ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2021, № 5, с. 105–109

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.241.13:534

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ АНЕМОМЕТРОВ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

© 2021 г. С. Н. Антонов[a,*], Ю. Г. Резвов[b,**]

[a] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

[b] Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева
Россия, 301665, Новомосковск Тульской обл., ул. Дружбы, 8

*e-mail: olga-ant@yandex.ru

**e-mail: rezvovyug@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2021 г.
После доработки 07.04.2021 г.
Принята к публикации 13.04.2021 г.

Рассмотрена схема лазерного доплеровского двухлучевого анемометра потока жидкости или газа на основе акустооптического модулятора на кристалле TeO_2, выполняющего функции делителя луча и сдвигателя частоты света. Показано, что режим акустооптической дифракции – аксиальное двухфононное взаимодействие на медленной акустической моде – наиболее оптимален для схем анемометров. В этом режиме формируются два равноинтенсивных дифрагированных луча с однонаправленными поляризациями, разность частот между которыми равна удвоенной частоте ультразвука. Выполнен расчет частоты параметров модулятора для анемометров с различными длинами волн света.

DOI: 10.31857/S0032816221050025

ВВЕДЕНИЕ

Прикладная акустооптика (а.о.) основана на использовании фотоупругого эффекта, возникающего при распространении ультразвука в прозрачных средах, для управления параметрами оптического излучения [1–6]. Акустооптические эффекты используются в системах и устройствах управления лазерным излучением: для амплитудной и фазовой модуляции, углового сканирования. Важное и практически безальтернативное свойство а.о. – сдвиг частоты света на величину, кратную частоте ультразвука.

Бесконтактный способ измерения кинематических параметров жидкости и газа – лазерная доплеровская анемометрия – широко используется для измерения скорости среды в локальной области потока жидкости или газа [7–9]. Принципиальным является то, что, осуществляя пространственное сканирование исследуемых потоков, можно изучать параметры сложных турбулентных образований.

Принцип действия двухлучевого лазерного доплеровского анемометра (л.д.а.) основан на том, что два когерентных луча с равнонаправленными векторами поляризации (или неполяризованных луча) пересекаются с образованием видимой интерференционной картины (рис. 1). Основные параметры интерференционной области: размер – a, расстояние между полосами интерференции – $d = \lambda/(2\sin\alpha)$, где λ – длина волны света, 2α – угол между лучами.

Если интерференционную картину пересекает непрозрачная (отражающая, рассевающая свет) частица, то интенсивность отраженного света

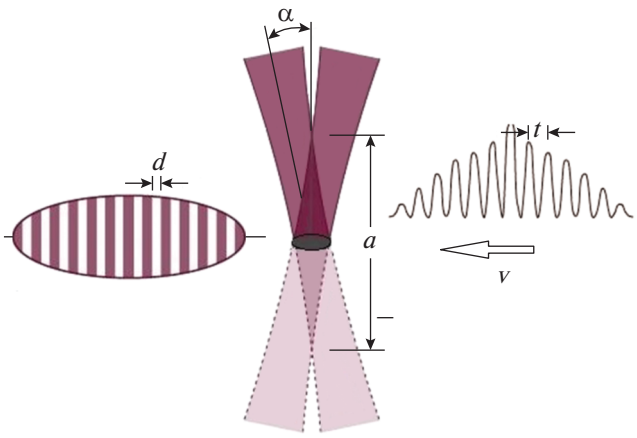

Рис. 1. Интерференционная картина в зоне пересечения лучей.

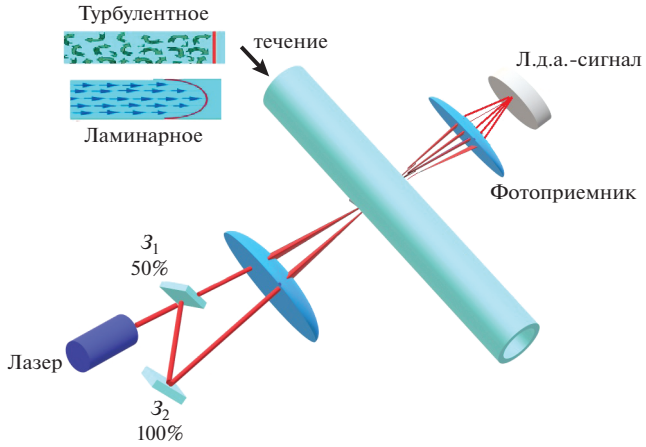

Рис. 2. Схема л.д.а. с зеркальным формированием двух лучей. $З_1$ и $З_2$ – зеркала.

