

Общая физика

УДК 548.0:534:535.4

Акустооптическая модуляция многоцветного излучения с пропорциональным изменением интенсивности световых волн

В. М. Котов

Предложен режим акустооптической модуляции многоцветного излучения Ar-лазера, который обеспечивает пропорциональное изменение интенсивности монохроматических компонент многоцветного излучения в процессе изменения мощности звука. Режим основан на использовании разных величин фазовой расстройки брэгговского синхронизма для разных лучей многоцветного излучения. Вариант проверен экспериментально на примере дифракции света на звуке многоцветного излучения Ar-лазера в кристаллическом кварце.

PACS: 42.79.Jp

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

Введение

Одним из широко используемых способов управления оптическим излучением является акустооптическая (АО) брэгговская дифракция [1, 2]. Высокая селективность брэгговского режима к длине волны света открыла возможность создавать целый класс приборов — АО-фильтров (см. напр., [3]). Однако для ряда задач необходимо, наоборот, управлять в брэгговском режиме одновременно несколькими лучами с разными длинами волн. Сравнительно недавно [4, 5] была продемонстрирована возможность одновременного управления двумя лучами с произвольными длинами волн. Однако наличие фазового синхронизма, как оказалось, не обеспечивает пропорциональное изменение интенсивности лучей с разными длинами волн в зависимости от мощности звука. Такая пропорциональность является одним из важных параметров АО-модуляторов.

В настоящей работе описывается метод, позволяющий решить эту задачу.

Теория

Как известно [1, 2], брэгговская АО-дифракция селективна к длине волны оптического излучения. Эффективность света, дифрагировавшего в первый дифракционный порядок, определяется следующим выражением из работы [1]:

$$\eta = \frac{I_1}{I_{inc}} = \frac{A^2 P}{B^2 + A^2 P} \sin^2 \sqrt{B^2 + A^2 P}, \quad (1)$$

где I_1 — интенсивность первого порядка дифракции, I_{inc} — интенсивность падающего на кристалл излучения, P — мощность звука. Параметры A и B определяются из соотношений:

$$A = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L}{2H}}, \quad B = \frac{\Delta k L}{2}, \quad (2)$$

здесь λ — длина волны света, M_2 — коэффициент АО-качества материала, зависящий от оптических и акустических свойств среды, L — длина АО-взаимодействия, H — высота акустического столба, Δk — величина фазового рассинхронизма.

Из выражения (1) следует, что при малых значениях мощности P и при $\Delta k = 0$ эффективность дифракции $\eta \approx A^2 P$. Пропорциональность η от P и используется в АО-модуляторах. Однако при этом, учитывая первое соотношение из (2), имеем $\eta \sim 1/\lambda^2$, т. е. с ростом λ эффективность η заметно падает. Для «выравнивания» изменения эффективности η для разных длин волн нами предлагается менять величину Δk . Другими слова-

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

Статья поступила в редакцию 17 октября 2014 г.

© Котов В. М., 2014

ми, изменением Δk необходимо обеспечить равенство производных $\partial\eta/\partial P$ для разных длин волн. Из (1) получим:

$$\frac{\partial\eta}{\partial P} = \frac{A^2}{B^2 + A^2 P} \sin^2 \sqrt{B^2 + A^2 P} \times \left[\frac{A^2 P \cos \sqrt{B^2 + A^2 P}}{\sqrt{B^2 + A^2 P} \sin \sqrt{B^2 + A^2 P}} - A^2 P + 1 \right]. \quad (3)$$

При $P \rightarrow 0$ из (3) имеем:

$$\frac{\partial\eta}{\partial P} = A^2 \frac{\sin^2 B}{B^2} = A^2 \left[\sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) / \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Пусть для излучения с длиной волны λ_0 величина $\Delta k = 0$. Тогда для λ_0 из (4) получим:

$$\frac{\partial\eta}{\partial P} = A_0^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right)^2 \left(\frac{M_2 L}{2H} \right). \quad (5)$$

Для другого излучения (с длиной волны λ_1) необходимо брать $\Delta k \neq 0$. Для λ_1 из (4) получаем выражение:

$$\frac{\partial\eta}{\partial P} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \right)^2 \left(\frac{M_2 L}{2H} \right) \left[\sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) / \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Приравняв выражения (5) и (6), найдем связь между длинами волн λ_0 и λ_1 :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \sin \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) / \left(\frac{\Delta k L}{2} \right). \quad (7)$$

Поскольку функция $\sin x/x \leq 1$, то $\lambda_1 \leq \lambda_0$, т. е. длины волн всех лучей с $\Delta k \neq 0$ должны быть меньше λ_0 . Выражение (7) — универсальное, оно не зависит от свойств среды (т. е. от M_2).

