
基于超辐射的始终相干的无阈值激光器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30952.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！

研究背景

传统激光器需要达到特定量的输入功率才能启动激光振荡。这个最低输入功率就称为激光阈值。在量子光学中，当腔内平均光子数达到激光阈值时，受激辐射过程变得比自发辐射更强。这个从非激光状态到激光状态的转变与凝聚态系统中的二阶相变有相似之处。激光阈值的存在通常归因于非激光模式的能量损失。在过去的研究中，研究者们通过提高从总发射到特定激光模式的能量传输效率（称为 β 参数），从而尽可能多的减少这种能量损失，最终实现无阈值的激光器。研究表明，通过将腔模式体积减少到波长尺度或更小，可以大幅增强Purcell效应，从而降低激光阈值。通过减少微米和纳米级腔中耦合到增益介质的腔模数量，可以使 β 参数接近于1。

然而，近期实验表明，当腔内平均光子数较小时，仅靠高的 β 参数并不能保证输出场的相干性。实验展示了低于传统阈值的热光子统计数据，尽管在对数尺度上可以观察到平滑的输出输入曲线，但在阈值附近没有出现任何突变。这表明，即使输入输出曲线中没有显示出激光阈值的存在，其也可能作为光子统计中的相变点持续存在。因此，无阈值激光器的实现仍然是一个重要的挑战。

近日，来自韩国首尔国立大学物理与天文学系及应用物理研究所的Kyungwon An教授团队提出了一种基于超辐射的始终相干的无阈值激光器，能够在不考虑腔内平均光子数的情况下产生相干光。该成果发表在国际顶尖期刊《Light: Science Applications》，题为Thresholdless coherence in a superradiant laser。

创新与亮点

针对无阈值激光器领域遇到的问题，研究人员基于福克-普朗克方程计算相干泵浦原子与腔场相互作用的半经典理论预测，这些原子在任何输入功率水平下都会发射相干光子，进一步提出了一种基于超辐射的始终相干的无阈值激光器，能够在不考虑腔内平均光子数的情况下产生相干光。具体而言，该激光器具有以下特点：

1. 该激光器由处于相同相位量子叠加态的双能级原子通过高品质因数（Q值）腔体实现。传统的超辐射需要在有限体积内有大量激发原子才能启动。研究人员使用了一种纳米孔阵列的原子相位掩模，在叠加态泵浦中的原子之间以及它们在交互时间 τ 内通过腔体时强制保持相位相关性，从而即使在高品质因数（Q值）腔体中的平均光子数少于一个，也实现了超辐射。
2. 观察到的超辐射激光没有发生在单位光子数附近的常规激光阈值，并且光子统计即使在低于该

