



УДК 535.14

DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.559.561

КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ БИФОТОНЫ: ГЕНЕРАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

CORRELATED OPTICAL-TERAHERTZ BI-PHOTONS: GENERATION AND APPLICATION

КИТАЕВА Г. Х.

gkitaeva@physics.msu.ru

KITAEVA G. KH.

gkitaeva@physics.msu.ru

ПРУДКОВСКИЙ П. А.

PRUDKOVSKII P. A.

КУЗНЕЦОВ К. А.

KUZNETSOV K. A.

ЛЕОНТЬЕВ А. А.

LEONTYEV A. A.

САФРОНЕНКОВ Д. А.

SAFRONENKOV D. A.

НОВИКОВА Т. И.

NOVIKOVA T. I.

*Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2*

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
2/1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia*

Высокоэффективная параметрическая генерация терагерцевых волн разностной частоты в нелинейных кристаллах была получена еще в 1990-х, на заре периода освоения терагерцевого диапазона частот, а в настоящее время активно применяется многими группами, нацеленными на создание мощных источников терагерцевых импульсов с высоким коэффициентом усиления [1]. Но лишь немногие исследователи отдают себе отчет в том, что терагерцевый фотон и оптический сигнальный фотон стоксовой частоты, если они испущены при одной и той же лазерной накачке генератора и в отсутствие какого-либо дополнительного внешнего затравочного излучения, формируют так называемые пучки-близнецы, которые вместе образуют запутанное квантовое состояние оптико-терагерцевого поля. Специфические квантовые свойства таких полей наиболее отчетливо проявляются в случае режима с низким коэффициентом параметрического усиления в нелинейной среде, когда процесс генерации преобразуется в спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) излучения накачки, а неупруго рассеянные фотоны образуют коррелированные «бифотонные» пары [2]. Пары взаимно связанных фотонов генерируются при СПР в широком спектральном диапазоне вплоть до частоты накачки. Наиболее известными являются полностью оптические бифотоны, излучаемые на сравнимых частотах в оптическом диапазоне. Начиная с пионерских работ группы Д. Н. Клышко и А. Н. Пенина в МГУ им. М. В. Ломоносова по спектроскопии и квантовой фотометрии на основе СПР [3, 4] и по настоящее время оптические бифотоны широко используются в различных квантово-оптических технологиях, таких как квантовая коммуникация, вычисления, метрология, квантовая когерентная томография и построение изображений в фантомных лучах [5]. Оптико-терагерцевые бифотоны, которые генерируются в сильно частотно-невыврожденном режиме СПР и состоят из одного оптического фотона с частотой, близкой к частоте лазерной накачки, и одного терагерцевого фотона с частотой, примерно на два порядка меньшей, также начинают вызывать значительный интерес. Недавно были проведены первые исследования, нацеленные на распространение оптических квантовых технологий на терагерцевый диапазон. Возможное применение специфических квантовых свойств оптико-терагерцевых бифотонов изучалось применительно к задачам терагерцевой спектроскопии, зондирования и фотометрии [6–8]. Развитие безэталонной калибровки квантовой эффективности детекторов излучения терагерцевых частот может стать в будущем одним из самых востребованных и актуальных направлений, которые приведут к созданию методов измерения абсолютных величин спектральной чувствительности терагерцевых приемников без сравнения с заранее прокалиброванным референсным детектором и без использования эталонного источника терагерцевого излучения с известной спектральной яркостью. Мы исследуем условия применения идей безэталонной СПР-калибровки на примере измерения токового отклика сверхпроводникового терагерцевого болометра. Первые измерения корреляционных параметров оптико-терагерцевых полей, необходимые для реализации безэталонных измерений, были осуществлены в нашей работе.

Ключевые слова: терагерц; оптико-терагерцевый бифотон; спонтанное параметрическое рассеяние; квантовая эффективность; сверхпроводниковый терагерцевый болометр.

