

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 621.391.63: 681.7.068

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-217-223>

Поступила в редакцию 04.03.2020.

Received 04.03.2020.

В. Б. Залесский, А. И. Конойко, В. М. Кравченко, А. С. Кузьмицкая*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь***АМПЛИТУДНАЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ РЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ-ПЕРО**

Аннотация. Рассматривается метод амплитудной электрооптической модуляции излучения на базе последовательностей резонаторов Фабри-Перо с поперечным электрооптическим эффектом на примере ниобата лития LiNbO_3 . Этот подход позволяет существенно уменьшить значение управляющего напряжения электрооптического амплитудного модулятора, работающего в режиме пропускания светового пучка при сохранении его высокой эффективности. Уменьшение управляющего напряжения достигается за счет как увеличения количества установленных последовательно резонаторов Фабри-Перо, так и фазового сдвига относительно экстремума функции коэффициента пропускания. Указанный метод дает возможность существенно уменьшить длительность получаемых световых сигналов, а следовательно, увеличить тактовую частоту при сохранении высокой эффективности модуляции излучения. Уменьшение длительности световых сигналов достигается за счет использования в отдельном канале модуляции двух последовательностей электрооптических резонаторов Фабри-Перо, одна из которых работает на пропускание, а другая – на отражение. Увеличение тактовой частоты на выходе модулятора обеспечивается суммированием сигналов, идущих от нескольких каналов модуляции. Показано, что величина управляющего напряжения для амплитудного электрооптического модулятора на базе последовательности резонаторов Фабри-Перо, выполненных из ниобата лития LiNbO_3 , при рабочей длине волны излучения, равной 1,307 мкм, может составлять величину 4 В – в случае, когда его начальная рабочая точка соответствует максимальному пропусканию, и 2 В – в случае, если начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента пропускания.

Ключевые слова: многолучевая интерференция, резонатор Фабри-Перо, эффективность модулятора, поперечный электрооптический эффект

Для цитирования. Амплитудная электрооптическая модуляция излучения последовательностями резонаторов Фабри-Перо / В. Б. Залесский [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 217–223. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-217-223>

Valery B. Zalesski, Alexey I. Konoyko, Vladimir M. Kravchenko, Hanna S. Kuzmitskaya*SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus***AMPLITUDE ELECTRO-OPTICAL MODULATION OF RADIATION BY SEQUENCES OF FABRY-PEROT RESONATORS**

Abstract. In this paper, we considered the method of amplitude electro-optical modulation of radiation using sequences of Fabry-Perot resonators based on the transverse electro-optical effect on the example of lithium niobate LiNbO_3 . With this method, it is possible to significantly reduce the voltage of the control electromagnetic field of the electro-optical amplitude modulator operating in the transmission mode of the light beam while maintaining its high efficiency. The reduction of the control voltage is achieved by increasing the number of Fabry-Perot resonators installed in series and the phase shift relative to the extremum of the transmittance function. This method allows to diminish the duration of the received light signals which leads to an increase in the clock frequency while maintaining a high efficiency of the radiation modulation. Diminishing the duration of light signals is achieved by using separate modulation channels of two sequences of electro-optical Fabry-Perot resonators, the first of which works on the transmission and the second one on the reflection. Increasing the clock frequency at the output of the modulator is achieved by summing the signals coming from several modulation channels. It is shown that the value of the control voltage for an amplitude electro-optical modulator based on a sequence of Fabry-Perot resonators made of lithium niobate LiNbO_3 , with an operating wavelength of 1.307 microns, can be 4 V in the case when its initial operating point corresponds to the maximum transmittance. The control voltage is 2 V if the initial operating point is shifted in phase relative to the extremum of the transmittance function.