阈值时仍保持接近相干状态。

3. 通过减少耦合常数以及叠加态中的激发态程度，进一步提高了相干性。

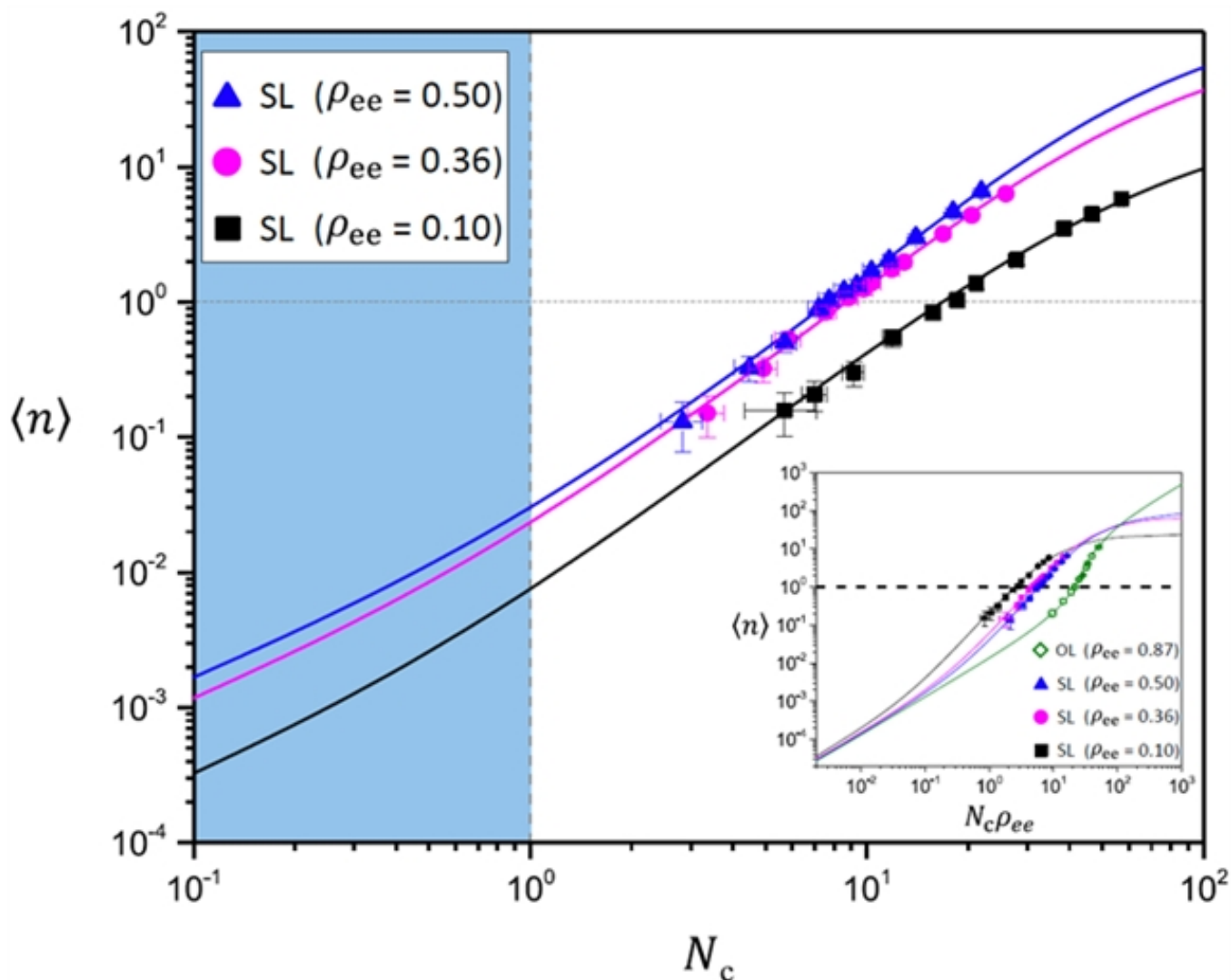


图1. 超辐射激光的输入输出曲线。腔内平均光子数 $\langle n \rangle$ （与输出功率成正比）相对于 N_c （与输入功率成正比）的函数曲线，针对三种不同相位相关的原子叠加态，分别表示为激发态群体 $\rho_{ee} = 0.10$ （黑色方块）， 0.36 （品红色圆圈）和 0.50 （蓝色三角形）。在对数图中，斜率拟合分别为 1.78 ± 0.13 （黑色）， 1.84 ± 0.05 （品红色），和 1.93 ± 0.06 （蓝色）。超辐射阈值出现在 $N_c = 1$ ，远低于此值（阴影区域）时自发辐射占主导，因此当作为 $\rho_{ee} N_c$ 的函数绘制时，所有三个曲线都收敛到斜率为1，如插图所示。

研究人员测量了在 Hanbury-Brown-Twiss（汉伯里·布朗及特维斯效应）配置下输出场的二阶相关性，对于选定的在0.1到10之间的各种腔内平均光子数（该范围很好地涵盖了预期的常规激光阈值位置），可以明显地观察到，即使平均光子数远小于1，相干光子统计仍然存在。这与在相同设置下仅进行粒子数反转的普通激光中观察到的热光子统计和相干光子统计之间的明显转变形成对比。通过减少原子叠加态中的激发态数量和降低原子-场耦合常数，提高了输出的相干性。实验结果表明，通过选择小的 ρ_{ee} 参数，可以使得超辐射激光的动态范围在腔内平均光子数上跨越了四个数量级，实现独立于腔内光子数的始终相干的无阈值激光。

