

ШИРОКОПОЛОСНАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. В. М. Котов*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, г. Фрязино, Московская обл., 141190 Россия

*e-mail: vmk277@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 17.09.2018 г.

После доработки 25.01.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

Для широкополосной модуляции интенсивности оптического излучения предложено использовать тандем из двух акустооптических (АО) брэгговских ячеек, акустические волны в которых распространяются в противоположных направлениях. Устройство позволяет модулировать оптическое излучение в полосе акустических частот ~ 6 МГц на четырехкратной частоте звука. Продемонстрирована возможность переключения частоты модуляции с $2f$ до $4f$, где f – частота звука, простым поворотом выходного поляризатора. Метод экспериментально опробован для модуляции излучения с длиной волны 0.63×10^{-4} см с использованием двух АО ячеек из парателлуриита, работающих на центральной частоте звука 22 МГц.

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, кристалл парателлуриита, “медленная” сдвиговая акустическая волна, модуляция оптического излучения

DOI: 10.1134/S0320791919040087

ВВЕДЕНИЕ

Устройства, состоящие из нескольких акустооптических (АО) брэгговских ячеек, обладают более широкими функциональными возможностями для управления параметрами оптического излучения в сравнении с “обычными” брэгговскими ячейками. Такие устройства нашли применение для обработки оптических изображений [1, 2], двумерного сканирования света [3], гетеродинирования света на комбинационных частотах [4], отклонения света без сдвига частоты [5], модуляции неполяризованного света [6, 7], обработки оптических изображений с произвольной поляризацией [8], в заграждающих поляризационно-нечувствительных фильтрах [9], в коллинеарных фильтрах с каскадной дифракцией [10] и т.д. В настоящей работе рассматривается еще одно применение тандемного расположения двух брэгговских ячеек – получение модуляции излучения в широкой полосе частот без изменения направления распространения выходящего из устройства луча. Такие модуляторы нужны, например, для волоконно-оптических линий связи, когда условия ввода оптического излучения в световод не должны меняться с изменением частоты звука. Устройство позволяет модулировать интенсивность света на частотах, превышающих частоту звука в 4 раза. Кроме того, существует возможность получения модуляции

на частоте $2f$ для одной поляризации света и на частоте $4f$ – для другой, где f – частота звука. Такие модуляторы востребованы, например, для проверки и настройки волоконно-оптических линий связи с анизотропными световодами. Описываемое устройство существенно расширяет возможности использования АО дифракции для задач управления параметрами оптического излучения.

ШИРОКОПОЛОСНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис. 1 приведена оптическая схема предлагаемого метода модуляции. Линейно-поляризованное излучение, генерируемое лазером L , отражается от зеркала M_1 и направляется на идентичные последовательно расположенные АО модуляторы АОМ-1 и АОМ-2 под углом β к их оптическим граням. В модуляторах возбуждаются акустические волны с одинаковой частотой f . Модуляторы изготовлены из гиротропного кристалла. Они ориентированы таким образом, чтобы акустические волны в них распространялись во встречных направлениях.

В модуляторе АОМ-1 излучение распадается на две собственные циркулярно-поляризованные

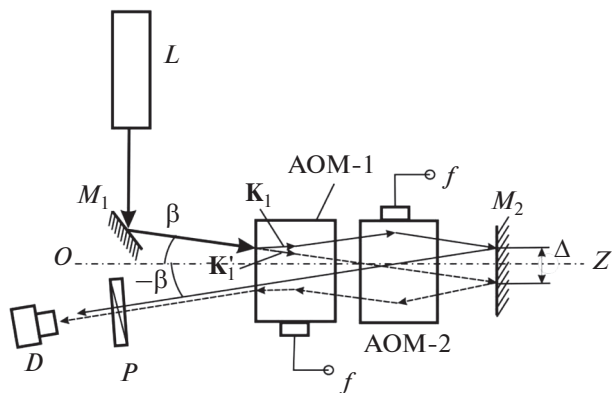


Рис. 1. Оптическая схема метода.