Keywords: multiple beam interference, Fabry-Perot, the efficiency of the modulator, the transverse electro-optic effect

For citation. Zalesski V. B., Konoiko A. I., Kravchenko V. M., Kuzmitskaya H. S. Amplitude electro-optical modulation of radiation by sequences of Fabry-Perot resonators. *Vesti Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 217–223 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-217-223>

Введение. Электрооптический резонансный модулятор на базе интерферометра Фабри-Перо представляет собой слоистую структуру, которая состоит из двух зеркал и промежуточного слоя из электрооптического материала [1]. С точки зрения уменьшения величины управляющего напряжения в одномодовых электрооптических модуляторах следует использовать поперечный электрооптический эффект, так как в этом случае величина управляющего напряжения пропорциональна d/l_0 , где d – расстояние между электродами, а l_0 – размер электрооптической среды в направлении распространения излучения (геометрическая база резонатора). А это означает, что управляющее электрическое поле должно быть ориентировано перпендикулярно направлению распространения проходящего света. Оптическая толщина электрооптического материала (оптическая база резонатора) кратна целому числу полуволн модулируемого излучения. Электрооптический резонатор может работать как на пропускание, так и на отражение падающего излучения. В таких модуляторах быстродействие, а соответственно, и минимальная длительность выходных оптических сигналов определяется в основном временем формирования в резонаторе интерферирующих волн, которое зависит от величины оптической базы и коэффициента отражения зеркал резонатора, что ограничивает возможности применения резонансных модуляторов Фабри-Перо в быстродействующих системах оптической связи. Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность уменьшения как величины управляющего напряжения, так и длительности промодулированных световых сигналов последовательностями электрооптических резонаторов Фабри-Перо, работающими как на пропускание, так и на отражение.

Описание метода. Модуляция излучения последовательностью резонаторов Фабри-Перо имеет свою особенность, а именно: необходимо устранение влияния излучения отраженного одним резонатором на светомодуляционные характеристики предыдущего за счет фильтрации. Для этого при применении объемных резонаторов может быть использована поляризационная развязка [2, 3]. В случае применения волоконно-оптических или полосковых резонаторов для этой цели могут быть использованы один и более Y-образных разветвителей, как это показано на рисунке 1, а, где 1 – зеркала резонатора; 2 – электрооптическая среда; 3 – управляющие электроды; 4 – Y-образный разветвитель. Так, при применении двух, расположенных последовательно, Y-образных разветвителей величина отраженного от резонатора светового потока, идущего по входному волноводу в обратном направлении, может составлять десятые доли процента.

При поступлении на входное зеркало резонатора монохроматического светового потока с длиной волны λ , обладающего плоским волновым фронтом и амплитудой E_0 , он частично проходит в резонатор и испытывает переотражения между зеркалами. Переотраженные световые волны интерферируют между собой. Если оптическая разность хода между интерферирующими волнами кратна длине волны λ , то между зеркалами формируется максимальная амплитуда результирующей волны, если $\lambda/2$, то – минимальная. Время образования очередной переотраженной интерферирующей световой волны t_0 определяется оптической базой резонатора и равно $t_0 = 2l_0 n_p / c$, где n_p – показатель преломления электрооптического материала; c – скорость света в вакууме. В случае отсутствия поглощения излучения в зеркалах резонатора суммарная амплитуда, прошедшей через резонатор E_t и отраженной E_r световых волн, могут быть определены из следующих соотношений [4]:

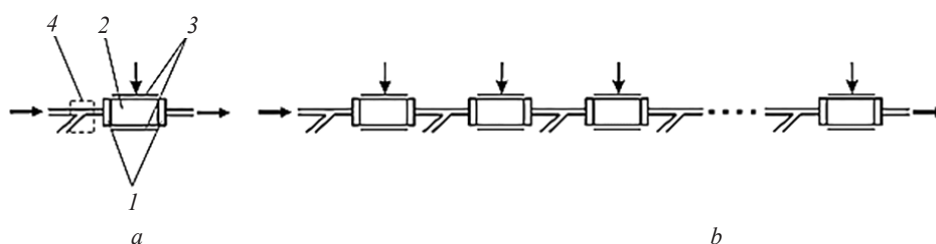


Рис. 1. Электрооптический амплитудный модулятор с одним (а) и N (b) резонаторами Фабри-Перо: 1 – зеркала резонатора; 2 – электрооптическая среда; 3 – управляющие электроды; 4 – Y-образный разветвитель

