

УДК 548.0:534:535.4

Полоса частот акустооптического расщепителя двухцветного излучения

В. М. Котов, Г. Н. Шкердин, Е. В. Котов, С. А. Тихомиров

Исследована частотная полоса двух вариантов брэгговского расщепления двухцветного излучения, когда падающее излучение распространяется как вблизи оптической оси кристалла, так и вдали от оси. Теоретически показано, что второй вариант обеспечивает полосу частот на порядок выше полосы первого варианта. Экспериментальное сравнение характеристик обоих вариантов выполнено на базе одной акустооптической ячейки, изготовленной из монокристалла TeO_2 . Предложен и экспериментально проверен вариант брэгговского расщепления двухцветного излучения Ar-лазера с подавлением нулевых дифракционных порядков.

PACS: 07.50.-e

Ключевые слова: двухцветное излучение, брэгговское расщепление, акустооптическая ячейка.

Введение

Акустооптические (АО) расщепители двухцветного излучения находят широкое применение в двухцветных лазерных интерферометрах – лазерных доплеровских анемометрах, гироскопах и т. д. [1–3]. В интерференционных приборах брэгговские расщепители выполняют две функции: расщепляют двухцветное излучение на монохроматические пары и сдвигают частоту каждого расщепленного луча на частоту звука как результат отражения света от бегущей звуковой решетки [4, 5].

В упомянутых приборах полоса частот, как таковая, непринципиальна, она определяет только диапазон частотной перестройки АО-элемента в составе прибора. Однако существуют приборы, для которых полоса частот является принципиально важной характеристикой, например, АО-модуляторы оптического излучения, поскольку в них именно полоса частот определяет крутизну управляющего акустического импульса [6]. В частности, для оптического излучения с гауссовым распределением интенсивности света, когда дифракционная расходимость света существенно меньше

расходимости звука, связь между полосой модулирующих частот Δf_m по уровню 0,5 и временем τ прохождения фронта акустического импульса определяется как

$$\Delta f_m = 0,75 / \tau.$$

Другими словами, чем больше Δf_m , тем меньше время нарастания фронта звукового импульса, тем "круче" фронт модулируемого оптического сигнала.

В настоящей работе исследуется частотная полоса двух вариантов двухцветных расщепителей, один из которых предназначен для управления излучения с циркулярными поляризациями, другой — с линейными. Оба варианта применяются при конструировании двухкоординатных лазерных доплеровских анемометров [3].

Расчет параметров расщепления на основе анализа векторных диаграмм

Векторные диаграммы рассматриваемых вариантов расщепления двухцветного излучения посредством дифракции на одной акустической волне представлены на рис. 1. Полагается, что АО-дифракция происходит в одноосном положительном гиротропном кристалле, примером которого может служить широко используемый на практике монокристалл TeO_2 . В обоих вариантах падающее излучение представлено двумя волновыми коллинеарными векторами \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{2i} , описывающими распространение излучений с длинами волн λ_1 и λ_2 , соответственно. Падающее излучение распространяется под углом α к оптической оси кристалла OZ. Лучи \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{2i} взаимодействуют с акусти-

Котов Владимир Михайлович, ведущий научный сотрудник.
Шкердин Геннадий Николаевич, ведущий научный сотрудник.

Котов Евгений Владимирович, младший научный сотрудник.
Тихомиров Сергей Анатольевич, научный сотрудник.
Филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН).
Россия, 141195, Моск. обл., г. Фрязино, пл. Введенского, 1.
Тел. 785-56-39-1455. E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2010 г.

ческой волной, волновой вектор \vec{q} которой направлен вдоль оси OX, ортогональной OZ.

