

УДК 535.3

Волоконно-оптический рычаг и интерферометр с резонаторами Фабри — Перо для обнаружения гравитационных волн

Петров Николай Иванович (*)

petrovni@mail.ru

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена непараксиальная эволюция волновых пакетов в оптических волноводах с использованием квантово-теоретического метода когерентных состояний. Продемонстрирован коллапс и возобновление волновых пакетов при непараксиальной эволюции в многомодовом волноводе вследствие интерференции мод. Показана возможность измерения смещений порядка 10^{-19} м между двумя состыкованными волноводами, что достаточно для обнаружения гравитационных волн [1]. Также рассматривается малогабаритный настольный лазерный интерферометр с резонаторами Фабри — Перо, состоящими из двух пространственно-распределенных «зеркал», для обнаружения гравитационных волн.

Ключевые слова: оптические методы обнаружения гравитационных волн, когерентные состояния, оптический рычаг, интерферометр Маха — Цандера, резонатор Фабри — Перо

Введение. Несмотря на существование неэквивалентности классической и квантовой механики и оптики, между классической оптикой и квантовой физикой можно найти очень близкие аналогии. Такие аналогии позволяют имитировать квантовые явления посредством моделирования распространения света в классических системах. Это открывает возможности для визуализации квантовых явлений, таких как состояние кота Шредингера, сжатые состояния, коллапс и возобновление, на макроскопическом уровне [2]. Эти явления представляют большой интерес во многих областях физики, таких как квантовая оптика, квантовые вычисления и прецизионные измерения.

Методы и материалы; результаты. Для обнаружения чрезвычайно малого смещения в лазерных гравитационно-волновых экспериментах можно использовать оптический рычаг, состоящий из двух состыкованных волноводов (рис. 1). Смещение оси между двумя волноводами, вызванное гравитационной волной, повлияет на выходные параметры распространяющегося пучка. В качестве выходного параметра можно выбрать изменение фазы волнового пакета. Расчеты показывают, что имеют место фазовые сдвиги порядка $\delta\phi \propto 10^{-6}$ рад, которые можно легко наблюдать из измерений.

Крайне желательно иметь компактный лазерный интерферометр для обнаружения гравитационных волн [3]. Здесь предлагается малогабаритный настольный лазерный интерферометр с резонаторами Фабри — Перо, состоящий из двух пространственно-распределенных «зеркал» (рис. 2, а).

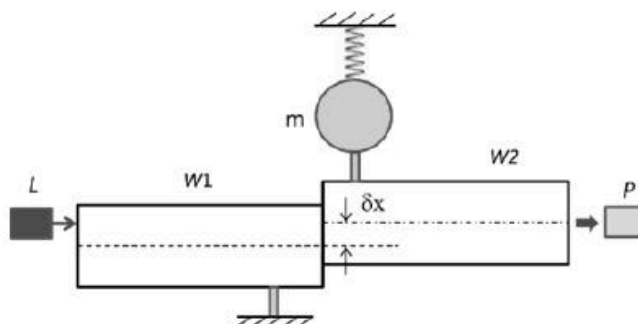


Рис. 1. Схема связи механического осциллятора с оптическими волноводами $W1$ и $W2$, соединенными встык: L — лазер, P — фотодетектор