Fig. 1. The electro-optical amplitude modulator with one (a) and N (b) Fabry-Perot resonators: 1 – mirrors of the resonator; 2 – electro-optical medium; 3 – control electrodes; 4 – Y-shaped splitter

$$E_t = E_0 T_i \sqrt{T} \left\{ \frac{1 - T^n R_i^n \exp[in(\phi + \delta\phi)]}{1 - t^2 R_i \exp[i(\phi + \delta\phi)]} \right\}, \quad (1)$$

$$E_r = E_0 \left\{ \left[\frac{1 - T_i^{(n-1)} R_i^{(n-1)} \exp[i(n-1)(\phi + \delta\phi)]}{1 - T R_i \exp[i(\phi + \delta\phi)]} \right] T_i T \sqrt{R_i} \exp[i(\phi + \delta\phi)] - \sqrt{R_i} \right\}, \quad (2)$$

где $\phi + \delta\phi = 2 \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} [2l_0(n_p + \delta n)]$ – разность фаз между интерферирующими световыми волнами, наводимая в резонаторе; δn – изменение показателя преломления под действием управляющего электрического напряжения; R_i – коэффициенты амплитудного отражения первого и второго зеркал; T_i – коэффициенты амплитудного пропускания первого и второго зеркал; T – коэффициент пропускания электрооптической среды, расположенной между зеркалами; $n = t/t_0$ – количество интерферирующих волн; t – время распространения световой волны в резонаторе; t_0 – время, за которое световая волна проходит между зеркалами резонатора в прямом и обратном направлении.

Выражения (1), (2) показывают, что для формирования результирующей (как прошедшей, так и отраженной) световой волны требуется n переотражений светового потока, прошедшего в одном резонаторе, т. е. для формирования результирующей волны требуется время, определяемое количеством переотражений n и оптической базой резонатора ($n_p l_0$).

Известно, что величину эффективного числа интерферирующих пучков $N_{\text{эфф}}$ в интерферометре Фабри-Перо можно найти из соотношения [5]:

$$N_{\text{эфф}} = \frac{\pi \sqrt{R_i}}{1 - R_i}. \quad (3)$$

Здесь $N_{\text{эфф}}$ – это такое число интерферирующих пучков одинаковой интенсивности, которое дает такую же ширину интерференционного максимума $\delta\lambda$, как и бесконечно большое число пучков убывающей интенсивности. Как показывают расчеты, число интерферирующих пучков с убывающей интенсивностью n , равное $N_{\text{эфф}}$, позволяет получить на выходе резонатора Фабри-Перо интенсивность светового пучка, равную порядка 90 % от падающего светового потока.

При использовании для амплитудной модуляции N резонаторов (рис. 1, б) выражение для суммарной интенсивности света, прошедшего через модулятор, будет иметь следующий вид:

$$I_{\Sigma t} = (E_t E_t^*)^N. \quad (4)$$

Такой модулятор работает следующим образом: в исходном состоянии в случае отсутствия управляющего напряжения излучение от источника света последовательно проходит все резонаторы Фабри-Перо, так как их светопропускание максимально вследствие того, что оптическая база резонаторов кратна длине волны. При подаче управляющего напряжения излучение модулятора гаснет, а отраженное каждым резонатором выводится из основного оптического тракта соответствующими Y-образными разветвителями, стоящими перед каждым резонатором.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности света на выходе электрооптических модуляторов, образованных одним (кривая 1) и девятью резонаторами (кривые 2, 3) от времени при подаче прямоугольных управляющих электрических сигналов. Графики соответствуют случаю, когда в начальный момент времени $t = 0$ электрическое напряжение на управляющих электродах резонаторов отсутствует, а подача управляющего напряжения осуществляется при достижении амплитуды светового сигнала, равной порядка 90 %.

