

Неразрушающее детектирование оптического фотона

А. Рейсерер и др. (Германия)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1311.3625v1 [quant-ph] 14 Nov 2013

Nondestructive Detection of an Optical Photon

Andreas Reiserer, Stephan Ritter (stephan.ritter@mpq.mpg.de) and **Gerhard Rempe**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Strasse 1, 85748 Garching, Germany

На сегодняшний момент все оптические детекторы при детектировании уничтожают фотон, что исключает повторные измерения. В данной публикации демонстрируется надежная схема детектирования, не связанная с поглощением. Вместо этого поступающий фотон отражается в оптический резонатор, содержащий единственный атом в состоянии суперпозиции двух состояний. Отражение переключает фазу суперпозиции, которая затем измеряется, чтобы отследить фотон. При использовании слабых лазерных импульсов эффективность детектирования единичного фотона составляет примерно 74% и достигается вероятность выживания 66%. Далее эффективность может быть увеличена за счет повторного наблюдения фотона. Сильная нелинейность единичного фотона в эксперименте должна обеспечить развитие квантовых средств фотоники и приготовление новых квантовых состояний света.

Неразрушающее детектирование имеет два главных применения. Во-первых, единичный фотон может быть детектирован неоднократно. Таким образом, соединение некоторых устройств повышает эффективность детектирования единичных фотонов. Во-вторых, неразрушающее детектирование может служить в качестве запускающего сигнала, свидетельствующего о наличии фотона, без его влияния на другие степени свободы, подобно его форме или поляризации. Это полностью отличается от случая поглощающих детекторов, когда квантовое состояние проектируется и, следовательно, уничтожается. Оба применения имеют огромную важность для быстропротекающих полевых процессов, таких, как квантовые измерения [5], оптические квантовые вычисления [6] и квантовые коммуникации и сетевые приложения [7, 8].

Механизм взаимодействия [9], который предлагается использовать, основан на принципах квантовой электродинамики резонатора, замечательно устойчивых и применимых к многочисленным различным физическим системам. Он позволяет неразрушающим образом детектировать распространяющиеся оптические фотоны и, таким образом, осуществлять полные эксперименты с микроволновыми полями, замороженными в сверхпроводящие резонаторы [10 – 12]. В конечном счете слабый лазерный импульс отражается из резонатора, в котором был приготовлен замороженный атом, приготовленный в состоянии суперпозиции двух внутренних состояний. Резонатор индуцирует сильную связь между световым импульсом и атомом в одном из атомных состояний, но не в другом. Это приводит к опрокидыванию фазы атомного состояния суперпозиции при отражении фотона. Последовательный отсчет атомной фазы, таким образом, делает возможным детектировать фотон без его поглощения.

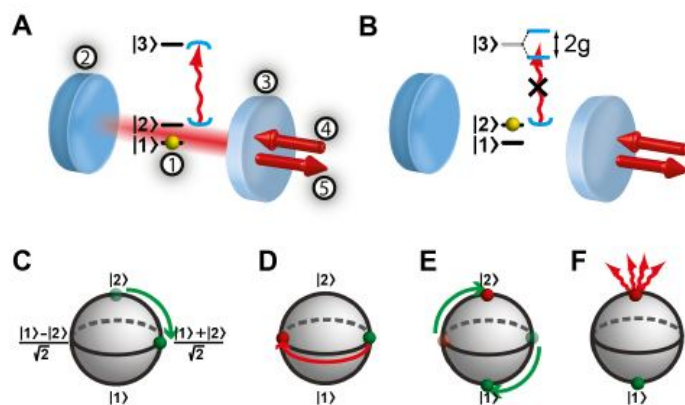


Рисунок 1. Неразрушающее детектирование фотона. (А,В) Схема установки и схема атомных уровней. Единичный атом (1) в заморожен в оптический резонатор, который состоит из сильного резонатора (2) и сопрягающего зеркала (3). Резонирующий фотон попадает на (4) и отражается от (5), резонатор. (А) Если атом находится в состоянии $|1\rangle_a$, фотон (красная искривленная стрелка) поступает в резонатор (голубые полуокружности), чтобы потом отразиться. В этом процессе совместное состояние атом-фотон испытывает фазовый сдвиг на π . (В) Если атом находится в состоянии $|2\rangle_a$, сильная связь на переход $|2\rangle_a \leftrightarrow |3\rangle_a$ приводит к расщеплению нормальной моды $2g$, так что фотон не может попасть в резонатор и непосредственно отражается без фазового сдвига. (С - F) Процедура для измерения того, отразился ли фотон или нет. (С) Атомное состояние, визуализированное на сфере Блоха, приготовлено в состоянии суперпозиции $\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_a + |2\rangle_a)$. (D) Если фотон отражается, атомное состояние переходит в $\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_a - |2\rangle_a)$. (E) Атомное состояние поворачивается на $\pi/2$. (F) Для различения между состояниями $|1\rangle_a$ и $|2\rangle_a$ используется флуоресцентное детектирование.