волны с волновыми векторами \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}'_1 . Угол β выбирается таким образом, что при прямом проходе через модуляторы только луч \mathbf{K}_1 участвует в брэгговской дифракции, луч \mathbf{K}'_1 проходит модуляторы без изменения. Однако после отражения лучей от зеркала M_2 их поляризации меняются местами, т.е. при обратном проходе луч \mathbf{K}_1 не дифрагирует, а \mathbf{K}'_1 — дифрагирует на тех же акустических волнах. Выходящий из устройства луч наклонен к границам под углом $-\beta$, т.е. входной и выходной лучи расположены симметрично относительно оси OZ . Если модуляторы изготовлены из кристалла парателлурита, то OZ — оптическая ось кристаллов, ориентированная ортогонально их оптическим границам.

Из рис. 1 можно видеть, что излучение \mathbf{K}_1 в процессе дифракции приобретает частоту $\omega + 2\Omega$, а луч \mathbf{K}'_1 при обратном проходе приобретает частоту $\omega - 2\Omega$. Здесь ω и Ω — циклические частоты света и звука, соответственно. При сложении этих волн на выходе устройства и возникает модуляция (“биения”). Частота модуляции интенсивности суммарного луча равна 4Ω . Выходное излучение проходит через поляризатор P и попадает на фотоприемник D . Посредством поляризатора P выбираются различные режимы модуляции (см. ниже).

В частности, при одном положении поляризатора наблюдается модуляция света на частоте $2f$, при другом — $4f$. Особенностью описываемого устройства является компенсация сдвига между лучами. Действительно, как видно из рис. 1, лучи, прошедшие модуляторы и падающие на зеркало M_2 , смещены относительно друг друга на величину Δ . Однако при обратном проходе это смещение компенсируется. Этим самым обеспечиваются лучшие условия интерференции складываемых на выходе устройства лучей, т.е. достигается максимальная глубина модуляции.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма используемых режимов дифракции. Здесь полагается, что дифракция происходит в одноосном гиротропном кристалле. Падающее излучение с волновым вектором \mathbf{K} направляется на оптическую грань OX кристалла под углом β и распадается в кристалле на два собственных луча \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}'_1 . В первом кристалле распространяется акустическая волна с волновым вектором \mathbf{q}_1 , во втором — \mathbf{q}_2 . Их величины равны, а направления — противоположны. Полагаем, что эффективность дифракции равна 100%. В строгом брэгговском синхронизме с \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 находится только луч \mathbf{K}_1 , он дифрагирует в направлении луча \mathbf{K}_2 в первом кристалле, а во втором кристалле происходит обратный процесс — \mathbf{K}_2 возвращается в \mathbf{K}_1 . Входным излучением может быть и луч \mathbf{K}' , он падает под углом $-\beta$ и распадается на собственные волны \mathbf{K}_3 и \mathbf{K}'_3 . В дифракции на \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 участвует только волна \mathbf{K}_3 , она дифрагирует в направлении \mathbf{K}_4 . Волновые векторы \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}'_1 и \mathbf{K}_2 расположены симметрично векторам \mathbf{K}_3 , \mathbf{K}'_3 и \mathbf{K}_4 . В схеме устройства предполагается, что векторы \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}'_1 и \mathbf{K}_2 соответствуют оптическим волнам, проходящим кристаллы в “прямом” направлении, \mathbf{K}_3 , \mathbf{K}'_3 и \mathbf{K}_4 — в обратном. Векторы \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}'_1 , \mathbf{K}_2 и \mathbf{K}_3 , \mathbf{K}'_3 , \mathbf{K}_4 не перекрываются между собой в угловом пространстве, т.е. их процессы дифракции независимы.

