

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 548.0:534:535.4

Модуляция многоцветного излучения Ar-лазера на основе акустооптической дифракции в кристалле парателлурита

В.М. Котов

Предложен вариант акустооптической брэгговской дифракции для модуляции шестицветного излучения, генерируемого Ar-лазером в сине-зеленой области спектра. Приведена методика расчета параметров дифракции многоцветного излучения на примере дифракции в монокристалле парателлурита. Выполнены эксперименты с использованием парателлурита в качестве акустооптической ячейки. Эксперименты подтвердили эффективное преобразование электрических сигналов в оптические с минимальными искажениями.

PACS: 42.79.Jр

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, модуляция, многоцветное излучение.

Введение

Для модуляции оптического излучения широко используется акустооптическая (АО) дифракция [1–3]. Наиболее притягательным из всех видов дифракции является брэгговский режим, позволяющий отклонять все излучение в один дифракционный порядок. Однако этот режим обычно характеризуется высокой селективностью по длине волны света, что затрудняет его использование для модуляции многоцветного излучения.

Целью данной работы является исследование возможностей режима брэгговской дифракции, реализуемой в анизотропном одноосном кристалле парателлурита, в интересах достижения высокоэффективной модуляции шестицветного оптического излучения Ar-лазера в сине-зеленой области спектра.

Теория

Как известно [4], в своем спектре генерации Ar-лазер излучает 6 линий с длинами волн $\lambda_1 = 0,514$ мкм, $\lambda_2 = 0,488$ мкм (две наиболее яркие линии), $\lambda_3 = 0,501$ мкм, $\lambda_4 = 0,496$ мкм, $\lambda_5 = 0,4765$ мкм и $\lambda_6 = 0,4579$ мкм.

Парателлурит (TeO_2) является одноосным положительным кристаллом, обладающим опти-

ческой активностью. Показатели преломления кристалла для излучения, распространяющегося в TeO_2 под углом θ_i к оптической оси, определяются как [5]

$$n_{i,2}^2 = \frac{1 + \text{tg}^2 \theta_i}{A \pm B},$$

$$A = \frac{1}{n_0^2} + \frac{\text{tg}^2 \theta_i}{2} \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right),$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\text{tg}^4 \theta_i}{2} \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2}.$$

где n_0 и n_e — главные показатели преломления кристалла, G_{33} — компонента псевдотензора гирации. Зависимости n_0 , n_e и G_{33} от длины волны λ получены путем интерполяции табличных значений [6, 7] и имеют следующий вид:

$$n_0 = 2,253 - \frac{11,9507 \cdot 10^{-6}}{\lambda} + \frac{7,76658 \cdot 10^{-10}}{\lambda^2},$$

$$n_e = 2,409 - \frac{14,7035 \cdot 10^{-6}}{\lambda} + \frac{9,337 \cdot 10^{-10}}{\lambda^2},$$

$$G_{33} = \frac{2,7725 \cdot 10^{-13}}{\lambda^2} - \frac{1,7037 \cdot 10^{-17}}{\lambda^3} + \frac{3,9442 \cdot 10^{-22}}{\lambda^4}.$$

На рис. 1 приведена векторная диаграмма АО-дифракции многоцветного излучения Ar-лазера на одной акустической волне в одноосном кристалле в приближении плоских волн, когда каждый из лучей можно охарактеризовать волновым вектором. Многоцветное излучение \vec{T}_0 , состоящее из шести лучей с разными длинами волн, падает на грань OX кристалла под углом α . Грань OX ориентирована ортогонально оптической оси OZ . Внутри кристалла лучи распространяются в направлении \vec{k}_{0i} , причем, строго говоря, преломленные лучи уже не коллинеарны друг другу.

Котов Владимир Михайлович, вед. научн. сотрудник.
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН).
Россия, 141195, г. Фрязино Моск. обл., пл. Введенского, 1.
E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2014 г.

