

## Выравнивание интенсивностей лучей четырехцветного лазерного излучения

В. М. Котов

*Предложен метод выравнивания интенсивностей четырехцветного лазерного излучения, составленного из трехцветного излучения одного лазера и монохроматического – другого лазера. В основе метода лежит использование ротатора поляризаций, изготовленного из гиротропного кристалла и обладающего оптической дисперсией. Метод продемонстрирован на примере выравнивания лучей трехцветного излучения Ar-лазера ( $\lambda_1 = 0,488$  мкм,  $\lambda_2 = 0,496$  мкм,  $\lambda_3 = 0,514$  мкм) и излучения полупроводникового лазера ( $\lambda_4 = 0,65$  мкм).*

*Ключевые слова:* многоцветное оптическое излучение, ротатор поляризации, выравнивание интенсивностей лучей.

**Ссылка:** Котов В. М. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 74.

**Reference:** V. M. Kotov, Prikl. Fiz., No. 2, 74 (2019).

### Введение

Для корректной работы устройств, использующих многоцветное лазерное излучение, во многих случаях крайне необходимо обеспечить энергетическую эквивалентность монохроматических составляющих излучения, т. е. обеспечить равенство их интенсивностей. Например, в двух- и трехцветных лазерных доплеровских анемометрах (ЛДА), где каждая монохроматическая составляющая предназначена для измерения одной из проекций скорости движения потока, различие в интенсивностях составляющих приводит к разным величинам ошибок измерения, что в целом ухудшает точность измерения, увеличивает вероятность ложных срабатываний и т. д. [1–3].

В настоящей работе предлагается простой способ выравнивания интенсивностей лучей четырехцветного излучения.

### Теория

Способ демонстрируется на примере четырехцветного излучения, сформированного из трех наиболее ярких линий Ar-лазера с длинами волн  $\lambda_1 = 0,488$  мкм,  $\lambda_2 = 0,496$  мкм,  $\lambda_3 = 0,514$  мкм и излучения полупроводникового (п/п) лазера с длиной волны генерации  $\lambda_4 = 0,65$  мкм. Лучи объединены в одно излучение согласно методике, описанной в [4]. Там четырехцветное излучение предполагалось использовать в системе ЛДА, где с помощью одной пары лучей измеряются две проекции скорости в одной точке потока, а с помощью другой пары – в другой точке. Задача выравнивания интенсивностей в нашем случае сводится к выравниванию лучей  $\lambda_1$ – $\lambda_3$ , генерируемых одним лазером, поскольку выравнивание лучей от разных лазеров выполняется достаточно просто, например, путем использования обычных ослабителей оптического излучения.

Оптическая схема предлагаемого метода приведена на рис. 1. Здесь лазер  $I$  генерирует линейно-поляризованное трехцветное излучение с длинами волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , интенсивности которых равны  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  соответственно.

**Котов Владимир Михайлович**, в.н.с., д.ф.-м.н.

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 141120, г. Фрязино Московской обл.,

пл. Введенского, 1.

E-mail: vmk277@ire216.msk.su, vmk6054@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

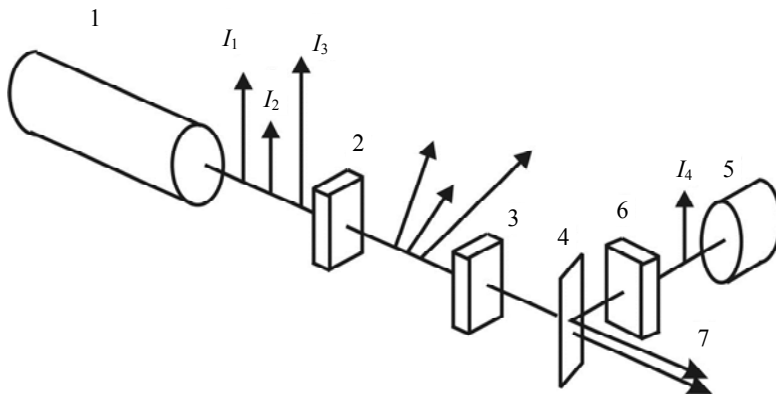


Рис. 1. Оптическая схема метода: 1 – лазерный источник излучений  $I_1, I_2, I_3$ ; 2 – ротатор поляризации; 3 – поляризатор; 4 – отражающая пластинка; 5 – лазерный источник излучения  $I_4$ ; 6 – пластинка  $\lambda/2$ ; 7 – выходное четырехцветное излучение.

