

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 534–14; 534.2; 535.421

**УПРАВЛЯЕМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО НА
ВЫХОДЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

© 2026 г. В. М. Котов*

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Российской академии наук

Россия, 141195, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

**E-mail: vmk6054@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2026

После доработки 22.04.2026

Принята к публикации 30.04.2026

Рассмотрен эффект изменения фазы световой волны, выходящей из акустооптического интерферометра, обусловленный разной длиной оптических путей, проходимых составляющими выходного луча в процессе изменения частоты звуковой волны. Разная длина оптических путей обусловлена функциональными особенностями акустооптического интерферометра. Эксперименты, выполненные на основе акустооптического интерферометра, в котором использована ячейка из кристалла парателлурита, выявили изменение фазы оптического излучения с длиной волны 0.63 мкм от нуля примерно до 1000° при изменении частоты звука от 40 до 40.1 МГц.

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, одноосный гиротропный кристалл, фазовый сдвиг

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометрические методы широко применяются на практике для измерения различных физических величин: температуры по сдвигу интерференционных полос [1], скорости движения мишеней после их облучения мощным лазерным импульсом [2], суммирования оптического излучения [3] и т. д. Интерферометрия, в которой параметры одного (или обоих) интерферирующих лучей управляются звуковой волной, широко используется, например, в лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) для создания зондирующего объема с движущейся интерференционной решеткой [4–6], для получения высокочастотной модуляции [7], для управления ориентацией плоскости поляризации линейно поляризованного света [8] и т.д.

В настоящей работе анализируются возможности акустооптического (АО) интерферометра для управления фазой оптического излучения посредством изменения частоты. Такой интерферометр можно рассматривать как разновидность интерферометра Майкельсона, состоящего, как известно, из светоделительного элемента и двух отражающих зеркал [9]. Существенный недостаток интерферометра Майкельсона – большие потери света при формировании выходного канала. АО-интерферометр лишен этого недостатка, он позволяет получить интенсивность света в выходном канале, близкую к интенсивности входного излучения. АО-интерферометр позволяет выполнять те же операции с оптическим излучением, что и интерферометр Майкельсона. Отметим, что АО-интерферометр обладает важной особенностью, если в нем использована АО-ячейка из гиротропного кристалла: на его выходе формируется линейно поляризованное излучение, вектор поляризации которого вращается с частотой, управляемой частотой звука. Эта особенность позволяет измерять выходное излучение по переменному сигналу, а также использовать его, например, для получения высокочастотной модуляции [7]. В настоящей работе будет показано, что АО-интерферометр позволяет эффективно управлять и фазой выходного оптического излучения посредством изменения частоты звука. Это существенно расширяет возможности акустооптики для решения задач, связанных с обработкой оптических сигналов.

2. ТЕОРИЯ

На рис. 1а приведена оптическая схема АО-интерферометра. Оптическое линейно поляризованное излучение с интенсивностью I_0 , генерируемое лазером, направляется в АО-модулятор АОМ, расщепляясь в нем на две собственные волны. Предполагается, что кристалл модулятора является гиротропным. В частности, здесь может быть использован одноосный гиротропный кристалл парателлурита (TeO_2), широко применяемый на практике. Условия АО-взаимодействия в кристалле выбраны таким образом, что только одна из собственных волн кристалла дифрагирует на звуке, отклоняясь в направлении волны 1. Вторая собственная волна проходит кристалл без дифракции, она распространяется в направлении 2. Волна 1, отразившись от зеркала M_1 в строго противоположном направлении, пересекает АОМ без повторной дифракции и направляется на фотодетектор PD в виде волны $1'$. Волна 2, отразившись от зеркала M_2 в строго обратном направлении, вновь пересекает модулятор, дифрагируя на этот раз на той же звуковой волне и, отклоняясь в направлении $2'$, попадает на фотодетектор. Волны $1'$ и $2'$ практически “сливаются” друг с другом. Таким образом, на фотодетектор падают две волны с круговыми

поляризациями и с частотами $(\omega+\Omega)$ и $(\omega-\Omega)$, где ω и Ω – циклические частоты света и звука соответственно.

Рис.1.

