

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 535.33;621.373;535.4

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР-РАСЩЕПИТЕЛЬ
С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ ВЫХОДНЫХ КАНАЛОВ

© 2019 г. В. М. Котов¹, *, С. В. Аверин¹, Г. Н. Шкердин¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московской обл., 141190 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

После доработки 15.03.2019 г.

Принята к публикации 23.03.2019 г.

Разработан двухканальный высокочастотный акустооптический (АО) модулятор-расщепитель, разделяющий оптическое излучение на два равноценных оптических канала и обеспечивающий модуляцию интенсивностей выходных каналов на двойной частоте звука. Модулятор позволяет достаточно просто менять поляризации выходных лучей. Макет модулятора, изготовленный из монокристалла TeO_2 , использован для модуляции и расщепления излучения с длиной волны 0.63×10^{-4} см. Получена модуляция интенсивностей выходных каналов на частоте ~ 200 МГц.

DOI: 10.1134/S0033849419100061

ВВЕДЕНИЕ

Для управления параметрами оптического излучения широко применяются акустооптические (АО) устройства [1, 2]. Одними из первых эффективно работающих устройств, предназначенных для модуляции интенсивности оптического излучения, были АО-модуляторы на стоячих акустических волнах [3, 4]. Модуляция света осуществлялась на двойной частоте звука, при этом в силу специфики устройства звуковая частота менялась дискретно. Устройства получили широкое распространение благодаря своей относительной простоте, высокой эффективности дифракции, малым потреблением управляющей электрической мощности. Они нашли применение для синхронизации мод лазерного излучения [5], сканирования луча на большие углы [6] и т.д. Однако выявился ряд факторов, существенно ограничивающих их рабочие частоты. Во-первых, для удовлетворительной работы модулятора апертура модулируемого оптического луча должна быть, по крайней мере, в четыре раза меньше длины волны звука [3]. Во-вторых, высокая добротность акустического резонатора приводит к накоплению акустической мощности в среде, большим акустическим деформациям кристалла, к его сильному разогреву и даже разрушению [6]. С увеличением частоты звука процесс разогрева кристалла только усугубляется, поскольку поглощение звука растет квадратично с ростом частоты звуковой волны [7]. На практике акустические частоты модуляторов, основанных на использо-

вании стоячих акустических волн, не превышают ~ 1 МГц [3]. Для увеличения частоты модуляции стали развиваться импульсные АО-модуляторы, работающие в брэгговском режиме дифракции (см., например, [8]). Параллельно с ними получили развитие интерференционные методы модуляции, принцип действия которых основан на интерференции двух лучей с разными частотами [9]. У таких модуляторов, как оказалось, более широкие функциональные возможности. Кроме амплитудной модуляции (см., например, [10]) они используются для контролируемого вращения вектора поляризации [11], двух- и четырехкратного увеличения частоты модуляции в сравнении с частотой “биений” [12–14] и т.д.

Для ряда приложений (например, для двухкоординатной лазерной доплеровской анемометрии) необходимы устройства, позволяющие получать несколько выходных оптических каналов с высокочастотной модуляцией амплитуды. При этом желательно модулировать оптический сигнал на максимально высокой частоте, поскольку частота модуляции определяет диапазон измеряемых скоростей [15–17].

В настоящей работе описан модулятор-расщепитель с использованием интерференции световых лучей. Расщепитель обеспечивает формирование двух равноценных оптических каналов, амплитуды которых промодулированы на частоте звука. Режим АО-дифракции выбирается таким образом, чтобы простым поворотом АО-ячейки осуществить изменение поляризаций выходных

