腔光子、激子和双激子的耦合动力学微观模拟

Hendrik Rose,[1] Stefan Schumacher,[1,2,3] 和 Torsten Meier[1,2]

[1] *Institute for Photonic Quantum Systems (PhoQS),Paderborn University, D-33098 Paderborn, Germany*

[2] *Department of Physics and Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn (CeOPP), Paderborn University, D-33098 Paderborn, Germany*[3] *Wyant College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA*(日期：2026年2月3日)

采用纳入多体库仑关联的全量子化微观方法，研究半导体纳米结构中量子光与物质激发之间的相干相互作用。数值模拟表明，量子动力学受到双激子连续态的影响，并且对腔模频率和光-物质耦合强度都高度敏感。

arXiv:2602.02105v1 [cond-mat.mes-hall] 2 Feb 2026

I. 引言

量子光-物质相互作用对于新兴的光子量子技术应用至关重要 [1–5]。半导体纳米结构和半导体-光子混合系统颇具吸引力，因为它们的性质可在很大范围内进行调控 [6]。量子点具有简单、离散的能级 [7–12], ，而量子阱和量子线等更大尺度的扩展结构则呈现更强但仍可调控的多体效应 [13–16]。这些系统的光学性质已通过微观半经典方法得到广泛而深入的研究，参见例如文献 [17–22], ；然而，这类方法无法捕捉涨落和纠缠等量子特征。包括库仑相互作用和量子光学效应在内的全量子化方法 [23–26] ，能够更准确地研究少光子过程和非线性量子过程。展示强耦合[27–29]和清晰少光子极化激元行为 [30, 31]的微腔实验，凸显了采用同一量子框架处理多体相互作用与光场的模型之必要性。在这项工作中，我们提出并分析了通过一种微观且全量子化的模型得到的数值模拟，该模型描述了微腔光子、激子和双激子之间的相互作用。

II. 理论模型

我们所考虑的系统由嵌入单模光学腔中的半导体纳米结构组成。电子和空穴由双带紧束缚模型描述，腔场则被视为量子化单模 [26]。描述系统动力学的总哈密顿量由下式给出

$$H = H_S + H_{LM} + H_C, \tag{1}$$

其中， H_S 包含单粒子电子能量和光子能量， H_{LM} 描述将光子转化为电子-空穴对及其逆过程的光-物质耦合而 H_C 则考虑光激发电子和空穴之间的多体库仑相互作用。

动力学在海森堡绘景中表述。正规序算符的期望值构成基本动力学变量，其耦合运动方程直接由哈密顿量 [6, 24, 26]得出。这里，我们假设腔模被初始化为双光子福克态，且电子系统最初处于其基态。由此产生一个耦合算符方程的层级；由于两个光子不能产生超过两个电子-空穴对，该层级会自然闭合。因此无需截断，有限的一组运动方程即可精确描述系统动力学。基于相干性的约化方案进一步简化了这些方程，并极大地降低了数值计算量，因为只需双光子相干、光子-激子相干和双激子相干，即可完整刻画系统的全部动力学[26]。

平均光子数定义为 $\langle b^\dagger b\rangle$，其中 $b^\dagger$和 b 分别是光子产生算符和湮灭算符。其时间演化遵循海森堡方程，

$$\frac{d}{dt}\langle b^\dagger b\rangle = \frac{i}{\hbar}\langle [H, b^\dagger b]\rangle, \tag{2}$$

如上所述，该方程与物质、光子以及物质和光子混合期望值的动力学相耦合。由此得到的运动方程组可以通过数值方法求解。更多细节见参考文献 26。

III. 结果

图 1 展示了在不同失谐 δ （腔光子能量 E_c 与 1s 激子能量 E_X 之间，且 $\delta = E_c - E_X$）下，平均光子数 $\langle b^\dagger b\rangle$ 的动力学数值模拟结果。数值模拟所用的参数分别为 $K = 60$、$U_0 = 20\,\mathrm{meV}$、 $J_c = 20\,\mathrm{meV}$、 $J_v = 2$ meV、 $a_0/d = 0.5$。光-物质耦合为 $M_0 = 1\,\mathrm{meV}$