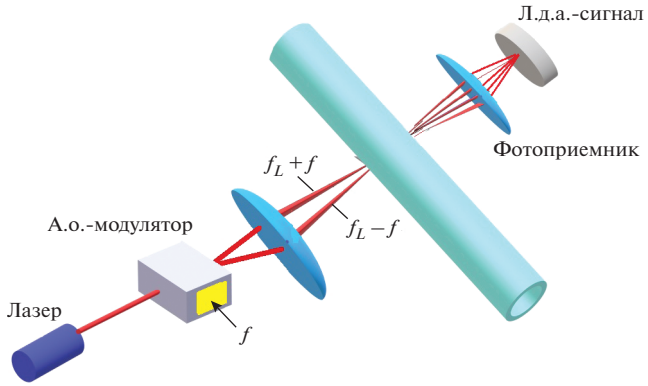

Рис. 3. Принципиальная схема л.д.а. с использованием а.о.-модулятора.

пульсирует с периодом $t = d/v$, где v – скорость частицы. Регистрируя отраженный (рассеянный) свет из области интерференции, можно получить информацию о скорости потока частиц, в чем и заключается принцип работы л.д.а. – бесконтактное оптическое измерение скорости потоков газа или жидкости.

При равенстве частот пересекающихся лучей интерференционная картина стационарна во времени. Следовательно, знак скорости частиц не регистрируется, и сигнал л.д.а. не зависит (инвариантен) от направления движения частиц среды. Очевидно, что в ряде случаев, особенно при исследовании неламинарных потоков, это сужает объем информации.

Разница между частотами лучей обеспечивает движение интерференционной картины в поперечном направлении, и, как следствие, частотный отклик для потоков (частиц) во встречных направлениях будет различен. Это позволяет определять направление движения.

Применение а.о.-модулятора одновременно решает задачу как сдвига частоты света, так и деления лазерного луча на два канала. Разработке модулятора для данной цели посвящена настоящая работа.

Л.Д.А. С АКУСТООПТИЧЕСКИМ МОДУЛЯТОРОМ

На рис. 2 показана оптическая схема л.д.а. для измерения параметров движущейся жидкости в прозрачных трубопроводах с зеркальным формированием двух лучей.

На рис. 3 приведена схема л.д.а. с а.о.-модулятором [10–13].

Существенно то, что а.о.-модулятор выполняет как функцию делителя исходного луча, так и сдвиг частоты. Угол между лучами и частотный сдвиг могут варьироваться в определенном диапазоне и определяются параметрами а.о.-модулятора и длиной волны лазерного излучения.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР

Доминирующим материалом в современной прикладной а.о. является монокристалл парателлурита (TeO_2). Это обусловлено феноменально большой величиной а.о.-качества – $M_2 \approx 1000 \times 10^{-18}$ с^3/г (дифракция на медленной сдвиговой акустической моде), широким диапазоном прозрачности, 0.35–5 мкм, высокой (сотни киловатт на квадратный сантиметр) лучевой стойкостью. Развита технология производства больших (с размерами до 25 × 25 × 50 мм) особо чистых кристаллов и итоговых оптических заготовок. Значительная величина M_2 позволяет создавать компактные высокоэффективные а.о.-устройства (дефлекторы, модуляторы и др.) при приемлемых непрерывных управляющих мощностях радиосигналов, составляющих порядка нескольких ватт.

TeO_2 является двулучепреломляющим, оптически активным, акустически анизотропным кристаллом. Высокое значение M_2 реализуется в такой топологии (геометрии), когда медленная сдвиговая акустическая мода распространяется вблизи направления [110], а в плоскости а.о.-взаимодействия лежит оптическая ось и ось [110]. Принята следующая классификация режимов а.о., связанных с направлением звука относительно оси [110]. Если ультразвуковая волна распространяется с уклоном от оси [110], то это неаксиальная дифракция (англ. far-of-axis), а если строго по оси [110] и один из взаимодействующих лучей распространяется вдоль оптической оси, то это аксиальная дифракция [14, 15].