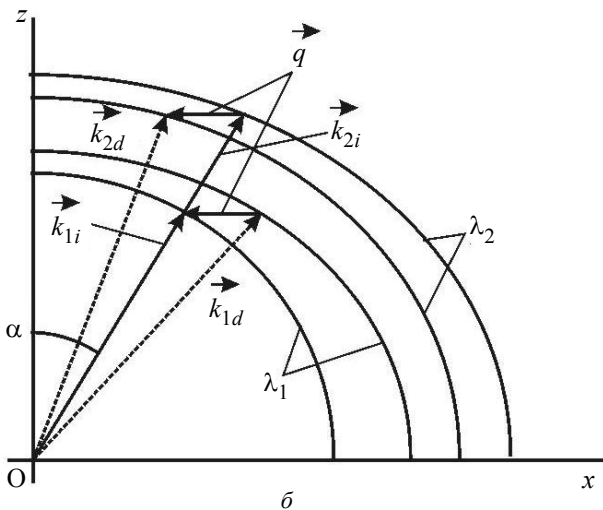
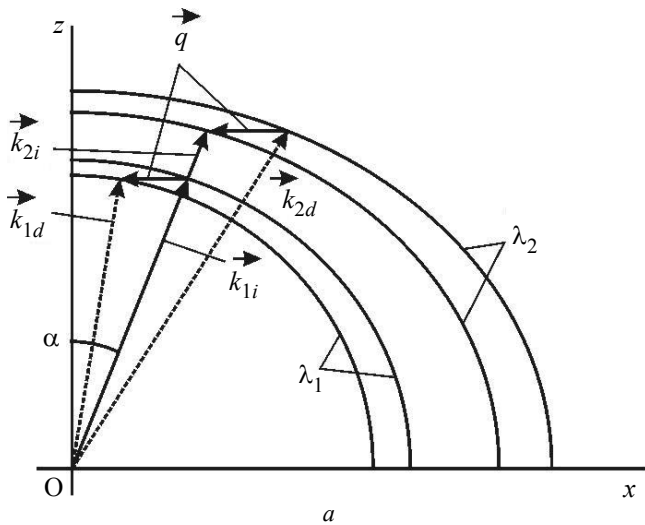


Рис. 1. Векторные диаграммы двух вариантов расщепления двухцветного излучения

В результате АО-взаимодействия луч \vec{K}_{1i} дифрагирует в направлении луча \vec{K}_{1d} , а луч \vec{K}_{2i} — в направлении луча \vec{K}_{2d} . Дифрагировавшие лучи показаны пунктирными векторами. Они распространяются по разные стороны от падающего излучения. Полагаем, что происходит анизотропная дифракция света на звуке, когда собственная волна одной волновой поверхности дифрагирует в собственную волну другой поверхности. Отличие рассматриваемых вариантов состоит в том, что в случае (а) падающие лучи \vec{K}_{1i} и \vec{K}_{2i} принадлежат внешней и внутренней волновым поверхностям, соответственно, а на рис. (б) — наоборот, внутренней и внешней поверхностям. Оказалось, что в TeO_2 первый вариант реализуется в случае, когда падающее оптическое излучение распространяется вблизи оптической оси кристалла, а второй — вдали от оси. Несмотря на это кажущееся несущее-

ственное отличие, параметры расщепления приведенных вариантов разительно отличаются друг от друга. На рис. 2, а и б приведены зависимости частоты f звуковой волны от угла α для рассматриваемых вариантов. Расчеты сделаны в предположении, что дифракция происходит в положительном одноосном гиротропном кристалле, показатели преломления которого описываются как [7]

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

где α — угол между направлением распространения света и оптической осью;
 n_0, n_e — главные показатели преломления кристалла;
 G_{33} — компонента псевдотензора гирации [8].