Другая особенность векторной диаграммы — широкополосность АО дифракции. Она обусловлена тем, что волновые векторы звука \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 направлены практически по касательной к внутренней поверхности волновых векторов. При этом направление падающего луча остается практически неизменным, а величины векторов \mathbf{q}_1 , \mathbf{q}_2 (т.е. частота звука) могут меняться в широких пределах [12, 13]. Расчеты показывают, что для излучения с длиной волны 0.63 мкм, дифрагирующего на “медленной” акустической волне в TeO_2 , полоса частот звука, когда эффективность дифракции не меньше 90% при длине АО взаимодействия 0.5 см, простирается от ~25 до 52 МГц, т.е. расчетная полоса АО взаимодействия равна 27 МГц.

Приведенная схема обладает рядом достоинств:

1) В дифракции участвуют обе собственные моды кристалла, одна мода приобретает частоту $\omega + 2\Omega$, другая — $\omega - 2\Omega$. Такой режим обеспечивает наилучшие условия интерференции, поскольку лучи в процессе дифракции “искажаются” одинаковым образом, а, значит, достигается наибольшая глубина модуляции [14]. Отметим, что каждый луч дифрагирует только два раза, а ча-

стога модуляции интенсивности увеличивается четырехкратно.

2) Входное и выходное излучения распространяются под разными углами (β и $-\beta$), что позволяет достаточно просто их разделять без потери оптической мощности.

3) Происходит компенсация смещения лучей посредством двойного прохождения через кристаллы.

4) Выбором режима АО взаимодействия обеспечивается широкополосность частоты акустической волны.

5) Выходное излучение не меняет своего направления в процессе изменения частоты звука, что очень важно, например, при вводе излучения в световод.

**ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Оптическая схема экспериментальной установки соответствует схеме, приведенной на рис. 1. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер, генерировавший на длине волны 0.63×10^{-4} см. Излучение пропусклось через фазовую пластинку $\lambda/2$, с помощью которой менялась ориентация линейно-поляризованного излучения. После отражения от зеркала M_1 излучение направлялось на две идентичных АО ячейки из парателлурита, размеры кристаллов $-0.6 \times 0.6 \times 1.0$ см вдоль направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$ и $[001]$, соответственно. Направление $[001]$ совпадает с оптической осью OZ кристалла. Вдоль направления $[110]$, совпадающего с осью OX (рис. 2), генерировалась поперечная акустическая волна, скорость которой в кристаллах составляла 617 м/с. На ячейки подавались электрические сигналы от одного генератора. Напряжение на выходе генератора равнялось ~ 8 В на нагрузке 50 Ом. Полоса пьезопреобразователя $-14-30$ МГц по уровню 3 дБ. За ячейками устанавливалось зеркало M_2 , отражающее лучи в обратном направлении и обеспечивающее эффективную дифракцию под другим углом падения света на кристаллы. Расстояние между ячейками ~ 0.5 см, расстояние от второй ячейки до зеркала ~ 1 см. Угол между падающим на кристаллы излучением и выходящим из кристаллов лучом равнялся $\sim 5^\circ$ и не перестраивался при изменении частоты звука. После выходного излучения устанавливался поляризатор P в положении максимального пропускания модулированного сигнала. Излучение после поляризатора направлялось на фотоприемник D , электрический сигнал с которого направлялся на осциллограф. На рис. 3 приведена фотография с экрана осциллографа электрического сигнала, снимаемого с фотоприемника, когда на АО ячейки подается сигнал частотой ~ 25 МГц. Видно, что

