

© В. А. ТАБАРИН, А. Ю. ПОТОЦКИЙ, Н. А. ИВАНОВА

Тюменский государственный университет  
vtabarin@utmn.ru, ponab@yandex.ru, n.ivanova@utmn.ru

УДК 621.373.8

## ДВУХТАКТНЫЙ ФАРАДЕЕВСКИЙ МОДУЛЯТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### *PUSH-PULL LASER MODULATOR ON FARADAY EFFECT*

*В настоящей статье рассматривается двухтактный магнитооптический модулятор лазерного излучения с активным элементом из железиттриевого граната. Обсуждаются типичные недостатки традиционных электрооптических и магнитооптических модуляторов лазерного излучения, в том числе и при работе в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн (1,1-5,5 мкм). Приводится возможный вариант оптической схемы двухтактного магнитооптического модулятора и описание его работы. В статье отмечается, что такой тип оптического модулятора позволяет получать на выходе модулирующего устройства излучение с интенсивностью в два раза больше, чем в обычном модуляторе. Таким образом, средняя интенсивность прошедшего (промодулированного) излучения равна интенсивности входного излучения. Такое преимущество двухтактного оптического модулятора исключает потерю половины полезной мощности входного сигнала, что в случае приема слабых сигналов позволяет получать достаточно большое отношение сигнал/шум в оптическом канале. Это обстоятельство позволяет использовать двухтактный оптический модулятор в устройствах дистанционного зондирования поверхности, оптоволоконной связи, в системах передачи и обработки информации.*

*A push-pull magneto-optical modulator of laser radiation with an active element of the yttrium iron garnet is proposed. The disadvantages of conventional magneto-optical and electro-optical modulators of laser radiation operating in the near infrared (NIR) wavelength range (1.1-5.5 micron) are discussed. An optical scheme of the push-pull magneto-optical modulator is proposed. It is shown that the proposed optical modulator eliminates the losses of the net power of the input signal, when receiving weak signals allows obtaining a sufficiently large signal/noise ratio in the optical channel. This fact allows use the push-pull optical modulator in the remote control of surfaces, the fiber-optic communication, the data transmission and processing of information.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Лазер, магнитооптический модулятор, поляризация, железиттриевый гранат.

**KEY WORDS.** Laser, magneto-optical modulator, polarization, yttrium iron garnet.

Высокая когерентность и направленность излучения лазеров делают весьма перспективным их применение для целей связи, дистанционного зондирования поверхности, точного измерения расстояний, а также в быстродействующих вычислительных устройствах и системах обработки информации [2]. В связи с этим для многих оптических систем важно иметь эффективные высокоскоростные модуляторы и переключатели света.

В настоящее время получили развитие как объемные модуляторы, так и модуляторы волноводного типа. Основные достижения в этом направлении были получены при использовании электрооптических модуляторов поляризации и интенсивности излучения как твердотельных, так и газовых лазеров [1]. Однако в ближней ИК области спектра известные электрооптические кристаллы обладают слабой прозрачностью. Кроме того, общими недостатками являются высокие управляющие напряжения, необходимость применения больших кристаллов для получения 100% глубины модуляции, ограничения, накладываемые на расходимость и монохроматичность светового луча, сильная зависимость величины модуляционных эффектов от температуры. От этих недостатков свободны монокристаллы ферритов-гранатов, в которых для модуляции используются магнитооптические эффекты. Например, железоиттриевые ферриты-гранаты (ЖИГ) имеют коэффициент поглощения в области прозрачности (1,1-5,5 мкм) порядка  $0,1 \text{ см}^{-1}$ , что позволяет использовать их в ближнем ИК диапазоне длин волн [5].

В обычных магнитооптических модуляторах [3; 4] интенсивность света на выходе можно представить в виде:

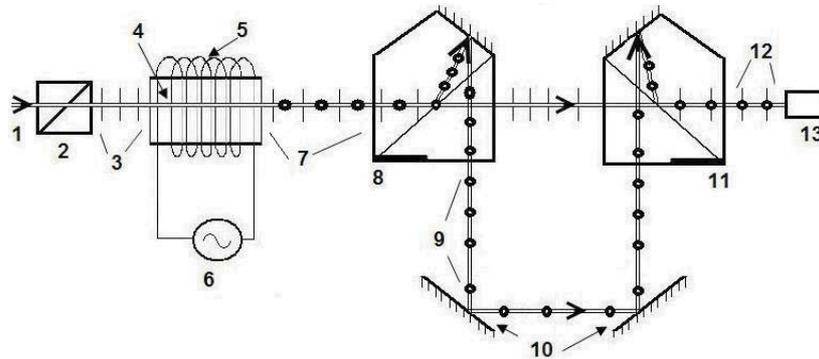
$$I = \frac{I_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos \left( 2Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin \Omega t \right\} \right) \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность света, падающего на кристалл;  $j_0$  — амплитуда силы тока модулирующего сигнала;  $\Omega$  — угловая частота модуляции;  $j_p$  — величина постоянного тока в намагничивающей катушке, задающая рабочую точку на статической характеристике модулятора;  $Q_p$  — угол фарадеевского вращения, соответствующий  $j_p$ . Уравнение (1) показывает, что среднее значение интенсивности излучения, прошедшего через обычный модулятор, равно только половине интенсивности света, падающего на кристалл.