Highly efficient parametric generation of difference-frequency terahertz waves in nonlinear crystals was obtained as early as in the 1990s. Both at the dawn of the period of mastering the terahertz frequency range and at present, it has actively been used by many teams aimed at creating powerful sources of terahertz pulses with a high gain [1]. But only a few researchers are aware



that a terahertz photon and an optical signal photon of the Stokes frequency, if they are emitted with the same laser pumping of the generator and in the absence of any additional external seed radiation, form the so-called “twin beams”, which together form an entangled quantum state of the optical terahertz field. The specific quantum properties of such fields are most clearly manifested in the case of a regime with a low parametric gain in a nonlinear medium, when the generation process is converted into spontaneous parametric down conversion (SPDC) of pump radiation, and inelastically scattered photons form correlated “biphoton” pairs [2]. Pairs of mutually coupled photons are generated during SPDC in a wide spectral range up to the pump frequency. The best known are all-optical biphotons emitted at comparable frequencies in the optical range. Starting with the pioneer works of D. N. Klyshko and A. N. Penin’s group at Lomonosov Moscow State University on SPDC-based spectroscopy and quantum photometry [3, 4] and at the present time, optical biphotons have been widely used in various quantum technologies — such as quantum communication, computing, metrology, quantum coherence tomography and ghost [5]. Optical-terahertz biphotons, which are generated in a strongly frequency-nondegenerate SPDC regime and consist of one optical photon with a frequency close to the laser pumping frequency, and one terahertz photon with a frequency approximately two orders of magnitude lower, also begin to attract considerable interest. Recently, the first studies aimed at extending optical quantum technologies to the terahertz range have been carried out. The possible applications of the specific quantum properties of optical-terahertz biphotons have been studied in relation to the problems of terahertz spectroscopy, sensing, and photometry [6–8]. In the future the development of standard-free calibration of the quantum efficiency of terahertz frequency radiation detectors may become one of the most popular and relevant areas aimed at creating methods for measuring the absolute values of the spectral responsivity of terahertz receivers without comparison with a pre-calibrated reference detector and without using a reference source of terahertz radiation with a known spectral brightness. We are studying the conditions for applying the ideas of standard-free SPDC calibration using the example of measuring the current response of a superconducting terahertz hot electron bolometer (HEB). The first measurements of the correlation parameters of optical-terahertz fields, necessary for the implementation of standard-free measurements, were carried out in our work.

Keywords: terahertz; optical-terahertz biphoton; spontaneous parametric down-conversion; quantum efficiency; superconductor terahertz hot electron bolometer.

Исследованы оптимальные температурные, спектральные и другие экспериментальные условия для генерации оптико-терагерцевых бифотонов с максимально возможными значениями параметров корреляции — корреляционной функции второго порядка $g^{(2)}$ при низком коэффициенте усиления [9], коэффициента подавления фотонного шума или ковариации фототоков при высоком параметрическом усилении [10]. В настоящее время отсутствуют коммерческие однофотонные терагерцевые детекторы, что делает невозможным использование типовых квантово-оптических схем для прямого обнаружения совпадений фотонов. Нами разработаны новые подходы для обнаружения бифотонных корреляций, основанные на анализе совместных статистических распределений аналоговых показаний оптического детектора в сигнальном канале и терагерцевого детектора в холостом канале установки СПР. Измерение параметров корреляции имеет ключевое значение при применении оптико-терагерцевых бифотонов в терагерцевой квантовой визуализации с помощью однопиксельных терагерцевых приемников, построении однофотонных терагерцевых источников, калибровке спектральной чувствительности терагерцевых детекторов без привязки к эталону и других перспективных задачах. Наша текущая работа посвящена изучению и абсолютному измерению квантовой эффективности аналоговых сверхпроводящих терагерцевых болометров. Проанализированы экспериментальные подходы, основанные на схеме генерации СПР с нелинейным кристаллом, помещенным в гелиевый криостат вместе с измерительной ячейкой болометра, и однофотонным детектором в оптическом канале детектирования. Полученные результаты актуальны в приложениях квантовых технологий на основе СПР и в других низкочастотных спектральных диапазонах — там, где по каким-либо причинам затруднено использование однофотонных детекторов хотя бы в одном канале квантово-коррелированного бифотонного поля.