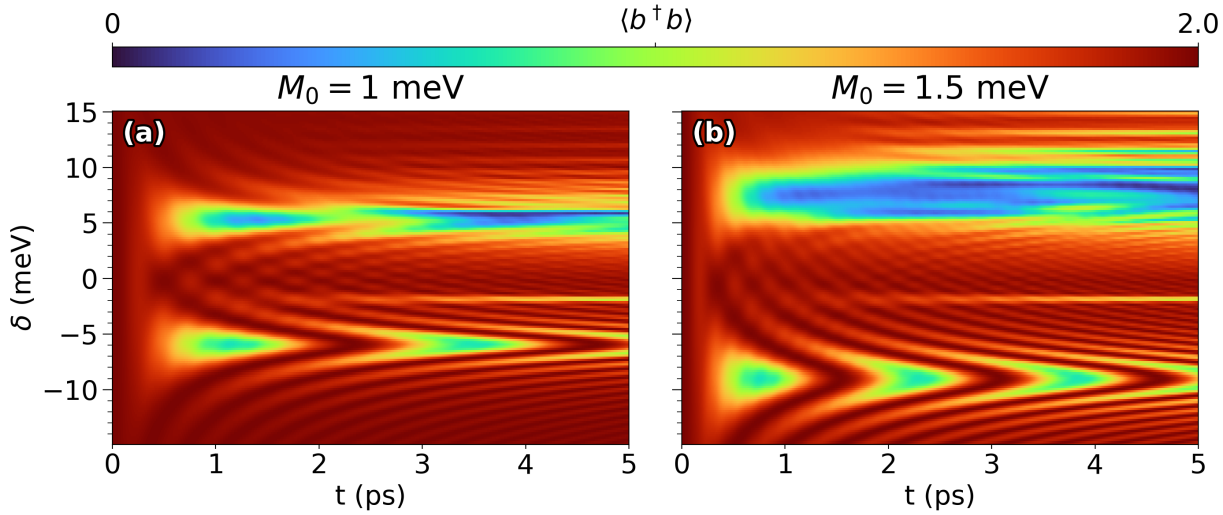

图 1. 使用正文给出的参数对式 (2) 进行的数值模拟。

图 1(a) 中为 $M_0 = 1.5$ meV，图 1(b) 中为 $M_0 = 1.5$ meV；有关模型和参数的详细说明，请参阅参考文献 26。

我们的模型参数给出的 1s 激子和双激子束缚能分别为$X_b \approx 20.06$meV 和 $XX_b \approx 3.82$ meV。因此，带隙处的激发对应于 $\delta \approx 20.06$meV，高于我们在图 1 中所考虑的激子能量附近的光谱范围。在图 1(a) 和 (b) 中于 $\delta \approx -1.9$ meV 处可见的弱吸收特征，即光子数的瞬态减少，与双激子束缚能的一半（即$-XX_b/2$）吻合良好，因而为束缚双激子态的存在及其激发提供了明确证据。最值得注意的是，光谱位置与 M_0 无关。

此外，当腔模与 1s 激子共振时，即在 $\delta = 0$处，我们没有观察到显著的吸收。相反，在远低于激子能量的失谐处会出现拉比振荡。由于仅包含束缚态的简化模型中并未出现这种位移 [26], ，因此它可归因于与非束缚双激子态连续谱之间较强的有效耦合。这会导致显著的正常模分裂，使共振发生位移。这一解释得到如下事实的支持：更强的光-物质耦合 M_0 会产生更大的分裂，参见图 1(a) 和 (b)。尽管存在这种位移，相应的拉比振荡仍保有激子特性，其频率随 M_0增加。此外，我们发现，在 $\delta \approx 5$ meV 及以上的一个谱区内，平均光子数显著降低。这一特征与激发至非束缚双激子态连续谱相符。同样，例如仅包含 1s 激子和束缚双激子态的少态模型也无法描述这种行为。尽管将非束缚双激子纳入其中的扩展简化模型在现象学上可能会呈现类似的共振位移，但它们无法定量再现这一效应 [26]。