© Котов В.М., 2014

Это различие мало и на рисунке не отражено. При выходе из кристалла эти лучи вновь становятся коллинеарными. В кристалле все шесть лучей взаимодействуют с одной акустической волной \vec{q} , направленной ортогонально оси OZ . Дифрагировавшие лучи \vec{k}_{di} будут также неколлинеарны (это отражено на рисунке), на выходе из кристалла они, в отличие от падающего излучения, будут распространяться под разными углами. При заданном угле падения α все шесть лучей не могут находиться в брэгговском синхронизме с одной акустической волной \vec{q} . Большинство из лучей будут взаимодействовать с расстройкой брэгговского синхронизма [1]. Однако можно найти такой угол α и длину вектора \vec{q} (по сути, частоту звука для выбранной звуковой моды), когда рассинхронизм между лучами будет минимальным.

Для иллюстрации сказанного на рис. 2 представлены эффективности дифракции в первый порядок шести лучей Аг-лазера в зависимости от угла падения α . Кривые построены при разных частотах звука, а именно, 100, 120 и 140 МГц (рис. 2, а, б и в, соответственно). Предполагалось, что дифракция происходит на «медленной» звуковой волне, распространяющейся в TeO_2 ортогонально оси OZ со скоростью $0,617 \cdot 10^5$ см/с в геометрии, отображенной на рис. 1. Эффективность дифракции η_1 вычислялась согласно выражению [1, 2]:

$$\eta_1 = \frac{R^2}{\Delta k^2 + R^2} \sin^2 \left(\sqrt{\Delta k^2 + R^2} \frac{L}{2} \right),$$

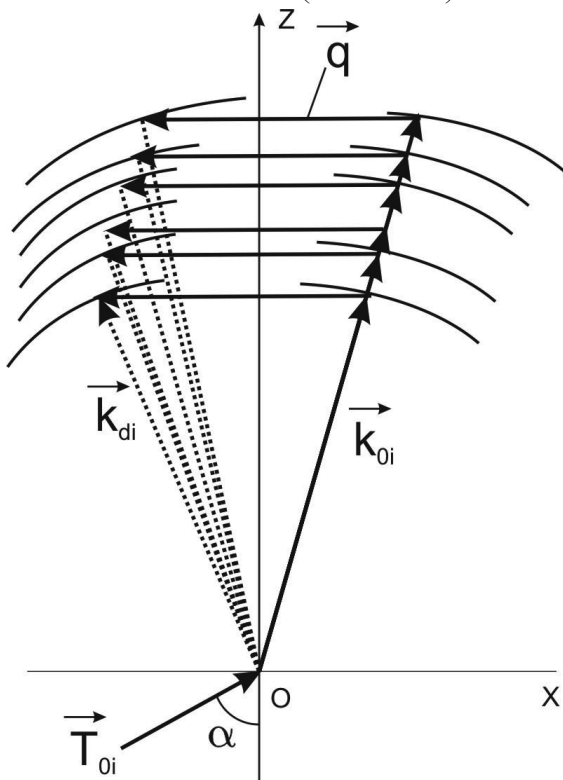
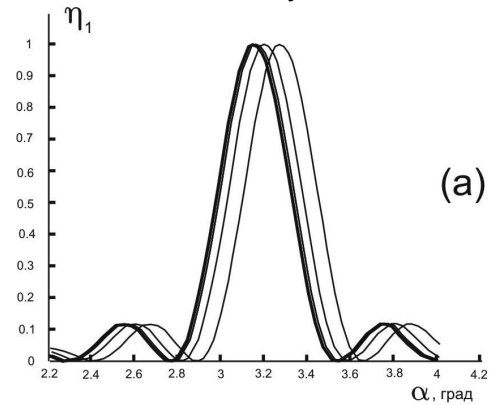


