

УДК 548.0:534:535.4

Использование акустооптической ячейки из гиротропного кристалла для амплитудной модуляции оптического сигнала

© 2017 г. В. М. Котов, доктор физ.-мат.наук; Е. В. Котов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино Моск. обл.

E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 07.06.2016

Предложен метод получения амплитудно-модулированного оптического сигнала синусоидальной формы с заданной частотой. Метод основан на сложении двух циркулярно-поляризованных волн с разными частотами, сформированными в результате акустооптического взаимодействия в гиротропном кристалле. Экспериментально получена амплитудная модуляция излучения He-Ne лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) на частоте звука, равной приблизительно 36 МГц.

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

Коды OCIS: 230.0230, 230.1040.

Среди всех акустооптических (АО) устройств, применяющихся на практике (дефлекторов, модуляторов, спектроанализаторов и т.д. [1–3]), наиболее востребованными оказались АО амплитудные модуляторы. Классические модуляторы основаны на АО взаимодействии света с импульсами звуковой волны, распространяющихся в АО кристалле (см. например [1, 2]). Характеристики импульса определяют характеристики дифрагировавшего света. В настоящей работе описывается АО модулятор, основанный не на прерывании акустической волны, а на преобразовании частоты сдвига оптического излучения в амплитудную модуляцию. Как известно [1–3], одной из особенностей АО дифракции является сдвиг частоты оптического излучения на частоту звука, вызванный отражением света от бегущей акустической решетки. Этот эффект можно использовать для получения амплитудной модуляции. Оптические сигналы, промодулированные на заданной частоте, нужны, например, для проверки и отладки волоконно-оптических линий связи [4], в лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [5, 6], и т.д., подобно тому, как для наладки радиоэлектронных устройств широко используются СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов.

Предлагаемое устройство представляет собой двухлучевой интерферометр, в котором ин-

терферирующие лучи имеют разные частоты. Простейший АО интерферометр приведен на рис. 1. Особенностью описываемой схемы является то, что в ней используется АО модулятор, изготовленный из гиротропного кристалла. В схеме линейно-поляризованное излучение I_0 , генерируемое лазером L , пропускается через пластинку $\lambda/4$, в результате чего становится циркулярно-поляризованным. Излучение I_0 расщепляется на два луча I_1 и I_2 посредством делительного кубика C . Луч I_1 направляется на АО модулятор АОМ. Туда же направляется луч I_2 под некоторым углом к лучу I_1 после отражения от зеркала M . Модулятор ориентирован таким образом, что в дифракции участвует только луч I_1 , который дифрагирует в направлении луча I_3 . На выходе кристалла лучи I_2 и I_3

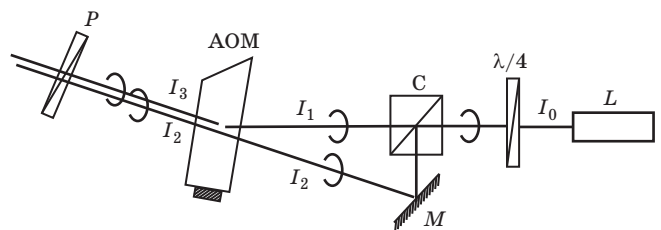


Рис. 1. Преобразование разности частот оптических лучей в амплитудную модуляцию.

распространяются коллинеарно друг другу. Коллинеарность лучей обеспечивается «нужной» ориентацией зеркала M . Выходное оптическое излучение пропускается через поляризатор P . При этом необходимо отметить, что в силу особенностей анизотропной АО дифракции луч I_2 не взаимодействует с акустической волной в кристалле. Этот момент поясняется с помощью векторной диаграммы на рис. 2. Лучи I_1 и I_2 представлены на диаграмме волновыми векторами \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 . Поскольку их поляризации одинаковы, они принадлежат одной волновой поверхности (в нашем случае – внутренней поверхности волновых векторов). Луч с волновым вектором \mathbf{k}_1 дифрагирует в направлении луча I_3 , представленным волновым вектором \mathbf{k}_3 . Полагая, что оптические грани кристалла ориентированы вдоль направления OX , ортогональном оптической оси OZ , луч \mathbf{k}_2 необходимо сориентировать относительно луча \mathbf{k}_3 таким образом, чтобы проекции волновых векторов на направление OX были равны. Это обеспечит коллинеарность распространения лучей \mathbf{k}_2 и \mathbf{k}_3 на выходе из кристалла. Видно, что луч \mathbf{k}_2 не находится в синхронизме с акустической волной \mathbf{q} и поэтому в дифракции не участвует.