Лучи представлены в виде векторов, длины которых пропорциональны интенсивностям лучей, а направления векторов – направлениям их поляризации. Излучение проходит через ротатор поляризации 2 и поляризатор 3, направляясь затем на отражающую пластинку 4. Пластинка 4, по сути, является стеклянной пластинкой с многослойным покрытием [4], которое обеспечивает пропускание лучей  $I_1-I_3$ , а луч  $I_4$  с длиной волны  $\lambda_4$ , генерируемый лазером 5, отражается от нее. Полуволновая пластинка 6 предназначена для поворота поляризации луча  $I_4$ , обеспечивая этим параллельность поляризации луча  $I_4$  с конечной поляризацией лучей  $I_1-I_3$ . Четырехцветное излучение на выходе устройства обозначено цифрой 7.

Для выравнивания интенсивностей всех четырех лучей необходимо найти параметры ротатора 2 и ориентацию поляризатора 3, которые обеспечивают равенство интенсивностей лучей  $I_1, I_2$  и  $I_3$ , генерируемых одним лазером. Выравнивание лучей  $I_1-I_3$  с излучением  $I_4$  осуществляется использованием ослабителей на пути лучей  $I_1-I_3$  или луча  $I_4$  в зависимости от того, какие излучения сильнее.

Ротатор поляризации 2 представляет собой пластинку, вырезанную из гиротропного кристалла, вращающего поляризации проходящих через нее лучей [5]. В качестве материала ротатора нами использовался одноосный гиротропный кристалл  $\text{TeO}_2$ , оптические грани которого ориентированы ортогонально его оптической оси. Величина оптического вращения  $\text{TeO}_2$  – разная для разных длин волн. Как известно [5, 6], угол поворота  $\varphi$  плоскости поляризации света, проходящего через вращающую пластинку толщиной  $L$ , равен  $\varphi = \rho L$ ,

где  $\rho$  – оптическое вращение (град/мм). На основании [7], нами определена величина  $\rho$  для каждой из длин волн Аг-лазера, которая оказалась равной 183, 174 и 157 град/мм для длин волн 0,488, 0,496 и 0,514 мкм соответственно.

На рис. 2 показаны лучи  $I_1, I_2$  и  $I_3$  после прохождения излучения через ротатор 2 толщины  $L$  в системе координат  $OXY$ . Полагается, что на входе ротатора поляризации всех лучей ориентированы вдоль направления  $OY$ . Углы поворота поляризации на выходе из ротатора равны:

$$\varphi_1 = \rho_1 L; \varphi_2 = \rho_2 L; \varphi_3 = \rho_3 L, \quad (1)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – оптические вращения лучей с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ;  $L$  – толщина ротатора.

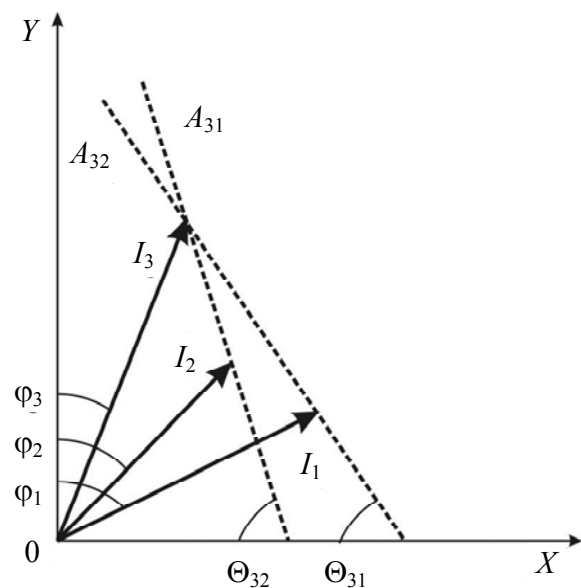


Рис. 2.  $I_1, I_2, I_3$  – лучи с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – углы поворота лучей относительно  $OY$ ;  $A_{32}, A_{31}$  – прямые, проходящие через концы векторов  $I_3, I_2$  и  $I_3, I_1$  соответственно;  $\theta_{32}, \theta_{31}$  – углы наклона прямых  $A_{32}, A_{31}$ .