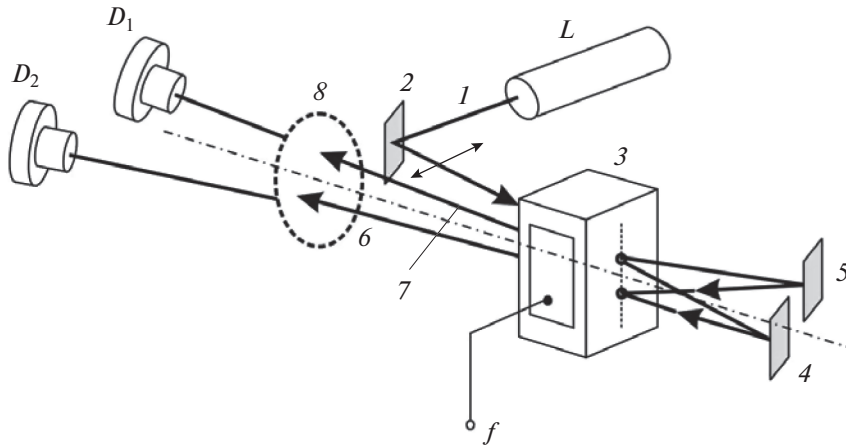


Рис. 1. Оптическая схема модулятора-расщепителя: 1 – входное излучение; 2, 4, 5 – отражающие зеркала; 3 – АО-модулятор; 6, 7 – выходные лучи; 8 – контрольный поляризатор; L – лазер; D_1 и D_2 – фотодетекторы.

лучей. Такой способ изменения поляризаций в ряде случаев оказывается предпочтительнее использования фазовых пластинок, поскольку не требует пространственного разделения лучей. Например, при конструировании АО-устройств для волоконно-оптических линий связи оптические лучи распространяются настолько близко друг к другу (практически перекрываются), что нет никакой возможности использовать фазовые пластинки [18]. В подобном случае предлагаемый нами метод изменения поляризации лучей может оказаться, пожалуй, единственным.

1. СХЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МОДУЛЯТОРА-РАСЩЕПИТЕЛЯ

Оптическая схема модулятора-расщепителя, формирующего два равноценных выходных оптических канала, представлена на рис. 1. Излучение 1, генерируемое лазером L, отражается от зеркала 2 и направляется на АО-модулятор 3 под углом Брэгга к акустической волне. На модулятор подается электрический сигнал частотой f . После АО-взаимодействия в модуляторе часть излучения проходит через модулятор без дифракции и направляется на зеркало 4, протифрагировавшая часть излучения направляется на зеркало 5. Оба луча отражаются от зеркал и направляются вновь в АО-модулятор, но в область, расположенную ниже области взаимодействия при “прямом” проходе лучей. Это делается для того, чтобы отраженные от зеркал 4 и 5 лучи не возвращались в лазер. Каждый из отраженных лучей взаимодействует с той же акустической волной и расщепляется в свою очередь на два луча. На выходе АО-модулятора расщепленные лучи складываются попарно и направляются на фотодетекторы D_1 и D_2 . Поляризатор 8 внесен в схему для проверки поляризаций лучей, в общем случае схема работает без этого

поляризатора. Полагается, что излучение 1 – линейно поляризованное. Кроме того, полагаем, что лучи в процессе АО-взаимодействия также остаются линейно поляризованными. Пусть эффективность АО-взаимодействия равна 50%, т.е. при каждом акте дифракции луч расщепляется на два одинаковых по амплитуде луча. Тогда, как нетрудно проследить, суммарные излучения, направляемые на фотодетекторы, равны между собой по амплитуде. Каждое из этих излучений состоит из двух лучей, амплитуды которых одинаковы, но частоты – разные, они отличаются на величину $2f$.

Пусть электрические поля E_1 и E_2 двух складываемых оптических волн имеют одинаковые амплитуды и описываются выражениями

$$E_1 = A \cos(\omega t); \quad E_2 = A \cos[(\omega + \Delta\omega)t], \quad (1)$$

где A – амплитуда полей; ω – частота поля E_1 ; $(\omega + \Delta\omega)$ – частота E_2 ; $\Delta\omega$ – разность частот ($\Delta\omega \ll \omega$); t – время. После сложения полей E_1 и E_2 получим [19]:

$$E = E_1 + E_2 = [2A \cos(\Delta\omega t/2)] \cos(\omega t), \quad (2)$$

откуда видно, что амплитуда суммарного колебания медленно меняется по гармоническому закону, происходят “биения” с частотой $\Delta\omega/2$. В случае использования схемы, представленной на рис. 1, разность частот между компонентами выходящих лучей равна $2f$, т.е. амплитуды суммарных лучей будут меняться с частотой f , а их интенсивности – с частотой $2f$.

В качестве материала АО-ячейки нами был выбран кристалл TeO_2 , который благодаря своим уникальным оптическим и акустическим свойствам наиболее часто используется в акустооптике. В частности, скорость поперечной акустической волны, распространяющейся в кристалле вдоль направления [110], равна всего 0.617×10^5 см/с [1, 2].

