

**Амплитудная модуляция двухцветного излучения на удвоенной частоте звука***В. М. Котов, А. Н. Булюк*

*Для амплитудной модуляции двухцветного оптического излучения на удвоенной частоте звука предложено использовать устройство, состоящее из двух идентичных акустооптических (АО) ячеек, работающих на одной частоте звука и обеспечивающих выполнение брэгговского синхронизма двух оптических лучей с одной акустической волной. В качестве АО-среды предложено использовать гиротропный кристалл, собственные волны которого циркулярно поляризованы. Модуляция вызвана интерференцией волн с циркулярными поляризациями. Экспериментально получена амплитудная модуляция двухцветного излучения Ar-лазера ( $\lambda_1 = 0,488$  мкм и  $\lambda_2 = 0,514$  мкм) на частоте 236 МГц с использованием двух АО-ячеек из парателлурита.*

*Ключевые слова:* акустооптическая дифракция, двухцветное излучение, брэгговский режим, сдвиг частоты, амплитудная модуляция.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-82-87

**Введение**

Акустооптические (АО) амплитудные модуляторы получили наибольшее распространение среди всех АО-устройств [1–3]. Традиционно используемые модуляторы основаны на АО взаимодействии света с импульсами звуковой волны, распространяющихся в АО-кристалле. При этом длительность импульса существенно меньше несущей частоты звукового сигнала  $f$  [1, 2]. Одним из наиболее эффективных способов существенного увеличения частоты модуляции является использование интерференции двух волн с разными частотами [4, 5], при этом разность частот интерферирующих волн задается частотой звуковой волны. Частота модуляции в этом случае может превышать частоту звука  $f$  в несколько раз. Например, в

[5] получена модуляция света на частоте  $4f$ . Однако во всех вышеприведенных работах осуществлялась модуляция только монохроматического излучения. В настоящей работе предлагается метод получения амплитудной модуляции двухцветного оптического излучения на удвоенной частоте звука.

Двухцветные промодулированные оптические сигналы нужны, например, для разработки процессоров спектрального типа [6], в двухкоординатной лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [7, 8], для разработки двухчастотных гироскопов [9] и т. д.

**Оптическая схема устройства**

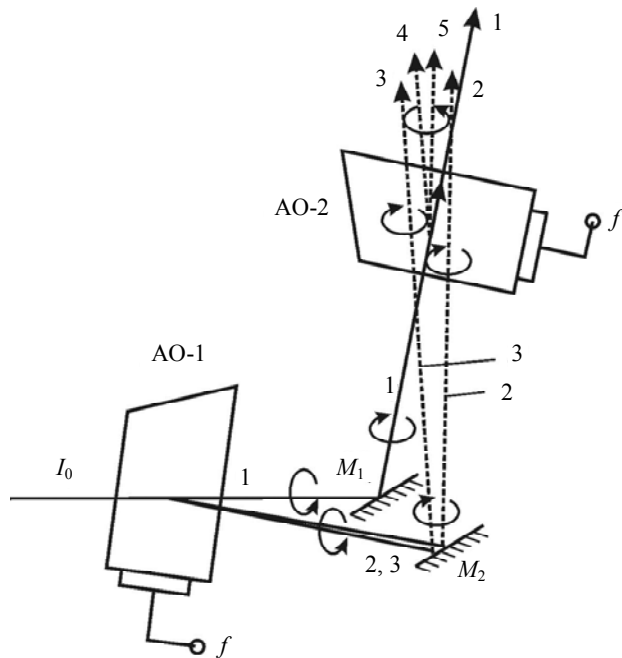
Для модуляции двухцветного излучения нами используются режимы дифракции, которые обеспечивают выполнение строгого брэгговского синхронизма двух разных оптических лучей с одной акустической волной. Такие режимы исследованы в [10]. Оптическая схема предлагаемого устройства приведена на рис. 1. Здесь двухцветное излучение  $I_0$ , состоящее из двух монохроматических лучей с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ), направляется на АО ячейку АО-1. На выходе ячейки

**Котов Владимир Михайлович**, в.н.с., д.ф.-м.н.  
E-mail: vmk277@ire216.msk.su, vmk6054@mail.ru  
**Булюк Алексей Николаевич**, н.с., к.ф.-м.н.  
ФирЭ им. В. А. Котельникова РАН.  
Россия, 141195, Московская обл., г. Фрязино,  
пл. Введенского, 1.