Ставится задача найти такую толщину  $L$ , чтобы концы всех векторов лежали на одной прямой. Для нахождения такой ситуации поступим следующим образом: введем проекции  $I_1, I_2$  и  $I_3$  на направления  $OX$  и  $OY$ :

$$\begin{aligned} I_{1x} &= I_1 \sin \varphi_1; & I_{2x} &= I_2 \sin \varphi_2; \\ I_{3x} &= I_3 \sin \varphi_3; & I_{1y} &= I_1 \cos \varphi_1; \\ I_{2y} &= I_2 \cos \varphi_2; & I_{3y} &= I_3 \cos \varphi_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Проведем прямую  $A_{32}$  через концы векторов  $I_3$  и  $I_2$ , как показано на рис. 2, а также прямую  $A_{31}$  через концы векторов  $I_3$  и  $I_1$ . Тогда углы наклона прямых  $A_{32}$  и  $A_{31}$  к оси  $OX$ , обозначенные  $\Theta_{32}$  и  $\Theta_{31}$ , определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Theta_{32} &= (I_{3y} - I_{2y})(I_{3x} - I_{2x})^{-1}; \\ \operatorname{tg} \Theta_{31} &= (I_{3y} - I_{1y})(I_{3x} - I_{1x})^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Понятно, что в общем случае  $\Theta_{32} \neq \Theta_{31}$ . Однако подбором толщины  $L$  можно найти условие, когда  $\Theta_{32}$  и  $\Theta_{31}$  будут равны друг другу. Это и будет решением нашей задачи. Продемонстрируем метод на конкретном примере. Согласно нашим измерениям, интенсивности линий Аг-лазера составили  $\sim 250$  мВ, 200 мВ и 400 мВ для лучей с длинами волн 0,488, 0,496 и 0,514 мкм соответственно. Согласно выражениям (1)–(3), определяем углы  $\Theta_{32}$  и  $\Theta_{31}$  и строим зависимости  $\Theta_{32}$  и  $\Theta_{31}$  от толщины  $L$ . Точка пересечения этих зависимостей и дает значение  $\Theta_{32} = \Theta_{31}$ . Построения показывают, что пересечение зависимостей реализуется при  $L \approx 3,733$  мм, в этой точке  $\Theta_{32} = \Theta_{31} \approx 73,8^\circ$ . Полученный угол определяет требуемую ориентацию поляризатора  $3$  относительно направления  $OX$ . Чтобы в этом убедиться, необходимо перейти в систему координат, связанную с ориентацией поляризатора, и найти проекции интенсивностей в новой системе координат. Перейдем в систему координат  $OX^1Y^1$ , повернутую относительно  $OXY$  на угол  $\Theta = 73,8^\circ$ :

$$\begin{aligned} X^1 &= X \sin \Theta - Y \cos \Theta, \\ Y^1 &= X \cos \Theta + Y \sin \Theta. \end{aligned} \quad (4)$$

В этой системе координат проекции  $I_{1x}^1, I_{2x}^1, I_{3x}^1$  интенсивностей  $I_1, I_2, I_3$  на направление  $OX^1$ , которое мы рассматриваем как направление максимального пропускания поляризатора, определяются как  $I_{1x}^1 = I_{1x} \sin \Theta - I_{1y} \cos \Theta$ ;  $I_{2x}^1 = I_{2x} \sin \Theta - I_{2y} \cos \Theta$ ;  $I_{3x}^1 = I_{3x} \sin \Theta - I_{3y} \cos \Theta$ .

На рис. 3 приведены зависимости проекций  $I_{1x}^1, I_{2x}^1, I_{3x}^1$  интенсивностей  $I_1, I_2, I_3$  (прямые 1, 2, 3 соответственно) от толщины  $L$ . Видно, что все зависимости пересекаются в одной точке при  $L \approx 3,733$  мм, т. е. в этой точке проекции равны друг другу. Из вышеприведенных результатов следует, что выбрав толщину пластинки из  $\text{TeO}_2$ , равную  $\sim 3,733$  мм, и ориентируя поляризатор на угол  $\sim 73,8^\circ$ , получим равенство интенсивностей трех выше заданных лучей.