Это позволяет достигать высокой эффективности дифракции при малых акустических мощностях, на три порядка меньших (!) в сравнении с другими АО-материалами [2].

Другое интересное свойство этого кристалла – возможность реализации не только анизотропной, но и изотропной дифракции света на “медленной” акустической волне [1, 20–22]. Отметим, что классическая теория АО взаимодействия запрещает изотропную дифракцию в TeO_2 на “медленной” поперечной звуковой волне, поскольку соответствующая упруго-оптическая константа равна нулю. Однако эта дифракция наблюдается в экспериментах, причем с хорошей эффективностью: соответствующая упруго-оптическая константа, полученная экспериментально, всего в два раза меньше константы анизотропной дифракции [1, 20]. В предлагаемом устройстве мы используем оба вида дифракции – как анизотропную, так и изотропную, обе дифракции нами получены экспериментально, причем их эффективность оказалась высокой (см. ниже).

На рис. 2 представлены векторные диаграммы анизотропной и изотропной дифракции. Дифракция происходит в одноосном положительном гиротропном кристалле TeO_2 , направление оптической оси кристалла [001]. Акустическая волна с волновым вектором \vec{q} распространяется под углом β к направлению [110]. Волновые поверхности кристалла S_1 и S_2 описывают распространение “обыкновенных” и “необыкновенных” оптических волн соответственно. Дифракция волны с волновым вектором \vec{K}_{1i} в волну с волновым вектором \vec{K}_{1d} является анизотропной: здесь волновые векторы света \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{1d} принадлежат разным волновым поверхностям: \vec{K}_{1i} – “необыкновенная” волна, принадлежит поверхности S_2 , волна \vec{K}_{1d} – “обыкновенная”, принадлежит S_1 . Дифракция же волны с волновым вектором \vec{K}_{2i} в волну с волновым вектором \vec{K}_{2d} – изотропная, она происходит в результате АО взаимодействия с той же акустической волной \vec{q} . Здесь волновые векторы \vec{K}_{2i} и \vec{K}_{2d} принадлежат одной волновой поверхности S_2 , т.е. волны \vec{K}_{2i} и \vec{K}_{2d} – “необыкновенные”. Поскольку в обоих случаях падающие волны \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{2i} – “необыкновенные”, то их поляризации лежат в плоскости рисунка, содержащей оптическую ось кристалла, и ортогональны векторам \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{2i} соответственно. Поэтому поляризация входного луча I на рис. 1 ориентировалась таким образом, чтобы она лежала в одной плоскости с оптической осью кристалла и направлением распространения звуковой волны.

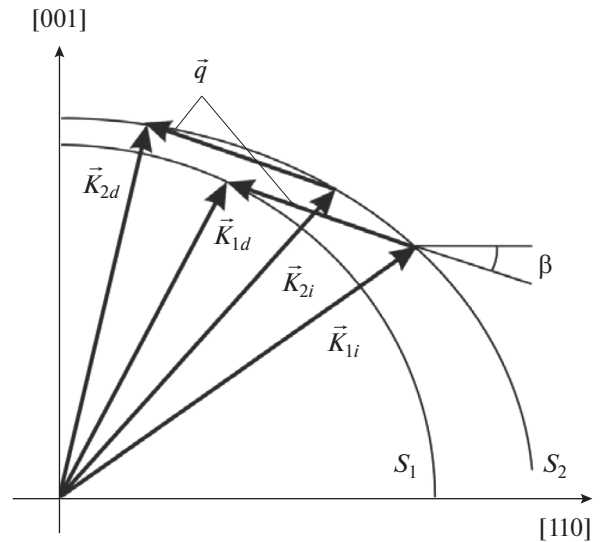


Рис. 2. Векторные диаграммы анизотропной и изотропной актов дифракции в одноосном кристалле. S_1, S_2 – волновые поверхности кристалла; [001] – направление оптической оси; $\vec{K}_{1i}, \vec{K}_{2i}$ – волновые векторы падающих лучей; $\vec{K}_{1d}, \vec{K}_{2d}$ – волновые векторы дифрагировавших лучей; \vec{q} – волновой вектор звука.