Статья поступила в редакцию 02 августа 2022 г.

© Котов В. М., Булюк А. Н., 2022

часть излучения не дифрагирует в кристалле, оно проходит в виде двухцветного излучения  $I$ , а другая часть – дифрагирует в минус первый порядок, отклоняясь в направления лучей 2 и 3 с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .



**Рис. 1. Оптическая схема устройства.**  $I_0$  – падающее двухцветное излучение;  $AO-1$ ,  $AO-2$  – АО-ячейки; 1 – непродифрагировавший луч; 2, 3 – продифрагировавшие лучи в ячейке  $AO-1$ ; 4, 5 – продифрагировавшие лучи в ячейке  $AO-2$ ;  $M_1$ ,  $M_2$  – отражающие зеркала;  $f$  – сигнал, подводимый к ячейкам

Полагаем, что АО-ячейка выполнена из гиротропного кристалла. Собственные волны такого кристалла имеют правоциркулярную и левоциркулярную поляризации ( $R$  и  $L$  поляризации). Полагаем, что происходит анизотропная дифракция света на звуке, т. е.  $R$ -поляризованные лучи дифрагируют в  $L$ -поляризованные, и наоборот,  $L$ -лучи дифрагируют в  $R$ -лучи. Отметим, что эти два вида дифракции происходят под разными углами Брэгга, поэтому на практике выбирают либо один вид дифракции, либо другой. Пусть выбран режим, когда  $R$ -лучи дифрагируют в  $L$ -лучи. Тогда  $R$ -поляризованные компоненты излучения  $I_0$  дифрагируют в лучи 2 и 3, являющиеся  $L$ -поляризованными, непродифрагировавшие лучи 1 так же являются  $L$ -поляризованными. Луч 1 отражается зеркалом  $M_1$  в направлении АО-ячейки  $AO-2$ , идентичной ячейке  $AO-1$ . Сигналы на обе ячейки поступают с одного генератора электрических сигналов. Лучи 2 и 3

отражаются зеркалом  $M_2$  в направлении той же ячейки  $AO-2$ . Известно [11], что циркулярно поляризованные лучи после отражения от зеркала меняют свои поляризации на взаимортогональные, т. е.  $L$ -поляризованные лучи 1, 2 и 3 после отражения от зеркал  $M_1$  и  $M_2$  будут  $R$ -поляризованными. Условия дифракции в ячейке  $AO-2$  выбраны таким образом, что  $R$ -поляризованный луч 1 дифрагирует на акустической волне в направления  $L$ -поляризованных лучей 4 и 5, а  $R$ -поляризованные лучи 2 и 3 проходят ячейку  $AO-2$  без дифракции. Зеркало  $M_2$  отражает лучи 2, 3 таким образом, что луч 2 распространяется параллельно лучу 5, а луч 3 – параллельно лучу 4. Отметим, что длина волны лучей 2 и 5 равна  $\lambda_1$ , а лучей 3 и 4 –  $\lambda_2$ . Для получения эффекта модуляции необходимо, чтобы параллельно распространяющиеся лучи интерферировали между собой, при этом частоты лучей должны быть разными. Для получения разных частот интерферирующих лучей использовано свойство АО-дифракции сдвигать частоту света дифрагировавшего излучения относительно частоты падающего. Частота сдвига равна частоте звуковой волны. Исходя из этого, ячейки  $AO-1$  и  $AO-2$  ориентированы таким образом, что дифракция лучей в первой ячейке осуществляется в  $-1$ -й порядок, а во второй – в  $+1$ -й. Другими словами, частоты лучей 2 и 3, дифрагировавших в ячейке  $AO-1$ , равны  $(\omega_1 - \Omega)$  и  $(\omega_2 - \Omega)$ , соответственно, а частоты лучей 5 и 4, сформировавшихся в результате дифракции в ячейке  $AO-2$ , равны  $(\omega_1 + \Omega)$  и  $(\omega_2 + \Omega)$ . Здесь  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – циклические частоты лучей с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $\Omega$  – циклическая частота акустической волны. Она связана с частотой  $f$  соотношением  $f = \Omega / 2\pi$ . Таким образом, параллельно распространяющиеся лучи 2 и 5 имеют частоты  $(\omega_1 - \Omega)$  и  $(\omega_1 + \Omega)$ , их сложение приведет к формированию линейно поляризованного излучения с частотой  $\omega_1$ , вектор поляризации которого вращается с частотой  $\Omega$  [12]. Аналогичным образом сложение двух лучей 3 и 4 приведет к формированию линейно поляризованной волны с частотой  $\omega_1$ , вектор поляризации которой вращается с частотой  $\Omega$ . Это приведет к тому, что на выходе устройства образуются два линейно поляризованных луча с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Векторы поляризации обоих лучей вращаются с одной