Теперь предположим, что изменилась частота звука Ω . Это приведет к изменению угла дифракции в АО-кристалле, и, как следствие, к отклонению лучей, падающих на фотоприемник. Понятно, что при этом изменяются и фазы лучей. Электрические поля волн, падающих на фотоприемник, можно записать в виде

$$E_1 = A \cos [(\omega+\Omega)t + \varphi_1], \quad E_2 = A \cos [(\omega-\Omega)t + \varphi_2], \quad (1)$$

где A – амплитуды волн E_1 и E_2 (полагаем, что их амплитуды равны), t – время, φ_1 и φ_2 – начальные фазы волн. Складывая E_1 и E_2 , получим

$$E_s = 2A \cos[\Omega t + 0.5(\varphi_1 - \varphi_2)] \cos[\omega t + 0.5(\varphi_1 + \varphi_2)]. \quad (2)$$

Амплитуда суммарной волны, как следует из формулы (2), равна

$$A_s = 2A \cos[\Omega t + 0.5(\varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (3)$$

Она не является постоянной, а зависит от времени t , частоты звука Ω и разности фаз $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Здесь она меняется по гармоническому закону, наблюдается эффект “биений” [10]. Наиболее важной для нашего рассмотрения является зависимость амплитуды A_s от разности фаз $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$. Величину $\Delta\varphi$ можно менять, изменяя частоту звука f . Отметим, что частота f , задаваемая генератором сигналов, связана с циклической частотой Ω , входящей в выражения (1)–(3), соотношением $\Omega = 2\pi f$. Аналогичная связь существует и между разностью фаз, используемой в теории, $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$ (см. выражения (1)–(3)), и разностью фаз $\Delta\Phi$, измеряемой в экспериментах, $\Delta\varphi = 2\pi\Delta\Phi$. Рассмотрим подробнее влияние изменения частоты f на сдвиг фаз между волнами $\Delta\varphi$. Пусть частота стала равняться величине $f + \Delta f$, где Δf – приращение частоты звука. Это приведет к тому, что в АО-интерферометре (см. рис. 1а) волна 1 отклонится от своего направления на угол β и будет распространяться в виде волны 3, попадая на фотоприемник в виде волны 3'. Излучение же 2 начнет взаимодействовать со звуком только при обратном прохождении через АО-модулятор и попадет на фотодетектор в виде волны 4'. Видно, что оптический путь, проходимый волной 3 от АОМ до зеркала M_1 и от зеркала M_1 до АОМ, в совокупности с расстоянием, проходимым волной 3' от АОМ до фотоприемника PD (изменением оптического пути внутри кристалла АОМ пренебрегаем, так как его вклад, как показывают расчеты, незначителен), существенно больше пути, проходимого волной 4'. Другими словами, плечи АО-интерферометра неодинаковые. Это

приводит к разному набегу фаз оптических волн, проходящих пути 3–3' и 4'. Понятно, что в данном случае набег фаз зависят от угла β , т. е. от изменения частоты звука Δf . Отметим, что поскольку фотодетектор PD работает в квадратичном режиме, сигнал с фотодетектора будет “сниматься” в виде $(A_s)^2$, т.е. в виде синусоиды с фазой $[2\Omega t + (\varphi_1 - \varphi_2)]$. Другими словами, частота сигнала будет равна удвоенной частоте звуковой волны (т. е. 2Ω), а начальная фаза будет в точности совпадать с разностью фаз $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$. Численные расчеты зависимости β от Δf выполнялись в рамках модели, в которой использованы характеристики кристалла TeO_2 . Полагалось, что оптические грани кристалла ориентированы ортогонально его оптической оси $[001]$, а акустическая волна, на которой происходит дифракция, является поперечной, эта волна распространяется вдоль оси $[110]$ со скоростью $V = 617$ м/с. Поверхности волновых векторов описывались соотношениями $2\pi n_1/\lambda$ и $2\pi n_2/\lambda$ соответственно, где λ – длина волны света, n_1 и n_2 – показатели преломления кристалла, которые вычислялись согласно выражению [11]

$$n_{i,2}^2 = \frac{1 + \text{tg}^2\delta}{\frac{1}{n_0^2} + \frac{\text{tg}^2\delta}{2} \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\text{tg}^4\delta \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) + 4G_{33}^2}}, \quad (4)$$

где n_0 , n_e – главные показатели преломления кристалла, δ – угол между волновым вектором света и оптической осью кристалла $[001]$, G_{33} – компонента псевдотензора гирации. При этом эллиптичность волн определялась, исходя из соотношения [11]

$$\rho = \frac{1}{2G_{33}} \left[\sqrt{\text{tg}^4\delta \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2} - \text{tg}^2\delta \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) \right]. \quad (5)$$

Рассматривался вариант анизотропной дифракции, когда оптическое излучение с волновым вектором, принадлежащим внутренней поверхности волновых векторов, дифрагировало в излучение, принадлежащее внешней поверхности.