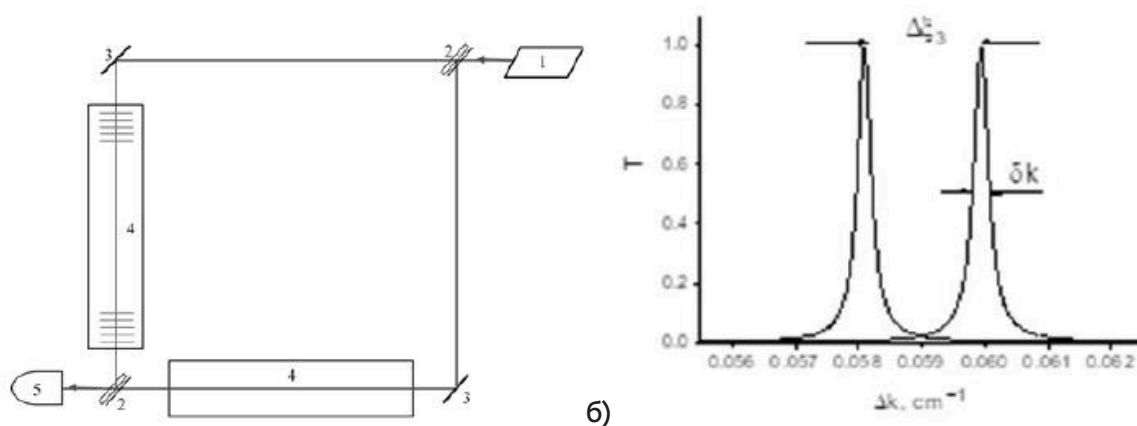


Рис. 2. (а) Оптическая схема интерферометра Маха — Цандера с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал. 1 — лазер, 2 — разделитель пучка, 3 — зеркало, 4 — резонатор Фабри — Перо с периодическими структурами, 5 — фотодетектор; (б) коэффициент пропускания как функция расстройки Δk

Ширина линии пропускания может достигать значений $\delta k \approx 10^{-23} \text{ см}^{-1}$ при расстоянии между зеркалами $d = 1 \text{ м}$ для длины волны излучения 630 нм . Это соответствует спектральному разрешению $\delta \lambda / \lambda_0 = \delta k / k_0 \approx 10^{-28}$.

Заключение. Результаты могут быть полезны в различных областях, например, в экспериментах с гравитационными волнами, спектроскопии высокого разрешения, квантовой обработке информации и метрологии.

Список источников

- [1] Брагинский В.Б. Развитие методов квантовых измерений. *УФН*, 2005, т. 175, № 6, с. 621–627. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200506c.0621>
- [2] Petrov N.I. Macroscopic quantum effects for classical light. *Phys. Rev. A*, 2014, vol. 90, art. no. 043814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.90.043814>
- [3] Petrov N.I., Pustovoi V.I. Small-Sized Interferometer with Fabry — Perot Resonators for Gravitational Wave Detection. *Sensors*, 2021, vol. 21 (5), art. no. 1877. <https://doi.org/10.3390/s21051877>

Optical Fiber Lever and Interferometer with Fabry — Perot Resonators for Detecting Gravitational Waves

Petrov Nikolai Ivanovich^(*)

petrovni@mail.ru

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A long-term nonparaxial evolution of wave beams in multimode optical waveguides is considered using a quantum-theoretical approach of coherent states. Collapse and revival of wave packets at long-term nonparaxial evolution due to mode interference is demonstrated. The possibility of measuring displacements of the order of 10^{-19} m between two butt-jointed waveguides is shown, which is sufficient to detect gravitational waves [1]. A small-sized tabletop laser interferometer with Fabry — Perot resonators consisting of two spatially distributed “mirrors” for detecting gravitational waves is also considered.

Keywords: optical methods for detecting gravitational waves, coherent states, optical lever, Mach — Zehnder interferometer, Fabry — Perot resonator, periodic diffraction structure, spectral resolution

Introduction. Despite the existence of the nonequivalence of classical and quantum mechanics and optics, very close analogies can be found between classical optics and quantum physics. Such analogies allow us quantum phenomena by means of light propagation in classical systems to be mimicked. This opens possibilities to visualize quantum phenomena, such as Schrodinger cat’s state, squeezing, and collapse and revival, at a macroscopic level [2]. These phenomena are of great interest in many fields of physics such as quantum optics, quantum computation and precision measurements.

Methods and materials; results. To detect such a small mechanical displacement in laser gravitational-wave experiments the optical lever consisting of two butt-jointed waveguides (fig. 1) can be considered.