На рис. 1 лучи, вышедшие из АО модулятора, имеют циркулярные взаимоортогональные поляризации. Сложение таких поляризаций образует линейно поляризованную волну, вектор поляризации которой вращается с частотой, равной половине частоты звука.

Для пояснения этого момента обратимся к рис. 3. На рис. 3а векторы циркулярно-поляризованных волн обозначены A_1 и A_2 для правой и левой, соответственно, поляризаций. Напомним, что у циркулярно-поляризованной волны с правым вращением вектор поляризации вращается против часовой стрелки, если смотреть в направлении распространения волны. У волны с левым вращением – по часовой стрелке [7]. За время $t = t_0$ волна A_1 повернется на угол φ_1 , волна A_2 – φ_2 . Если угловые скорости волн разные, то $\varphi_1 \neq \varphi_2$.

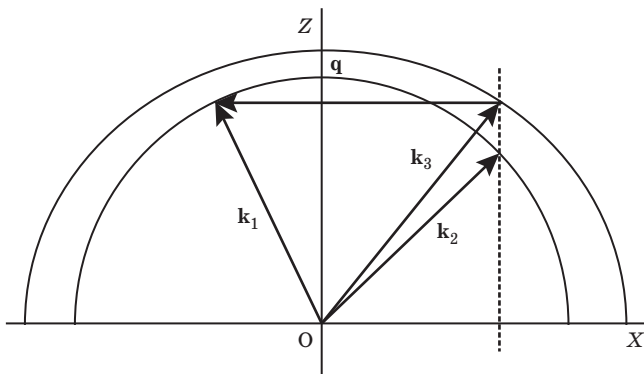


Рис. 2. Векторная диаграмма АО взаимодействия для получения амплитудной модуляции.

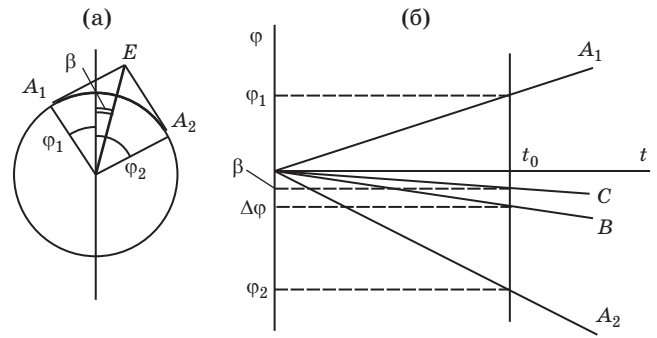


Рис. 3. Вращение суммарного вектора поляризации E в зависимости от углов вращения циркулярно-поляризованных волн.