Используя хорошо известную методику (см., например, [11]), мы определяли зависимость β от Δf . После этого мы вычисляли изменения оптических путей 3–3' и 4'. Важным моментом являлся тот факт, что при изменении частоты звука лучи 3' и 4' отдалялись друг от друга, т. е. перекрытие лучей уменьшалось, что приводило к уменьшению суммарного переменного сигнала. На рис. 16 приведено поперечное сечение перекрывающихся лучей. Будем полагать, что сечения лучей представляют собой круги с одинаковыми радиусами r . Расстояние между центрами кругов

обозначено как d . Общая площадь кругов (область их пересечения) обозначена S . Нетрудно показать, что площадь S вычисляется согласно выражению

$$S = 2r(r\eta - 0.5d\sin\eta), \quad (6)$$

где $\eta = \arccos(0.5d/r)$. Степенью перекрытия двух кругов μ будем называть отношение площади S к площади круга:

$$\mu = S/\pi r^2. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости изменения фазы сигнала $\Delta\Phi$, вычисленные на основании вышеприведенной методики (сплошная кривая), и величины степени перекрытия лучей μ (штриховая кривая) от частоты звука f . Здесь же приведены результаты эксперимента в виде точек с указанием погрешностей измерений. Вычисления выполнялись с использованием следующих параметров TeO_2 , входящих в выражения (4)–(7): $\lambda = 0.63$ мкм, $n_0 = 2.26$, $n_e = 2.41$, $G_{33} = 2.62 \cdot 10^{-5}$ [12, 13]. Полагалось, что строгий брэгговский синхронизм реализуется на частоте 40 МГц. Затем частота увеличивалась до 40.1 МГц, при этом расчет выполнялся с учетом расстройки синхронизма. Радиус пересекающихся кругов принимался равным 0.75 мм. Расстояние L_1 от АО-модулятора до зеркал M_1 и M_2 бралось равным 20 см, расстояние L_2 от модулятора до фотоприемника – 100 см (условие эксперимента). Видно, что зависимости $\Delta\Phi$ и μ от частоты звука f носят линейный характер, а результаты эксперимента хорошо совпадают с прямой $\Delta\Phi$ в пределах погрешностей измерений.

Рис. 2.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты проверялись экспериментально. Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Линейно поляризованное излучение 1, генерируемое He–Ne-лазером 2 на длине волны 0.63 мкм, направляется на зеркало 3, отразившись от которого, оно попадает в АО-ячейку 4 под углом Брэгга к акустической волне. На ячейку подается электрический сигнал 5 от СВЧ-генератора 6. В результате АО-взаимодействия часть излучения отклоняется в направлении луча 7. Излучение, не претерпевшее дифракции, распространяется в направлении 8. Отразившись от зеркал 9 и 10, лучи 7 и 8 вновь пересекают АО-ячейку. Луч 11 является выходным лучом интерферометра. Он проходит через поляризатор 12 и попадает на

фотоприемник 13. Сигнал с фотоприемника поступает на осциллограф 14. На него же подается сигнал синхронизации 15 от генератора 6.

Рис. 3.