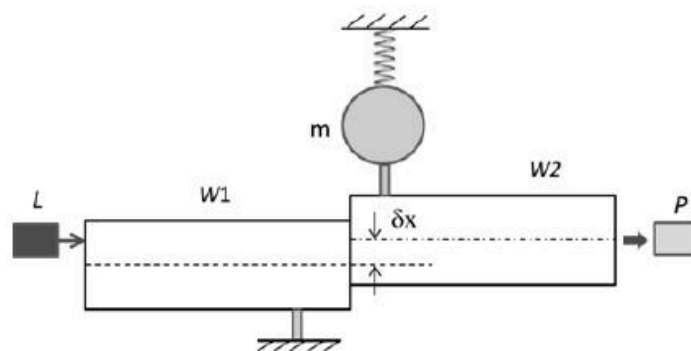


Fig. 1. Scheme for coupling a mechanical oscillator’s position to optical butt-jointed waveguides W1 and W2:

L — laser, P — photodetector

Axis displacement between two waveguides caused by the gravitational wave will affect output parameters of a propagating beam. As an output parameter the

phase change of wave packet can be selected. Calculations show that the phase shifts of the order $\delta\phi \propto 10^{-6}$ rad take place, which can be easily observed from measurements. Note that in the LIGO interferometer the measurement of 10^{-18} m requires a phase shift measurement of 10^{-9} rad [1].

It is highly desirable to have a compact laser interferometer for detecting gravitational waves [3]. Here, a small-sized tabletop laser interferometer with Fabry — Perot resonators consisting of two spatially distributed “mirrors” for detecting gravitational waves is proposed (Fig. 2a). A method for detecting gravitational waves is proposed based on the measurement of the correlation function of the radiation intensities of non-zero-order resonant modes from the two arms of the Mach — Zehnder interferometer. The influence of light absorption in crystals on the limiting resolution of such resonators is studied. A higher sensitivity of the interferometer to shorter-wave laser radiation is shown.

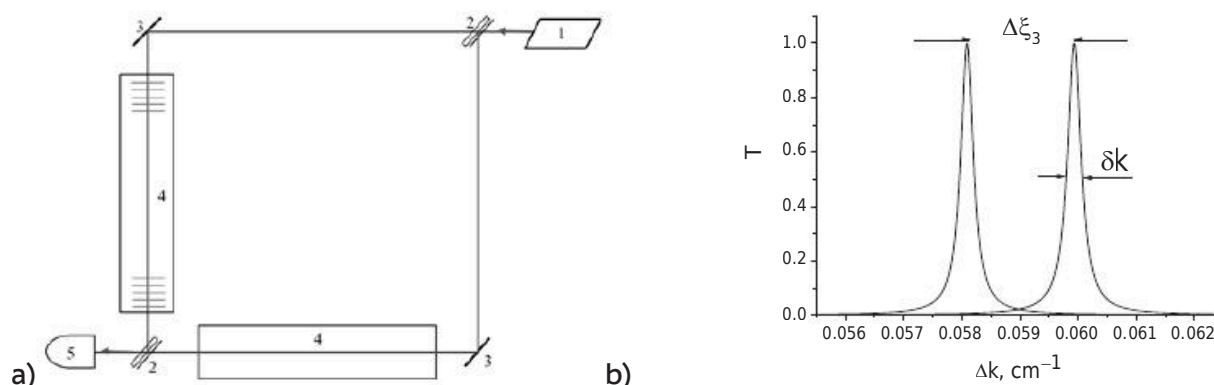


Fig. 2. (a) Optical scheme of Mach-Zehnder interferometer with periodical structures as reflecting mirrors. 1—laser, 2—beam splitter, 3—mirror, 4—Fabry-Perot resonator with periodical structures, 5—photodetector; (b) transmittance as function of detuning Δk

The line width of the transmittance can reach the values of $\delta k \approx 10^{-23} \text{ cm}^{-1}$ at a distance between the mirrors $d = 1 \text{ m}$ for the radiation wavelength 630 nm. This indicates that the spectral resolution is equal to $\delta\lambda/\lambda_0 = \delta k/k_0 \approx 10^{-28}$.

Conclusion. Results may be useful in various fields, e. g. in gravitational wave experiments, high precision spectroscopy, and quantum information processing and metrology.

References

- [1] Braginsky V.B. Development of methods of quantum measurements. *Phys. Usp.*, 2005, vol. 48, art. no. 595. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n06ABEH002626>
- [2] Petrov N.I. Macroscopic quantum effects for classical light. *Phys. Rev. A*, 2014, vol. 90, art. no. 043814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.90.043814>
- [3] Petrov N.I., Pustovoi V.I. Small-Sized Interferometer with Fabry — Perot Resonators for Gravitational Wave Detection. *Sensors*, 2021, vol. 21 (5), art. no. 1877. <https://doi.org/10.3390/s21051877>