

## Устранение влияния потерь на квантовую запутанность

А. Е. Уланов<sup>1,2</sup>, И. А. Федоров<sup>1,3</sup>, А. А. Пушкина<sup>1,2,3</sup>, Ю. В. Курочкин<sup>1</sup>, Т. Ральф<sup>4</sup>, А. И. Львовский<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Сколково

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>3</sup>Физический институт им. Лебедева

<sup>4</sup>Centre for Quantum Computation and Communication Technology, School of Mathematics and Physics, University of Queensland

<sup>5</sup>Institute for Quantum Science and Technology, University of Calgary

Протоколы квантовой коммуникации, телепортации и квантовых вычислений используют для своих целей корреляции между удаленными подсистемами – квантовую запутанность [1]. Однако, данные подсистемы подвержены влиянию внешней среды, вследствие чего запутанность деградирует. Одним из решений этой проблемы является квантовая дистилляция - метод усиления запутанности между подсистемами [2]. В данной работе предложен протокол квантовой дистилляции оптического ресурса запутанности в непрерывных переменных, а также продемонстрированы экспериментальные результаты дистилляции запутанного состояния в распространенном на практике случае низкой начальной запутанности и больших потерь.

В качестве ресурса запутанности использовалось состояние двухмодового сжатого вакуума [3] - оптические моды А и В (рис. 1), приготовленного методом спонтанного параметрического рассеяния. В первом приближении при малом параметре сжатия данное состояние может быть записано в фоковском базисе следующим образом:

$$|\psi_{in}\rangle = |00\rangle - \gamma|11\rangle \quad (1)$$

В основе предлагаемого метода дистилляции лежит процесс бесшумового усиления [4], носящий название квантовый катализ [5]. Он заключается в следующем. Прошедшая через канал с потерями мода В интерферирует с одиночным фотоном на светоделителе с малым коэффициентом отражения  $r \ll 1$ . На выходе светоделителя, соответствующем прохождению моды В через него, расположен однофотонный детектор. Сигнал данного детектора при регистрации фотона говорит об успешном осуществлении катализа. Фотон может быть зарегистрирован в двух случаях: (а) если одиночный фотон отразится от светоделителя с амплитудой вероятности  $r$  или (б) если фотон в моде В пройдет через

светодетектор с амплитудой вероятности  $\gamma\tau$ , где  $\tau$  - коэффициент пропускания канала с потерями.

Учитывая малость параметров  $\gamma \ll 1$ ,  $r \ll 1$  и  $\tau \ll 1$  выходное состояние хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$|\psi_{out}\rangle = r|00\rangle - \gamma\tau|11\rangle \quad (2)$$

Результатом катализа является уменьшение доли вакуума, что эквивалентно бесшумовому усилению с амплитудой  $g=1/r$ . При амплитуде усиления  $g=1/(\gamma\tau)$  дистиллированное состояние достигает начального уровня запутанности.

В отличие от предлагаемых ранее протоколов дистилляции запутанности в непрерывных переменных, основанных на вычитании фотона [6,7] и способных усилить запутанность не более чем в два раза, описанный выше метод квантового катализа позволяет восстановить запутанность после произвольно высоких потерь. В нашем эксперименте потери составляли 95%. Было показано, что величина запутанности дистиллированного состояния в нашем эксперименте превышает величину запутанности идеально чистого, бесконечно запутанного состояния, прошедшего через те же потери.

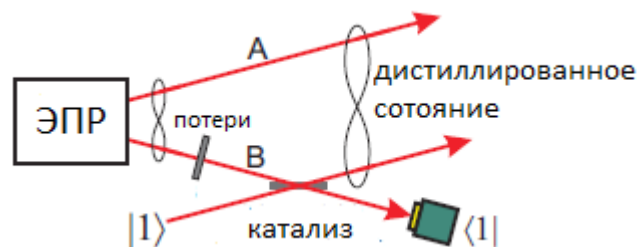


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, ЭПР – источник состояний Эйнштейна-Подольского-Розена (в данном эксперименте - двухмодового сжатого вакуума).

Для характеристики квантовых состояний в описываемом эксперименте использовался метод гомодинной томографии (рис. 2). Величина сжатия (запутанности) определялась по дисперсии суммы и разности квадратур мод A и B. Для двухмодового сжатого вакуума данная зависимость выглядит следующим образом:

$$\langle (X_A \mp X_B)^2 \rangle = e^{\mp 2\gamma} \quad (3)$$

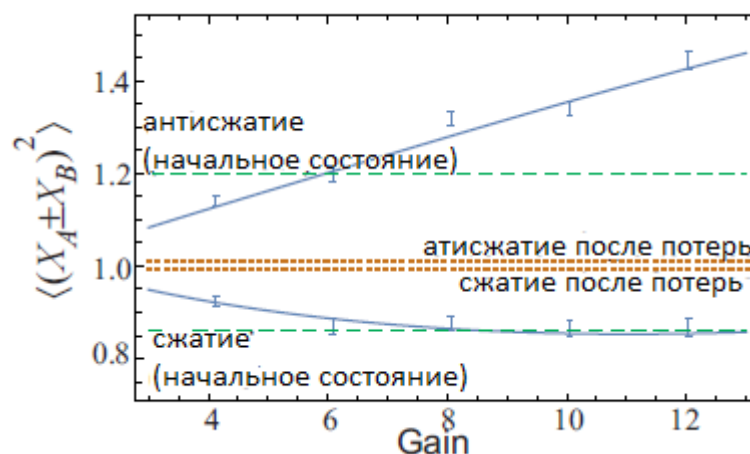


Рис. 2. Результаты эксперимента: зависимость дисперсии суммы и разности квадратур от амплитуды усиления.

#### Литература

1. *Nielsen M. and Chuang I.* Quantum computation and quantum information. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 700 p.
2. *Bennett C. [et al.].* Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy channels. - Phys. Rev. Lett. – Vol. 76. - 1996.
3. *Reid M.D.* Demonstration of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox using nondegenerate parametric amplification. - Phys. Rev. A. - Vol. 40. - 1989.
4. *Ralph T.C. and Lund A.P.* Nondeterministic Noiseless Linear Amplification of Quantum Systems, Quantum Communication Measurement and Computing. - Proceedings of 9th International Conference, Lvovsky, A. (editor). - AIP, New York. - 2009.
5. *Lvovsky A.I., Mlynek J.* Quantum-Optical Catalysis: Generating Nonclassical States of Light by Means of Linear Optics. - Phys.Rev.Lett. –Vol. 88. – 2002.
6. *Takahashi H., Neergaard-Nielsen J.S., Takeuchi M., Takeoka M., Hayasaka K., Furusawa A., Sasaki M.* NonGaussian entanglement distillation for continuous variables. - Nature Photonics 4. - 2010.
7. *Kurochkin Y., Prasad A.S. and Lvovsky A.I.* Distillation of the two-mode squeezed state. - Phys. Rev. Lett. 112. - 2014.