Основным элементом интерферометра является АО-ячейка 4. Она выполнена из кристалла TeO_2 , имеющего форму куба, ориентированного вдоль направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$ и $[001]$, со сторонами, равными $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ см}^3$. К грани (110) методом холодной сварки приварен пьезопреобразователь из LiNbO_3 [14], генерирующий поперечную волну в направлении, ортогональном оптической оси $[001]$. Размеры преобразователя составляют $0.6 \times 0.6 \text{ см}^2$. Используемая длина АО-взаимодействия $L = 0.6 \text{ см}$ обеспечивает условие брэгговской дифракции. Действительно, режим АО-дифракции определяется параметром Клейна–Кука [15]

$$Q = \lambda L (f/V)^2. \quad (8)$$

При этом режим Брэгга определяется условием $Q \geq 4\pi$. На частоте $f = 40 \text{ МГц}$ из формулы (8) получим, что $Q \approx 15.9$, что существенно выше величины 4π , т. е. используемый режим является брэгговским. Расчеты показывают, что падающий и дифрагированный лучи распространяются в кристалле под углами 0.065° и 0.9704° к оптической оси $[001]$ кристалла соответственно. Эллиптичности этих лучей, исходя из выражения (5), равны 0.994 и 0.879. Видно, что значения эллиптичностей близки к единице, т. е. поляризации волн близки к круговым.

Эксперименты выполнялись в диапазоне частот 38–42 МГц. Угловой юстировкой АО-ячейки, а также зеркал 9 и 10 мы добивались совмещения двух лучей, представляющих собой компоненты выходного излучения 11, на расстоянии примерно 100 см от ячейки. Апертура фотоприемника равнялась примерно 7 мм. В нашем случае совмещение реализовывалось на частоте звука 40 МГц. На рис. 4 приведена типичная фотография с экрана осциллографа. Здесь приведены два сигнала: 1 – сигнал с фотоприемника, 2 – сигнал от генератора. Цена деления на экране осциллографа для сигнала 1 равна 20 мВ, для сигнала 2 составляет 50 мВ. Видно, что частоты различаются в два раза. При изменении частоты сигнала 2 примерно от 40 до 40.1 МГц сигнал 1 достаточно быстро смещается вправо на несколько амплитуд. Потребовались более точные измерения, которые показали, что полное смещение равно примерно 1000° . На рис. 2 приведены экспериментальные результаты в виде точек с указанием ошибки измерений. Ошибка составила около 80° . Эксперименты выполнялись с шагом 0.01 МГц. При этих измерениях частота генератора

измерялась частотомером. Видно, что существует хорошее согласие между теоретической кривой и экспериментальными результатами. Добавим, что выше частоты 40.1 МГц амплитуда сигнала 1 на рис. 4 начинает быстро уменьшаться, что указывает на существенное уменьшение размера области перекрытия интерферирующих лучей.

Рис. 4.

4. ВЫВОДЫ

1. Исследовано изменение фазы световой волны, выходящей из АО-интерферометра, обусловленное сдвигом фаз между компонентами, составляющими выходное излучение, в процессе изменения частоты звука. Показано, что изменение фазы главным образом вызвано существенным различием длины плеч интерферометра.

2. Выявлено, что даже небольшое изменение частоты звука, практически не влияющее на частоту вращения плоскости поляризации линейно поляризованного излучения, сильно влияет на фазу сигнала, отображающего вращение поляризации.

3. Выполнены эксперименты на основе АО-интерферометра с использованием АО-ячейки из кристалла TeO_2 и оптического излучения с длиной волны 0.63 мкм, в процессе которых продемонстрировано изменение фазы сигнала, снимаемого с фотодетектора, в пределах от нуля примерно до 1000° при изменении частоты звука от 40 до 40.1 МГц. Такое изменение фазы электрического сигнала соответствует изменению фазы вращения поляризации оптического луча, падающего на фотодетектор, от нуля до 1000° .

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00395-26-00 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Потапов В.Т., Жамалетдинов Н.М., Мусеев В.В.* // ПТЭ. 2025. № 2. С. 131.
<https://doi.org/10.31857/S0032816225020164>
2. *Борисов Е.С., Гаврилов Д.С., Какшин А.Г., Лобода Е.А., Потапов А.В., Говрас Е.А.* // ПТЭ. 2024. № 4. С. 149.
<https://doi.org/10.31857/S0032816224040176>
4. *Антонов С.Н.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 51.