IV. 结论

我们考虑一个完全量子化的微观模型，用以描述双光子福克态与半导体纳米结构之间的光与物质相互作用。我们给出了平均光子数的数值结果，其呈现出显著的共振位移、以激子特性为主的拉比振荡，以及对束缚双激子的弱吸收。这些结果无法由仅包含束缚激子态和双激子态的简化模型所刻画。因此，我们的结果表明，要对与量子光相互作用的半导体纳米结构进行准确建模，必须进行细致的微观分析。未来工作的一个有趣方向是将该模型推广到多模场和更一般的光子统计，不过超过二的光子数将需要新的截断策略。

致谢

我们感谢德国研究联合会（DFG）通过合作研究中心“定制非线性光子学”TRR 142/3（项目编号 231447078，子项目 A02）提供的经费支持。作者衷心感谢帕德博恩 NHR 中心并行计算中心（PC²）提供的 Noctua 2 高性能计算机计算时间。该中心由联邦教育与研究部以及参与 NHR 的各州政府共同支持（www.nhr-verein.de/unsere-partner）。

[1] J. Wang、F. Sciarrino、A. Laing 和 M. G. Thompson，《集成光子量子技术》，《自然·光子学》**14**，273（2020）。[2] E. Pelucchi、G. Fagas、I. Aharonovich、D. Englund、E. Figueroa、Q. Gong、H. Hannes、J. Liu、C.-Y. Lu、N. Matsuda、*et al.*，《集成光子学在量子技术领域的潜力与全球展望》，《自然综述：物理》**4**，194（2022）。[3] G. Moody、V. J. Sorger、D. J. Blumenthal、P. W. Juodawlkis、W. Loh、C. Sorace-Agaskar、A. E. Jones、K. C. Balram、J. C. Matthews、A. Laing、*et al.*，《2022年集成量子光子学路线图》，《物理学杂志：光子学》**4**，012501（2022）。[4] W. Luo、L. Cao、Y. Shi、L. Wan、H. Zhang、S. Li、G. Chen、Y. Li、S. Li、Y. Wang、S. Sun、M. F. Karim、H. Cai、L. C. Kwek 和 A. Q. Liu，《量子通信与互联网量子光子芯片的最新进展》，《光：科学与应用》**12**，175（2023）。[5] L. G. Helt、M. Liscidini 和 J. E. Sipe，《其规模如何扩展？集成器件中量子与经典非线性光学过程的比较》，《美国光学学会杂志 B》**29**，2199（2012）。[6] M. Kira 和 S. W. Koch，*Semiconductor Quantum Optics*（剑桥大学出版社，剑桥，2011）。[7] P. Michler、A. Kiraz、C. Becher、W. V. Schoenfeld、P. M. Petroff、L. Zhang、E. Hu 和 A. Imamoglu，《量子点单光子闸门器件》，《科学》**290**，2282（2000）。[8] D. Heinze、A. Zrenner 和 S. Schumacher，《来自量子点双光子发射的偏振纠缠双光子》，《物理评论 B》**95**，245306（2017）。[9] T. K. Bracht、M. Cosacchi、T. Seidelmann、M. Cygorek、A. Vagov、V. M. Axt、T. Heindel 和 D. E. Reiter，《利用失谐脉冲激发量子发射体布居》，《PRX Quantum》**2**，040354（2021）。[10] B. Jonas、D. Heinze、E. Sch¨oll、P. Kallert、T. Langer、S. Krehs、A. Widhalm、K. D. J¨ons、D. Reuter、S. Schumacher 和 A. Zrenner，《单个量子点中的非线性下转换》，《自然·通讯》**13**，1387（2022）。[11] D. Bauch、N. K¨ocher、N. Heinisch 和 S. Schumacher，《确定性生成线性光子簇态中的时间-bin纠缠》，《APL Quantum》**1**，036110（2024）。[12] S. K. Kim、E. Z. Casalengua、K. Boos、F. Sbresny、C. Calcagno、H. Riedl、J. J. Finley、C. Ant´on-Solanas、F. P. Laussy、K. M¨uller、L. Hanschke 和 E. del Valle，《通过平均场工程释放单光子源的多光子发射》，《科学进展》**11**，eadw3395（2025）。[13] C. Weisbuch、M. Nishioka、A. Ishikawa 和 Y. Arakawa，《半导体量子微腔中激子-光子耦合模分裂的观测》，《物理评论快报》**69**，3314（1992）。