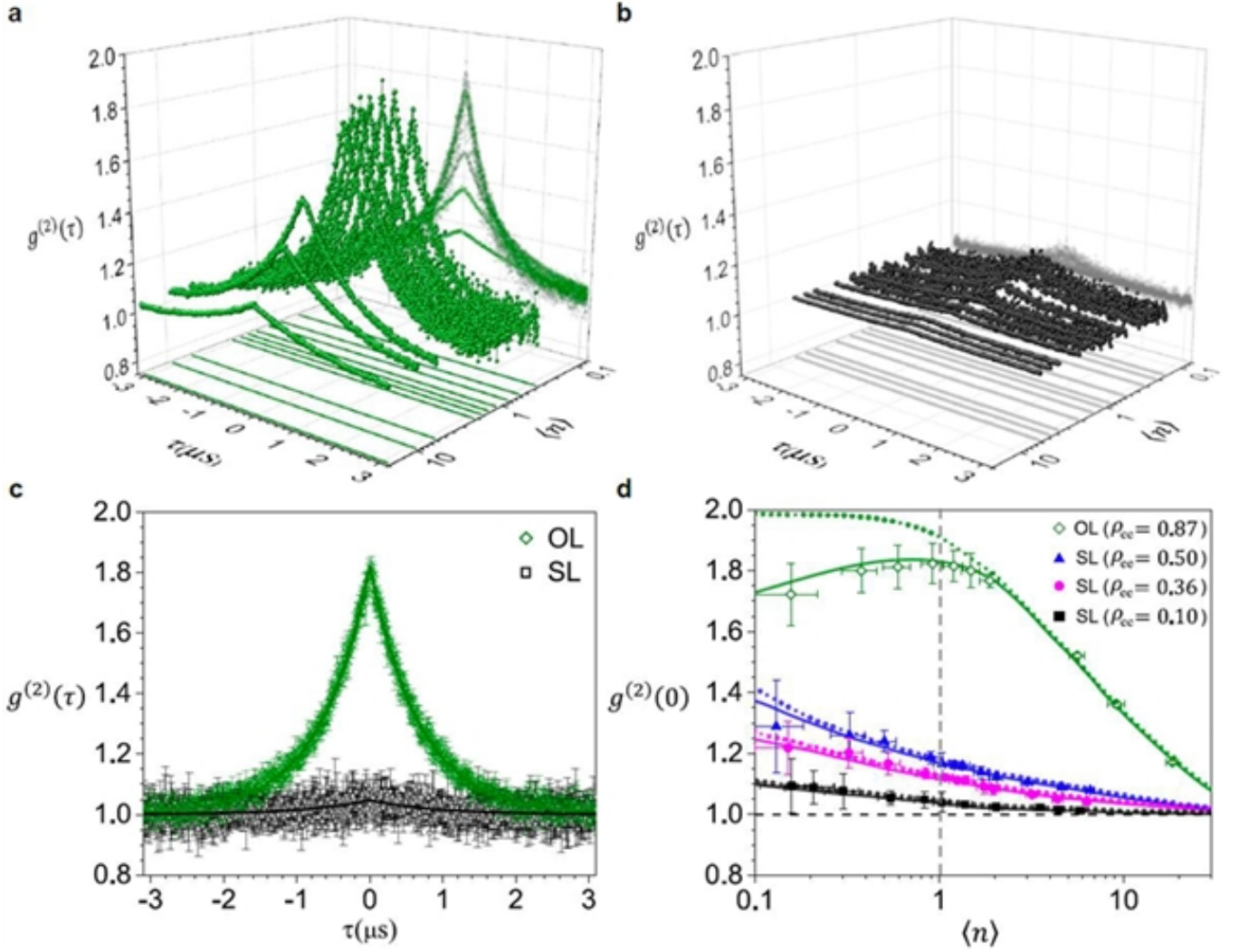


图2. 超辐射激光的二阶相关函数 $g^{(2)}(t)$ 。(a) 普通激光在没有原子相位相关的情况下使用激发态原子 ($\rho_{ee}=0.87$) 时的 $g^{(2)}(t)$ 演变, 采样的 $\langle n \rangle$ 值在0.1到10之间变化。(b) 超辐射激光使用叠加态 ($\rho_{ee}=0.10$) 时的 $g^{(2)}(t)$ 演变。(c) 比较两种情况下的 $g^{(2)}(t)$ 演变, 分别为 $\Theta=\pi$ (OL, 橄榄色圆圈) 和 $\Theta=0.64$ (SL, 黑色圆圈), 在相同的平均光子数 $\langle n \rangle=1.0$ 时, 接近普通激光的传统阈值。(d) 零时间延迟下的二阶相关函数 $g^{(2)}(0)$ 作为腔内平均光子数 $\langle n \rangle$ 的函数, 