

УДК 548.0:534:535.4

**Акустооптическое преобразование частотного сдвига оптического излучения
в амплитудно-модулированный сигнал оптического излучения***В. М. Котов, С. В. Аверин, Е. В. Котов*

Предложено акустооптическое (АО) устройство, позволяющее преобразовывать частоту сдвига между оптическими лучами в амплитудную модуляцию на частоте, равной nf , где f — частота звуковой волны, n — целое число. Работоспособность устройства подтверждена на примере АО-модулятора из кристалла парателлурита, с помощью которого оптическое излучение с длиной волны 0,63 мкм промодулировано по амплитуде на учетверенной звуковой частоте, равной ~180 МГц.

PACS: 42.79.Jp

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, сдвиг частоты, амплитудная модуляция, кристалл парателлурита.

Введение

Известно [1, 2], что брэгговская акустооптическая (АО) дифракция сопровождается сдвигом частоты света на частоту звука. Это используется в различных системах, где необходимо сдвигать частоту света на фиксированную величину, а именно, для оптического гетеродинамирования [3], лазерной доплеровской анемометрии [4], оптических гироскопов [5] и т. д.

Целью данной работы является демонстрация возможности преобразования сдвига частоты в амплитудную модуляцию. Для создания соответствующего устройства необходимо использовать АО-модулятор, изготовленный из гиротропного кристалла, а также использовать несколько пассивных элементов, в частности, зеркал. Такие модуляторы являются принципиально новым классом АО-устройств, значительно расширяющих возможности применения АО-дифракции для управления параметрами оптического излучения.

Принципы оптического гетеродинамирования

Для описания предлагаемой схемы рассмотрим вначале принцип осуществления оптического гетеродинамирования («фотосмещения» [6]) на основе использования АО-модулятора (рис. 1). По сути, здесь происходит преобразование разности частот световых лучей в амплитудную модуляцию. Оптическое излучение I_{inc} направляется в АО-модулятор АОМ под углом Брэгга к акустической волне, возбуждаемой на частоте f и распространяющейся в материале модулятора. На выходе модулятора образуются два луча — прошедший I_0 и продифрагировавший I_1 , причем частота последнего сдвинута на частоту звука f по отношению к частоте прошедшего излучения. Вышедшие из кристалла лучи «сбиваются» в один луч посредством отражающего зеркала M и светоделительного кубика C . Фотоприемником Pd фиксируется частота «биения» этих лучей, равная $f/2$. Подобная схема была впервые использована для подтверждения сдвига частоты света на частоту звука в процессе брэгговской АО-дифракции. Схема широко используется в системах лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [4, 6]. Частота сдвига в ЛДА определяет диапазон измерения скоростей потоков, поэтому увеличение частоты сдвига очень важно для улучшения характеристик устройства в целом.

В настоящей работе описывается устройство, которое не только сдвигает частоту света на значительную величину, но и позволяет получать амплитудно-модулированный сигнал на частоте,

Котов Владимир Михайлович, ведущий научный сотрудник.

Аверин Станислав Владимирович, ведущий научный сотрудник.

Котов Евгений Владимирович, младший научный сотрудник.

Фрязинский филиал Института электроники и радиотехники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН).

Россия, 141195, г. Фрязино Московской обл.,

пл. Введенского, 1.

E-mail: vmk277@ire216.msk.su; sva278@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 29 марта 2016 г.

равной nf , где f — частота звука, n — целое число. Это существенно расширяет возможности использования АО-дифракции для решения различных задач, возникающих на практике.

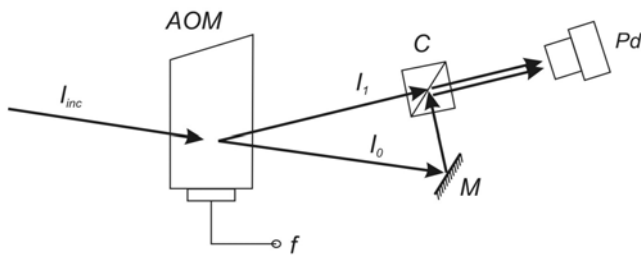


Рис. 1. Оптическая схема гетеродина. АОМ — АО-модулятор, С — светоделительный кубик, Pd — фотодетектор.

