



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.5

СНИЖЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В АМПЛИТУДНОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ МОДУЛЯТОРЕ ПРИ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

КОНОЙКО А.И.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В настоящей работе излагается метод, позволяющий реализовать высокоэффективную амплитудную модуляцию излучения на выходе кольцевого резонатора за счет управления его искусственными световыми потерями, выводимыми из него при помощи двух Y-образных разветвителей. При этом в резонаторе обеспечивается необходимый постоянный уровень световой энергии, что, вследствие отсутствия потерь излучения при вводе его в кольцевой резонатор, позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения, чем у существующих электрооптических модуляторов, а следовательно, меньшей величины потребляемой электрической мощности и увеличения рабочего частотного диапазона модуляции оптического излучения. Возможность реализации рассматриваемого метода обеспечивается тем, что ввод световой энергии в кольцевой резонатор может осуществляться без потерь. Кроме того, одномодовые волноводы способны сохранять временную когерентность проходящего излучения, что обеспечивает реализацию многолучевой интерференции. Стабилизация оптических характеристик кольцевого резонатора, который очень чувствителен к изменению различных внешних факторов, например, температуры, давления, вибраций, может осуществляться за счет электрооптической коррекции длины оптического пути резонатора путем введения в кольцевой резонатор управляемого фазового элемента, работающего на поперечном электрооптическом эффекте, и реализации соответствующей оптоэлектронной цепи обратной связи.

Ключевые слова: многолучевая интерференция, кольцевой резонатор Фабри–Перо, электрооптический эффект, когерентность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Конойко А.И. Снижение управляющего напряжения в амплитудном электрооптическом модуляторе при многолучевой интерференции в кольцевом резонаторе. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 14-20.

REDUCTION OF THE CONTROL VOLTAGE IN THE AMPLITUDE ELECTROOPTIC MODULATOR AT MULTIPLE-INTERFERENCE IN A RING RESONATOR

ALEXEY I. KANOJKA

*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” of National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Belarus)*

Submitted 25 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper, it's described a method that allows to implement highly efficient amplitude modulation of radiation at the output of a ring resonator by controlling its artificial light losses, which are derived from it using two Y-shaped couplers. At the same time, the necessary constant level of light energy is provided in the resonator, which, due to the absence of radiation losses when entering it into the ring resonator, allows one to achieve a significantly lower value of the required control electric voltage than existing electro-optical modulators, and, therefore, a smaller amount of consumed electric power and an increase in working frequency range of modulation of optical radiation. The possibility of implementing the method under consideration is ensured by the fact that the input of light energy into the ring resonator can be carried out without loss, in addition, single-mode waveguides are able to maintain the temporal coherence of transmitted radiation, which ensures the implementation of multipath interference. The stabilization of the optical characteristics of a ring resonator, which is very sensitive to changes in various external factors, for example, temperature, pressure, vibrations, can be achieved by electro-optical correction of the length of the optical path of the resonator by introducing a controlled phase element operating on the transverse electro-optical effect into the ring resonator and implementing corresponding optoelectronic feedback circuit.

Keywords: multipath interference, Fabry–Perot ring resonator, electro-optical effect, coherence.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kanojka A.I. Reduction of the control voltage in the amplitude electrooptic modulator at multiple-interference in a ring resonator. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 14-20.

Введение

В настоящее время существует проблема дальнейшего увеличения рабочего частотного диапазона электрооптических модуляторов, которые могут работать до тактовых частот порядка 50 ГГц. Такое ограничение является следствием роста рассеиваемой электрической мощности [1] из-за увеличения тактовой частоты модуляторов при постоянной величине управляющего поля, что ведет к недопустимому разогреву их элементов. В результате ухудшаются как электрические, так и оптические характеристики, что особенно характерно для электрооптических модуляторов с использованием многолучевой интерференции [2, 3]. Поэтому вопрос уменьшения величины управляющего напряжения электрооптических модуляторов является весьма актуальным.