<https://doi.org/10.31857/S0032816221030162>

4. *Ринкевичус В.С.* Лазерная анемометрия. Москва: Энергия, 1978.
5. *Коронкевич В.П., Ханов В.А.* Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985.
6. *Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соскин М.С.* Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985.
7. *Котов В.М., Воронко А.И., Тихомиров С.А.* // ПТЭ. 2019. № 4. С. 89.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219040098>
8. *Котов В.М.* // ПТЭ. 2025. № 1. С. 92.
<https://doi.org/10.31857/S0032816225010123>
9. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Том IV. Оптика. Москва: Физматлит, 2002.
10. *Саржевский А.М.* Оптика. Полный курс. Москва: Едиториал УРСС, 2004.
11. *Котов В.М.* Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. Москва: Янус-К, 2016.
12. Акустические кристаллы / *Под ред. М.П. Шаскольской.* Москва: Наука, 1982.
13. *Кизель В.А., Бурков В.И.* Гиротропия кристаллов. Москва: Наука, 1980.
14. *Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г.* Теория и практика современной акустооптики. Москва: Изд. Дом МИСис, 2015.
15. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. Москва: Радио и Связь, 1985.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. а – Оптическая схема АО-интерферометра: I_0 – излучение от лазера, АОМ – АО-ячейка; 1, 2 – лучи после дифракции на частоте f и без нее; M_1, M_2 – отражающие зеркала; 3, 3' – лучи после дифракции луча 1 на частоте $f+\Delta f$; 1', 2' – выходные лучи после дифракции на частоте f ; 3', 4' – выходные лучи после дифракции на частоте $f+\Delta f$; PD – плоскость фотодетектора; L_1, L_2 – расстояния от АОМ до зеркал M_1, M_2 и от АОМ до фотодетектора PD . **б** – Поперечное сечение перекрывающихся лучей, попадающих на фотоприемник: r – радиус перекрывающихся пучков, d – расстояние между центрами пучков, S – площадь перекрытия пучков

Рис. 2. Зависимость сдвига фазы сигнала $\Delta\Phi$, снимаемого с фотоприемника (сплошная кривая, левая шкала ординат), и величина степени перекрытия лучей μ (штриховая кривая, правая шкала ординат) от частоты звука f ; точки с границами погрешности – результаты измерений

Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – входной оптический луч; 2 – лазер; 3, 7, 9 – зеркала; 4 – АО-ячейка; 5 – СВЧ-сигнал; 6 – генератор; 7, 8 – расщепленные лучи; 11 – выходной луч; 12 – поляризатор; 13 – фотоприемник; 14 – осциллограф; 15 – передача сигнала синхронизации

Рис. 4 Фотография с экрана осциллографа: 1 – сигнал от генератора; 2 – сигнал, снимаемый с фотоприемника

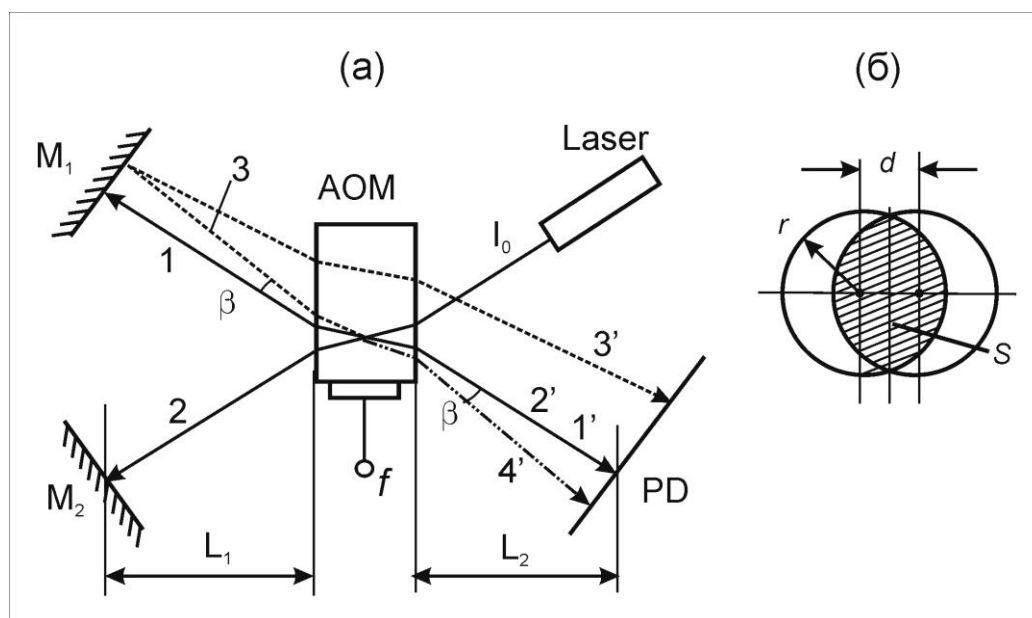


Рис. 1.