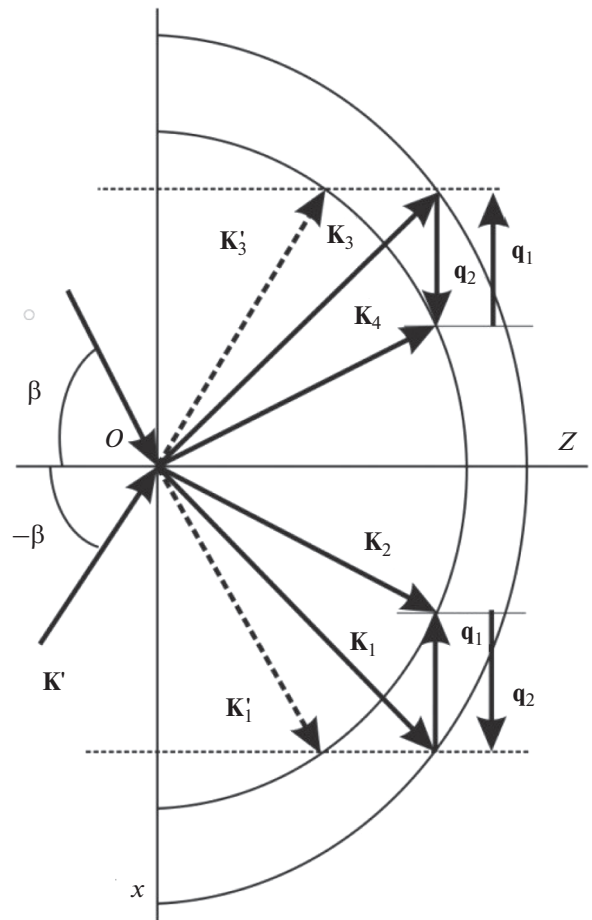


Рис. 2. Векторная диаграмма актов АО дифракции.

частота наблюдаемого сигнала в четыре раза превышает частоту, подаваемую на АО ячейку. Глубина модуляции сигнала составила $\sim 25\%$. Аналогичная глубина модуляции наблюдалась и на частоте ~ 17 МГц, хотя интенсивность выходного луча при этом спадала на $\sim 10\%$ в сравнении с эффективностью выходного луча на частоте 25 МГц.

В процессе выполнения экспериментов наблюдался и другой эффект – модуляция света на частоте $4f$ для одной поляризации и на частоте $2f$ – для другой. Этот эффект возникает при разных эффективностях дифракции лучей, распространяющихся через кристаллы в прямом и обратном направлениях. Тогда на выходе устройства формируются три волны: две – с эллиптическими поляризациями, но разными амплитудами, и одна – с линейной поляризацией. Этот момент поясняется с помощью рис. 4. Здесь эллипсы поляризации обозначены 1 и 2 (наибольший и наименьший эллипсы, соответственно), линейная поляризация обозначена 3. Важным условием наблюдения эффекта является совпадение направления линейной поляризации 3 с большой полуосью наибольшего эллипса 1. По-

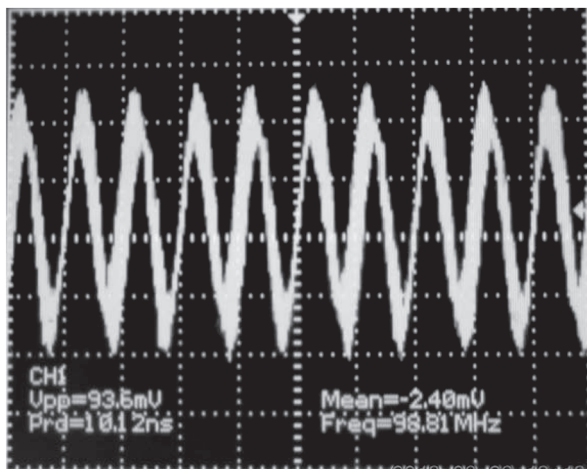


Рис. 3. Модулированный сигнал на частоте звука ~25 МГц.