и той же частотой  $\Omega$ . Если после ячейки АО-2 расположить поляризатор, то на выходе устройства получим два луча с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , промодулированных на частоте  $2f$ .

### Степень перекрытия оптических лучей

Как ясно из рис. 1, параллельные лучи не полностью перекрываются друг с другом. Только перекрывающаяся часть лучей, по сути, является промодулированным сигналом. Оценим степень перекрытия двух лучей в зависимости от расстояния между центрами лучей. На рис. 2 представлено поперечное сечение двух пар пересекающихся лучей с длинами волн  $\lambda_1$  (а) и  $\lambda_2$  (б). Полагаем, что сечения всех лучей представляют собой окружности с одинаковым радиусом  $r$ . Окружности налагаются друг на друга, расстояние между центрами окружностей равно  $d$ . Расстояние между центрами пар лучей равно  $D$ . Общая площадь окружностей (область пересечения) обозначена  $S$ .

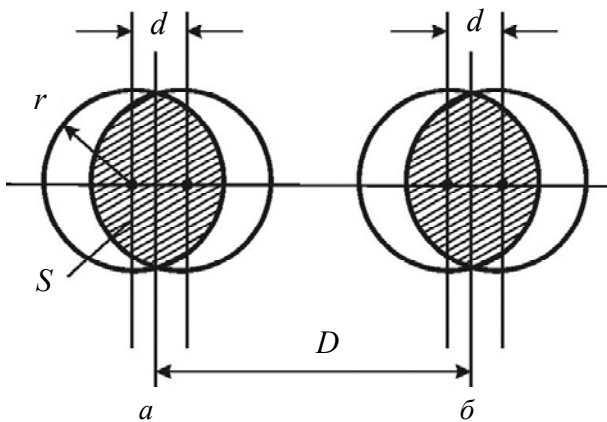


Рис. 2. Наложение интерферирующих лучей: а) – лучи с длиной волны  $\lambda_1$ ; б) – лучи с длиной волны  $\lambda_2$ ;  $d$  – расстояние между центрами лучей;  $r$  – радиус лучей;  $S$  – площадь пересечения лучей;  $D$  – расстояние между центрами пар лучей

Нетрудно показать, что площадь  $S$  вычисляется согласно выражению

$$S = 2r(r\varphi - 0,5d \sin \varphi), \quad (1)$$

где  $\varphi = \arccos(0,5d/r)$ . Степенью перекрытия двух окружностей  $\mu$  будем называть отношение площади  $S$  к площади окружности, т. е.

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

Выполним численные оценки применительно к условиям эксперимента. Все расчеты будем делать на примере двухцветного излучения, генерируемого Аг-лазером на длинах волн  $\lambda_1 = 0,488$  мкм и  $\lambda_2 = 0,514$  мкм. Поскольку  $\text{TeO}_2$  является не только гиротропным, но и одноосным кристаллом, поляризации его собственных волн, строго говоря, являются эллиптическими. Показатели преломления  $\text{TeO}_2$  определяются выражениями [10]

$$n_{1,2}^2 = \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{\frac{1}{n_0^2} + \frac{\text{tg}^2 \varphi}{2} \left( \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\text{tg}^4 \varphi \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2}}, \quad (3)$$

а эллиптичности собственных волн кристалла вычисляются как

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

Здесь  $n_0, n_e$  – главные показатели преломления кристалла;  $\varphi$  – угол между оптической осью [001] кристалла и волновым вектором световой волны;  $G_{33}$  – компонента псевдотензора гирации. На основании табличных значений [13, 14] для  $\text{TeO}_2$  имеем:

$$\lambda_1 = 0,488 \text{ мкм}; n_0 = 2,3303; n_e = 2,494; G_{33} = 3,93 \times 10^{-5};$$

$$\lambda_2 = 0,5145 \text{ мкм}; n_0 = 2,3115; n_e = 2,4735; G_{33} = 3,69 \times 10^{-5}.$$

В расчетах полагалось, что двухцветное излучение распространяется вблизи оптической оси кристалла [001], дифракция происходит на «медленной» звуковой волне, распространяющейся вдоль направления [110] кристалла, со скоростью, равной  $V = 0,617 \times 10^5$  см/с. Расчеты показывают, что наилучшие условия синхронизма двухцветного излучения Аг-лазера с одной акустической волной в  $\text{TeO}_2$  достигаются в полосе частот 102–120 МГц по уровню 3 дБ.

### Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

Экспериментальная установка полностью соответствовала оптической схеме, приведенной на рис. 1. Для экспериментов нами была выбрана частота 118 МГц. На этой частоте угол падения света на кристалл согласно расчетам равен  $3,3^\circ$ . Угол между лучом 1 и лучами 2, 3 равен  $\sim 5^\circ$ , угол между лучами 2 и 3 составляет  $\sim 0,2^\circ$ . Такой же угол между лучами 4 и 5. Эллиптичности лучей с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равны  $\rho_1 = 0,82$  и  $\rho_2 = 0,84$  соответственно. Как видно, эллиптичности лучей близки к единице, что обеспечивает эффективное преобразование поляризаций лучей при их отражении от зеркал.

В экспериментальной установке оптическое излучение проходило путь между ячейками АО-1 и АО-2 длиной  $\sim 8$  см. При этом центры дифрагировавших лучей 2 и 3 расходились на величину 0,14 мм. Радиусы  $r$  оптических лучей согласно нашим измерениям равнялись  $\sim 0,5$  мм. Степень перекрытия лучей 2 и 5, а так же лучей 3 и 4, согласно расчетам на основании выражений (1) и (2), равна  $\mu = 0,867$ . Другими словами, монохроматические пары перекрываются на  $\sim 87\%$ . На экране, расположенном на расстоянии  $\sim 1$  м от ячейки АО-2, отчетливо наблюдались два дифракционных пятна, соответствующие лучам с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , размеры пятен  $\sim 1$  мм. Расстояние между пятнами составило  $\sim 3,5$  мм. При необходимости дифракционные пятна можно свести в один луч. Нами это осуществлялось путем использования призмы из  $\text{TeO}_2$  с углом при вершине  $\sim 11^\circ$ , располагающейся сразу после ячейки АО-2. Для наблюдения модуляции каждой монохроматической составляющей выходного дифрагировавшего излучения после ячейки АО-2 устанавливался поляризатор, а на расстоянии 1 м по ходу распространения лучей располагался фотодетектор, с помощью которого поочередно измерялась амплитудная модуляция каждого луча. На рис. 3 приведен типичный сигнал от луча с длиной волны  $\lambda_1$  (кривая 1), снимаемый с фотоприемника и наблюдаемый на экране осциллографа. Сигнал от луча  $\lambda_2$  аналогичен сигналу от луча  $\lambda_1$  и здесь не приводится. Здесь же приведен нулевой сигнал (2),

регистрируемый в отсутствии оптического излучения.

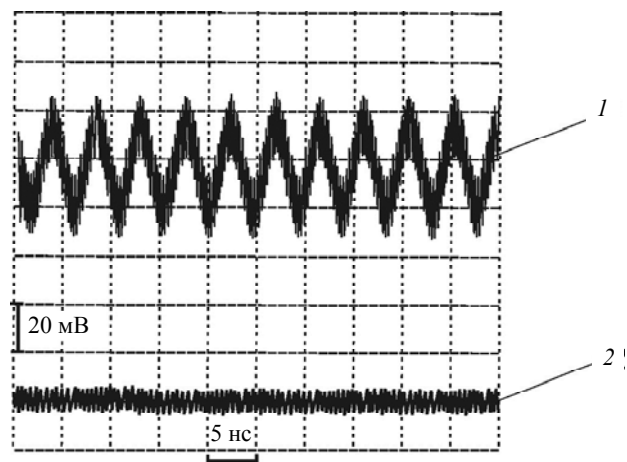


Рис. 3. Модулированный сигнал, наблюдаемый на экране осциллографа: 1 – модулированный сигнал луча с длиной волны  $\lambda_1$ ; 2 – сигнал в отсутствии оптического излучения

Частота сигнала 1 соответствует удвоенной частоте сигнала, подаваемого на ячейки, что проверялось измерениями частот с помощью частотомера.