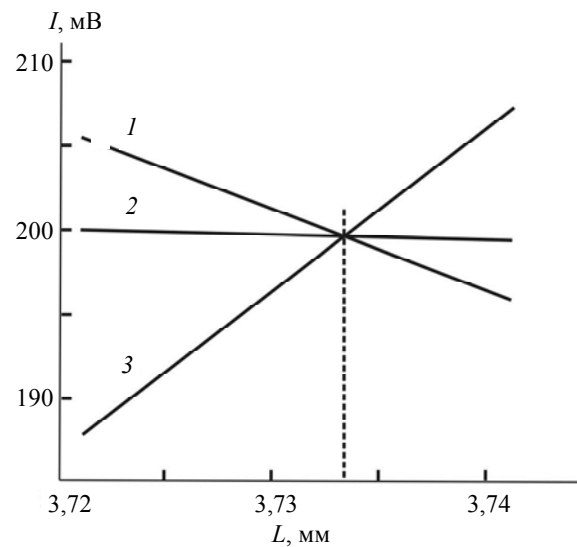


Рис. 3. Зависимости проекций интенсивностей  $I_1, I_2, I_3$  (1, 2, 3 соответственно) на направление пропускания поляризатора от толщины  $L$  ротатора поляризации.

### Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

Для проверки полученного результата был выполнен эксперимент. Излучение Аг-лазера пропускалось через монохроматор, посредством которого выделялись монохроматические компоненты лазерного излучения. Вначале измерялись интенсивности компо-

нент с длинами волн 0,488, 0,496 и 0,514 мкм, которые составили, как указывалось выше, ~ 250, 200 и 400 мВ соответственно. Затем между лазером и монохроматором устанавливалась пластинка из  $\text{TeO}_2$ , выполняющая функцию ротатора поляризаций. Толщина пластинки была выбрана 3,7 мм. Это немного меньше, чем расчетное значение, полученное выше. При таком подходе полагалось, что небольшим наклоном пластинки можно менять ее эффективную толщину, тем самым подстраивая её до нужной величины. После пластинки устанавливался поляризатор. Ориентацией поляризатора и наклоном пластинки добивалась ситуация, когда различие в интенсивностях всех трех лучей были минимальным. После настройки измеренные значения выходных интенсивностей были равны  $180 \pm 10$  мВ. Видно, что достигнуто значительное «выравнивание» интенсивностей. Если изначально интенсивности лучей отличались до 100 %, то после выравнивания их отличие составило не более 5 %. Из приведенных результатов видно, что интенсивность существенно уменьшилась у лучей с длинами волн 0,488 и 0,514 мкм, а у излучения 0,496 мкм потери незначительные.

Измеренное значение интенсивности  $I_4$  на выходе полупроводникового лазера составила ~ 100 мВ. Для выравнивания интенсивностей лучей  $I_1$ – $I_3$  и луча  $I_4$  использовался перестраиваемый нейтральный ослабитель на пути лучей  $I_1$ – $I_3$ , и интенсивность каждого луча на выходе устройства (излучение 7, см. рис. 1) в конечном итоге составила ~ 90 мВ. Как следует из результатов измерений, появились потери и излучения  $I_4$ , которые мы связываем с частичным пропуском этого луча пластинкой 4 при отражении от нее.

Таким образом, описана достаточно простая методика «выравнивания» интенсивностей лучей четырехцветного излучения. Добавим, что вместо кристалла  $\text{TeO}_2$  в качестве материала для ротатора поляризаций можно использовать и другие гиротропные кристаллы, например, кристаллический кварц [7, 8], йодоватую кислоту ( $\alpha$ - $\text{HIO}_3$ ) [9], тиогаллат кадмия ( $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ ) [10], тиогаллат серебра ( $\text{AgGaS}_2$ ) [11] и др.

## Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для выравнивания интенсивностей четырехцветного лазерного излучения, составленного из трехцветного излучения одного лазера и монохроматического от другого лазера, предложено использовать ротатор поляризаций, поляризатор и пластинку, пропускающую трехцветное и отражающую монохроматическое излучения.