Для пропорционального изменения интенсивности всех лучей с изменением мощности звука необходимо обеспечить строгий фазовый синхронизм ($\Delta k = 0$) для наибольшей длины волны, а для других длин волн Δk должно удовлетворять условию (7). Однако надо иметь в виду, что процесс дифракции в реальных кристаллах налагает на Δk и другое условие, вытекающее из необходимости выполнения брэгговского синхронизма. Здесь определяющим является геометрия АО-взаимодействия, частота звука и форма оптической индикатрисы. Получаемая при этом зависимость Δk от λ может не совпадать с зависимостью (7). Поэтому необходимо искать условия, при которых обе эти зависимости были бы близки друг к другу.

На рис. 1 приведены зависимости $\Delta k L$ от длины волны λ , вычисленные на основании (7). Здесь $\lambda_0 = \lambda_{\max} = 0,55 \cdot 10^{-4}$ см, где λ_{\max} — макси-

мальная длина волны сине-зеленой области излучения Аг-лазера. Область лежит между λ_{\max} и $\lambda_{\min} \approx 0,45 \cdot 10^{-4}$ см. На рис. 2 представлены зависимости η от P для трех длин волн λ_{\min} , λ_{\max} и $\lambda_p = 0,5 \cdot 10^{-4}$ см (середина области). Сплошные кривые λ_{\max} , λ_p и λ_{\min} построены при $\Delta k = 0$; 3,5 и 5 см⁻¹, соответственно. Здесь величины Δk определены на основании другого подхода: предполагалось, что оптическое излучение распространяется в кристаллическом кварце вблизи его оптической оси OZ , а вдоль направления OX распространяется поперечная акустическая волна со скоростью $3,84 \cdot 10^5$ см/с и частотой 50 МГц. Излучение падает под углом, обеспечивающим строгий брэгговский синхронизм излучения с длиной волны $0,5 \cdot 10^{-4}$ см. При этих условиях вычислялись величины Δk для длин волн 0,45 и $0,50 \cdot 10^{-4}$ см. Длина АО-взаимодействия $L = 0,5$ см. Полученные значения $\Delta k L$ отмечены точками на рис. 1. Видно, что расхождение между точками и кривой мало. Сплошные кривые на рис. 2 достаточно плотно располагаются друг к другу. Здесь же для сравнения приведены пунктирные кривые для λ_p и λ_{\min} , построенные при $\Delta k = 0$. Видно, что наклон кривых к оси абсцисс существенно зависит от Δk .

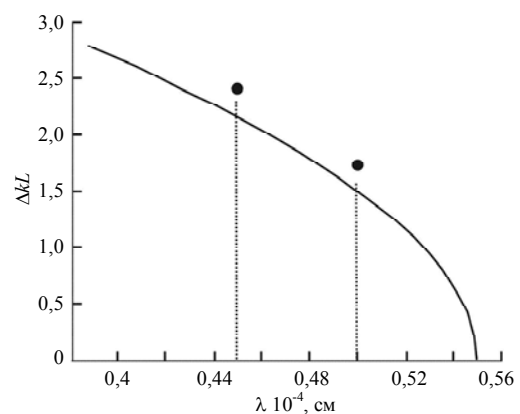


Рис. 1. Зависимость $\Delta k L$ от λ

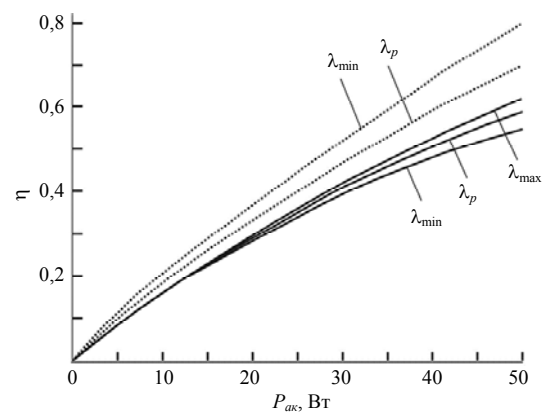


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции η трех линий сине-зеленого диапазона от мощности акустической волны P

Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 3 представлена оптическая схема экспериментальной установки. Шестицветное излучение Ag-лазера 1 распространяется в направлении луча 2 и попадает на АО-ячейку 3, выполненную из кристаллического кварца. К ячейке подводится СВЧ-сигнал частотой 50 МГц. На пути луча 2 расположен механический модулятор-прерыватель 4. Дифрагировавшие лучи распространяются в направлении 5, непродифрагировавшие — 6. Интенсивность лучей 5 измеряется фотоприемником 7. Расстояние между ячейкой 3 и фотоприемником 7 равно ~ 4 м. При этом дифрагировавшие лучи достаточно хорошо отделяются друг от друга, что позволяет измерять их интенсивности независимо. Параметры АО-ячейки приведены в теоретической части, они использованы при расчетах теоретических кривых.