Преобразование частоты сдвига f в амплитудно-модулированный сигнал частотой nf

Оптическая схема получения амплитудно-модулированного сигнала на частоте nf приведена на рис. 2. Здесь линейно-поляризованное излучение I_{inc} , генерируемое лазерным источником L , отражается от зеркала M и направляется в АО-модулятор AOM под углом Брэгга к акустической волне. Частота звука — f . На выходе модулятора образуются два луча — непродифрагировавший I_0 с частотой ω и продифрагировавший I_1 с частотой $\omega + f$. Предполагается, что происходит анизотропная дифракция света на звуке, когда угол Брэгга в общем случае не совпадает с углом отражения света от звуковой волны [1, 2]. Кроме того считаем, что материалом АО-модулятора является гиротропный кристалл, собственные волны которого являются циркулярно поляризованными. Примером такого кристалла является парателлурид TeO_2 , когда оптические лучи распространяются вблизи оптической оси кристалла. В дифракции участвует только одна из собственных волн кристалла. Пусть для определенности такой волной будет волна с право-циркулярной поляризацией. В процессе анизотропного АО-взаимодействия право-циркулярная волна дифрагирует в лево-циркулярную. При отражении от зеркала так же происходит смена поляризации луча с право-циркулярной на лево-циркулярную и наоборот. На рис. 2 луч I_1 после отражения от зеркала M_2 вновь направляется в АОМ под углом Брэгга. После повторного взаимодействия с акустической волной луч отражается от зеркала M_3 и вновь направляется в АО-модулятор. Таким образом осуществляется «накопление» сдвига частоты света, как это происходит при каскадной АО-дифракции [7]. В качестве примера на рис. 2 луч I_1 претерпевает четыре брэгговских отражения, получив суммарный частотный сдвиг,

равный $4f$. После четырехкратного взаимодействия луч I_1 направляется на делительный кубик C . На тот же кубик направляется излучение I_0 после отражения от зеркал M_1 и M_4 . После кубика C часть излучения формируется в параллельный пучок, который направляется на фотоприемник Pd . Анализ показывает, что суммарный пучок состоит из двух лучей, один из которых имеет правоциркулярную поляризацию, другой — левоциркулярную. При сложении таких лучей образуется линейно-поляризованная волна [8]. Однако поскольку частоты лучей — разные, то суммарная линейно-поляризованная волна будет вращаться с разностной частотой, равной $4f$. Если на пути лучей установить поляризатор P , то после поляризатора образуется амплитудно-модулированный сигнал частотой $4f$.

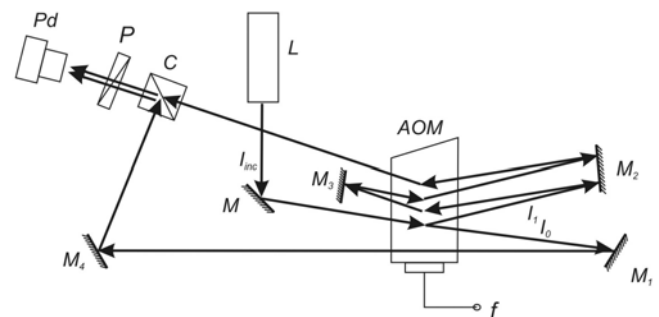


Рис. 2. Оптическая схема преобразования частотного сдвига $4f$ в амплитудную модуляцию.

Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

Для проверки предложенной методики преобразования сдвига частоты света в амплитудно-модулированный сигнал был выполнен эксперимент. Экспериментальная установка соответствовала оптической схеме, представленной на рис. 2. Линейно поляризованное оптическое излучение I_{inc} с длиной волны 0,63 мкм генерировалось He—Ne-лазером ЛГ-207а. Модулятор АОМ был изготовлен из TeO_2 с размерами 1,0×1,0×1,0 см вдоль направлений $[001]$, $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ кристалла. Вдоль $[1\bar{1}0]$ распространялась «медленная» звуковая волна, генерируемая пьезопреобразователем из $LiNbO_3$. Частота звука — 45 МГц. Длина АО-взаимодействия — 0,6 см, скорость звука в кристалле — 617 м/с. Осуществлялась анизотропная дифракция света на звуке с преобразованием мод. Углы падения света на звуковую волну и отражения от звука отличались в ~ 2 раза. Оптические лучи распространялись вблизи оптической оси кристалла, отклонение света от оптической оси не превышало 1—2° в кристалле. Поэтому полагалось, что собственные волны в кристалле —

циркулярно-поляризованные. Посредством внешних зеркал M_2 и M_3 реализовывалась четырехкратная дифракция света на звуке. Акты дифракции легко различались между собой, поэтому их число нетрудно контролировать. Юстировками зеркала M_4 и кубика C , а также мощности звука добивались ситуации, когда на фотоприемнике наблюдалась амплитудная модуляция необходимой частоты.