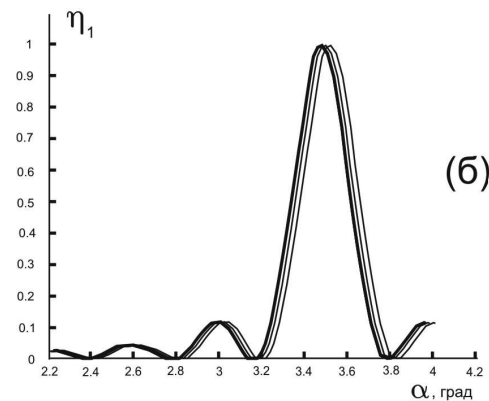
Рис. 1. Векторная диаграмма АО-дифракции шестицветного излучения на одной акустической волне.

где R — параметр Рамана-Ната, связанный с акустической мощностью, L — длина АО-взаимодействия, Δk — величина расстройки брэгговского синхронизма. В расчетах полагалось $R = 5\pi$; $L = 0,2$ см (условие эксперимента, см. ниже); Δk вычислялась графическим методом (см., например, [8]). Если на рис. 2, а и б, кривые отстоят достаточно далеко друг от друга, то на рис. 2, в они практически неразличимы. Это и будет оптимальным условием дифракции шестицветного излучения на одной акустической волне.

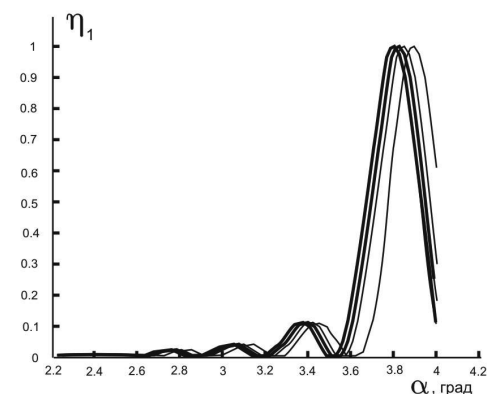
На практике для АО-модуляции используют сходящиеся оптические лучи, поскольку быстродействие модулятора определяется временем пробега акустического цуга через апертуру света [3]. Это приводит к уширению кривых эффективности η_1 , другими словами, к их большему перекрытию и, как следствие, к улучшению условий дифракции многоцветного излучения. Однако при этом



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Эффективность 1-го порядка дифракции шестицветного излучения в зависимости от угла падения α .

эффективность дифракции падает. Здесь возникает ситуация, типичная для всех АО-модуляторов, заключающаяся в необходимости достижения компромисса между быстродействием модулятора и эффективностью дифракции модулируемого света [2, 3]. В нашем случае у нас появляется возможность увеличить частоту звука (сделать ее выше 120 МГц), поскольку чем выше несущая частота звука, тем круче фронты оптического сигнала [3].

Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

Для проверки расчетов был выполнен эксперимент. Экспериментальная установка изображена на рис. 3.

Шестицветное излучение Ar-лазера 1 направляется на поляризационный ослабитель 2, затем пропускается через поляризатор 3, ориентирующий поляризацию входного излучения, после чего направляется на линзу 4 с фокусным расстоянием $F = 16$ см. Сходящееся под углом $\sim 1^\circ$ излучение направляется на АО-ячейку 5, находящуюся в фокусе линзы 4. За ячейкой 5 расположена призма 6, коллимирующая дифрагировавшие расходящиеся лучи в единый пучок. Линза 7, аналогичная линзе 4, формирует расходящийся свет в параллельный, который направляется затем на фотоприемник 8. Непродифрагировавшие лучи распространяются в направлении 9. Отметим, что используемые элементы не являются ахроматическими, однако в нашем случае это не сказывается существенным образом на характеристики модуляции. В качестве АО-ячейки нами использовался монокристалл TeO_2 с размерами $10 \times 10 \times 10$ мм, грани которого ориентированы ортогонально направлениям $[001]$, $[110]$ и $[1\bar{1}0]$. Оптическая ось OZ совпадает с направлением $[001]$.