*Эта работа была выполнена при поддержке
Российского научного фонда, грант № 22-12-00055.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Suizu K., Koketsu K., Shibuya T., Tsutsui T., Akiba T., Kawase K. Extremely frequency-widened terahertz wave generation using Cherenkov-type radiation // *Optics Express*, 2009. Vol. 17. P. 6677–6681.
2. Kitaeva G. Kh., Leontyev A. A., Prudkovskii P. A. Quantum correlation between optical and terahertz photons generated under multimode spontaneous parametric down-conversion // *Physical Review A*, 2020. Vol. 101. P. 053810.
3. Клышко Д. Н. Фотоны и нелинейная оптика. — М.: Наука, 1980.
4. Клышко Д. Н., Пенин А. Н. Перспективы квантовой фотометрии // *Успехи физических наук*, 1987. — Т. 152 (4). — С. 653–665.
5. Couteau C., Spontaneous parametric down-conversion // *Contemporary physics*, 2018. Vol. 59. P. 291–304.
6. Kitaeva G. K., Yakunin P. V., Kornienko V. V., Penin A. N. // *Appl. Phys. B*, 2014. Vol. 116. P. 929.
7. Kuznetsov K. A., Kitaeva G. Kh., Kovalev S. P., Germansky S. A., Buryakov A. M., Tuchak A. N., Penin A. N. // *Appl. Phys. B*, 2016. Vol. 122. P. 223.
8. Kutas M., Haase B., Klier J., Molter D., von Freymann G. Quantum-inspired terahertz spectroscopy with visible photons // *Optica*, 2021. Vol. 8 (4). P. 438–441.
9. Леонтьев А. А., Кузнецов К. А., Прудковский П. А., Сафронов Д. А., Китаева Г. Х. Прямое измерение корреляционной функции оптико-терагерцевых бифотонов // *Письма в ЖЭТФ*, 2021. — Т. 114. — С. 565–571.
10. Новикова Т. И., Леонтьев А. А., Китаева Г. Х. Измерение квантовой эффективности аналоговых детекторов в поле параметрического рассеяния света // *Письма в ЖЭТФ*, 2022. — Т. 116. — С. 343–349.



In this work, we study optimal temperature, spectral, and other experimental conditions for the generation of optical-terahertz biphotons with the best possible values of the correlation parameters — the second-order correlation function $g^{(2)}$ at a low reduction factor [9], the photon noise reduction factor, or photocurrent covariance at high parametric gain [10]. At present, single-photon terahertz detectors are not widely available, which makes it impossible to use common quantum optical circuits for direct detection of photon coincidences. We have discovered new approaches for detecting biphoton correlation

properties based on the analysis of statistical distributions of the analog-type readings of an optical detector placed in the signal channel and of a terahertz detector placed in the idler channel of the SPDC set-up. The measurement of correlation parameters is of key importance if optical-terahertz biphotons are considered to be applied in quantum terahertz ghost imaging with single-pixel terahertz receivers, in creating the single-photon terahertz sources, in measuring the spectral sensitivity of terahertz detectors without reference terahertz sources or detectors, and in other promising tasks. Our current work is devoted

to the measurement of quantum efficiency of a superconducting terahertz HEB. Experimental approaches based on the SPDC experimental scheme with a nonlinear crystal, being placed in a helium cryostat together with a bolometer detecting cell, and with a single-photon detector placed in the optical detection channel, have been analyzed. The results obtained are relevant to applications of SPDC-based quantum technologies in other low-frequency spectral ranges also, where, for some reason, it is difficult to use single-photon detectors in at least one channel of a quantum-correlated biphoton field.