Следовательно, в процессе преобразования модуляции по поляризации в модуляцию по интенсивности происходит потеря 50% мощности сигнала. Также, в случае приема слабых сигналов, шумы в оптическом канале не позволяют получать достаточно большое отношение сигнал/шум, что существенно снижает дальность линии связи или ограничивает возможности локационной техники при обнаружении далеко удаленных целей.

В настоящей статье предлагается существенно более экономичный двухтактный модулятор фарадеевского типа, лишенный вышеуказанных недостатков.

На рис. 1 показан один из возможных вариантов схемы такого двухтактного оптического модулятора.



- 1 — немодулированный световой луч; 2 — поляризатор;
- 3 — луч, поляризованный вертикально; 4 — образец из ЖИГ;
- 5 — намагничивающая катушка; 6 — генератор модулирующего сигнала;
- 7 — две ортогонально линейно-поляризованные волны со сдвигом фаз;
- 8 — первая призма Фостера; 9 — луч, поляризованный горизонтально;
- 10 — отражающие зеркала; 11 — вторая призма Фостера;
- 12 — две ортогональных линейно-поляризованных волны (сдвиг фаз равен нулю); 13 — амплитудный фотодетектор

Рис. 1. Схема двухтактного фарадеевского модулятора лазерного излучения

Покажем, что на выходе такого модулятора средняя интенсивность прошедшего света равна интенсивности света, падающего на кристалл. Как известно, линейно-поляризованный луч света, проходя через магнитный кристалл, расщепляется на две компоненты, поляризованные по кругу с противоположным направлением вращения вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Следовательно, излучение в кристалле можно представить в виде двух компонент.

На выходе из кристалла эти две компоненты складываются и вновь образуются линейно-поляризованное излучение, вектор  $\vec{E}$  которого будет повернут на угол  $\theta$ . Далее в призме Фостера линейно-поляризованное излучение расщепляется на две ортогональных линейно-поляризованных компоненты. Эти два луча проходят разные оптические пути прежде, чем они вновь соединятся во второй призме Фостера. Интенсивности для горизонтальной  $I_H$  и вертикальной  $I_V$  поляризации двух лучей на выходе первой призмы можно записать в виде:

$$I_H = \frac{I_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos \left( Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin \Omega t \right\} \right) \right], \quad (2)$$

$$I_V = \frac{I_0}{2} \cdot \left[ 1 + \cos \left( Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin \Omega t \right\} \right) \right]. \quad (3)$$

Если разница оптических путей двух лучей между призмами устанавливается таким образом, что горизонтально-поляризованный луч задерживается по времени на  $\pi/\Omega$  по отношению к вертикально поляризованному лучу, тогда интенсивности этих лучей, прошедших через вторую призму, можно представить в виде:

$$I_{Гвых} = \frac{I_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos \left( Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin(\Omega t + \pi) \right\} \right) \right], \quad (4)$$

$$I_{Ввых} = \frac{I_0}{2} \cdot \left[ 1 + \cos \left( Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin \Omega t \right\} \right) \right]. \quad (5)$$

Учитывая сказанное, полная интенсивность излучения на выходе может быть записана в виде:

$$I_{вых} = I_{Гвых} + I_{Ввых}, \quad (6)$$

$$I_{вых} = I_0 \cdot \left[ 1 + \cos \left( Q_p \left\{ 1 + \frac{j_0}{j_p} \cdot \sin \Omega t \right\} \right) \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что интенсивность света, прошедшего через двухтактный модулятор, будет в два раза больше, чем в обычном модуляторе. Как видно из рис. 1, выходное излучение может быть демодулировано с помощью амплитудного фотодетектора.

На рис. 2 приведен внешний вид модулирующего элемента. Он представляет собой ячейку Фарадея с замкнутым магнитопроводом, состоящим из четырех одинаковых замыкающих элементов из поликристаллического феррита марки М400НН, которые приклеиваются к боковым граням и торцам управляющего элемента (прямоугольного параллелепипеда из железоиттриевого граната). Модулирующая катушка содержит 20 витков провода диаметром  $\sim 1$  мм.

