АКУСТООПТИКА

Акустооптические сдвигатели частоты лазерного излучения с большим углом между прямым и дифрагированным лучами

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, В.Н.Шорин, А.В.Апрелев

Предложены конструкции сдвигателей частоты лазерного излучения, обеспечивающих большой угол разведения прямого и продифрагировавшего лучей. Проанализированы два варианта частотосдвигателей, различающихся взаимным расположением обыкновенного и необыкновенного лучей по отношению к оптической оси кристалла. Разработанный акустооптический частотосдвигатель на частоту 80 МГц, созданный на кристалле TeO_2 для лазерного излучения с длиной волны 532 нм, обеспечил разведение прямого и дифрагированного лучей на ~12° как для обыкновенного, так и для необыкновенного входных лучей.

Ключевые слова: *акустооптическая дифракция, частотосдвигатель, акустооптическая ячейка, одноосный кристалл, угол разведения лучей.*

1. Введение

Акустооптические (АО) сдвигатели частоты лазерного излучения (далее частотосдвигатели) широко используются для управления частотой лазерного излучения. АО частотосдвигатели применяются в системах лазерного охлаждения квантовых стандартов частоты [1, 2], в оптических приборах для измерения амплитуды и скорости вибраций поверхностей различных объектов [3, 4]. В приборах для измерения амплитуды и скорости колебаний поверхностей, построенных на основе интерферометра, в плечах интерферометра используют обе части лазерного луча, прошедшего через частотосдвигатель: продифрагировавшую часть (со сдвинутой частотой) и непродифрагировавшую часть (с неизмененной частотой). Оптическая схема лазерного виброметра позволяет разделить эти лучи на выходе из частотосдвигателя и направить по различным траекториям.

В устройствах с изотропной АО дифракцией угол между прямым и дифрагированным лучами мал. Для лазерного излучения видимого диапазона при ультразвуковой частоте менее 100 МГц реальные углы дифракции не превышают 1°. Из-за этого возникают затруднения, которые решаются или за счет существенного увеличения размеров оптического блока, или за счет ввода дополнительных оптических элементов и потери части энергии лазерного излучения.

В устройствах с анизотропной дифракцией (дифракция световой волны с изменением поляризации продифрагировавшей волны) углы дифракции могут достигать нескольких градусов. Дальнейшее увеличение угла между прямым и дифрагированным лучами можно выполнить при помощи внешних элементов, например поляризационного светоделителя, однако в частотосдвигателях, изготовленных из одноосных кристаллов, для этого можно использовать свойства отражения внутри кристаллов. Целью работы является разработка АО частотосдвигателя с анизотропной дифракцией, в котором достигается существенное увеличение угла между прямым и продифрагировавшим лучами, что позволяет сделать более компактным устройство, использующее частотосдвигатель.

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, В.Н.Шорин, А.В.Апрелев. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570, Менделеево; e-mail: s-mmazur@mail.ru

Поступила в редакцию 28 марта 2022 г., после доработки – 6 апреля 2022 г.

2. Описание вариантов анизотропных АО сдвигателей частоты лазерного излучения и расчет их характеристик

Конфигурация частотосдвигателя с анизотропной дифракцией показана на рис.1 [5]. Там же представлена векторная диаграмма акустооптического взаимодействия.

У акустооптической ячейки (АОЯ), показанной на рис.1, входная *1* и выходная *2* грани параллельны. Непродифрагировавшая часть светового пучка выходит из АОЯ без изменения направления распространения. Продифрагировавшая часть светового пучка отклоняется на угол дифракции φ, определяемый величинами волновых векторов света и звука и их взаимным расположением. На выходе из АОЯ угол между обыкновенным и необыкновенным лучами $\delta_0 \approx n^*\varphi$, где n^* – эффективный показатель преломления продифрагировавшего луча. Угол δ_0 достигает максимума при нормальном падении обыкновенной волны на грань *2*.

В различных АО устройствах часто встречаются разные вариации наклона выходной грани АО ячейки. Их используют для коррекции направления распространения дифрагированного луча; уменьшения аберраций в АО фильтрах, предназначенных для передачи изображений; создания поляризаторов, пропускающих только продифрагировавшее излучение [6–10]. В настоящей работе предлагается выбирать наклон грани *2* таким, что грань перестает быть выходной, а становится полностью отражающей для лучей. Увеличения угла между прямым и продифрагировавшим лучом на выходе АО частотосдви-