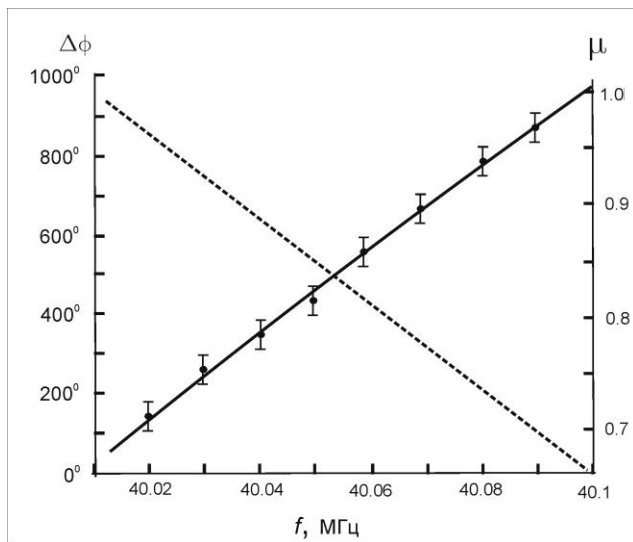


Рис. 2.

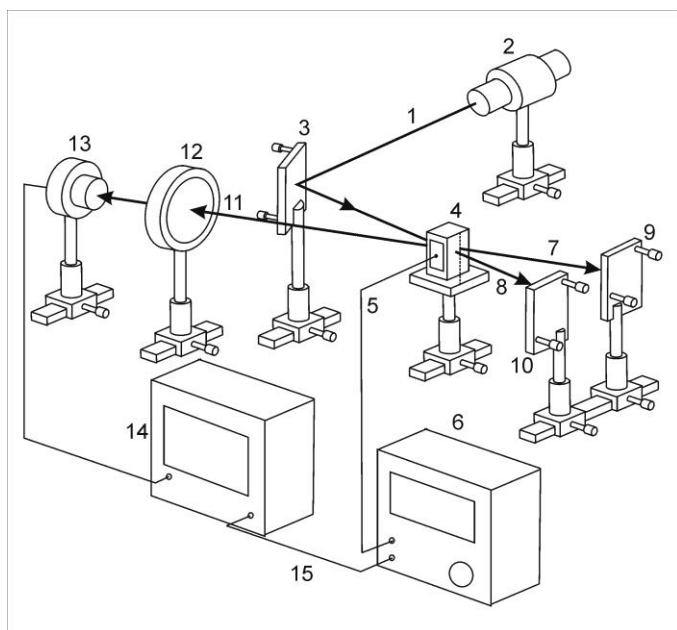


Рис. 3.

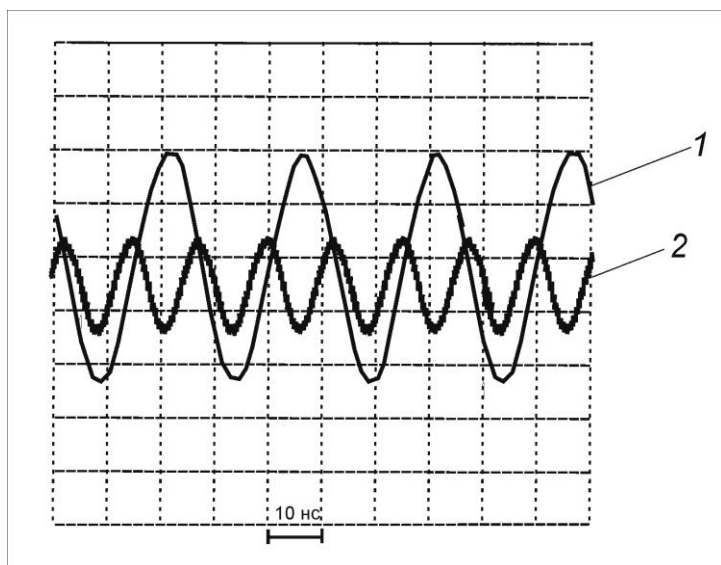


Рис. 4.