Глубина модуляции сигнала составляла  $\sim 20\text{--}25\%$  в зависимости от ориентации поляризатора. Этот эффект может быть объяснен наличием эллиптичности интерферирующих лучей. Сравнительно небольшая глубина наблюдаемого сигнала на рис. 3 может быть объяснена рядом причин. Прежде всего, реальные волны, используемые нами в экспериментах, не являются плоскими. Они имеют гауссово распределение. Кроме неполного наложения волн, рассмотренного в настоящей статье, на глубину интерференции влияют такие факторы, как искажение лазерных пучков в процессе АО взаимодействия. В [15] показано, что искажение дифрагировавшего поля зависит от геометрии светового и акустического пучков и от величины акустической мощности. В частности, световое поле сужается вдоль направления распространения звуковой волны на величину  $\sqrt{1-\xi/4}$ , где  $\xi$  – безразмерный параметр, равный отношению акустической мощности, излучающей преобразователем, к мощности, при которой эффективность дифракции равна 100%. В нашем случае  $\xi \approx 1$ . Таким образом, пучок сужается на  $\sim 15\%$ . Эффект сужения, с другой стороны, приводит к увеличению интенсивности центральной части пучка из-за перераспределения

его мощности, что приводит к искажению профиля пучка. Это, согласно нашим оценкам, так же уменьшает глубину интерференции на ~15 %. На профиль оптического поля влияет и неоднородность звуковой волны [16]. Согласно нашим оценкам, неоднородность звука приводит к уменьшению глубины интерференции на 5–7 %. Кроме того, на конечный результат могут влиять паразитное рассеяние света в АО-ячейках, неполная идентичность АО-ячеек, и т. п. Немаловажным является и то обстоятельство, что в экспериментах добивалась ситуация, когда глубина модуляции лучей с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  была одинакова, что принципиально важно для практического использования устройства, например, в системах ЛДА. Отметим, что посредством более тщательной угловой юстировки и подбором подводимой мощности можно было увеличить (на 7–10 %) глубину модуляции одного из лучей в ущерб глубине модуляции другого луча. Однако мы предпочли выбрать режим, обеспечивающий равенство глубин модуляции обоих лучей.

Отметим, что полученный результат ничуть не уступает характеристикам оптического излучения, используемого в дифференциальных схемах ЛДА [17]. Там излучение формируется в результате интерференции двух лучей, которое затем применяется для измерения скорости потоков.

Полученные результаты могут найти применение в устройствах, предназначенных для управления двухцветным лазерным излучением.

### Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. Для амплитудной модуляции двухцветного оптического излучения с управляемой частотой предложено использовать устройство, состоящее из двух идентичных АО-ячеек, работающих на одной частоте звука и обеспечивающих выполнение брэгговского синхронизма двух оптических лучей с одной акустической волной. В качестве АО-среды предложено использовать гиротропный кристалл, собственные волны которого циркулярно поляризованы. Модуляция вызвана интерференцией волн с циркулярными поляризациями.

2. Для обеспечения разных частот интерферирующих лучей предложено использовать режимы АО дифракции, при которых дифракция в одной ячейке происходит с повышением частоты лучей, дифрагировавших в кристалле, а в другой – с понижением частоты.

3. Схема опробована на устройстве, состоящем из двух АО-ячеек из парателлурита, работающих на частоте звука 118 МГц. В качестве источника двухцветного излучения использован Ag-лазер, генерирующий две наиболее яркие линии с длинами волн 0,488 мкм и 0,514 мкм. Получена модуляция монохроматических компонент на частоте 236 МГц.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Советское Радио, 1978.
2. Балакиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и Связь, 1985.
3. Xu J., Stroud R. Acousto-optic Devices: Principles, Design, and Applications. – N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
4. Котов В. М., Аверин С. В., Шкердин Г. Н. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 2. С. 179.
5. Котов В. М., Аверин С. В., Котов Е. В. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 65.
6. Акустооптические процессоры спектрального типа / Под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. – М.: Радиотехника, 2012.
7. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982.
8. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985.
9. Kersey A. D., Dandridge A., Burns W. K. // Electron. Lett. 1986. Vol. 22. № 18. P. 935.
10. Котов В. М. Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. – М.: Янус-К, 2016.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
12. Най Дж. Физические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1967.
13. Кизель В. А., Бурков В. И. Гиротропия кристаллов. – М.: Наука, 1980.

