

09.2;09.7;11.3;13.4

Источник квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника с управляемым интегрально-оптическим светоделителем

© В.В. Лебедев^{1,2}, В.М. Петров¹, И.В. Ильичев^{1,2}, П.М. Агрозин^{1,2}, А.В. Шамрай^{1,2,¶}¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: achamrai@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2021 г.

В окончательной редакции 14 июля 2021 г.

Принято к публикации 15 июля 2021 г.

Разработан широкополосный источник квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника. Точная электрооптическая настройка схемы балансного фотоприемника осуществлялась при помощи интегрально-оптического светоделителя, изготовленного на подложке ниобата лития в виде интерферометра Маха–Цендера с двойным выходом. Классическая составляющая детектируемых шумов, связанная с относительным шумом интенсивности лазерного диода, была подавлена более чем на 15 dB. При максимальной мощности лазерного излучения 100 mW уровень детектируемого дробового шума в частотной полосе свыше 3 GHz на 12 dB превышал уровень технических шумов измерительной системы.

Ключевые слова: квантовый генератор случайных чисел, флуктуации вакуума, измерение дробового шума, интегральная оптика, ниобат лития.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51620.18870

Генераторы истинно случайных чисел востребованы для решения многих практических задач [1–3]. Детектирование дробового шума балансного фотоприемника является одним из наиболее эффективных методов построения аналоговой части данных генераторов — источника квантового шума [4–10]. В качестве физического источника энтропии используются квантовые флуктуации вакуума, а техническая реализация основана на их гомодинном детектировании в виде дробового шума балансного фотоприемника при прохождении лазерного излучения через светоделитель. Балансный фотоприемник подавляет синфазную компоненту классического шума интенсивности источника лазерного излучения и позволяет детектировать дробовой шум, который при высокой оптической мощности значительно превосходит технические шумы измерительной системы. Важным параметром является полоса частот регистрируемого дробового шума [6]. Экспериментально достигнутая максимальная полоса частот источников квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника составляет ~ 1 GHz [8,9], что обусловлено техническими проблемами точной фазировки и балансировки схем на так называемой „объемной“ оптике.

Интегрально-оптические светоделители на основе кремниевых оптических волноводов [10] имеют высокое поглощение и фоточувствительность на телекоммуникационных длинах волн (1500–1600 nm), что создает источники дополнительных классических шумов и ограничивает максимальную оптическую мощность, а примененное в [10] для активной подстройки термоэлектриче-

ское управление имеет высокую инерцию и не подходит для широкополосных устройств.

Нами предложен и экспериментально реализован широкополосный источник квантового шума, использующий в качестве управляемого светоделителя интегрально-оптический модулятор Маха–Цендера с двойным выходом (ММЦ), изготовленный на основе оптических волноводов в кристаллической подложке ниобата лития (рис. 1). Данная технология уже подтвердила свою эффективность при построении различных квантовых устройств [11]. Оптические волноводы были изготовлены по хорошо отработанной технологии термической диффузии титана [12]. Электрооптическое управление через планарные электроды обеспечивало быструю подстройку амплитуды и фазы в

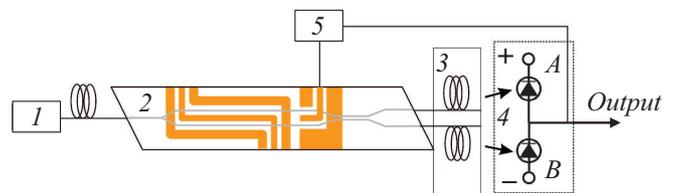


Рис. 1. Схема широкополосного источника квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника, использующего в качестве управляемого светоделителя интегрально-оптический модулятор Маха–Цендера с двойным выходом. 1 — одночастотный лазерный диод, 2 — ММЦ, 3 — волоконно-оптическая сборка, 4 — балансный фотоприемник, 5 — система стабилизации рабочей точки ММЦ.