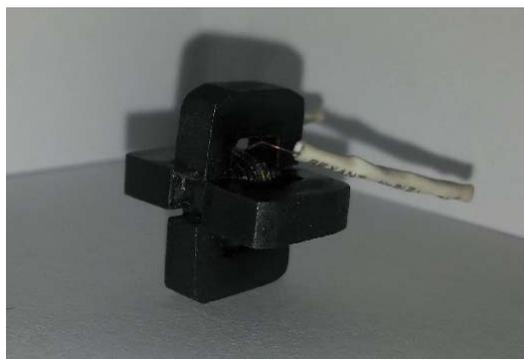


Рис. 2. Внешний вид модулирующего элемента

Расчеты [9] показывают, что если управляющий элемент поместить в соленоид, то потребуется в 20 раз больший управляющий ток в отличие от конструкции с замкнутой магнитной цепью. Частота релаксации феррита М400НН и используемый соленоид из 20 витков провода позволили получить граничную частоту модулятора на длине волны 3,39 мкм порядка 1 МГц. Глубина модуляции на граничной частоте достигала 60%.

Таким образом, преимущества двухтактного магнитооптического модулятора лазерного излучения, несмотря на некоторые осложнения в оптической системе, позволяют найти ему широкий спектр применения в приборах дистанционного оптического зондирования поверхностей, оптоволоконных системах связи, а также в быстродействующих вычислительных устройствах и системах обработки информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамир Т. Интегральная оптика. М.: Мир, 1978. 344 с.
2. Табарин В. А., Шестаков А. В., Чжан Ю. В. и др. Дистанционный лазерный газоанализатор нового поколения, размещаемый на беспилотном летательном аппарате. Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 4 (40). 52-57 с.
3. Cooper R. W., Page J. L. Magneto-optic Light Modulators. The Radio and Electronics Engineer. 1970. Vol. 39. № 6. Pp. 302-304.
4. Cooper R. W. Infra-red Intensity Modulators Using Faraday Rotation in YIG Electronics Applications Bulletin. Holland, 1972. Vol. 31. № 4. Pp. 244-257.
5. Четкин М. В., Шалыгин А. Н. Эффект Фарадея и модуляция инфракрасного света в ферритах гранатах. Квантовая электроника, 1978. Т. 5. № 1. 158-159 с.
6. Табарин В. А., Демьянцева С. Д. Магнитооптическая модуляция интенсивности лазерного излучения. Радиотехника и электроника. 1983. Т. 23. № 3. 609-611 с.
7. Табарин В. А., Шадрин Г. А. Магнитооптическая модуляция излучения трехзеркального лазера. Журнал прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76. № 2. 187-193 с.

#### REFERENCES

1. Tamir, T. Integrated optics. M.: Peace, 1978. 344 p.
2. Tabarin, V. A., Shestakov, A. V., Zhang, Y. V. and others. Remote laser gas analyzer of the new generation, are placed on unmanned aerial vehicles. Vehicles on alternative fuels. 2014. № 4 (40). Pp. 52-57.
3. Cooper, R. W., Page, J. L. Magneto-optic Light Modulators. The Radio and Electronics Engineer, 1970. Vol. 39. № 6. Pp. 302-304.
4. Cooper, R. W. Infra-red Intensity Modulators Using Faraday Rotation in YIG Electronics Applications Bulletin. Holland, 1972. Vol. 31. № 4. Pp. 244-257.
5. Chetkin, M. V., Shalygin, A. N., Faraday effect and modulation of infrared light in iron garnets. Quantum Electronics, 1978. Vol. 5. № 1. Pp. 158-159.
6. Tabarin, V. A., Demyantseva, S. D., Magneto-optical modulation of laser radiation intensity. Technology and Electronics, 1983. Vol. 23. № 3. Pp. 609-611.
7. Tabarin, V. A., Shadrin, G. A., Magneto-optical modulation of radiation three-mirror laser. Journal of Applied Spectroscopy 2009. Vol. 76. № 2. Pp. 187-193.

**Авторы публикации**

**Табарин Валерий Андреевич** — профессор кафедры радиофизики Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

**Потоцкий Антон Юрьевич** — аспирант кафедры радиофизики Тюменского государственного университета

**Иванова Наталья Анатольевна** — доцент кафедры радиофизики Тюменского государственного университета, кандидат физико-математических наук

**Author of the publication**

**Valeriy A. Tabarin** — Dr. Sci. (Phus.-Math), Professor of Radiophysics Department, Tyumen State University

**Anton Yu. Pototsky** — The post-graduate, Department of Radiophysics of the Tyumen State University

**Natalya A. Ivanova** — Cand. Sci. (Phus.-Math), Associate Professor Department of Radiophysics, Tyumen State University