Из приведенных зависимостей видно, что при отсутствии управляющего напряжения время формирования переднего фронта светового сигнала в случае модулятора с девятью резонаторами в 1,76 раза больше, чем однорезонаторного. При подаче на электроды резонаторов управля-

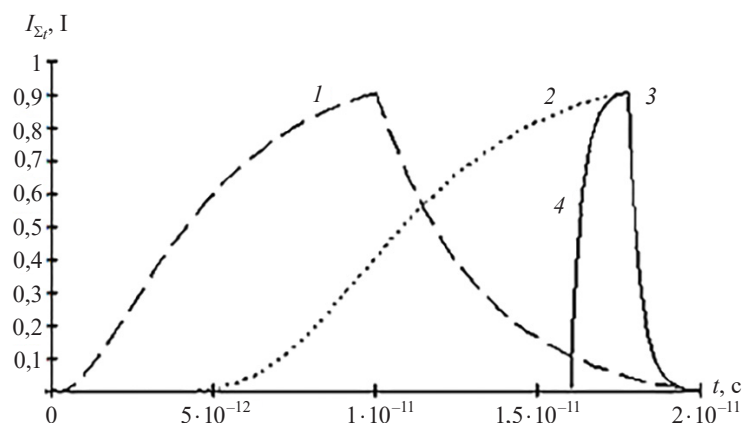


Рис. 2. Зависимость интенсивности света на выходе электрооптического модулятора на базе резонаторов Фабри-Перо от времени: 1 – один резонатор; 2, 3 – последовательность из 9 резонаторов; 3, 4 – электрооптический амплитудный модулятор коротких оптических сигналов (рис. 4, а)

Fig. 2. The time dependence of the light intensity at the output of an electro-optical modulator based on Fabry-Perot resonators: 1 – one resonator; 2, 3 – a sequence of 9 resonators; 3, 4 – electro-optical amplitude modulator for short optical signals (Fig. 4, a)

ющего электрического напряжения в момент времени, когда амплитуда оптического сигнала на выходе достигнет 90 % от падающего излучения, на выходе модуляторов происходит резкое падение интенсивности света. Причем время затухания оптического сигнала до уровня примерно 2 % в случае модулятора с девятью резонаторами на порядок меньше, чем у однорезонаторного. В результате этого длительность оптического сигнала на выходе модулятора с девятью резонаторами $t_0 = 0,76 t_1$, где t_1 – длительность сигнала на выходе модулятора, содержащего один резонатор. А это означает, что существует возможность поднять частоту световых сигналов на 30 %.

Выражение для определения величины управляющего напряжения резонатора U_t , требуемого для обеспечения заданной эффективности модуляции излучения при работе резонатора в режиме пропускания, при условии, что его начальная рабочая точка соответствует минимальному отражению, имеет вид

$$U_t = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{n_e^3 r_{33}} \frac{d}{l_0} \arccos \left(1 - \frac{(1 - TR_i)^2}{2TR_i} \left\{ \sqrt[N]{\frac{1}{1 - \eta_t \left[(1 - TR_i)^2 / T_i^2 T \right]^N}} - 1 \right\} \right), \quad (5)$$

где r_{33} – электрооптический коэффициент ниобата лития; η – эффективность модулятора.

На рис. 3 показаны графики расчетных зависимостей управляющих напряжений от требуемой эффективности модуляции η при использовании одного (кривые 1, 2) и девяти (кривые 3, 4) резонаторов, работающих на пропускание. Кривые 1, 3 соответствуют режиму модуляции излучения, когда начальная рабочая точка резонаторов соответствует минимальному отражению, а кривые 2, 4 – когда его начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента отражения, т. е. его минимума, на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$, где δn – изменение показателя преломления (δn) в случае поперечного электрооптического эффекта при использовании в качестве электрооптической среды ниобата лития LiNbO_3 , которое можно найти из выражения [6]:

$$\delta n = \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{U}{d}. \quad (6)$$