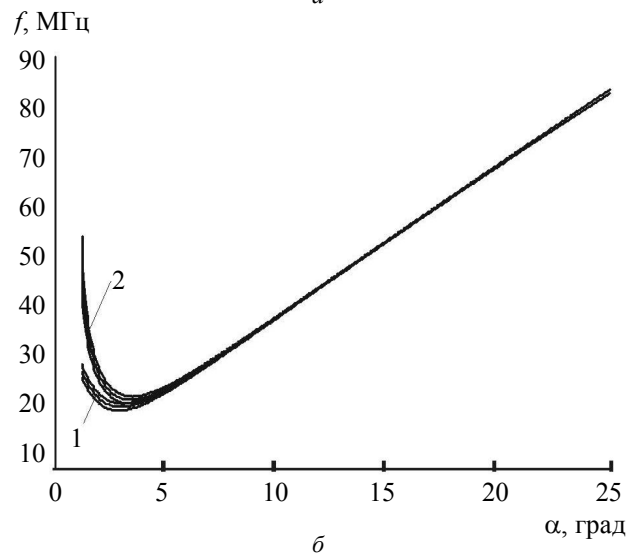
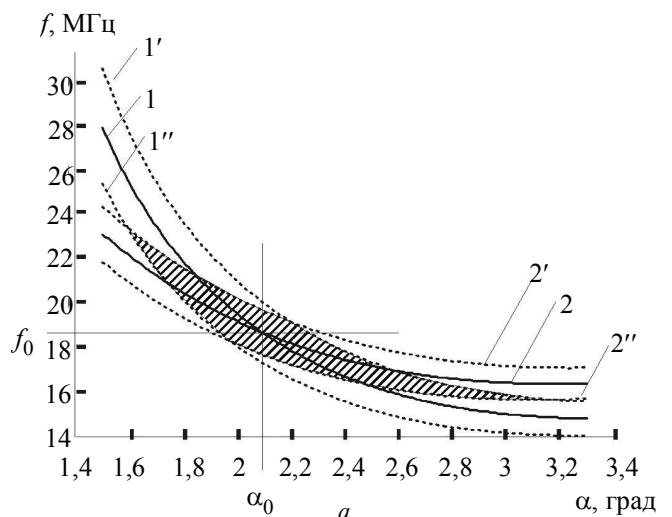


Рис. 2. Зависимость частоты звуковой волны f от угла падения α (в кристалле) двухцветного излучения Ar-лазера для первого (а) и второго (б) вариантов расщепления в TeO_2

Выражение (1), взятое со знаком (+) в знаменателе, описывает распространение луча, принадлежащего внутренней волновой поверхности, со знаком (–) — внешней поверхности. Далее, поскольку в экспериментах использовалось излучение Ar-лазера, генерирующего две линии с длинами волн $\lambda_1 = 0,514$ мкм и $\lambda_2 = 0,488$ мкм, в расчетах брались параметры кристалла именно для этих длин волн [8—10]: для $\lambda_1 = 0,514$ мкм: $n_0 = 2,3115$; $n_e = 2,4735$; $G_{33} = 3,69 \cdot 10^{-5}$; для $\lambda_2 = 0,488$ мкм: $n_0 = 2,3303$; $n_e = 2,494$; $G_{33} = 3,93 \cdot 10^{-5}$. Скорость звука в кристалле $V = 0,617 \cdot 10^5$ см/с. На рис. 2 кривые 1 и 2 являются резонансными кривыми для излучений λ_1 и λ_2 , соответственно. Эти кривые соответствуют выполнению строгого брэгговского синхронизма, т. е. обеспечивают максимально возможную эффективность дифракции, равную 1. Кривые 1 и 2 строились согласно выражению

$$f = \frac{V}{\lambda} |x_1 - x_2|, \quad (2)$$

где f — частота звука;

V — скорость звуковой волны;

λ — длина волны света, причем сюда подставлялись значения либо λ_1 , либо λ_2 .