Целью настоящей работы является рассмотрение вопросов, связанных с уменьшением управляющего напряжения одномодовых амплитудных электрооптических модуляторов на многолучевой интерференции, что позволяет существенно расширить их рабочий частотный диапазон.

Сущность метода

Сущность метода заключается в реализации амплитудной модуляции излучения на одном из двух выходов кольцевого резонатора за счет управления его искусственными световыми потерями, при обеспечении в нем постоянного необходимого уровня световой энергии, что позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения, чем у существующих электрооптических модуляторов.

Оптическая схема амплитудного электрооптического модулятора на базе кольцевого резонатора представлена на рис. 1. Здесь 1, 3, 5 – первый, второй и третий Y-образные разветвители, 2 – кольцевой резонатор, 4, 6 – первый и второй электрооптические управляемые отражатели, 7 – электрооптический фазовый элемент, 8 – фотоприемник цепи обратной связи, 9 – блок управления коррекцией длины оптического пути резонатора. Первый, второй и третий Y-образные разветвители представляют собой два отрезка оптического волокна, имеющие оптический контакт [4]. В качестве первого и второго электрооптических управляемых отражателей могут быть использованы как брэгговские решетки, так и микрорезонаторы Фабри–Перо.

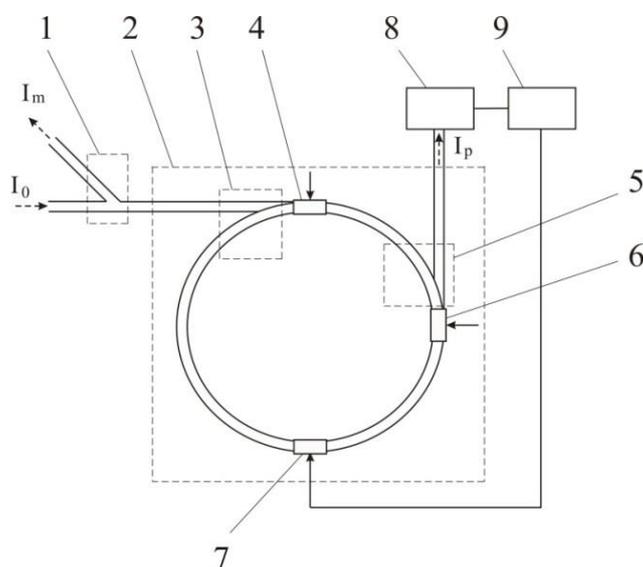


Рис. 1. Оптическая схема амплитудного электрооптического модулятора на базе кольцевого резонатора
Fig. 1. Optical design of an amplitude electro-optical modulator based on a ring resonator

Брэгговские решетки могут быть выполнены в виде отрезков электрооптического волокна с брэгговскими решетками для различных длин волн в сердцевине и наружными управляющими электродами. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первой (кривая 1) и второй (кривая 2) брэгговских решеток (рис. 2, *a*) должны быть сдвинуты друг относительно друга на величину, равную разности ширины главного максимума спектральной характеристики и его участка, на котором коэффициент отражения растет от нуля до величины, определяемой лучевой прочностью кольцевого резонатора.

Микрорезонаторы Фабри–Перо могут быть выполнены в виде полосковых линий с наружными электродами для различных длин волн. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первого (кривая 1) и второго (кривая 2) микрорезонаторов (рис. 2, *b*) должны быть сдвинуты друг относительно друга на величину, соответствующую коэффициенту отражения, определяемому лучевой прочностью кольцевого резонатора. Электрооптический фазовый элемент может быть выполнен как в виде отрезка электрооптического волокна, так и в виде полосковой линии из электрооптического материала с наружными управляющими электродами.