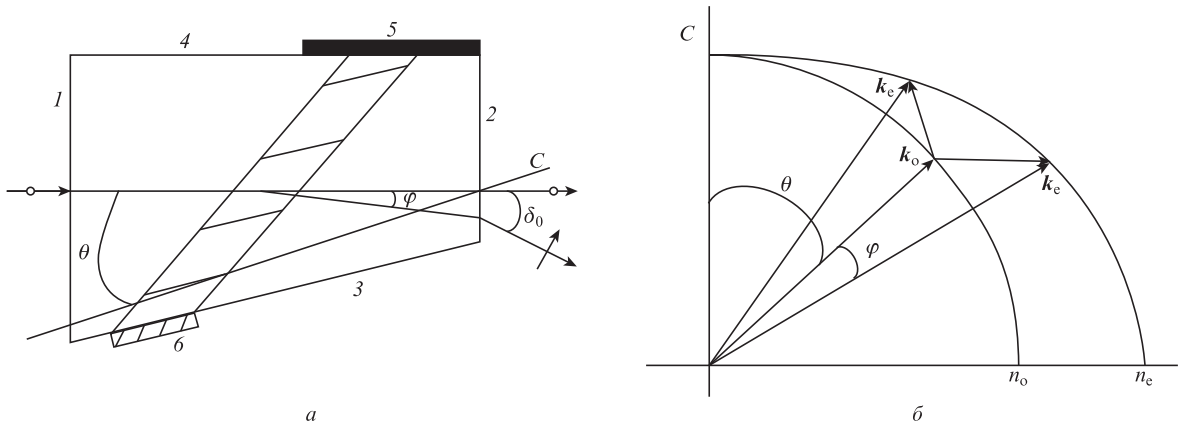

Рис.1. Схема АО ячейки анизотропного АО частотосдвигателя (*а*) и векторная диаграмма АО взаимодействия с возможными положениями волновых векторов относительно оптической оси (*б*): *1–4* – грани ячейки; *5* – поглотитель ультразвуковой волны; *6* – ультразвуковой излучатель размером $L \times H$; *C* – направление оптической оси кристалла; φ – угол дифракции внутри АО ячейки; θ – угол между оптической осью кристалла и направлением распространения обыкновенного луча; δ_0 – угол между обыкновенным и необыкновенным лучами после выхода из АОЯ; n_o и n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; стрелкой и кружком обозначено состояние поляризации лучей.

гателя можно достичь, применив оптические схемы, показанные на рис.2, где прямой и продифрагировавший лучи выходят из АОЯ после полного внутреннего отражения внутри нее.

В АОЯ, изображенной на рис.2,*а*, угол между обыкновенным и необыкновенным лучами света при выходе из АОЯ максимально увеличивается, когда угол, который необыкновенный луч образует с оптической осью, становится больше, чем угол, образуемый обыкновенным лучом. В АОЯ, изображенной на рис.2,*б*, где угол между необыкновенным лучом и оптической осью меньше угла между обыкновенным лучом и оптической осью, угол между обыкновенным и необыкновенным лучами света при выходе из АОЯ достигает максимума.

Оценки показывают, что угол между необыкновенным и обыкновенным лучами изменяется незначительно при смене поляризации входного луча. В дальнейшем для расчетов будем предполагать, что падающая световая волна обыкновенная, а наклон грани *2* АОЯ такой, что обеспечивает перпендикулярное падение отраженного обыкновенного светового луча на выходную грань *4* или *3*. Пусть в результате АО дифракции необыкновенный луч отклоняется на угол φ от обыкновенного луча. Тогда для схемы рис.2,*а* угол Δ можно найти из уравнения (1), а для схемы рис.2,*б* – из уравнения (2):

$$\cos(\pi/4+\varphi)\sqrt{n_o^2[\cos(\varphi+\theta)]^2+n_e^2[\sin(\varphi+\theta)]^2}$$
$$=\cos(\pi/4+\Delta)$$
$$\times\sqrt{n_o^2[\cos(\pi/2-\theta+\Delta)]^2+n_e^2[\sin(\pi/2-\theta+\Delta)]^2}, \quad (1)$$

$$\cos(\pi/4+\varphi-(\theta-\gamma)/2)$$
$$\times\sqrt{n_o^2[\cos(\theta-\varphi)]^2+n_e^2[\sin(\theta-\varphi)]^2}$$
$$=\cos(\pi/4+\Delta-(\theta-\gamma)/2)$$
$$\times\sqrt{n_o^2[\cos(\pi/4+\gamma-\Delta)]^2+n_e^2[\sin(\pi/4+\gamma-\Delta)]^2}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) получены из условия равенства проекций волновых векторов падающей и отраженной волн на отражающую грань.