Для задачи лазерной анемометрии оптимальной является аксиальная двухфононная дифрак-

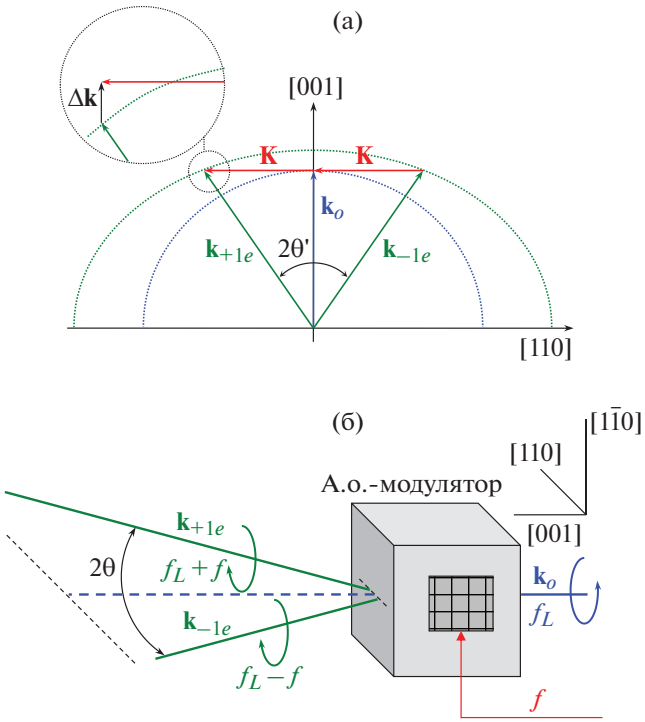

Рис. 4. а – векторная диаграмма аксиальной дифракции; **б** – ход лучей на выходе а.о.-модулятора.

ция, характеризующаяся, во-первых, равнонаправленностью поляризаций отклоненных (интерферирующих) лучей и, во-вторых, удвоенным углом отклонения и удвоенной разностной частотой сдвига по сравнению с неаксиальной дифракцией. На рис. 4 приведена векторная диаграмма данного режима а.о.-дифракции и показан ход лучей на выходе а.о.-модулятора.

Падающий луч (волновой вектор $\mathbf{k}_o$) с правой круговой поляризацией распространяется строго по оптической оси [001], сдвиговая ультразвуковая волна (вектор **K**) – по оси [110] с поляризацией вдоль [1$\bar{1}$0]. В результате двухфононного (двухактового) а.о.-взаимодействия на одной акустической волне луч света разделяется на два равноинтенсивных луча с векторами $\mathbf{k}_{\pm 1e} \cong \mathbf{k}_o \pm \mathbf{K}$. Угол отклонения лучей равен $\theta' \cong K/k_o$ в среде и $\theta \cong f\lambda/v_s$ в воздухе, где f и v_s – соответственно частота и скорость ультразвука, λ – длина волны света. Отклоненные лучи имеют сдвиг по частоте на частоту звука f в плюс и минус соответственно. В плосковолновом приближении при определенной мощности и частоте f_0 звука (частота f_0 определяется точным равенством $\mathbf{k}_{\pm 1e} = \mathbf{k}_o \pm \mathbf{K}$) каждый из двух отклоненных лучей несет 50% мощности падающего излучения. Отметим, что двухфононное взаимодействие можно реализовать и в другой геометрии [16].