К грани $\{110\}$ приклеивался пьезопреобразователь из LiNbO_3 , генерирующий поперечную звуковую волну с направлением сдвига вдоль $[1\bar{1}0]$. Направление OX совпадает с направлением $[110]$.

На АО-ячейку подавались электрические сигналы в виде импульсов, заполненных синусоидальным сигналом. На рис. 4 в качестве примера показан типичный импульс, подаваемый на ячейку, длительностью 1.3 мкс и частотой заполнения 135 МГц. На фотодетекторе этот сигнал наблюдается в виде оптического импульса (рис. 5) с той же длительностью. Отметим, что форма оптического сигнала с хорошей точностью повторяет огибающую электрического сигнала: у них практически идентичны передний и задний фронты, что указывает на наличие минимальных искажений формы сигнала в процессе АО-взаимодействия.

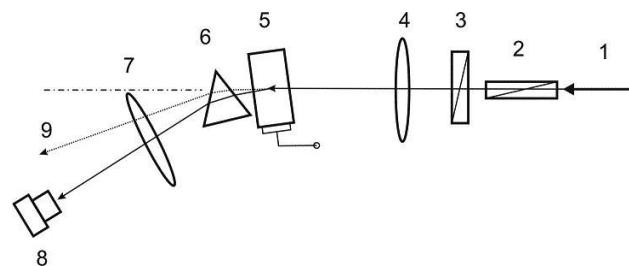


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки.

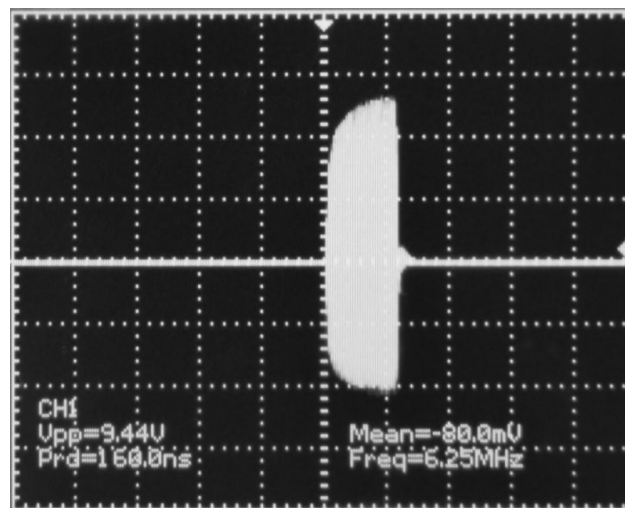


Рис. 4. Электрический сигнал, подаваемый на АО-ячейку.

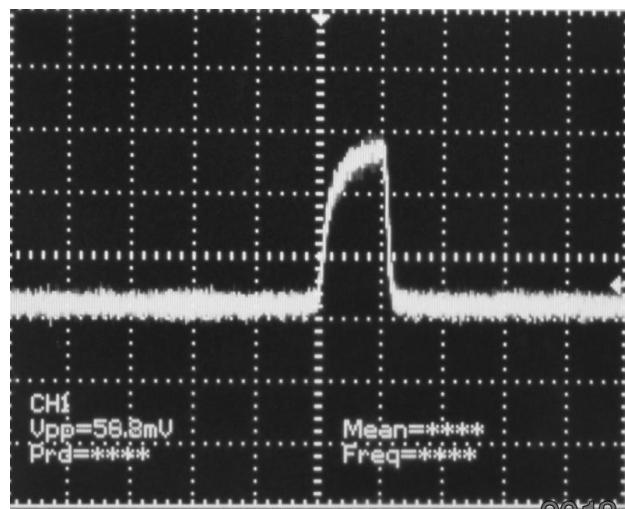


Рис. 5. Оптический сигнал, регистрируемый фотоприемником.