Величины x_1 и x_2 определялись из соотношения

$$x_{1,2} = \sqrt{\frac{P}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{P}{2R}\right)^2 - \frac{Q}{R}}}, \quad (3)$$

где

$$R = (n_0 n_e)^{-2},$$

$$P = \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \left(1 - \frac{n^2 \cos^2 \alpha}{n_0^2} \right); \quad (4)$$

$$Q = n^4 \cos^4 \alpha \left(\frac{1}{n_0^4} - G_{33}^2 \right) - \frac{2n^2 \cos^2 \alpha}{n_0^2} + 1. \quad (5)$$

В выражениях (3)—(5) n — показатель преломления кристалла для рассматриваемого типа падающей собственной волны, определяемой из (1) с учетом выбора знака в знаменателе (см. выше). Понятно, что в выражениях (2)—(5) для каждой длины волны существует свой набор n_0 , n_e и G_{33} .

На рис. 2, а кривые 1 и 2 пересекаются в точке с координатами $\alpha_0 \approx 2,1^\circ$, $f_0 \approx 18,6$ МГц. В этой точке выполняется строгий синхронизм между акустической волной и обоими излучениями с длинами волн λ_1 и λ_2 . Вне этой точки дифракция происходит, вообще говоря, с расстройкой синхронизма.

На рис. 2, б кривые 1 и 2 практически сливаются между собой в области изменения угла $\alpha \approx 6—25^\circ$, что соответствует частотному диапа-

зону 20—90 МГц. Иными словами, здесь брэгговский синхронизм двух рассматриваемых лучей с одной акустической волной обеспечивается в очень широком интервале акустических частот.

Кроме резонансных кривых нами определялась область АО-взаимодействия, в которой эффективность дифракции была бы выше 0,5, т. е. находились кривые, в которых обеспечивается эффективность дифракции по уровню 0,5. На рис. 2, а им соответствуют кривые 1', 1'' и 2', 2'' для длин волн λ_1 и λ_2 , соответственно. На рис. 2, б в диапазоне углов $\alpha \approx 6—25^\circ$ аналогичные кривые практически сливаются с кривыми 1 и 2 и поэтому не видны. Ход кривых определялся на основании вычисления эффективности первого порядка дифракции I_1 [4, 5], равной

$$I_1 = \frac{R^2}{(L\Delta k)^2 + R^2} \sin^2 \left(\frac{1}{2} \sqrt{(L\Delta k)^2 + R^2} \right), \quad (6)$$

где R — безразмерный параметр Рамана—Ната, связанный с акустической мощностью;

L — длина АО-взаимодействия;

Δk — величина вектора фазовой расстройки, равная $\Delta k = |\vec{K}_i + \vec{q} - \vec{K}_d|$, где \vec{K}_i , \vec{K}_d — волновые векторы падающей и дифрагировавшей волн;

\vec{q} — волновой вектор звука.

В расчетах бралось $R = \pi$, $L = 0,6$ см. Было установлено, что $I_1 \geq 0,5$ при $\Delta k \leq 4$ см⁻¹. Путем построения векторных диаграмм с учетом фазовой расстройки Δk , равной 4 см⁻¹, находились кривые 1', 1'' и 2', 2''. Область между этими кривыми (заштрихованная область на рис. 2, а) определяет область дифракции двух рассматриваемых лучей по уровню эффективности 0,5. Эта область ограничена значениями углов α между 1,6 и 3,1°, что соответствует частотной области между 16 и 23 МГц, т. е. частотному диапазону 7 МГц. Соответствующая область на рис. 2, б простирается во всем диапазоне углов α между 6 и 25°, т. е. в частотном диапазоне 70 МГц. Этот диапазон на порядок больше диапазона, получаемого в первом варианте. Отметим, что на практике весь частотный диапазон второго варианта реализовать достаточно сложно.