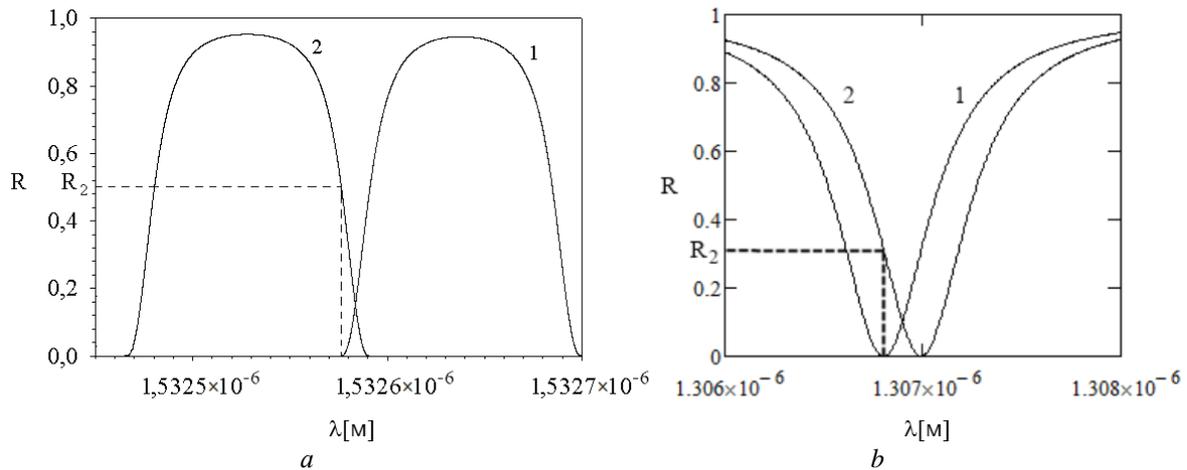


Рис. 2. Главные максимумы спектральных коэффициентов отражения: *a* – первой и второй брэгговских решеток; *b* – первого и второго резонаторов

Fig. 2. The main maxima of the spectral reflection coefficients: *a* – of the first and second Bragg gratings; *b* – of the first and second resonators

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим основные закономерности функционирования такого амплитудного модулятора. В исходном состоянии коэффициент отражения первого электрооптического управляемого отражателя минимален, то есть $R_1 = 0$, а второго – имеет значение, отличное от нуля ($R_2 \neq 0$), определяемое величиной интенсивности света I_{\max} , которую еще выдерживает резонатор.

Поэтому постоянное световое излучение с амплитудой E_0 , поступающее на вход резонатора, последовательно проходит через первый, второй Y-образные разветвители, первый электрооптический управляемый отражатель, третий Y-образный разветвитель, второй электрооптический управляемый отражатель, электрооптический фазовый элемент на следующий цикл прохождения по кольцевому резонатору и т. д. При этом в результате многолучевой интерференции в кольцевом резонаторе на выходе второго Y-образного разветвителя мы будем иметь световое поле с амплитудой электрического вектора E_k , равной:

$$E_k = \frac{E_0}{1 - \sqrt{T_k T_p} e^{i\delta}}, \quad (1)$$

где T_k – энергетический коэффициент светопропускания кольца резонатора; T_p – энергетический коэффициент суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей, который в исходном состоянии равен коэффициенту пропускания второго электрооптического управляемого отражателя T_2 , то есть $T_p = T_2$; δ – разность фаз между интерферирующими в резонаторе световыми волнами.

Следовательно, интенсивность света на выходе второго Y-образного разветвителя I_k можно определить из выражения, имеющего следующий вид:

$$I_k = E_k E_k^* = \frac{I_0}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}. \quad (2)$$

Так как максимальная величина интенсивности света I_k определяется величиной интенсивности света I_{\max} , которую еще выдерживает кольцевой резонатор, то, решая уравнение (2), при условии $\delta = 0$, можно определить максимальную величину коэффициента пропускания второго электрооптического управляемого отражателя T_p , которая будет определяться выражением

$$T_p = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_{\max}}}\right)^2}{T_k}. \quad (3)$$

Выражение для определения интенсивности света на втором выходе третьего Y-образного разветвителя, отраженного от второго электрооптически управляемого отражателя I_p будет иметь следующий вид:

$$I_p = \frac{I_0 R_2}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}, \quad (4)$$

где $R_2 = 1 - T_2$ – коэффициент отражения второго электрооптически управляемого отражателя 6.