Эффективность дифракции составила $\sim 10\%$ и была практически одинаковой для всех линий. Существует потенциальная возможность увеличить эффективность в ~ 2 раза посредством формирования «нужной» эллиптичности входных оптических лучей. Однако формирование эллиптичности лучей в широком спектре длин волн является отдельной задачей и нами она не ставилась. Добавим, что при увеличении мощности звука также можно увеличить эффективность

дифракции, однако при этом в оптическом сигнале начинают появляться искажения («провалы» в центре сигнала, искажения передних и задних фронтов, и т.п.). Искажения появляются и в случае уменьшения длительности импульсов. Если стоит задача получения коротких оптических импульсов безотносительно передачи формы самого импульса, то эффективность дифракции можно увеличить в 2,5–3 раза, а длительность импульса уменьшить в 20–30 раз, что можно видеть из сравнения крутизны задних (наиболее крутых) фронтов электрического и оптического импульсов (см. рис. 4 и 5).

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложен вариант брэгговской АО-дифракции в TeO_2 для модуляции шестичветного оптического излучения, генерируемого Ar-лазером в сине-зеленой области спектра.

2. Показано, что использование расходимости оптических лучей сглаживает брэгговский резонанс, тем самым улучшая условия дифракции многоцветного излучения. Это позволяет увеличить несущую частоту электрического сигнала.

3. Основные теоретические результаты проверены экспериментально на основе исследования

дифракции шестичветного излучения Ar-лазера в кристалле TeO_2 .

4. Получено преобразование электрических сигналов в оптические при длительности импульсов $\sim 1,3$ мкс с эффективностью дифракции $\sim 10\%$ в режиме передачи сигналов без искажений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13–07–00138, грант № 14–07–00014) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации 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. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. —М.: Радио и Связь, 1985.*

3. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. —М.: Советское Радио, 1978.*

4. *Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. —М.: Наука, 1988.*

5. *Котов В.М. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 77. № 3. С. 493.*

6. *Акустические кристаллы. Под ред. М.П. Шапской. —М.: Наука, 1982.*

7. *Кизель В.А., Бурков В.И. Гиротропия кристаллов. —М.: Наука, 1980.*

8. *Котов В.М., Шкердин Г.Н., Уласюк В.Н. // Радио-техника и электроника. 2011. Т. 56. № 11. С. 1370.*

Modulation of the multicolor Ar laser radiation on the basis of the acousto-optic diffraction in the paratellurite crystal

V. M. Kotov

Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
Fryazino Branch

1 Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow Region, 141195, Russia

E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Received February 15, 2014

It is suggested a variant of the acousto-optic Bragg diffraction for the modulation of the six-color radiation generated by Ar laser in the blue-green spectrum range. It is demonstrated the design procedure of the diffraction parameters of the multi color radiation by the example of the diffraction in the paratellurite mono crystal. The experiments with the using of the paratellurite as the acousto-optic cell are fulfilled. The experiments confirmed the effective transformation of the electrical signals into optical ones with the minimal distortions.

PACS: 42.79.Jp

Keywords: acousto-optic diffraction, Bragg regime, modulation, multicolor radiation.

References

1. J. Xu and R. Stroud, *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications*. (John Wiley & Sons. Inc. NY.: 1992).
2. V. I. Balakshin, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Basic Physics of Acousto-Optics* (Radio i Svyaz», Moscow, 1985) [in Russian].
3. L. N. Magdich and V. Ya. Molchanov, *Acousto-Optics Devices and Their Application* (Sov. Radio, Moscow, 1978) [in Russian].
4. N. V. Karlov, *Lectures on Quantum Electronics* (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
5. V. M. Kotov, *Optics and Spectroscopy* 77, 493 (1994).
6. *Acoustical Crystals*. Ed. by M. P. Shaskolskaya (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
7. V. A. Kizel» and V. I. Burkov, *Gyrotropy of Crystals* (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
8. V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, and V. N. Ulasyuk, *J. Commun. Technol. Electron.* **56**, 1370 (2011).