Эксперимент

Для проверки полученных результатов был выполнен эксперимент. Была изготовлена АО-ячейка из монокристалла TeO₂, размеры которого равнялись 8×8×10 мм вдоль кристаллографических направлений [110], [1 $\bar{1}$ 0] и [001], соответственно. Оптической осью кристалла является направление

[001]. К грани {110} приклеивался преобразователь из LiNbO_3 , генерировавший поперечную волну с направлением сдвига вдоль $[1\bar{1}0]$. Основная частота преобразователя равнялась 16 МГц. Скорость звука в кристалле $0,617 \cdot 10^5$ см/с. На рис. 3 показана фотография изготовленной ячейки. Перед ячейкой расположена линейка для демонстрации размеров изготовленного АО-устройства.

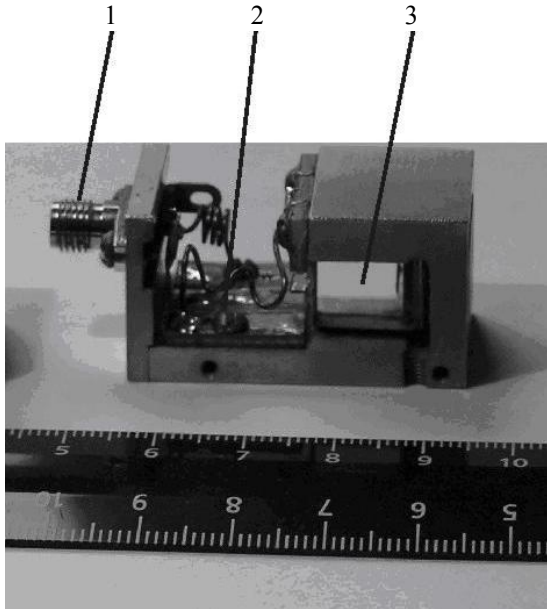


Рис. 3. Вид изготовленного АО-элемента:
1 — СВЧ-вход ячейки; 2 — электрические элементы согласования; 3 — АО-кристалл

Подбором элементов согласования 2 была получена полоса частот 10—30 МГц по уровню 3 дБ, что было вполне достаточно для исследования первого варианта расщепления. Для проверки второго варианта параметры согласующих элементов были изменены; новые параметры обеспечивали наибольшую полосу генерации в области 3-й гармоники преобразователя. Был получен частотный диапазон 32—60 МГц по уровню 3 дБ. Источником двухцветного излучения служил Аг-лазер, генерировавший две наиболее яркие линии с длинами волн 0,514 и 0,488 мкм. Излучение являлось линейно поляризованным. Для получения эффекта расщепления лучей перед АО-ячейкой располагался ротатор плоскости поляризации — элемент, обеспечивающий "разворот" поляризаций излучений λ_1 и λ_2 на 90° относительно друг друга. В наших экспериментах для этого использовалась пластинка из гиротропного материала TeO_2 , вырезанная ортогонально оптической оси кристалла. Дисперсия оптической активности [3, 9], по сути, и обеспечивает необходимый селективный разворот поляризаций. Толщина пластинки l находится из условия

$$l[\rho(\lambda_1) - \rho(\lambda_2)] = b \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

Здесь $\rho(\lambda)$ — оптическое вращение на соответствующей длине волны λ [9], $b = 1, 3, 5, \dots$. В частности, при $b = 1$ для излучений 0,514 и 0,488 мкм необходимо выбирать пластинку из TeO_2 толщиной $l = 3,4$ мм.

Для обеспечения высокоэффективной дифракции в первом варианте после ротатора поляризации располагалась четвертьволновая пластинка для формирования циркулярно-поляризованного излучения, поскольку TeO_2 вблизи оптической оси имеет сильно выраженную гиротропию [10]. Пластинка эффективно работала для обоих лучей Аг-лазера. В диапазоне частот 16—25 МГц эффективность дифракции лучей была не менее 0,5 при приложении электрического напряжения к преобразователю ~ 7 В. На низких частотах этого диапазона начинали появляться высокие порядки дифракции, поэтому за рабочую полосу была взята полоса 18—25 МГц.