На рис. 3, б показаны графики расчетной зависимости величины управляющего напряжения модулятора излучения с эффективностью $\eta_t = 0,8$, работающего на пропускание, от количества

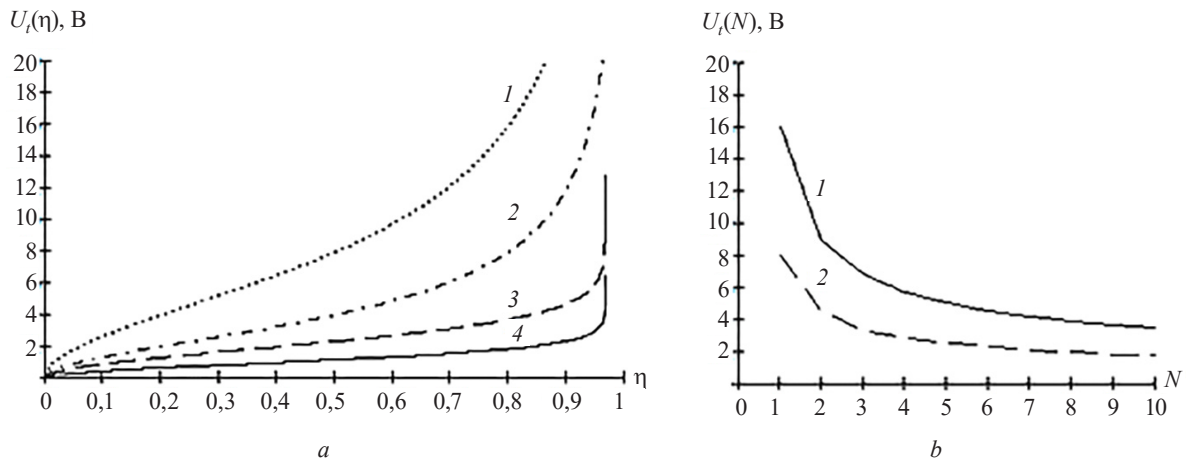


Рис. 3. Зависимости управляющего напряжения модулятора на базе резонаторов Фабри-Перо: *a* – от требуемой эффективности модуляции излучения (1 – 1 резонатор, начальная рабочая точка резонаторов соответствует минимальному отражению; 2 – 1 резонатор, начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента отражения на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$; 3 – 9 резонаторов, начальная рабочая точка резонаторов соответствует минимальному отражению; 4 – 9 резонаторов, начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента отражения на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$); *b* – от количества установленных последовательно резонаторов (1 – начальная рабочая точка резонаторов соответствует минимальному отражению; 2 – начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента отражения на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$)

Fig. 3. Dependences of the modulator control voltage based on Fabry-Perot resonators on the following parameters: *a* – required efficiency of the radiation modulation (1 – 1 resonator, the initial operating point of the resonator corresponds to the minimum reflection; 2 – 1 resonator, the initial operating point is shifted in phase relative to the extremum of the reflection coefficient function by an amount equal to $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$; 3 – 9 resonators, the initial operating point of the resonators corresponds to the minimum reflection; 4 – 9 resonators, the initial working point is phase-shifted relative to the extremum of the reflection coefficient function by an amount equal to $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$); *b* – the number of resonators installed in series (1 – the initial operating point of the resonators corresponds to the minimum reflection; 2 – the initial operating point is shifted in phase relative to the extremum of the reflection coefficient function by an amount equal to $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$)

установленных последовательно электрооптических резонаторов Фабри-Перо. Кривая 1 соответствует режиму модуляции излучения, когда начальная рабочая точка резонаторов соответствует минимальному отражению, а кривая 2 – когда его начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента отражения, т. е. его минимума, на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0)$. Из приведенных зависимостей видно, что использование для амплитудной модуляции излучения последовательности электрооптических резонаторов Фабри-Перо позволяет существенно снизить величину управляющего напряжения, а следовательно, электрическую мощность, подводимую к резонаторам.