На рис. 3 приведена фотография сигнала, получаемого на экране осциллографа. Частота сигнала с хорошей точностью равна учетверенной частоте звука. Глубина модуляции составила $\sim 10\%$. Видно, что сигнал наблюдается на фоне достаточно большого шума. Шум может быть обусловлен несколькими факторами: шумом лазера, шумом регистрирующего тракта, разностью хода интерферирующих лучей, превышающей длину когерентности, и т. п. Небольшая глубина модуляции вызвана, по нашему мнению, недостаточной полосой фотоприемника, но главным образом — искажениями волнового фронта света, полученными в процессе четырех актов дифракции. Поэтому волновые фронты дифрагировавшего и недифрагировавшего лучей достаточно сильно различаются. Различие фронтов существенно ухудшает интерференционные характеристики лучей [6]. Тем не менее, факт амплитудной модуляции на четырехкратной частоте звука получен, и тем самым подтверждена идея получения способа модуляции света на частоте, существенно превышающей частоту звука.

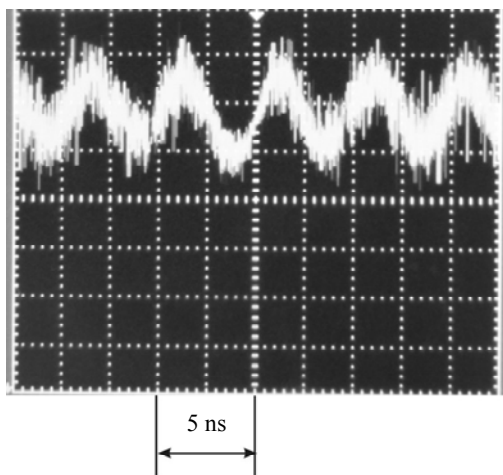


Рис. 3. Фотография электрического сигнала с экрана осциллографа.

В дальнейших работах предполагается найти пути существенного улучшения характеристик представленного в статье устройства.

Заключение

На основании материалов, изложенных в статье, можно сделать следующие основные выводы.

1. Предложено АО-устройство, позволяющее преобразовывать частоту сдвига между оптическими лучами в амплитудную модуляцию частотой nf , где f — частота звуковой волны, n — целое число.

2. Работоспособность устройства подтверждена на примере преобразования сдвига частоты оптического сигнала с длиной волны $0,63$ мкм, полученного в процессе АО-дифракции в кристалле TeO_2 на звуковой волне частотой 45 МГц. Получен амплитудно-модулированный сигнал на учетверенной частоте звука, равной ~ 180 МГц.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-02312, грант № 16-07-00064), а также Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (программа государственной поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ-3317.2010.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Xu J. and Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications. — John Wiley & Sons. Inc. NY.: 1992.
2. Балакиш В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и Связь, 1985.
3. Korpel A. Acousto-Optics. — New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1988.
4. Ринкевичус В. С. Лазерная анемометрия. — М.: Энергия, 1978.
5. Optical fiber rotation sensing / Ed. by William K. Burns. — New York: Acad. Press, Inc., 1994.
6. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Сошкин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. — Киев: Наукова думка, 1985.
7. Котов В. М. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 4. С. 373.
8. Най Дж. Физические свойства кристаллов. — М.: Мир, 1967.

Acousto-optic transformation of the frequency shift of the optical radiation into the amplitude modulated signal

V. M. Kotov, S. V. Averin, and E. V. Kotov

Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS
1 Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow Region, 141195, Russia
E-mail: vmk277@ire216.msk.su; sva278@ire216.msk.su

Received March 29, 2016

Consideration is given to an acousto-optic (AO) arrangement that allows to transform the frequency shift between two optical beams into the amplitude modulation on the frequency equal to nf , where f is the acoustic wave frequency and n is integer. The efficiency of the arrangement has been confirmed with using the AO modulator from a paratellurite crystal, whereby the optical radiation with the wavelength of $0.63 \mu\text{m}$ was amplitude modulated with the quadruple frequency, equal to $\sim 180 \text{ MHz}$.

PACS: 42.79.Jp

Keywords: acousto-optic diffraction, Bragg regime, frequency shift, amplitude modulation, paratellurite crystal.

REFERENCES

1. J. Xu and R. Stroud, *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications*. (John Wiley & Sons. Inc. NY.: 1992).
2. V. I. Balakshii, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Physical Foundations of Acousto-Optics* (Radio Svyaz', Moscow, 1985) [in Russian].
3. A. Korpel, *Acousto-Optics*. (New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1988).
4. V. S. Rinkevichus, *Laser Anemometry*. (Energiya, Moscow, 1978) [in Russian].
5. *Optical Fiber Rotation Sensing* Ed. by William K. Burns. (New York: Acad. Press, Inc., 1994).
6. V. P. Klochkov, L. F. Kozlov, I. V. Potykevich, and M. S. Soskin, *Laser Anemometry. Handbook*. (Naukova Dumka, Kiev, 1985) [in Russian].
7. V. M. Kotov, *Quantum Electronics* **30**, 373 (2000).
8. J. Nai, *Physical Features of Crystals* (Mir, Moscow, 1967) [in Russian].