На выходной грани АОЯ необыкновенный луч преломляется и выходит под углом δ, который для схемы, изображенной на рис.2,*а*, определяется формулой (3), а для схемы, изображенной на рис.2,*б*, формулой (4):

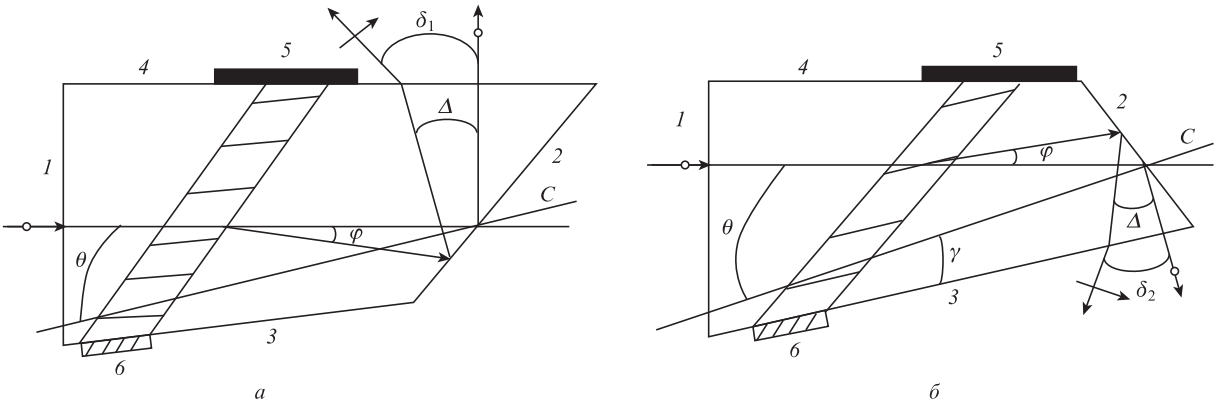

Рис.2. Схемы хода лучей в АО ячейках в конфигурациях 1 (*а*) и 2 (*б*); Δ – угол между обыкновенным и необыкновенным лучами после отражения внутри АОЯ; δ_1, δ_2 – углы между обыкновенным и необыкновенным лучами после выхода из АОЯ; γ – угол между гранью *3* и оптической осью кристалла; остальные обозначения те же, что и на рис.1.

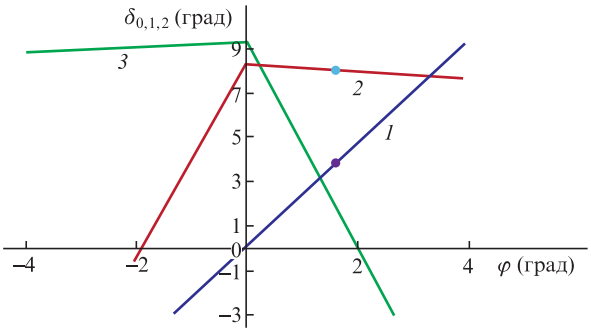

Рис.3. Зависимости от угла дифракции φ угла δ_0 (*1*), величин $(|\delta_1| - |\delta_0|)$ (*2*) и $(|\delta_2| - |\delta_0|)$ (*3*). Кружками обозначены экспериментальные результаты для конфигураций частотосдвигателей, представленных на рис.1 и на рис.2,*а*.

$$\delta_1 = \Delta\sqrt{n_o^2[\cos(\pi/2+\Delta-\theta)]^2 + n_e^2[\sin(\pi/2+\Delta-\theta)]^2}, \quad (3)$$

$$\delta_2 = \Delta\sqrt{n_o^2[\cos(\pi/2+\gamma-\Delta)]^2 + n_e^2[\sin(\pi/2+\gamma-\Delta)]^2}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) предполагается, что угол δ мал и $\sin\delta = \delta$. При расчетах принималось, что кристалл одноосный, оптически положительный, и не учитывалось возможное наличие гиротропии. Для оптически отрицательных кристаллов эффект увеличения угла между прямым и продифрагировавшим лучами при внутреннем отражении также возможен, но математические выражения (1)–(4) несколько изменятся.

Для кристалла TeO_2 при длине волны излучения 532 нм и входном обыкновенном луче, который распространяется под углом $\theta = 11.85°$ к оптической оси кристалла, были рассчитаны зависимости, представленные на рис.3. Кривая *1* – это зависимость угла δ_0 между обыкновенным и необыкновенным лучами как функция угла дифракции φ при использовании конфигурации АО частотосдвигателя, представленной на рис.1,*а*, кривые *2* и *3* – это зависимости $(|\delta_1| - |\delta_0|)$ и $(|\delta_2| - |\delta_0|)$ от угла φ, т.е. изменение углов между выходными лучами относительно угла δ_0 при реализации частотосдвигателей по схемам, представленным на рис.2. Из рис.3 видно, что если необыкновенная волна распространяется под бóльшим углом к оптической оси, чем обыкновенная волна, то для максимального выигрыша в увеличении угла между ними следует выбирать конфигурацию АО частотосдвигателя, изображенную на рис.2,*а*, и наоборот, если необыкновенная волна распространяется под меньшим углом к оптической оси, чем обыкновенная волна, то для максимального выигрыша в увеличении угла между ними следует выбирать конфигурацию АО частотосдвигателя, изображенную на рис.2,*б*.