Показатели преломления лучей, принадлежащих волновым поверхностям S_1 и S_2 , были определены по формуле [23]

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

где n_0, n_e – главные показатели преломления кристалла; φ – угол между оптической осью кристалла и волновым вектором световой волны; G_{33} – компонента псевдотензора гирации. При расчетах было принято, что длина волны оптического излучения λ равна 0.63×10^{-4} см, а параметры света при распространении его в TeO_2 следующие: $n_0 = 2.26$; $n_e = 2.41$; $G_{33} = 2.62 \times 10^{-5}$. Значение угла β в расчетах было выбрано 11° , частота звука 100 МГц. При этом скорость звука равна $V = 0.727 \times 10^5$ см/с. Сильная акустическая анизотропия кристалла TeO_2 приводит к “сносу” акустической энергии [1, 2], угол сноса $\delta = 55^\circ$. Все это учитывалось при конструировании АО-ячейки.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальная установка полностью соответствовала оптической схеме, приведенной на рис. 1. Источником излучения L служил He-Ne-

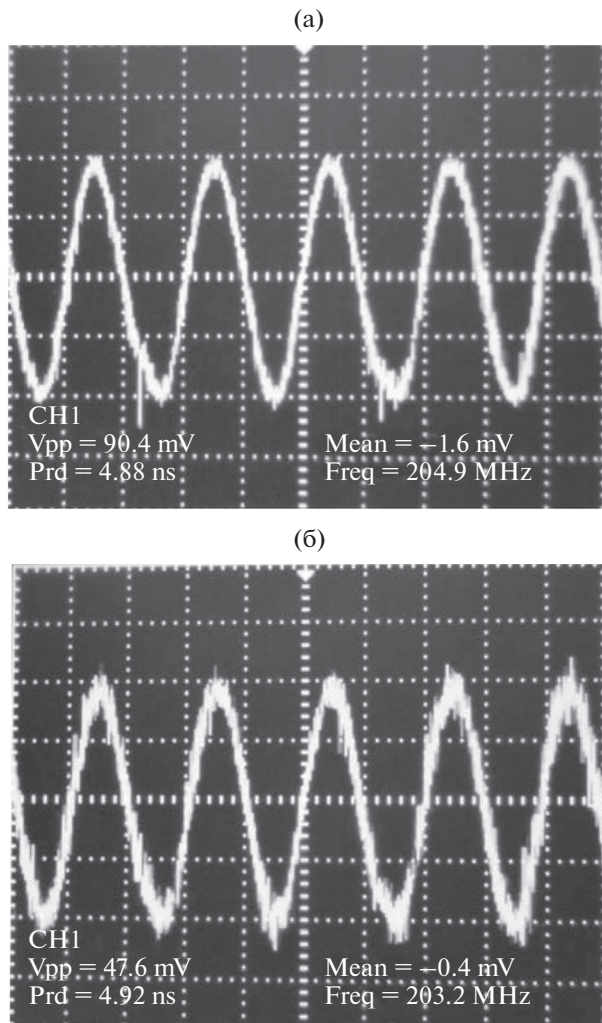


Рис. 3. Фотографии сигналов, наблюдаемые на экране осциллографа при реализации анизотропной (а) и изотропной (б) вариантов дифракции. Развертка по времени – 0.25 нс/дел, развертка по напряжению – 20 (а) и 10 мВ/дел (б).

лазер, генерировавший луч 1 с длиной волны 0.63×10^{-4} см. Посредством зеркала 2 излучение направлялось в АО-ячейку 3, изготовленную из монокристалла TeO_2 . Поляризация излучения 1 ориентировалась в плоскости, содержащей оптическую ось кристалла и направление распространения акустической волны в кристалле. В наших экспериментах использовались “косые” срезы кристалла. Оптические грани кристалла были “скошены” под углом $\sim 8.5^\circ$ относительно грани (001) кристалла и ортогонально граням $(1\bar{1}0)$. Звуковая грань кристалла “скашивалась” под углом $\beta \sim 11^\circ$ к направлению $[110]$. Из-за сильной акустической анизотропии кристалла были увеличены размеры между его оптическими гранями, а также смещен пьезопреобразователь от центра к краю кристалла для того, чтобы избежать