Второй вариант расщепления не требовал использования четвертьволновой пластинки; он эффективно работал с линейно-поляризованным излучением. Эффективная дифракция двухцветного излучения (не менее 0,5) была получена в диапазоне частот 30—48 МГц при приложении электрического сигнала до 10 В. Непосредственно получить расщепление на более высоких частотах оказалось невозможным из-за сильного наклона оптической грани АО-ячейки к падающему излучению: угол наклона света к кристаллу начинал превышать 40° . В работе не ставилась задача проверить весь диапазон второго варианта, для этого надо было бы изготовить отдельную ячейку со скошенной оптической гранью. Было проведено сравнение двух вариантов на основе использования одной ячейки. Даже в этом случае второй вариант продемонстрировал неоспоримые преимущества, а именно, частотный диапазон оказался в 2,5 раз больше, чем у первого варианта. К тому же нет необходимости использовать дополнительные оптические элементы, а значит, уменьшаются оптические потери и габариты устройства в целом.

Расщепитель с подавлением нулевых дифракционных порядков

Второй вариант был использован для создания расщепителя двухцветного излучения Аг-лазера с подавлением нулевых порядков, т. е. подавлением проходящей, непродифрагировавшей части излучения. Оптическая схема расщепителя показана на рис. 4. Здесь линейно-поляризованное двух-

цветное оптическое излучение с длинами волн λ_1 и λ_2 (их поляризации ориентированы вертикально) направляется на ротатор плоскости поляризации 1, после которого угол между поляризациями становится равным 90° . Пусть для упрощения анализа излучение λ_2 имеет вертикальную поляризацию, а излучение λ_1 — горизонтальную. Эти излучения направляются на АО-ячейку 2, к электрическому входу 3 которой подводится управляющий высокочастотный сигнал. В результате дифракции на выходе ячейки образуются продифрагировавшие лучи (пунктирные векторы) и непродифрагировавшие (сплошные векторы). Поляризации продифрагировавших лучей повернуты на 90° относительно поляризаций непродифрагировавших лучей в результате анизотропной дифракции. Все лучи направляются на ротатор поляризации 4, аналогичный ротатору 2. После ротатора 4 поляризации непродифрагировавших лучей становятся параллельными друг другу. Поляризации продифрагировавших лучей также параллельны между собой, но ортогональны поляризациям непродифрагировавших лучей. Все лучи затем направляются на поляризатор 5, который не пропускает излучения с вертикальными поляризациями, но пропускает с горизонтальными. Таким образом, подавление нулевых дифракционных порядков осуществляется благодаря использованию поляризационной фильтрации. Вышедшие после поляризатора 5 лучи направляются на интерференционный фильтр 6, который отражает один из лучей и пропускает другой. В результате происходит разделение излучения на монохроматические компоненты.

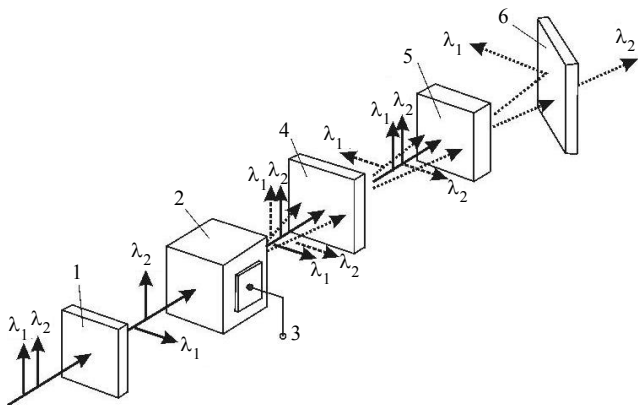


Рис. 4. Оптическая схема расщепления двухцветного излучения с подавлением нулевых дифракционных порядков

Описанная схема проверялась экспериментально. Были изготовлены два идентичных ротатора поляризации из TeO_2 , толщина пластинок ротатора составила $\sim 3,5$ мм. Частота управляющего сигнала, подаваемого на вход 3 ячейки 2, равнялась 40 МГц. Использованный в эксперименте интер-

ференционный фильтр 6 пропускал излучение с длиной волны 0,514 мкм и отражал луч с длиной волны 0,488 мкм. Эффективность дифракции составила 80 %. Уровень "нежелательного" излучения, прошедшего через устройство, составил ~ 10 %. Наличие этого излучения, по мнению авторов, обусловлено, главным образом, присутствием других линий, генерируемых Ar-лазером.