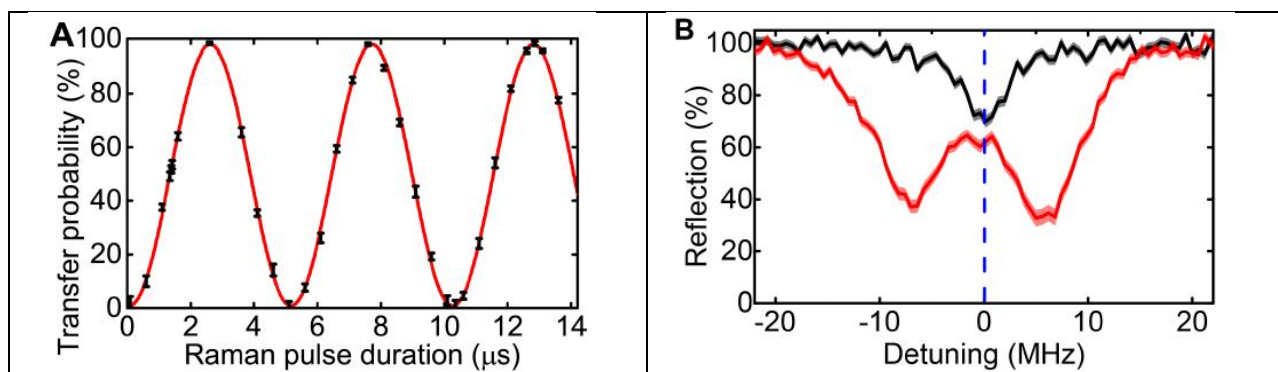


Рисунок 2. Манипулирование атомным состоянием и спектр отражения резонатора. (А) Осцилляции Раби атомной популяции, когда атом приготовлен в состоянии $|2\rangle_a$ и для управления длительностью приложены два рамановских лазерных пучка. Красная сглаженная кривая показывает видимость 97%. (В) Обратное отражение системы атом-резонатор как функция пробной частоты лазера с атомом в сильно связанном состоянии $|2\rangle_a$ (красная линия) или в несвязанном состоянии $|1\rangle_a$ (черная линия). Статистическая стандартная ошибка показана толщиной линий.

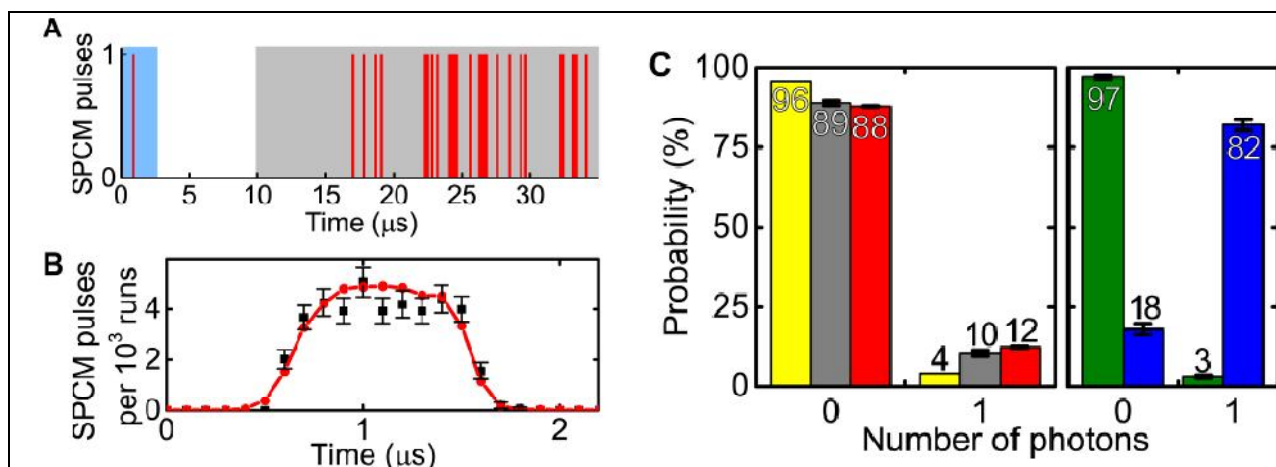


Рисунок 3. Экспериментальные результаты. (А) Типичный след экспериментальной реализации (красная полоса), попадающий в триггерный интервал (голубая область) приводит к испусканию многих фотонов в интервале отсчета (серая область). Когда входной импульс блокируется, ни одного фотона не детектируется в обоих интервалах. (В) Временная оболочка отраженного фотонного импульса при наличии атома (черные квадратики) в сравнении с опорной реализацией в отсутствие атома (красные точки). С учетом ошибок, не наблюдается отклонения в форме импульса, за исключением малого изменения амплитуды, возникающих вследствие немного отличных отражений, см. рис. 2В. (С) Неразрушающее детектирование единичного фотона. Показана вероятность не детектировать ни одного фотона или детектировать один фотон (число фотонов отложено по горизонтальной оси). Желтый цвет: результат SPCM¹-детектирования. Серый цвет: Расчетный входной импульс, учитывающий эффективность SPCM-детектирования. Красный цвет: результат отсчета атомного состояния. Зеленый цвет: отсчет атомного состояния без отраженного света. Синий цвет: атомное состояние, обусловленное SPCM-детектированием отраженного фотона в триггерном интервале.