分别为 $\rho_{ee}=0.87$ (OL) 和 $\rho_{ee}=0.10, 0.36, 0.50$ (SL)。

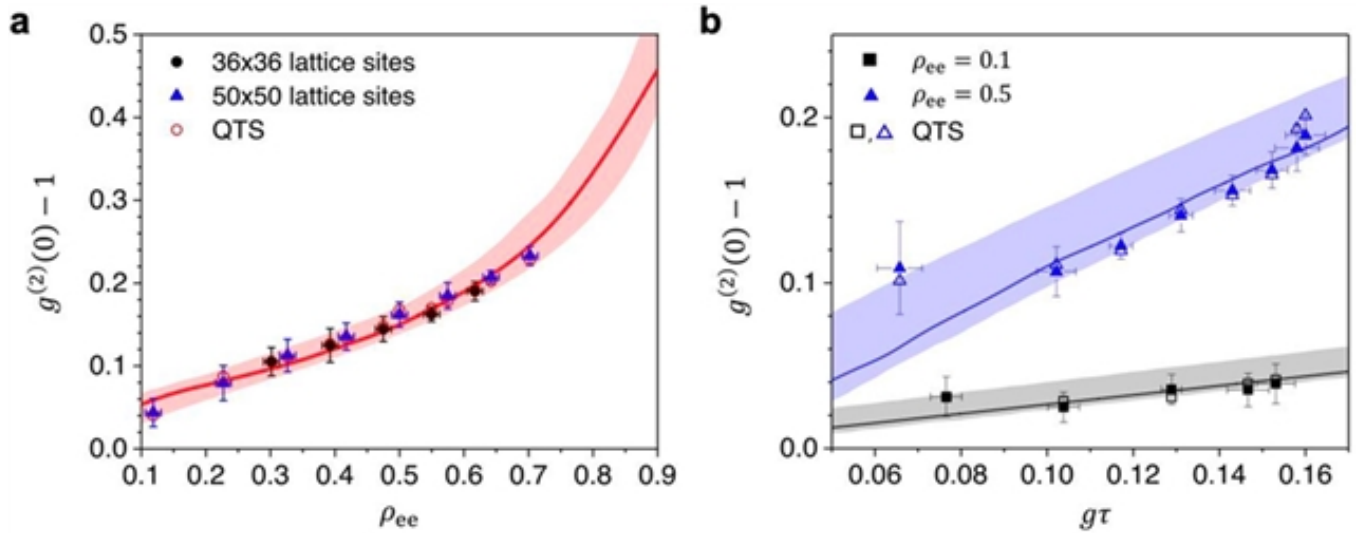


图3. 传统阈值附近二阶相关函数的群体和 $g\tau$ 依赖性。(a) 零延迟时间下的二阶相关函数 $g^{(2)}(0)$ 作为相位相关叠加态中激发态数 ρ_{ee} 的函数。原子数量 N_c 被调整以保持平均光子数 $\bar{n} \approx 1$ ，接近传统激光阈值。使用了两种不同的纳米孔阵列。(b) 固定 ρ_{ee} 为0.10或0.50，并将 τ 从0.065变化到0.16，同时保持平均光子数接近1时的结果。在(a)中的数据点中，实际的平均光子数在0.92到1.08之间变化，而在(b)中， $\rho_{ee}=0.1$ 时在0.88到1.03之间变化， $\rho_{ee}=0.5$ 时在0.90到1.12之间变化。

