. C. Müller、L. M. Bongartz、V. A. Lumsargis、Y. Zakharko 和 J. Zaumseil, 《ACS纳米》**13**，9259（2019年）。[29] S. Reich、M. Dworzak、A. Hoffmann 和 M. Strano, 《物理评论B辑》**71**（2005年）。[30] M. P. van Exter、G. Nienhuis 和 J. P. Woerdman, 《物理评论A辑》**54**，3553（1996年）。[31] A. Ishii、X. He、N. F. Hartmann、H. Machiya、H. Htoon、S. K. Doorn 和 Y. K. Kato, 《纳米快报》**18**，3873（2018年）。

S-I. 材料自发荧光比较

在三个光子集成电路平台上进行了微区光致发光测量：富硅氮化硅、化学计量比氮化硅和铌酸锂。在所有情况下，待研究薄膜的厚度均为 300 nm，并分别沉积在带有厚度为 3 μm、2 μm 和 5.7 μm 埋入式二氧化硅层的硅衬底上。样品置于自由空间中，使用工作波长为 780 nm、入射功率为 87 μW 的钛蓝宝石激光器进行激发。收集发射的光致发光并进行光谱分析，积分时间分别为 5 秒或 10 秒。

如图 S-1 所示，在整个测量光谱范围内，铌酸锂平台的自发荧光最低，且在 1300 nm 附近的目标区域，其发射强度接近噪声底。不过需要注意的是，残余信号可能来自位于表面下方 5.7 μm 处的硅衬底。

S-II. 布局

光栅耦合器和波导采用 Lukas Chrostowski 开发的光子器件库 [2] 实现。如图 S-2 所示，大量谐振腔经图案化排列，并由框架包围，以减轻局部应力并防止制造过程中出现裂纹。每个谐振腔的中央区域宽度逐渐收窄，从而使中央反射波长发生偏移，并形成光子腔。

S-III. 表征装置

如图 S-3 所示，表征装置由显微物镜、光纤阵列以及光子芯片载台组成；载台配有直线平移台、旋转台和温度控制器。该配置可保持显微物镜焦点与光纤阵列通道之间的距离固定，从而能够在自由空间激发和基于光栅耦合器的光纤耦合之间无缝切换。

S-IV. 印章转印过程示例

本节对正文中描述的碳纳米管压印流程作进一步说明，并提供实验装置、印章转印过程及形成结构的更多照片。图 S-4 展示了集成光致发光监测的印章装置，以及小块 PDMS薄片与芯片接触时的侧视图。图 S-5 展示了印章转印过程中拍摄的显微图像，突出了接触瞬间空腔周围的干涉条纹，以及移除印章时薄片发生的碎裂，说明蒽薄片通常仅有部分被转印。最后，图 S-6 展示了蒽薄片上孤立碳纳米管的光致发光和反射映射，以及谐振腔印章转印后的映射。

S-V. 额外的谐振腔耦合碳纳米管光致发光光谱

图 S-7 展示了若干通过光纤阵列测量的波导传输后耦合碳纳米管光谱示例。请注意，这些样品的自相关测量不一定都显示出单光子传输。还可以观察到，参数不同的某些谐振腔会在不同波长处呈现一个或多个共振。

S-VI. 功能化碳纳米管的稳定性问题

尽管通常认为碳纳米管具有化学稳定性，但溶液处理的样品往往会出现闪烁行为，并且在连续激发数分钟至数小时后可能发生永久性光漂白。图 S-8 展示了此类闪烁动力学的代表性示例。有趣的是，在某些情况下，耦合碳纳米管可通过数秒的强脉冲激发暂时恢复发光。然而，亮度逐渐下降（可能是由缺陷形成或湿度诱导的退化导致）最终限制了可进行光子自相关测量的时长。目前正在研究若干种减轻猝灭效应的策略。如图 S-4 所示，实验装置升级后加入了氮气氛围控制，以期延长碳纳米管寿命，但迄今尚未观察到显著改善。