14. Акустические кристаллы / Под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982.

15. Молчанов В. Я., Китаев Ю. И., Колесников А. И., Нарвер В. Н., Розентейн А. З., Солодовников Н. П., Шаповаленко К. Г. Теория и практика современной акустооптики. – М.: Изд. Дом МИСис, 2015.

16. Balakshy V. I., Mantsevich S. N. // *Acoustical Physics*. 2012. Vol. 58. № 5. P. 549.

17. Гречихин В. А. Разработка и анализ компьютерных алгоритмов обработки одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1996.

PACS: 42.79.Jp; 42.81.Gs; 42.25.Ja

## Amplitude modulation of two-color radiation at double sound frequency

V. M. Kotov and A. N. Bulyuk

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, (Fryazino Branch)  
1 Vvedensky sq., Fryazino, Moscow Region, 141120, Russia

Received August 02, 2022

***For amplitude modulation of two-color optical radiation at a double sound frequency, it is proposed to use a device consisting of two identical acousto-optic (AO) cells operating at the same sound frequency and providing Bragg matching of two optical beams with one acoustic wave. As an AO medium, it is proposed to use a gyrotropic crystal whose eigenwaves are circularly polarized. The modulation is caused by the interference of waves with circular polarizations. The amplitude modulation of two-color Ar laser radiation ( $\lambda_1 = 0.488 \mu\text{m}$  and  $\lambda_2 = 0.514 \mu\text{m}$ ) at a frequency of 236 MHz was experimentally obtained using two paratellurite AO cells.***

***Keywords:*** acousto-optic diffraction, two-color radiation, Bragg regime, frequency shift, amplitude modulation.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-82-87

### REFERENCES

1. L. N. Magdich and V. Ya. Molchanov, *Acousto-optic devices and applications* (Sov. Radio, Moscow, 1978) [in Russian].
2. V. I. Balakshy, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Physical principles of Acoustooptics* (Radio & Sviaz, Moscow, 1985) [in Russian].
3. J. Xu and R. Stroud, *Acousto-optic Devices: Principles, Design, and Applications*. (John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1992).
4. V. M. Kotov, S. V. Averin, and G. N. Shkerdin, *Quantum Electronics* **46** (2), 179 (2016).
5. V. M. Kotov, S. V. Averin, and E. V. Kotov, *Applied Physics*, No. 3, 65 (2016).
6. *Acousto-optic processors of Spectral Type*. Ed. by V. V. Proklov and V. N. Ushakov (Radiotekhnika, Moscow, 2012) [in Russian].
7. Yu. N. Dubnishev and B. S. Rinkevichus, *Methods of Laser Doppler Anemometry*. (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
8. V. P. Klochkov, L. F. Kozlov, I. V. Potykevich, and M. S. Soskin, *Laser Anemometry, Distance Spectroscopy and Interferometry. Handbook* (Naukova Dumka, Kiev, 1985) [in Russian].
9. A. D. Kersey, A. Dandridge, W. K. Burns, *Electron. Lett.* **22** (18), 935 (1986).
10. V. M. Kotov, *Acoustooptics. Bragg diffraction of multi-color radiation*. (Yanus-K, Moscow, 2016) [in Russian].
11. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*. (Pergamon Press, New York, 1965).
12. J. F. Nye, *Physical properties of crystals*. (Clarendon Press, Oxford, 1957).
13. B. A. Kizel' and V. I. Burkov, *Gyrotropy of Crystals*. (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
14. *Acoustic Crystals*. Ed. by M. P. Shaskol'skaya (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
15. V. Ya. Molchanov, Yu. I. Kitaev, A. I. Kolesnikov, V. N. Narver, A. Z. Rozenshtein, N. P. Solodovnikov, and K. G. Shapovalenko, *Theory and practice of modern acoustooptics*. (MISiS, Moscow, 2015) [in Russian].
16. V. I. Balakshy and S. N. Mantsevich, *Acoustical Physics* **58** (5), 549 (2012).
17. V. A. Grechihin, *Development and analysis of computer algorithms for processing singleparticle signals of laser Doppler anemometers / Abstract diss. cand. tech. Sciences*. (Moscow Institute of Energy, Moscow, 1996) [in Russian].