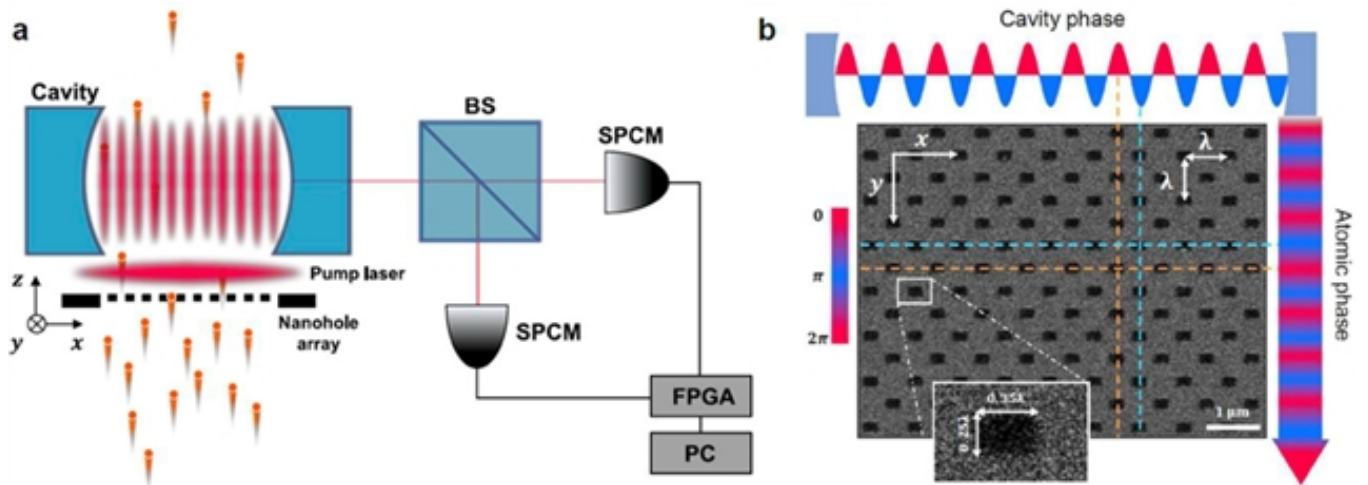


图4. 实验装置。(a) 用于光子统计测量的实验示意图。138Ba原子束通过孔间距等于原子跃迁波长的纳米孔阵列，并暴露在泵浦场（沿y方向）中，使所有原子激发到具有相同相位的叠加态。纳米孔与与原子共振的高Q值腔体的反节点对齐。腔体的输出被送入由50:50分束器（BS）和两个单光子计数模块（SPCMs）组成的Hanbury-Brown-Twiss装置。从使用现场可编程门阵列（FPGA）记录的两个探测器上的所有可能的计数事件中获得输出场的二阶相关性。(b)

用于超辐射激光实验的纳米孔阵列的扫描电子显微镜图像。每个矩形孔的尺寸为 $0.35\lambda \times 0.25\lambda$ 。

总结与展望

传统激光器需要达到激光阈值才能启动激光振荡，而仅通过提高从总发射到特定激光模式的能量传输效率（??参数）的方案受限于腔内平均光子数，无法完全实现无阈值激光器。Kyungwon An

教授团队提出了一种基于超辐射的始终相干的无阈值激光器，能够在不考虑腔内平均光子数的情况下产生相干光。这为使用诸如半导体量子点、氮空位中心和晶体中的掺杂离子等实用介质实现始终相干的无阈值超辐射激光开辟了道路。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01591-2>

作者：Kyungwon An 来源：《光：科学与应用》

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](https://www.iikx.com)转发