S-VII. 发射寿命测量

我们分别采用自由空间激发和 FA 构型进行发射寿命测量，以评估腔耦合情况下珀塞尔效应可能引起的变化。然而，如图 S-9 所示，未观察到明显的寿命缩短。

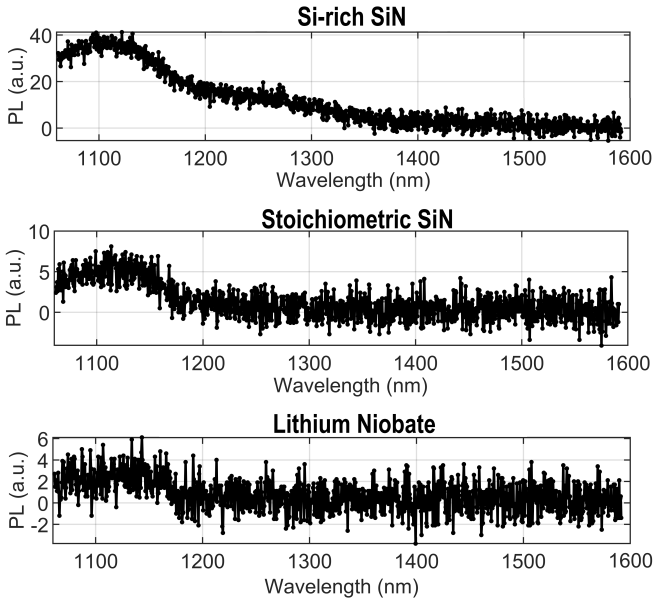

图 S-1. 富硅氮化硅、化学计量比氮化硅和铌酸锂材料在 87 μW、780nm 连续激发下的近红外光致发光，激发时间分别为 5、10 和 10 秒。

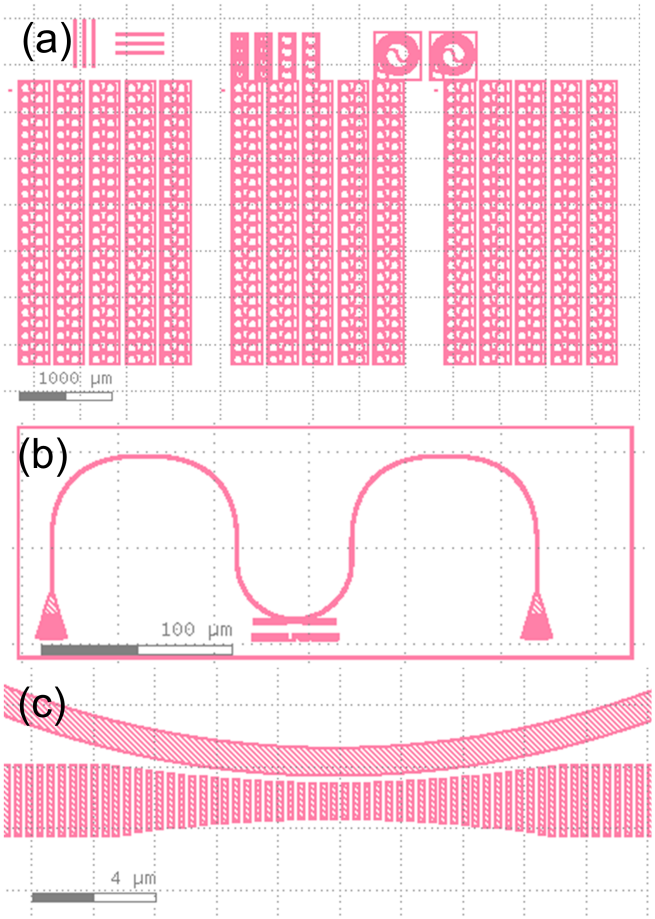

图 S-2. (a) 腔阵列芯片、(b) 耦合测试电路单元和 (c) 耦合腔的布局图像。