Ссылки

- [1] R. J. Glauber, The quantum theory of optical coherence. Phys. Rev. 130, 2529-2539 (1963).
- [2] L. Mandel, E. Wolf, Optical Coherence and Quantum Optics (Cambridge University Press, 1995).
- [3] V. B. Braginsky, F. Y. Khalili, Quantum nondemolition measurements: the route from toys to tools. Rev. Mod. Phys. 68, 1-11 (1996).
- [4] P. Grangier, J. A. Levenson, J.-P. Poizat, Quantum nondemolition measurements in optics. Nature 396, 537-542 (1998).
- [5] H. M. Wiseman, G. J. Milburn, Quantum Measurement and Control (Cambridge University Press, 2009).
- [6] J. L. O'Brien, Optical quantum computing. Science 318, 1567-1570 (2007).
- [7] N. Gisin, R. Thew, Quantum communication. Nature Photon. 1, 165-171 (2007).
- [8] H. J. Kimble, The quantum internet. Nature 453, 1023-1030 (2008).
- [9] L.-M. Duan, H. J. Kimble, Scalable photonic quantum computation through cavity-assisted interactions. Phys. Rev. Lett. 92, 127902 (2004).

¹ SPCM – single-photon counting module (однофотонный счетный модуль).

- [10] G. Nogues et al., Seeing a single photon without destroying it. *Nature* 400, 239-242 (1999).
- [11] C. Guerlin et al., Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting. *Nature* 448, 889-893 (2007).
- [12] B. R. Johnson et al., Quantum non-demolition detection of single microwave photons in a circuit. *Nature Phys.* 6, 663-667 (2010).
- [13] J. Cho, H.-W. Lee, Generation of atomic cluster states through the cavity input-output process. *Phys. Rev. Lett.* 95, 160501 (2005).
- [14] J. Bochmann et al., Lossless state detection of single neutral atoms. *Phys. Rev. Lett.* 104, 203601 (2010).
- [15] Materials and methods are available as supplementary material on Science Online.
- [16] A. Reiserer, C. Nölleke, S. Ritter, G. Rempe, Groundstate cooling of a single atom at the center of an optical cavity. *Phys. Rev. Lett.* 110, 223003 (2013).
- [17] D. F. Walls, G. J. Milburn, *Quantum Optics* (Springer, 2008).
- [18] W. Chen et al., All-optical switch and transistor gated by one stored photon. *Science* 341, 768-770 (2013).
- [19] L. M. K. Vandersypen, I. L. Chuang, NMR techniques for quantum control and computation. *Rev. Mod. Phys.* 76, 1037-1069 (2005).
- [20] R. H. Hadfield, Single-photon detectors for optical quantum information applications. *Nature Photon.* 3, 696-705 (2009).
- [21] M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S. V. Polyakov, Single-photon sources and detectors. *Rev. Sci. Instrum.* 82, 071101 (2011).
- [22] F. Marsili et al., Detecting single infrared photons with 93% system efficiency. *Nature Photon.* 7, 210-214 (2013).
- [23] Y. Colombe et al., Strong atom-field coupling for Bose-Einstein condensates in an optical cavity on a chip. *Nature* 450, 272-276 (2007).
- [24] B. Dayan et al., A photon turnstile dynamically regulated by one atom. *Science* 319, 1062-1065 (2008).
- [25] C. Junge, D. O'Shea, J. Volz, A. Rauschenbeutel, Strong coupling between single atoms and nontransversal photons. *Phys. Rev. Lett.* 110, 213604 (2013).
- [26] J. D. Thompson et al., Coupling a single trapped atom to a nanoscale optical cavity. *Science* 340, 1202-1205 (2013).
- [27] B. Wang, L.-M. Duan, Engineering superpositions of coherent states in coherent optical pulses through cavity-assisted interaction. *Phys. Rev. A* 72, 022320 (2005).
- [28] A. S. Sørensen, K. Mølmer, Measurement induced entanglement and quantum computation with atoms in optical cavities. *Phys. Rev. Lett.* 91, 097905 (2003).
- [29] Y.-F. Xiao et al., Realizing quantum controlled phase flip through cavity QED. *Phys. Rev. A* 70, 042314 (2004).
- [30] L.-M. Duan, B. Wang, H. J. Kimble, Robust quantum gates on neutral atoms with cavity-assisted photon scattering. *Phys. Rev. A* 72, 032333 (2005).
- [31] D. L. Moehring et al., Entanglement of single-atom quantum bits at a distance. *Nature* 449, 68-71 (2007).
- [32] C. Nölleke et al., Efficient teleportation between remote single-atom quantum memories. *Phys. Rev. Lett.* 110, 140403 (2013).