Несомненным достоинством устройства является возможность его работы с сильно расходящимися оптическими лучами, расходимость которых значительно превышает угол брэгговской дифракции: предлагаемая система поляризационной фильтрации и в этом случае эффективно подавляет нулевые дифракционные порядки.

Результаты работы могут найти применение в системах управления двухцветным лазерным излучением, а также излучением, расходимость которого существенно превышает угол брэгговской дифракции.

Выводы

1. Рассмотрены два варианта брэгговского расщепления двухцветного лазерного излучения с точки зрения полосы частот АО-дифракции по уровню 0,5, когда падающее излучение распространяется как вблизи оптической оси кристалла, так и вдали от оси. Расчет с использованием векторных диаграмм показывает неоспоримые преимущества второго варианта расщепления, полоса частот которого на порядок выше полосы первого варианта.

2. Оба рассмотренных варианта экспериментально проверены на базе одной АО-ячейки. Показано, несмотря на то, что ячейка не оптимальна для реализации второго варианта, частотная полоса второго варианта в 2,5 раз больше полосы первого.

3. Предложен и изготовлен расщепитель двухцветного излучения с подавлением нулевых дифракционных порядков. Экспериментально продемонстрировано подавление нулевых порядков двухцветного излучения Ar-лазера до 10 % от интенсивности падающего излучения. Оставшееся излучение, видимо, вызвано наличием других линий генерации Ar-лазера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-07-00047) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-3317.2010.9.

Л и т е р а т у р а

1. Антонов С. Н., Котов В. М., Сотников В. Н. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 1. С. 168.
2. Котов В. М. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 5. С. 471.
3. Антонов С. Н., Котов В. М., Сотников В. Н., Тимофеев А. С. Акустооптические поляризационные расщепители для лазерных доплеровских анемометров. Препринт ИРЭ АН СССР.— М., 1990. № 20 (549).
4. Балакий В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985.
5. Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design and Applications. John Wiley & Sons. Inc. NY., 1992.
6. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: Советское радио, 1978.
7. Котов В. М. //ФТТ. 1995. Т. 37. В. 1. С. 261.
8. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. — М.: Наука, 1979.
9. Акустические кристаллы / Под ред. М. П. Шаскольской. — М.: Наука, 1982.
10. Кизель В. А., Бурков В. И. Гиротропия кристаллов. — М.: Наука, 1980.

Frequency bandwidth of the acousto-optic splitter of the two-colored radiation

V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, E. V. Kotov, S. A. Tikhomirov
Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 1 Vvedensky sq., Fryazino
Moscow region, 141195, Russia
E-mail: vmk277@ire216.msk.su

The frequency bandwidth of two variants of the Bragg two-colored light splitting is investigated. The incident optical radiations propagate both close to the optical axis of the crystal and far off the axis. It is shown theoretically that the second variant supplies the frequency bandwidth in ten times more than the bandwidth of the first variant. The experimental comparison of the characteristics of both variants is made on the basis on the single acousto-optic cell performed from the TeO₂ monocrystal. A variant of the Bragg splitting of the two-color Ar laser radiation with the suppressing of the zeros diffraction orders is proposed and experimentally tested.

PACS: 07.50.-e

Keywords: two-color radiation, Bragg splitting, acousto-optic cell.

Bibliography — 10 references.

Received December 29, 2010