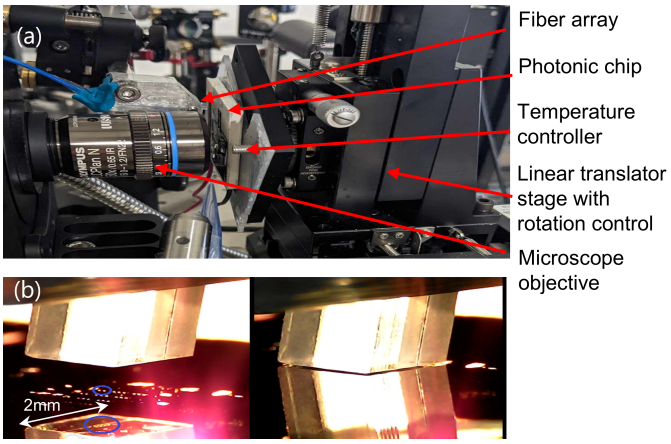

图 S-3。（a）光致发光测量与PIC耦合装置；（b）使用变焦相机拍摄的光纤阵列耦合照片。

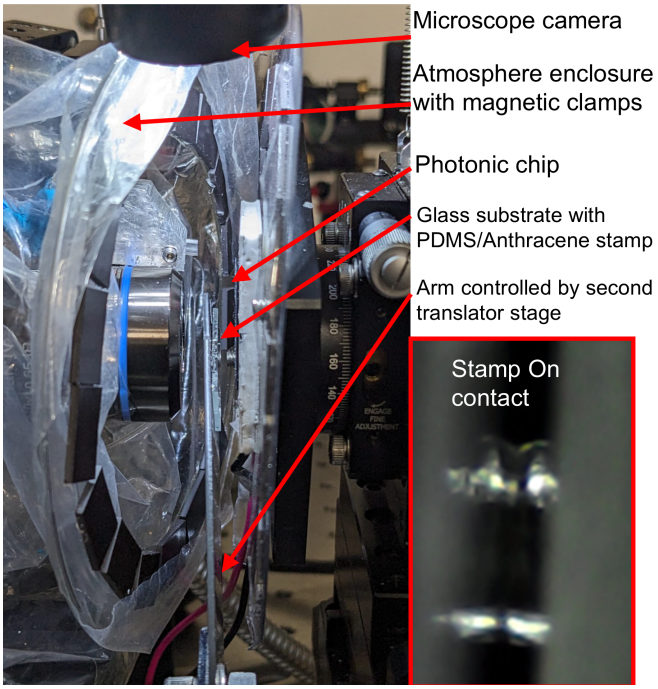

图 S-4。印章装置图像及印章接触时的放大照片。

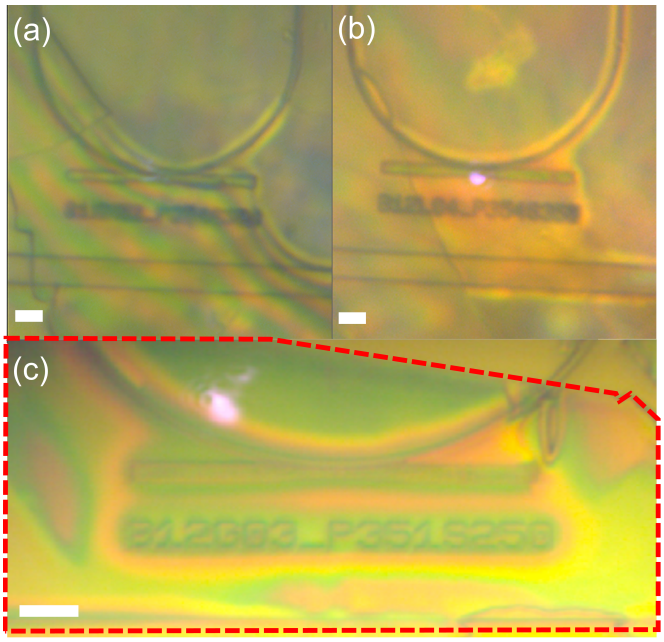

图 S-5. 空腔在 (a) 印章转印过程中、(b) 转印后以及 (c) 去除聚二甲基硅氧烷后的显微镜图像。比例尺为 5 μm。

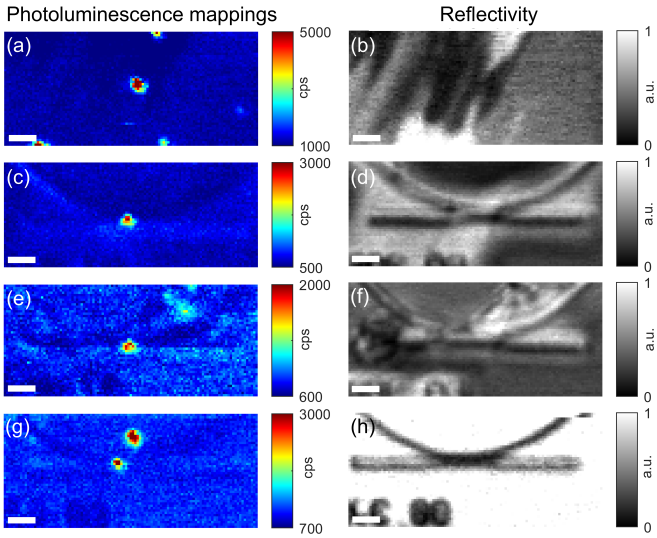