люси эллипсов ориентированы вдоль направлений X и Y . Положим, что частоты волн 1, 2 и 3 равны, соответственно, $(\omega + 2\Omega)$, $(\omega - 2\Omega)$ и ω . Тогда электрическое поле этих волн можно записать, следуя методике [15], как

$$\begin{aligned} E_{1x} &= \rho E_1 \cos[(\omega + 2\Omega)t]; \\ E_{1y} &= -E_1 \sin[(\omega + 2\Omega)t] \end{aligned} \quad (1)$$

– наибольший эллипс, правовращающая волна;

$$\begin{aligned} E_{2x} &= E_2 \cos[(\omega - 2\Omega)t]; \\ E_{2y} &= E_2 \rho \sin[(\omega - 2\Omega)t] \end{aligned} \quad (2)$$

– наименьший эллипс, левовращающая волна, и

$$E_{3x} = 0; \quad E_{3y} = E_3 \sin(\omega t) \quad (3)$$

– линейная поляризация. Здесь E_1 , E_2 , E_3 – амплитуды волн 1, 2 и 3; ρ – эллиптичность волн 1 и 2 (полагаем, что волны имеют одинаковую эллиптичность). Тогда, если поляризатор P (см. рис. 1) ориентирован на максимум пропускания X -направления, амплитуда суммарного поля вдоль X равна

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} = \rho E_1 \cos[(\omega + 2\Omega)t] + E_2 \cos[(\omega - 2\Omega)t] = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (4)$$

где

$$A_1 = \sqrt{\rho^2 E_1^2 + E_2^2 + 2\rho E_1 E_2 \cos(4\Omega t)}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что амплитуда поля модулирована на частоте 2Ω , а интенсивность, пропорциональная квадрату амплитуды, – на частоте 4Ω .

Если теперь поляризатор P переориентировать на максимум пропускания вдоль Y -направления, то амплитуда суммарного поля будет $E_y = E_{1y} + E_{2y} + E_{3y}$. Полагаем, что амплитуда

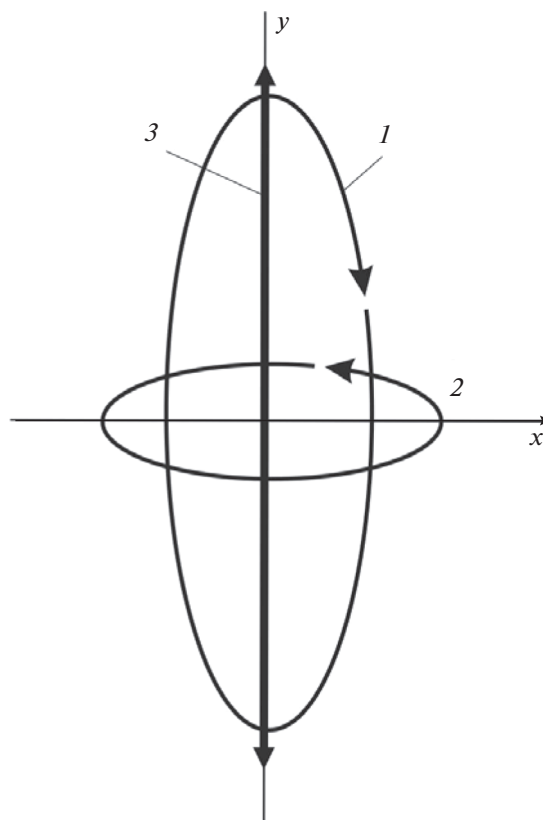


Рис. 4. Поляризации оптических волн.

E_2 существенно меньше амплитуд E_1 и E_3 , тогда поле вдоль Y можно записать в виде

$$E_y = E_{1y} + E_{3y} = -E_1 \sin[(\omega + 2\Omega)t] + E_3 \sin(\omega t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (6)$$

где

$$A_2 = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 - 2E_1 E_3 \cos(2\Omega t)}, \quad (7)$$

откуда видно, что амплитуда поля E_y модулирована на частоте Ω , а интенсивность света, соответственно, на частоте 2Ω .