[14] H. Deng、H. Haug 和 Y. Yamamoto，《激子-极化激元玻色-爱因斯坦凝聚》，《现代物理评论》**82**，1489（2010）。[15] I. Rosenberg、Y. Mazuz-Harpaz、L. Lovisa、Y. Harel、K. West、L. Pfeiffer 和 R. Rapaport，《强相互作用偶极极化激元》，《科学进展》**4**，eaat8880（2018）。[16] C. L¨uders, M. Pukrop, F. Barkhausen, E. Rozas, C. Schneider, S. H¨ofling, J. Sperling, S. Schumacher, and M. Aßmann，《利用时间分辨层析成像追踪极化激元凝聚态中的量子相干性》，《物理评论快报》**130**，113601（2023）。[17] J. J. Hopfield，《激子对晶体复介电常数贡献的理论》，《物理评论》**112**，1555（1958）。[18] C. Sieh, T. Meier, A. Knorr, F. Jahnke, P. Thomas, and S. W. Koch，《载流子关联对激子光学响应的影响：包括无序和微腔效应》，《欧洲物理学报B》**11**，407（1999）。[19] S. W. Koch, M. Kira, and T. Meier，《半导体激子光学性质中的关联效应》，《光学杂志B：量子与半经典光学》**3**，R29（2001）。[20] T. Meier and S. W. Koch，《半导体激子光学非线性中的库仑关联特征》，载于 *Ultrafast Physical Processes in Semiconductors*《半导体与半金属》，第67卷，K. T. Tsen 编（爱思唯尔，阿姆斯特丹，2001），第231–313页。[21] H. Haug and S. W. Koch，*Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors* 5，第版（世界科技出版公司，新加坡，2009）。[22] M. Kira and S. W. Koch，《半导体的量子光学光谱学》，《物理评论 A》**73**，013813（2006）。[23] E. V. Denning, A. Knorr, F. Katsch, and M. Richter，《原子级薄半导体中双激子参量增益产生的高效正交压缩》，《物理评论快报》**129**，097401（2022）。[24] H. Rose, A. N. Vasil'ev, O. V. Tikhonova, T. Meier, and P. R. Sharapova，《利用双能带模型和单模量子场研究微腔中半导体纳米结构的量子光学激发》，《物理评论 A》**107**，013703（2023）。[25] H. Rose, P. R. Sharapova, and T. Meier，《与量子光耦合的激子多体关联动力学的微观模拟》，*Proc. SPIE*，**12884**，1288403（2024）。[26] H. Rose, S. Schumacher, and T. Meier，《半导体纳米结构中量子化光与物质相互作用的微观方法：激子、双激子与光子的复杂耦合动力学》，《物理评论 B》**112**，245304（2025）。[27] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, and Y. Arakawa，《半导体量子微腔中耦合激子—光子模分裂的观测》，《物理评论快报》**69**，3314（1992）。[28] J. Rarity and C. Weisbuch，编，*Microcavities and Photonic Bandgaps: Physics and Applications*，北约科学系列 E，第324卷（施普林格，1996）。[29] G. Khitrova, H. M. Gibbs, F. Jahnke, M. Kira, and S. W. Koch，《简正模耦合半导体微腔的非线性光学》，《现代物理评论》**71**，1591（1999）。[30] A. Cuevas, J. C. L´opez Carre˜no, B. Silva, M. De Giorgi, D. G. Su´arez-Forero, C. S´anchez Mu˜noz, A. Fieramosca, F. Cardano, L. Marrucci, V. Tasco, *et al.*，《量子化激子极化激元场的首次观测及相互作用对单个极化激元的影响》，《科学进展》**4**，eaao6814（2018）。

[31] J. Shang, X. Zhang, V. L. Zhang, X. Zhang, and T. Yu, 《二维半导体微腔中的激子—光子相互作用》，ACS Photonics **10**，2064（2023）。