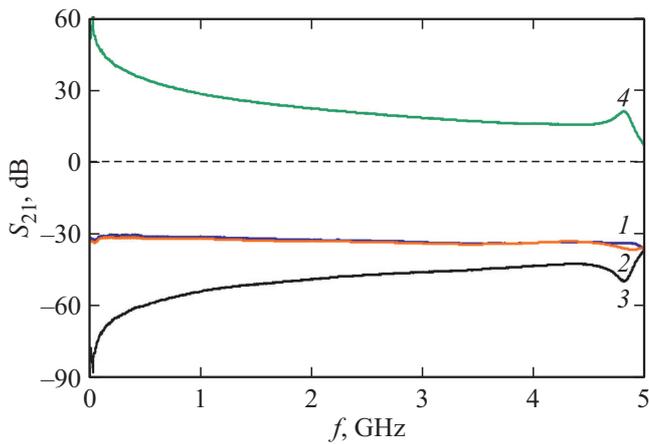


Рис. 2. Подавление синфазной помехи балансным фотоприемником. 1, 2 — отклик S_{12} каждого из фотодиодов (A и B) на синфазный сигнал, 3 — отклик балансного фотоприемника на синфазный сигнал, 4 — подавление синфазной помехи.

каналах балансного фотоприемника. В качестве источника лазерного излучения был использован одночастотный лазерный диод с распределенной обратной связью с длиной волны 1552 nm, шириной линии излучения 170 kHz, мощностью 100 mW. Излучение с выходов ММЦ поступало через волоконную сборку на InGaAs pin-фотодиоды, образующие балансный фотоприемник. Полоса каждого фотодиода составляла 10 GHz, что обеспечивало полосу балансного фотоприемника выше 3 GHz. Для этого отбирались фотодиоды с максимально близкой частотной характеристикой и одинаковой чувствительностью ~ 0.78 A/W. Высокий ток насыщения (~ 30 mA) и низкий темновой ток ($< 1 \mu$ A) определяли высокий динамический диапазон детектируемых сигналов. Система стабилизации рабочей точки ММЦ [13] обеспечивала точную балансировку выходных мощностей ($< 0.1\%$). Для подавления классического

шума интенсивности было обеспечено противофазное вычитание синхронных сигналов за счет выравнивания оптических и электрических путей в балансной схеме детектирования. Эффективность подавления классического шума интенсивности оценивалась по подавлению синфазной помехи. Для этого излучение лазера было промодулировано по амплитуде (синфазный сигнал), а на электроды ММЦ подавался дифференциальный сигнал. Подавление определялось как отношение частотного отклика на дифференциальный сигнал к частотному отклику на синфазный сигнал и составило > 15 dB в полосе частот $f > 3$ GHz (рис. 2). Снижение эффективности подавления с ростом частоты обусловлено повышением требований к точности фазировки и балансировки.

Измерения шумового сигнала на выходе балансного фотоприемника с предусилителем показали, что в частотной полосе > 3 GHz спектральная плотность мощности детектируемых оптических шумов более чем на 12 dB превосходит уровень технических шумов (шумов электроники) (рис. 3, a). Классические шумы, обусловленные шумом интенсивности лазерного диода, были не видны на фоне квантового дробового шума, что подтверждалось линейной зависимостью мощности детектируемого шумового сигнала P_{el} от суммарной мощности лазерного излучения на входе фотодиодов балансного фотоприемника P_{opt} (рис. 3, b). Уровень мощности регистрируемого дробового шума хорошо согласуется с теоретической оценкой [14]:

$$N(f) = 2qP_{opt}AR_0|H_{pd}^2(f)|, \quad (1)$$

где $N(f)$ — спектральная плотность мощности шума, q — заряд электрона, A — чувствительность фотодиодов по постоянному току, $H_{pd}(f)$ — частотная характеристика балансного фотодетектора, нормированная на чувствительность по постоянному току, R_0 — сопротивление нагрузки на выходе фотоприемника.