2. В качестве ротатора поляризаций предложено использовать пластинку из гиротропного материала, обладающего оптической дисперсией, т. е. вращающего поляризацию оптических излучений с разными длинами волн на разные углы.

3. Для проверки предложенного метода выполнены эксперименты с использованием трехцветного излучения Ar лазера с длинами волн 0,488, 0,496 и 0,514 мкм и излучения полупроводникового лазера с длиной волны 0,65 мкм. В качестве ротатора поляризаций использована пластинка из кристалла  $\text{TeO}_2$ . При толщине ротатора  $L = 3,7$  мм получено равенство интенсивностей всех четырех лучей на выходе устройства с точностью ~ 5 %. Интенсивность каждого луча составила ~ 90 мВ.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке устройств, использующих многоцветное лазерное излучение.

---

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00259 и грант № 19-07-00071).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982.
2. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985.
3. Антонов С. Н., Котов В. М., Сотников В. Н., Тимофеев А. С. Акустооптические поляризационные расщепители для лазерных доплеровских анемометров / Препринт ИРЭ АН СССР. 1990. № 20 (549).

4. Котов В. М. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 321.
5. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. – М.: Наука, 1979.
6. Яриу А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987.
7. Кизель В. А., Бурков В. И. Гиротропия кристаллов. – М.: Наука, 1980.
8. Акустические кристаллы / Под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982.
9. Иванов Н. Р., Чихладзе О. А. // Кристаллография. 1976. Т. 21. С. 125.
10. Hobden M. V. // Acta Crystallogr. 1968. Vol. A24. P. 676.
11. Anderson P. Y., Park V. // Opt. Comm. 1974. Vol. 2. P. 392.

PACS: 42.79.-e; 42.81.Gs; 42.25.Ja

## Equalization of the beams intensities of the four-color laser radiation

V. M. Kotov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, (Fryazino Branch)  
 1 Vvedensky sq., Fryazino, Moscow Region, 141120, Russia  
 E-mail: vmk277@ire216.msk.su, vmk6054@mail.ru

Received March 18, 2019

**Consideration is given to a method of the equalization of the intensities of the four-color laser radiation composed from three-color radiation generated by one laser and monochromatic radiation of another one. The basis of the method makes use of the polarization rotator which is made from gyro tropic crystal possessing the optical dispersion. The method is demonstrated by the example of the equalization of beams of three-color Ar laser radiation ( $\lambda_1 = 0.488 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0.496 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 0.514 \mu\text{m}$ ) and the radiation of the semi-conductor laser ( $\lambda_4 = 0.65 \mu\text{m}$ ).**

**Keywords:** multi-color optical radiation, rotator of polarization, equalization of the beams intensities.

### REFERENCES

1. Yu. N. Dubnishev and B. S. Rinkevichus. *Methods of Laser Doppler Anemometry* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
2. V. P. Klochkov, L. F. Kozlov, I. V. Potykevich, and M. S. Soskin, *Laser Anemometry, Distance Spectroscopy and Interferometry. Handbook* (Naukova Dumka, Kiev, 1985) [in Russian].
3. S. N. Antonov, V. M. Kotov, V. N. Sotnikov, and A. S. Timofeev, *Acousto-optic polarization splitters for laser Doppler anemometers*, Preprint IRE of Acad. of Sci. USSR No. 20 (549) (1990).
4. V. M. Kotov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (4), 321 (2016).
5. Yu. I. Sirotnin and M. P. Shaskol'skaya, *Principles of Crystal Physics* (Nauka, Moscow, 1979) [in Russian].
6. A. Yariv and P. Yuh. *Optic Waves in Crystals* (Mir, Moscow, 1987) [in Russian].
7. V. A. Kizel' and V. I. Burkov, *Gyrotropy of Crystals* (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
8. *Acoustic Crystals*. Ed. by M. P. Shaskol'skaya (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
9. N. R. Ivanov and O. A. Chihladze, *Kristallographiya* **21**, 125 (1976).
10. M. V. Hobden, *Acta Crystallogr.* **A24**, 676 (1968).
11. P. Y. Anderson and V. Park, *Opt. Comm.* **2**, 392 (1974).