На рис. 5 приведены фотографии сигналов модуляции оптического излучения, наблюдаемых на экране осциллографа на частоте звука ~14.5 МГц. Сигналы соответствуют двум положениям поляризатора P . На рис. 5а частота модуляции равна $2f$, при повороте поляризатора на 90° частота изменилась до величины $4f$ (рис. 5в). Видно, что сигнал на частоте $2f$ достаточно чистый, здесь не прослеживается присутствие третьей волны с другой частотой. Глубина модуляции составила ~30%. Глубина модуляции на частоте $4f$ не такая глубокая, она всего ~10%. Этого и следовало ожидать, поскольку эффективность дифракции одной из собственных волн существенно меньше эффективности дифракции другой. Тем не менее,

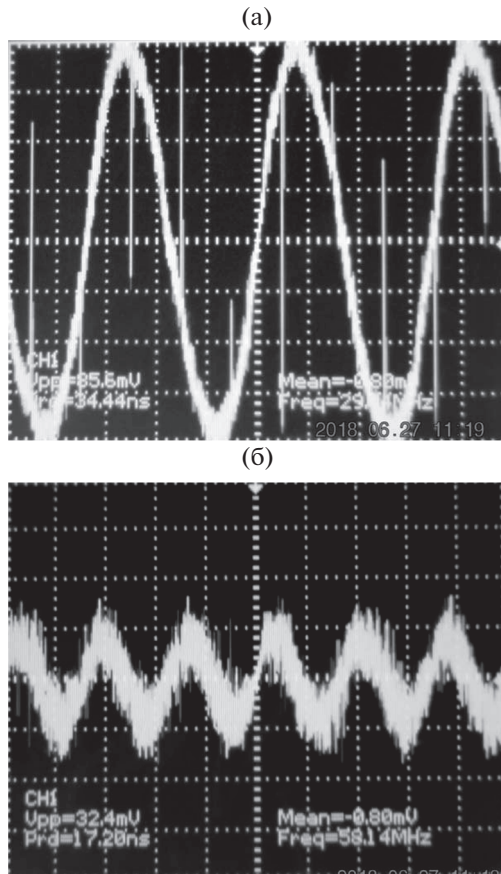


Рис. 5. Модулированные сигналы на частоте звука ~ 14.5 МГц при разных положениях поляризатора.

полученных характеристик вполне достаточно для ряда задач, связанных с тестированием волоконно-оптических линий, основанных на использовании анизотропных световодов.

Экспериментально полученные значения глубины модуляции, как видно из приведенных данных, существенно меньше теоретически ожидаемых. Это вызвано несколькими причинами.

1. Невозможность экспериментально реализовать 100%-ную эффективность дифракции одновременно в четырех актах АО взаимодействия. Как следствие, достаточно большая доля излучения остается в нулевом брэгговском порядке. Кроме того, часть излучения дифрагирует в более высокие порядки. Эффективность четырех актов дифракции уменьшают такие факторы, как неполная идентичность АО ячеек – различие их электрических и акустических импедансов, неодинаковость частотной полосы пьезопреобразователей, неоднородность материала ячеек, неточность ориентации граней относительно оптических осей кристалла и т.д.

2. На эффективность дифракции, связанную с отражением света от зеркальных поверхностей,

влияет эллиптичность собственных волн кристалла. В наших экспериментах излучение падало на кристалл под углом $\sim 2.5^\circ$, что соответствует эллиптичности света внутри кристалла ~ 0.85 . Наличие эллиптичности приводит, в частности, к тому, что поляризация волны при отражении света от зеркала не обеспечивает формирование взаимортогональной поляризации: отражение только меняет направление вращения вектора поляризации, но не меняет ориентацию полуосей эллипса поляризации. Это приводит к увеличению доли недифрагировавшего излучения. Кроме того, в расчетах не учитывалась расходимость оптических и акустических волн.

В задачу наших исследований не входило получение предельных параметров устройства. В работе предложена новая интересная и перспективная схема получения высокочастотной модуляции, которая позволяет модулировать сигнал в широкой частотной полосе звука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для высокочастотной модуляции оптического излучения предложено использовать тандем, состоящий из двух АО ячеек, акустические волны в которых распространяются в противоположных направлениях. Эффект модуляции основан на сложении двух взаимортогональных эллиптически поляризованных оптических лучей с разными частотами.