Со второго выхода третьего Y-образного разветвителя отраженный световой поток падает на фотоприемник цепи обратной связи, на выходе которого появляется сигнал пропорциональный интенсивности света в кольце резонатора. Этот сигнал поступает на вход блока управления коррекцией длины оптического пути резонатора. Последний вырабатывает управляющий электрический сигнал, поступающий на электрооптический фазовый элемент, который корректирует длину оптического пути кольцевого резонатора. Эта длина должна быть кратна длине волны распространяющегося по кольцу резонатора излучения λ , что обеспечивает в резонаторе необходимый стабильный уровень световой энергии.

При одновременной подаче на управляющие электроды первого и второго электрооптически управляемых отражателей управляющих сигналов свет поступает через первый и второй Y-образные разветвители к первому электрооптически управляемому отражателю. Управляющее напряжение, подаваемое на их электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала по закону

$$n = n_e + \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{U}{d}, \quad (5)$$

где n_e – показатель преломления необыкновенной волны в электрооптическом материале, U – приложенное напряжение, d – расстояние между управляющими электродами (ширина волновода), r_{33} – электрооптический коэффициент. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а следовательно, к соответствующему изменению длины световой волны λ_{p1} , при которой отражение от первого электрооптически управляемого отражателя минимально. Поэтому величина интенсивности света на выходе первого электрооптически управляемого отражателя будет падать в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения. Отраженный от первого электрооптически управляемого отражателя световой поток поступает в обратном направлении через второй Y-образный разветвитель к первому, через который направляется на выход в качестве модулируемого сигнала I . Величину интенсивности этого сигнала можно определить из выражения

$$I = \frac{I_0 R_1}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}, \quad (6)$$

где $R_1 = 1 - T_2$ – коэффициент отражения первого электрооптически управляемого отражателя.

Свет, прошедший через первый электрооптически управляемый отражатель, поступает через третий Y-образный разветвитель на второй электрооптически управляемый отражатель. Управляющее напряжение, подаваемое на его управляющие электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала по такому же закону (5), как и в первом электрооптически управляемом отражателе. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а следовательно, к соответствующему изменению длины световой волны λ_{p2} , при которой отражение от второго электрооптически управляемого отражателя минимально. Поэтому величина интенсивности отраженного света на втором выходе второго электрооптически управляемого отражателя будет уменьшаться в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения,

что обеспечивает необходимый стабильный уровень световой энергии в кольцевом резонаторе, так как на электрооптический материал электрооптических управляемых отражателей воздействует электрическое поле одной и той же величины.

Расчеты показывают, что для излучения с резонансной длиной волны существует максимум интенсивности света на выходе модулятора (рис. 3). По мере увеличения потерь в кольцевом резонаторе максимум интенсивности излучения смещается в сторону меньших значений коэффициента суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей, а его величина – уменьшается.

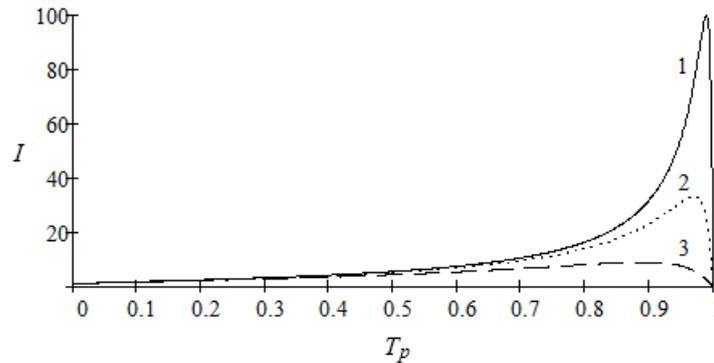


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности света на выходе амплитудного электрооптического модулятора на базе многолучевой интерференции от коэффициента суммарного светопропускания электрооптических управляемых отражателей при различных потерях в кольцевом резонаторе: 1 – 1 %; 2 – 3 %; 3 – 10 %