Суммарное поле этих волн представляет собой линейно-поляризованную волну, вектор поляризации которой E определяется по правилу параллелограмма. Угол поворота E за время t_0 обозначен β . На рис. 3(б) приведено изменение фазы волны φ от времени t . Прямые A_1 и A_2 описывают изменение фаз циркулярно-поляризованных волн A_1 и A_2 . В момент времени $t = t_0$ их фазы равны φ_1 и φ_2 . Прямая B описывает изменение разности фаз этих волн от времени. При $t = t_0$ разность фаз $\Delta\varphi = |\varphi_2| - |\varphi_1|$. Угол поворота β суммарной поляризации E равен половине разности фаз $\Delta\varphi$ [7]. На рис. 3б изменение угла β описывается прямой C . Угловые скорости волн A_1 и A_2 равны, соответственно, $\omega_1 = \varphi_1/t_0$ и $\omega_2 = \varphi_2/t_0$. Тогда скорость вращения вектора E равна $\Omega = \Delta\varphi/2t_0 = 0,5(\omega_2 - \omega_1)$. Пусть в результате АО дифракции частоты ω_1 и ω_2 стали отличаться на величину частоты звука f . Тогда $\Omega = f/2$. Иными словами, частота вращения вектора E в 2 раза меньше частоты звуковой волны. При пропускании такой волны через поляризатор формируется линейно-поляризованная волна (не вращающаяся) с частотой Ω . Но при регистрации такой волны внешним фотодетектором ток в фотодиоде пропорционален квадрату амплитуды световой волны, т.е. имеет составляющую той же частоты, что и частота звука f [8]. Сигнал с фотодиода будет синусоидальным с частотой f . (Здесь существует полное согласие с законом Малюса [9], описывающего поведение интенсивности света при пропускании его через поляризатор: $I = I_0 \cos^2 \beta$, где I_0 – интенсивность падающего линейно-поляризованного луча, I – интенсивность света, прошедшего через поляризатор, ориентированного под углом β к поляризации падающего излучения. То есть I изменяется квадратично с изменением угла β).

Такая модуляция была подтверждена экспериментально на основе АО дифракции в ячейке из парателлурита. Эксперимент выполнялся согласно схеме на рис. 1. Линейно поляризованное оптическое излучение I_0 с длиной волны $0,63 \text{ мкм}$ генери-

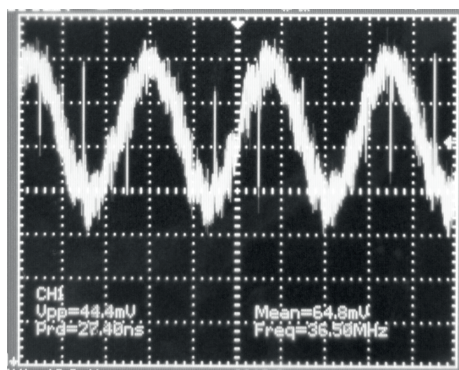


Рис. 4. Амплитудно-модулированный сигнал, наблюдаемый на экране осциллографа.

ровалось He-Ne лазером ЛГ-207А. Модулятор АОМ был изготовлен из TeO_2 с размерами $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ см}^3$ 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 – 36 МГц. Длина АО взаимодействия – 0,6 см, скорость звука в кристалле – 617 м/с. Осуществлялась анизотропная дифракция света на звуке с преобразованием мод. 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 внешнего зеркала M лучи I_1 и I_2 совмещались между собой. Юстировкой зеркала M и кубика C , а также мощности звука, подаваемого на преобразователь АО модулятора, добивалась ситуация, когда на фотоприёмнике наблюдалась амплитудная модуляция.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xu J., Stroud R. Acousto-optic devices: principles, design, and applications. NY.: John Wiley & Sons, 1992. 652 p.
2. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и Связь, 1985. 280 с.
3. Корпел А. Акустооптика / Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 240 с.
4. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации. М.: Мир, 1984. 502 с.
5. Ринкевичус В.С. Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978. 160 с.
6. Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соскин М.С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 760 с.
7. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967. 385 с.
8. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
9. Сивухин Д.В. Оптика. Т.4. М.: Физматлит МФТИ, 2002. 791 с.

На рис. 4 показан сигнал, наблюдаемый на экране осциллографа. Видно, что сигнал является синусоидальным, его частота совпадает с частотой генератора. Шумы сигнала согласно нашим дополнительным исследованиям обусловлены шумами лазера и фотодетектора. Если оптическое излучение подается непосредственно на фотоприёмник, то на осциллографе сигнал «прописывается» в виде горизонтальной линии с таким же уровнем шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложена схема преобразования частоты сдвига, возникающего между оптическими лучами в процессе АО дифракции, в амплитудную модуляцию с частотой, равной половине частоты звуковой волны f . Метод основан на использовании АО ячейки из гиротропного кристалла.

2. На основе предложенного метода изготовлено устройство. 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 36 МГц. Сигнал с фотоприёмника, работающего в квадратичном режиме, имел частоту, совпадающую с частотой звуковой волны.

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).