2. Максимальная частота модуляции достигается в результате двойного прохождения излучения через обе АО ячейки, при этом интенсивность света модулирована на частоте $4f$, где f – частота звука.

3. Продемонстрирован вариант, позволяющий модулировать оптическое излучение на частоте $2f$ для одной поляризации света и $4f$ – для другой.

4. Метод экспериментально проверен на примере двух АО ячеек из парателлуриата для амплитудной модуляции излучения с длиной волны 0.63×10^{-4} см. На частотах звука 25 и 17 МГц продемонстрирована модуляция $4f$, а на частоте звука 14.5 МГц – модуляция на частоте $2f$ для одной поляризации света и $4f$ – для другой.

Полученные результаты существенно расширяют возможности использования АО взаимодействия для высокочастотной модуляции оптического излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00259 и грант № 19-07-00071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Athale R.A., van der Gracht J., Prather D.W., Mait J.N.* Incoherent optical image processing with acousto-optic pupil-plane filtering // *Appl. Optics*. 1995. V. 34. № 2. P. 276–280.
2. *Cao D., Banerjee P.P., Poon T-C.* Image edge enhancement with two cascaded acousto-optic cells with contra-propagating sound // *Appl. Optics*. 1998. V. 37. № 14. P. 3007–3014.
3. *Манешин Н.К., Парыгин В.Н., Сокуренок А.Д.* Двумерное сканирование света на ультразвуке // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 3. Физ., астр.* 1995. Т. 16. № 5. С. 574–578.
4. *Cretin B., Xie W.-X., Wang S., Hauden D.* Heterodyne interferometers: practical limitations and improvements // *Optics Communications*. 1988. V. 65. № 3. P. 157–162.
5. *Freyre F.W.* Zero frequency shift Bragg cell beam deflection and translation // *Appl. Optics*. 1981. V. 20. № 22. P. 3896–3900.
6. *Kastelik J.-C., Yushkov K.B., Dupont S., Voloshinov V.B.* Cascaded acousto-optical system for the modulation of unpolarized light // *Optics Express*. 2009. V. 17. № 15. P. 12767–12776.
7. *Антонов С.Н.* Акустооптические устройства управления неполяризованным светом и модуляторы поляризации на основе кристалла парателлурита // *ЖТФ*. 2014. Т. 74. В. 10. С. 84–89.
8. *Yushkov K.B., Dupont S., Kastelik J.-C., Voloshinov V.B.* Polarization-independent imaging with an acousto-optic tandem system // *Optics letters*. 2010. V. 35. № 9. P. 1416–1418.
9. *Kastelik J.-C., Champagne J., Dupont S., Yushkov K.B.* Wavelength characterization of an acousto-optic notch filter for unpolarized near-infrared light // *Appl. Optics*. 2018. V. 57. № 10. P. C36–C41.
10. *Machikhin A., Burmak L., Polschikova O., Ramazanova A., Pozhar V., Boritko S.* Multispectral phase imaging based on acousto-optic filtration of interfering light beams (invited) // *Appl. Optics*. 2018. V. 57. № 10. P. C64–C69.
11. *Uchida N., Ohmachi Y.* Elastic and photoelastic properties of TeO₂ single crystal // *J. Appl. Phys.* 1969. V. 40. № 12. P. 4692–4695.
12. *Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и Связь, 1985. 280 с.
13. *Xu J., Stroud R.* Acousto-optic Devices: Principles, Design and Applications. New York: John Wiley and Sons. Inc., 1992. 652 p.
14. *Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В., Воронко А.И., Тихомиров С.А.* Акустооптический модулятор с вращающимся вектором поляризации на основе гиротропного кристалла // *КЭ*. 2017. Т. 47. В. 2. С. 135–139.
15. *Shamir J., Fainman Y.* Rotating linearly polarized light source // *Appl. Optics*. 1982. V. 21. № 3. P. 364–365.