В случае, если к рассмотренной последовательности электрооптических резонаторов Фабри-Перо, которые работают на пропускание, присоединить еще одну последовательность, работающую на отражение (рис. 4, *a*), то можно получить световые сигналы с длительностью в 5 раз меньшей, чем сигналы, получаемые при помощи одного электрооптического резонатора. В качестве выходного сигнала такой светомодуляционной системы будет сумма световых волн, отраженных резонаторами 2-й последовательности. Причем в таком модуляторе управляющее электрическое поле, прикладываемое к 2-й последовательности резонаторов, должно опережать поле, прикладываемое к 1-й, на время, равное промежутку гашения светового сигнала на выходе первой последовательности.

На рис. 2 кривыми под номерами 3, 4 представлена зависимость интенсивности света на выходе такого электрооптического модулятора от времени для некогерентного излучения, т. е. для случая суммирования мощностей отраженного резонаторами излучения. В случае, если имеет место когерентное излучение, то амплитуда выходного сигнала для $N = 9$ каждой последовательности может увеличиться, как показывают расчеты, в 6 раз по сравнению с входным излучением.

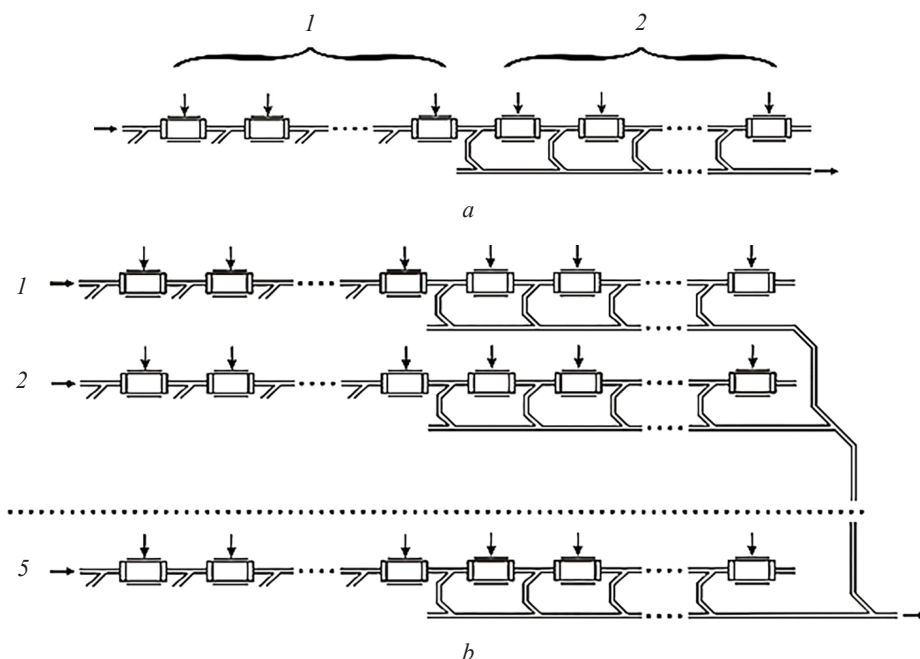


Рис. 4. Резонансный электрооптический амплитудный модулятор : *a* – коротких оптических сигналов;
b – последовательности коротких оптических сигналов

Fig. 4. Resonant electro-optical amplitude modulator of short optical signals (*a*), and sequences of short optical signals (*b*)

Если взять 5 таких модуляторов и объединить их выходы (как это показано на рис. 4, *b*), то на выходе такой светомодуляционной системы будет иметь место последовательность световых сигналов с тактовой частотой, в 5 раз превышающей частоту световых сигналов, которые можно получить при помощи одного резонатора. Причем и на каждый последующий модулятор управляющее напряжение необходимо подавать с дополнительным временным сдвигом, равным $1/5$ длительности светового сигнала, получаемого от одного резонатора.