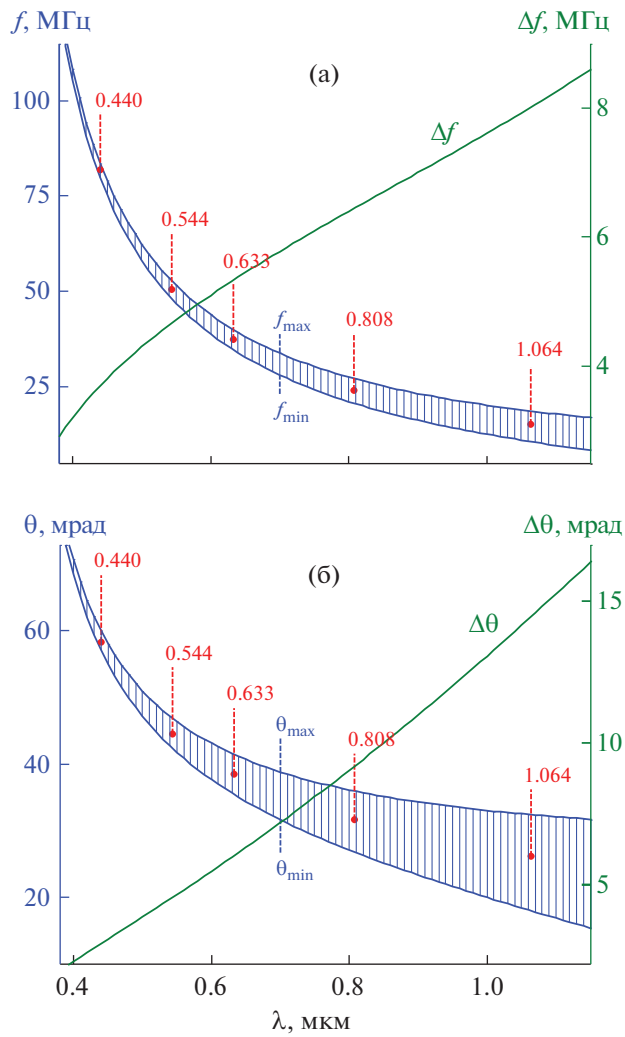

Рис. 5. Зависимость частотного (**а**) и углового (**б**) диапазонов эффективного взаимодействия от длины световой волны.

В ряде практических реализаций возникает необходимость изменять частоту звука, например, при частотной или фазовой модуляции в методах синхронного детектирования. При изменении частоты возникает расстройка синхронизма $\Delta\mathbf{k}$, уменьшается эффективность дифракции, и допустимая величина этого уменьшения определяет полосу акустических частот Δf и интервал $\Delta\theta$ угла отклонения.

Расчет частотной и угловой характеристик был выполнен для большого интервала длин волн света при длине взаимодействия (длина преобразователя) $L = 5$ мм. Оптические и акустические данные взяты из работ [17, 18] соответственно. Рис. 5 иллюстрирует полученные результаты.

Расчет диапазонов велся из условия, что при изменении частоты от значения f_0 доля мощности в каждом из отклоненных лучей снижалась с

Таблица 1

Длина волны λ, мкм	Частотный диапазон $f_{min} - f_{max}$, МГц	Угловой диапазон $\theta_{min} - \theta_{max}$, мрад
0.440	80–84	57–60
0.5435	48–53	42–47
0.6328	35–40	35–41
0.808	21–27	27–36
1.064	11–19	18–32

50% до 30%. На рис. 5а левая шкала соответствует значениям граничных f_{min} и f_{max} частот, а правая шкала – полосе $\Delta f = f_{max} - f_{min}$. На рис. 5б приведены аналогичные зависимости для угла отклонения в воздухе.

Отметим особенности полученных результатов. Во-первых, при приближении к коротковолновой границе области пропускания TeO_2 акустическая частота и угол отклонения увеличиваются, при этом диапазоны сужаются. Это требует более точной юстировки модулятора относительно источника света. Во-вторых, расстройка $\Delta\mathbf{k}$ при отклонении от центральной частоты меняется несимметрично. Согласно рис. 4а, при уменьшении частоты расстройка растет медленнее, чем при увеличении. Значит, диапазон пропускания расширен в сторону уменьшения частоты.

В табл. 1 приведены значения параметров для некоторых характерных длин волн, на которых работают промышленные лазеры.

На рис. 6 приведена фотография внешнего вида модуля, включающего коллиматор волоконного лазера на длине света 1.06 мкм и а.о.-модулятор. Юстировка и последующая фиксация модулятора позволяют обеспечить размещение модуля в любом заданном положении в конструкции л.д.а. Использовался а.о.-модулятор на кристалле TeO_2 с пьезопреобразователем сдвиговых колебаний из $LiNbO_3$ с размерами $L = 5$ мм, $H = 4$ мм. На длине волны света 1.06 мкм и частоте звука 20 МГц угол θ составил 32 мрад.