переотражения звука от боковых граней. Размер пьезопреобразователя 0.6×0.6 см², расстояние между оптическими гранями 1.5 см. Преобразователь генерировал акустическую волну с частотой ~ 100 МГц. Напряжение, подаваемое на преобразователь 10 В. На рис. 3а и 3б приведены фотографии сигналов, наблюдаемые на экране осциллографа, соответствующие использованию анизотропной и изотропной вариантам дифракции. Переход от одного варианта к другому осуществлялся небольшим поворотом АО-ячейки на угол $\sim 1^\circ$ вокруг оси $[1\bar{1}0]$. Как видно из рис. 3, частоты наблюдаемых сигналов равны ~ 200 МГц, что соответствует удвоенной частоте сигнала, подаваемого на преобразователь. Глубина модуляции сигнала на рис. 3а составила $\sim 20\%$, на рис. 3б – 10%. Неодинаковость глубин модуляции обусловлена тем, что эффективность изотропной дифракции оказалась в ~ 2 раза меньше эффективности анизотропной при одном и том же напряжении электрического сигнала, подаваемого на преобразователь. Достаточно низкая глубина модуляции, по нашему мнению, обусловлена неполным наложением световых пучков, а также искажением фронтов оптических волн, интерферирующих между собой. В любом случае она существенно выше глубины, найденной в работе [24], где для получения такой же частоты модуляции использована каскадная АО-дифракция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании изложенного выше материала можно сделать следующие выводы.

1. Предложена схема высокочастотного двухканального АО-модулятора-расщепителя, позволяющего сформировать два идентичных выходных оптических луча, интенсивности которых промодулированы на двойной частоте звука.

2. Предложено использовать два режима АО-дифракции – анизотропный и изотропный, осуществляемые на одной акустической волне, что позволяет менять поляризации выходных каналов посредством простого поворота АО-ячейки. В качестве материала такой ячейки предложено использовать парателлурит.

3. Разработан макет модулятора-расщепителя из монокристалла TeO_2 для расщепления и модуляции излучения с длиной волны 0.63×10^{-4} см. Получена модуляция интенсивностей выходных каналов на частоте 200 МГц. Макет позволяет менять поляризации выходных лучей путем простого поворота АО-ячейки на угол $\sim 1^\circ$, при этом отпадает необходимость в использовании дополнительных фазовых пластинок.

Предложенное устройство может найти широкое применение в различных датчиках физиче-

ских величин, датчиках перемещения, лазерных доплеровских анемометрах и т.д.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема 0030-2019-0014), а также при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-07-00259 и 19-07-00071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
2. Xu J., Stroud R. Acousto-optic Devices: Principles, Design and Applications. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1992.
3. Physical Acoustics. Principles and methods / Ed. W.P. Mason, R.N. Thurston. N.Y.: Acad. Press, 1970.
4. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Сов. радио, 1977.
5. DeMaria A.J., Gagosz R., Barnard G. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. № 3. P. 453.
6. Aas H.G., Erf R.K. // J. Acoust. Soc. Am. 1964. V. 36. № 10. P. 1906.
7. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
8. Maydan D. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. № 4. P. 1552.
9. Dixon R.W., Gordon E.I. // Bell Sys. Techn. J. 1967. V. 46. № 2. P. 67.
10. Яриш А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
11. Shamir J., Fainman Y. // Appl. Opt. 1982. V. 21. № 3. P. 364.
12. Котов В.М., Аверин С.В., Шкердин Г.Н. // Квант. электроника. 2016. Т. 46. № 2. С. 179.
13. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. и др. // Квант. электроника. 2017. Т. 47. № 2. С. 135.
14. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 94.
15. Ринкевичус В.С. Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978.
16. Коронкевич В.П., Ханов В.А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985.
17. Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соскин М.С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985.
18. Антонов С.Н., Котов В.М. // Радиотехника. 1988. № 8. С. 22.
19. Саржевский А.М. Оптика. Полный курс. М.: Едиториал УРСС, 2004.
20. Волошинов В.Б., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. // Вестн. МГУ. Физика, астрономия. 1976. Т. 17. № 3. С. 305.
21. Волошинов В.Б., Чернятин А.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2000. Т. 88. № 6. С. 1000.
22. Shcherbakov A.S., Arellanes A.O. // J. Opt. Soc. Am. B. 2016. V. 33. № 9. P. 1852.
23. Kotov V., Stiens J., Shkerdin G., Vounckx R. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. V. 3. P. 517.
24. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 65.