Fig. 3. The dependence of the relative light intensity at the output of the amplitude electro-optical modulator based on multipath interference on the total transmittance of electro-optical controlled reflectors at various losses in the ring resonator: 1 – 1 %; 2 – 3 %; 3 – 10 %

На рис. 4 приведена зависимость относительной интенсивности света на выходе модулятора от напряжения, приложенного к электрооптическому материалу управляемых отражателей при $T_p = 0,81$, которая имеет линейный характер.

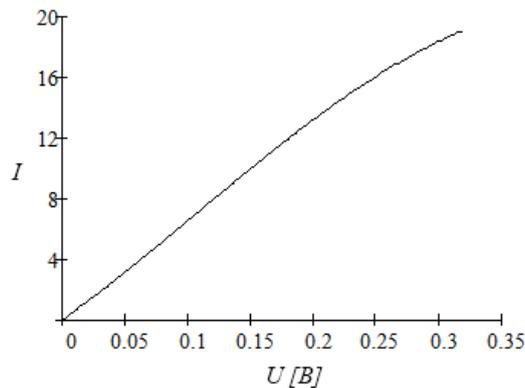


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности света на выходе модулятора от напряжения, приложенного к электрооптическим управляемым отражателям при $T_p = 0,81$
Fig. 4. The dependence of the relative light intensity at the output of the modulator on the voltage applied to the electro-optical controlled reflectors at $T_p = 0.81$

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод амплитудной модуляции позволяет реализовать амплитудную модуляцию излучения на выходе кольцевого резонатора, имеющего два выхода, за счет управления его искусственными световыми потерями, при обеспечении в нем постоянного необходимого уровня световой энергии, что позволяет достичь значительно меньшей величины требуемого управляющего электрического напряжения,

чем у существующих электрооптических модуляторов. Амплитудный модулятор, реализующий этот метод, имеет линейную светомодуляционную характеристику и может обладать управляющим напряжением как минимум на один порядок меньшим, чем существующие амплитудные модуляторы любых типов. Кроме того, благодаря когерентному суммированию амплитуд интерферирующих световых волн он обладает еще усилением излучения с резонансной длиной волны. Следовательно, для такого модулятора требуемая управляемая электрическая мощность составит величину, как минимум, на один порядок меньшую, чем у существующих в настоящее время, что существенно расширяет его рабочий частотный диапазон.

Список литературы

1. Мустель Е.П., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука; 1970.
2. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. Ленинград: Машиностроение, 1985.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука; 1973.
4. Миrowsкий Д.И., Будагян И.Ф. Микроволноводная оптика и голография. М.: Наука; 1983.

References

1. Mustel E.R., Parygin V.N. [*Metody moduljacji i skanirvanija sveta*]. M.: Nauka; 1970. (In Russ.)
2. Nagibina I.M. [*Interferencija i difracija sveta*]. Leningrad: Maschinostroenie, 1985. (In Russ.)
3. Born M., Wolf E. [*Osnovy optiki*]. M.: Nauka; 1973. (In Russ.)
4. Mirowicki D.I., Budagian I.F. [*Microwolnowodnaja optika i golografija*]. M.: Nauka; 1983. (In Russ.)

Сведения об авторах

Конойко А.И., к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Information about the authors

Kanojka A.I., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Photoelectronics Laboratory of SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology".

Адрес для корреспонденции

220090, Республика Беларусь,
г. Минск, Логойский тракт, д. 22,
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника
и лазерная техника»
тел. +375-44-746-63-72;
e-mail: kon54@yandex.by
Конойко Алексей Иванович

Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,
Minsk, Logoyskiy tract, 22,
SSPA "Optics, Optoelectronics
and Laser Technology"
tel. +375-44-746-63-72;
e-mail: kon54@yandex.by
Kanojka Alexey Ivanovich