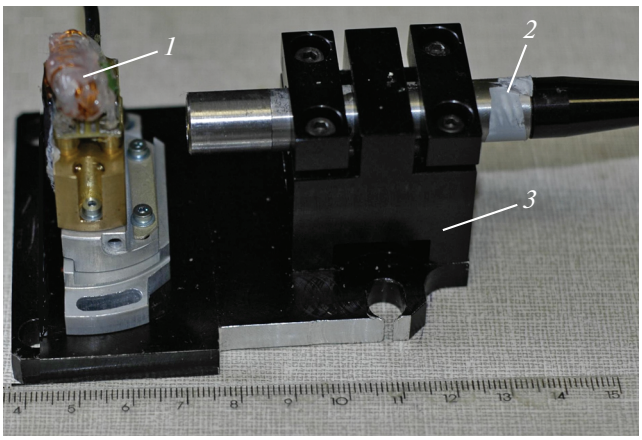

Рис. 6. Внешний вид модуля, содержащего лазер и а.о.-модулятор. *1* – а.о.-модулятор, *2* – коллиматор лазера, *3* – корпус.

Отметим, что данное устройство нашло применение при исследовании аэродинамических потоков в ЦАГИ, г. Жуковский.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование а.о.-модулятора в схеме двухлучевого л.д.а. решает основные функциональные задачи: деление луча на два канала и сдвиг частоты света для верификации знака направления потока. Оптимальным является использование а.о.-модулятора на основе кристалла парателлурита в режиме двухфононной аксиальной дифракции. Данный режим реализуется в топологии, когда свет распространяется строго по оптической оси [001], а сдвиговая ультразвуковая волна – по оси [110] с вектором поляризации по направлению $[1\bar{1}0]$. В этом случае отклоненные лучи имеют равные интенсивности и равнонаправленный вектор поляризации, частоты сдвинуты на двойную частоту ультразвука, угол между лучами равен двойному углу рассеяния при однократной дифракции. При этом возможно изменение разностной частоты между лучами при допустимом снижении максимальной эффективности. Разработана и изготовлена экспериментальная конструкция модуля, содержащего коллиматор волоконного лазера и а.о.-модулятор на основе TeO_2 со следующими параметрами: длина волны света 1.06 мкм, частота звука 20 МГц, угол между лучами 64 мрад.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Благотворительный фонд Андрея Мельниченко (The Andrey Melnichenko Foundation) за помощь в проведении данного исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.

2. *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
3. *Корпел А.* Акустооптика. М.: Мир, 1993.
4. *Xu J., Stroud R.* Acousto-optic devices. N.Y.: Wiley, 1992.
5. *Задорин А.С.* Динамика акустооптического взаимодействия. Томск: Томский гос. ун-т, 2004.
6. *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. М.: МИСиС, 2015.
7. *Ринкевичюс Б.С.* Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978.
8. *Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.* Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
9. *Albrecht H.-E., Borys M., Damasche N., Tropea C.* Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Berlin: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8
10. *Антонов С.Н., Литвинов В.М., Проклов В.В., Скворцов В.В., Филатов А.Н.* // Автометрия. 1982. № 3. С. 45.
11. *Антонов С.Н., Котов В.М., Сотников В.Н., Тимофеев А.С.* Препринт № 20 (549). М.: ИРЭ АН СССР, 1990.
12. *Котов В.М., Шкердин Г.Н.* // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 6. С. 309.
13. *Антонов С.Н., Котов В.М., Сотников В.Н.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 168.
14. *Warner A.W., White D.L., Bonner W.A.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4489. https://doi.org/10.1063/1.1660950
15. *Белый В.Н., Кулак Г.В., Крох Г.В., Ропот П.И., Шакин О.В.* // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85. № 4. С. 673.
16. *Захаров А.В., Волошинов В.Б.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 9. С. 96. http://dx.doi.org/DOI:%2010.1134/S1063784216090292
17. *Молчанов В.Я., Колесников А.И., Брызгина М.А., Гасанов О.В., Арямин Е.Е., Друина Д.В., Лямкин А.В.* // Вестник ТвГУ. Сер. Физика. 2010. № 11. С. 21.
18. *Молчанов В.Я., Волошинов В.Б., Макаров О.Ю.* // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 4. С. 353.