3. Результаты экспериментального исследования АО частотосдвигателей

Нами были изготовлены АО частотосдвигатели на основе кристалла TeO_2 по схемам, представленным на рис.1 и на рис.2,*а*. Для реализованных частотосдвигателей была выбрана геометрия АО взаимодействия, соответствующая АО фильтру [11]. Векторная диаграмма взаимодействия в обоих частотосдвигателях была одинакова с точностью, определяемой погрешностью ориентировки граней. Оба АО частотосдвигателя работали на длине волны 532 нм и обеспечивали сдвиг частоты 80 МГц. При нормальном падении света на входную грань угол θ был равен 11.85°, а угол $\gamma = 5.77°$, определяющий направление волнового вектора ультразвуковой волны, задавался ориентацией плоскости *3* АОЯ. Для обоих частотосдвигателей в АОЯ достигалась эффективность АО дифракции, превышающая 90%, при управляющей мощности около 50 мВт для светового пучка диметром меньше 2 мм. Результаты исследований, полученные для АОЯ, представлены в табл.1.

Табл.1. Результаты исследований частотосдвигателей двух конфигураций.

Тип АОЯ	$L\times H$ (мм)	$F_{го}^{**}$ (МГц)	Δf_o^{***} (МГц)	$F_{ге}^{**}$ (МГц)	Δf_e^{***} (МГц)	φ^* (град)	Δ^* (град)	$\delta_{0,1}^*$ (град)
АОЯ (рис.1)	7×3	81.9	0.6	83.7	1	1.65	–	3.8
АОЯ (рис.2,*а*)	5×2	80.65	1.1	81.7	1.4	1.65	4.8	11.9

* рассчитанные величины;

**$F_{го}$ и $F_{ге}$ – резонансные частоты акустического взаимодействия при вводе обыкновенной и необыкновенной волн;

***Δf_o и Δf_e – ширины обращенных аппаратных функций акустического взаимодействия при вводе обыкновенной и необыкновенной волн.

Из последнего столбца табл.1 видно, что при использовании внутреннего отражения лучей в АОЯ угол δ между обыкновенным и необыкновенным лучами увеличился примерно в три раза.

Расчеты показывают, что для конфигурации рис.2,*б* схемы АО ячейки при одинаковых углах θ и φ и угле между необыкновенным лучом и оптической осью, равным $\theta-\varphi$, угол между обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе из АО частотосдвигателя $\delta_2 \approx 12.9°$.

Следует отметить, что для используемых конфигураций АО взаимодействия при изменении поляризации входного луча пространственное расположение выходных лучей меняется, но угол δ изменяется незначительно. Таким образом, частотосдвигатель можно успешно использовать для обеих поляризаций входного лазерного излучения.

1. Риле Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
2. Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Стрелкин С.А., Слюсарев С.Н. *Альманах современной метрологии*, №11, 81 (2017).
3. Балкарей И.Е., Давыдов Б.Л., Епихин В.М., Козлов К.С., Пальцев Л.Л., Самородов Ю.Д. *Квантовая электроника*, **16** (7), 1494 (1989) [*Quantum Electron*., **19** (7), 964 (1989)].
4. https://www.polytec.com/int.
5. Епихин В.М., Барышев В.Н., Слюсарев С.Н., Апрелев А.В., Блинов И.Ю. *Квантовая электроника*, **49** (9), 857 (2019) [*Quantum Electron*., **49** (9), 857 (2019)].
6. Абрамов А.Ю., Епихин В.М., Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н. *Тез. докл. XV Всесоюзн. конф. «Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела»* (Л.: ЛИАП, 1991, ч.IV, с.84-85).
7. Мазур М.М., Мазур Л.И., Пустовойт В.И., Судденок Ю.А., Шорин В.Н. *ЖТФ*, **87** (9), 1399 (2017) [*Techn. Phys*., **62** (9), 1407 (2017)]. DOI 10.21883/JTF.2017.09.44917.2056.
8. Епихин В.М., Калинников Ю.К. *ЖТФ*, **59** (2), 160 (1989).
9. Мазур М.М., Пустовойт В.И. Патент на изобретение 2388030 от 27 апреля 2010 г.
10. Епихин В.М., Визен Ф.Л., Магомедов З.А., Пальцев Л.Л. *ЖТФ*, **88** (7), 1071 (2018) [*Techn. Phys*., **63** (7), 1040 (2018)].
11. Chang I.C. *Appl. Phys. Lett*., **25** (7), 370 (1974).