Заключение. Показана возможность уменьшения в 5 раз длительности получаемых при помощи электрооптических резонаторов световых сигналов, а следовательно, соответствующего увеличения тактовой частоты при сохранении высокой эффективности модуляции излучения. Уменьшение длительности световых сигналов достигается за счет использования в отдельном канале модуляции двух последовательностей электрооптических резонаторов Фабри-Перо, одна из которых работает на пропускание, а другая – на отражение. Увеличение тактовой частоты на выходе модулятора может быть достигнуто суммированием сигналов, идущих от пяти каналов модуляции. Показано, что величина управляющего напряжения для амплитудного электрооптического модулятора на базе последовательности резонаторов Фабри-Перо, выполненных из ниобата лития LiNbO_3 , при рабочей длине волны излучения, равной 1,307 мкм, может составлять величину 4 В в случае, когда его начальная рабочая точка соответствует максимальному пропусканию, и 2 В в случае, если начальная рабочая точка сдвинута по фазе относительно экстремума функции коэффициента пропускания на величину, равную $(2\pi/\lambda) \cdot (\delta n l_0/2)$.

Список использованных источников

1. Мустель, Е. П. Методы модуляции и сканирования света / Е. П. Мустель, В. Н. Парыгин. – М.: Наука, 1970. – 296 с.
2. Амплитудная модуляция света за счет управления многолучевой интерференцией в интерферометре Фабри-Перо / В. А. Пилипович [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: материалы междунар. конф. – Воронеж, 2000. – Т. 1. – С. 2094–2100.
3. Амплитудная модуляция света путем электрооптического управления многолучевой интерференцией в интерферометре Фабри-Перо / В. А. Пилипович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 4. – С. 41–46.

4. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. С. Н. Бреус, А. И. Головашкин, А. А. Шубин, [под ред. Г. П. Мотулевич]. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
5. Прикладная физическая оптика / В. А. Москалев [и др.]; под ред. В. А. Москалева. – СПб.: Политехника, 1995. – 527 с.
6. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; пер. с англ. С. Г. Кривошлыкова, Н. И. Петрова; [под ред. И. Н. Сисакяна]. – М.: Мир, 1987. – 616 с.

References

1. Mustel E. P., Parygin V. N. *The Methods of Light Modulation and Scanning*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 296 p. (in Russian).
2. Pilipovich V. A., Konoiko A. I., Demchenko A. I., Yarmolitskii V. F. Amplitude modulation of light due to control of multipath interference in a Fabry-Perot interferometer. *Materialy mezhdunarodnoj konferencii "Radiolokaciya, navigaciya, svyaz"* [Materials of the International conference "Radar, Navigation, Communication"], 2000, vol. 1, pp 2094–2100 (in Russian).
3. Pilipovich V. A., Zaleskii V. B., Konoiko A. I., Kravchenko V. M. light amplitude modulation by electrooptical control of multibeam interference in the Fabry-Perot interferometer. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2015, vol. 59, no. 4, pp. 41–46 (in Russian).
4. Born M., Vol'f E. *Principles of Optics*. Elsevier, 1980. 863 p.
5. Moskalev V. A., Nagibina I. M., Polushkina N. A., Rudin V. L. *Applied Physical Optics*. SPb., Politekhnik Publ., 1995. 527 p. (in Russian).
6. Yariv A., Yuh P. *Optical Waves in Crystals*. John Wiley & Sons, 1984. 616 p.

Информация об авторах

Залесский Валерий Борисович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией фотополупроводников, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaleski@oelt.basnet.by

Коновко Алексей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kon54@yandex.by

Кравченко Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь).

Кузьмицкая Анна Сергеевна – младший научный сотрудник, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7074-0034>

Information about the authors

Valery B. Zaleski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Photoelectronic, SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology" (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaleski@oelt.basnet.by

Alexey I. Konoyko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher, SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology" (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kon54@yandex.by

Vladimir M. Kravchenko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology" (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus)

Hanna S. Kuzmitskaya – Junior Researcher, SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology" (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7074-0034>