图 S-6. (a)-(b) 碳纳米管包覆的葱薄片以及 (c)-(d)、(e)-(f)、(g)-(h) 压印空腔的光致发光映射及相应的反射率。比例尺为 5 μm。

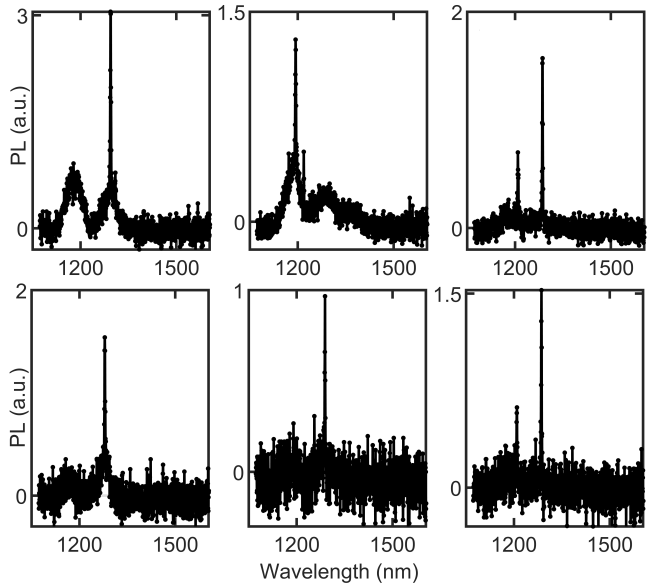

图 S-7. 780 nm 1.5 μW 激发下多个耦合碳纳米管的光致发光光谱 n.

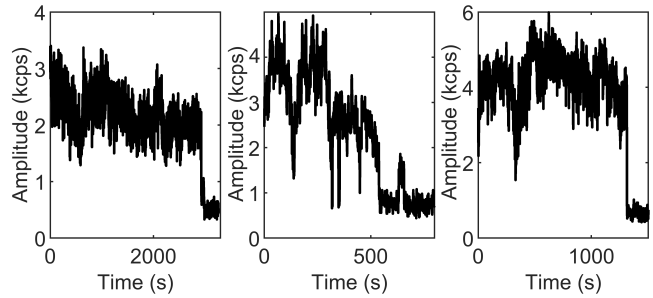

图 S-8. 电路耦合碳纳米管的发射强度随时间的变化。

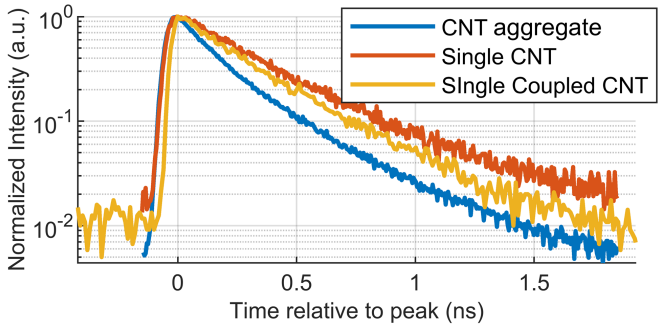

图 S-9. 碳纳米管聚集体（蓝色曲线）、单根碳纳米管（橙色曲线）和腔耦合碳纳米管（黄色曲线）的典型发射寿命测量结果。