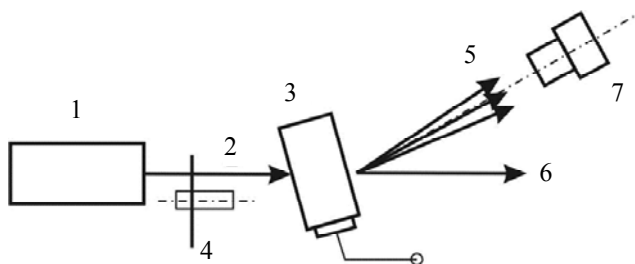


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 — Ag-лазер, 2 — многоцветное излучение, 3 — АО ячейка, 4 — механический модулятор, 5 — дифрагировавшие лучи, 6 — непродифрагировавшее излучение, 7 — фотоприемник

Методика измерений была следующей: посредством интерференционного фильтра выделялась линия $0,514 \cdot 10^{-4}$ см, которая рассматривалась как линия с наибольшей длиной волны, затем подбирался угол падения для наилучшей дифракции этой линии на звуке. После этого фильтр убирался, появлялись другие линии, и измерялось изменение интенсивности линий от изменения мощности звука. Наши измерения ограничивались напряжением на ячейке, меняющимся в пределах 1—13 В. При больших напряжениях ячейка начала перегреваться. Работа в импульсном режиме, позволяющем существенно увеличить напряжение, нами не проводилась. Это предполагается делать в дальнейших исследованиях. Измерения подтвердили пропорциональное изменение интенсивности всех линий излучения Ag-лазера с нерав-

номерностью 3—5 %. Такая неравномерность может быть вызвана различной чувствительностью фотоприемника к разным длинам волн, влиянием светового фона, неоднородностью световых и звуковых полей, и т. п. Тем не менее, по нашему мнению, существует хорошее согласие экспериментальных результатов с данными теории.

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Для пропорционального изменения интенсивности монохроматических составляющих многоцветного оптического излучения от мощности звука предложено менять величину фазовой расстройки Δk в зависимости от длины волны света λ .

2. Показано, что характер изменения Δk от λ должен описываться соотношением $\lambda/\lambda_0 = \sin x/x$, где $x = 0,5\Delta kL$.

3. Выявлено, что это условие должно сочетаться с зависимостью Δk от λ , получаемой при учете условий АО-дифракции в реальных кристаллах, т. е. геометрии АО-взаимодействия, частоты звука и вида оптической индикатрисы кристалла.

4. Предложенный метод экспериментально подтвержден на примере АО-дифракции многоцветного излучения Ag-лазера в кристаллическом кварце.

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. Балакий В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и Связь, 1985.
3. Chang I. C. // Appl.Phys.Lett. 1974. V. 25, No. 7. P. 370.
4. Котов В. М. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. №. 2. С. 386.
5. Котов В. М. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 77. №. 3. С. 493.

Acousto-optic modulation of multi-color radiation with the proportional changing of the light waves intensity

V. M. Kotov

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

Received October 17, 2014

Proposed is the acousto-optic modulation regime of the multi color Ar laser radiation which provides the proportional intensity changing of the mono chromatic components of the multi-color radiation during the sound power changing. Regime is based on the using of different values of the Bragg synchronism phase mismatch for different beams of the multi color radiation. The variant is verified experimentally by the example of the light diffraction on the sound of the multi color Ar laser radiation in the quartz crystal.

PACS: 42.79.Jp

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

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 Foundation of Acousto-Optics*. (Radio i Svyaz', Moscow, 1985) [in Russian].
3. I. C. Chang, *Appl. Phys. Lett.* **25**, 370 (1974).
4. V. M. Kotov, *Opt. Spectrosc.* **74**, 386 (1993).
5. V. M. Kotov, *Opt. Spectrosc.* **77**, 493 (1994).