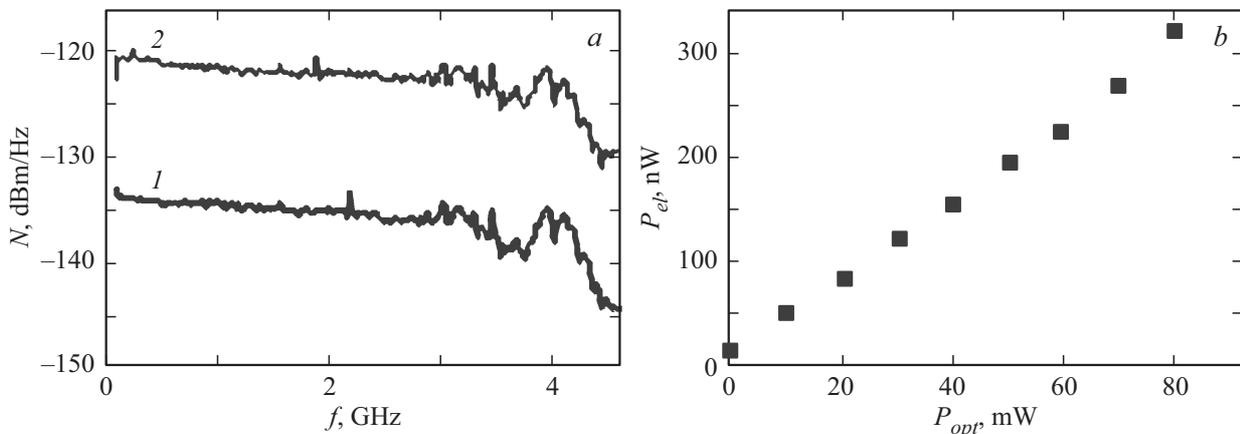


Рис. 3. a — шумовой сигнал N на выходе балансного фотоприемника после предусилителя: 1 — при выключенном лазерном диоде (уровень технических шумов измерительной системы), 2 — при мощности лазерного излучения 100 mW (квантовый дробовой шум). b — зависимость мощности шума на выходе (в полосе от 0.01 до 3 GHz) от мощности лазерного излучения.

Таким образом, разработан широкополосный источник квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника, использующий управляемый светоделитель на основе волноводного интерферометра Маха–Цендера на подложке ниобата лития и высокочастотный балансный фотоприемник. Экспериментально получено превышение квантовых шумов над классическими более чем на 12 dB в полосе частот > 3 GHz, что является лучшими характеристиками для данного типа источников, известными из литературы. Оценка производительности генератора истинно случайных чисел, использующего данный генератор шума, дает беспрецедентно высокую скорость ($\sim (10-20) \cdot 10^9$ bit/s).

Финансирование работы

В университете ИТМО работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 2019-0923).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Herrero-Collantes, J.C. Garcia-Escartin, *Rev. Mod. Phys.*, **89** (1), 015004 (2017). DOI: 10.1103/RevMOdPhys.89.015004
- [2] A.V. Gleim, V.V. Chistyakov, O.I. Bannik, *J. Opt. Technol.*, **84** (6), 362 (2017). DOI: 10.1364/JOT.84.000362
- [3] Y. Liu, Q. Zhao, M.H. Li, *Nature*, **562** (7728), 548 (2018). DOI: 10.1038/s41586-018-0559-3
- [4] C. Gabriel, C. Wittmann, D. Sych, *Nature Photon.*, **4** (10), 711 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2010.197
- [5] T. Symul, S.M. Assad, P.K. Lam, *Appl. Phys. Lett.*, **98** (23), 231103 (2011). DOI: 10.1063/1.3597793
- [6] T. Gehring, C. Lupo, A. Kordts, D.S. Nikolic, N. Jain, T. Rydberg, T.B. Pedersen, S. Pirandolo, U.L. Andersen, *Nature Commun.*, **12**, 605 (2021). DOI: 10.1038/s41467-020-20813-w
- [7] H. Zhou, P. Zeng, M. Razavi, X. Ma, *Phys. Rev. A*, **98** (4) 042321 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevA.98.042321
- [8] J.Y. Haw, S.M. Assad, A.M. Lance, N.H.Y. Ng, V. Sharma, P.K. Lam, T. Symul, *Phys. Rev. Appl.*, **3** (5), 054004 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.054004
- [9] B. Xu, Z. Chen, Z. Li, J. Yang, Q. Su, W. Huang, Y. Zhang, H. Guo, *Quant. Sci. Technol.*, **4** (2), 025013 (2019). DOI: 10.1088/2058-9565/ab0fd9
- [10] L. Huang, H. Zhou, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36** (3), B130 (2019). DOI: 10.1364/JOSAB.36.00B130
- [11] O. Alibart, V. D'Auria, M. De Micheli, F. Doutre, F. Kaiser, L. Labonté, T. Lughì, E. Picholle, S. Tanzilli, *J. Opt.*, **18** (10), 104001 (2016). DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104001
- [12] В.М. Петров, А.В. Шамрай, И.В. Ильичев, П.М. Агрузов, В.В. Лебедев, Н.Д. Герасименко, В.С. Герасименко, *Фотоника*, **14** (5), 414 (2020). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423
- [13] A. Petrov, A. Tronev, P. Agruzov, A. Shamrai, V. Sorotsky, *Electronics*, **9** (11), 1861 (2020). DOI: 10.3390/electronics9111861
- [14] В.Д. Урик, Д.Д. Мак-Кини, К.Д. Вильямс, *Основы микроволновой фотоники* (Техносфера, М., 2016). [V.J. Urick, D.J. McKinney, K.J. Williams, *Fundamentals of microwave photonics* (John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., 2015).].