

# АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

А.И. Конойко<sup>1</sup>, И.А. Гончаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова, проспект Независимости, 68, 220072  
Минск, Беларусь, kanojka@inel.bas-net.by

<sup>2</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Машиностроителей,  
25, 220118 Минск, Беларусь

Быстродействие существующих электрооптических амплитудных модуляторов света поляризационного [1], интерференционного [2,3] и абсорбционного [4] типов определяется частотными свойствами канала подачи управляющего сигнала, которые ограничены емкостными характеристиками электрической схемы модулятора и рассогласованием между электрической (СВЧ) и световой волнами. В настоящее время при помощи электроабсорбционных модуляторов с электродами типа бегущей волны достигнуты частоты модуляции более 40 ГГц [5], кроме того показано, что при оптимизации их параметров частота модуляции может достигать порядка 100 ГГц.

В работе излагается метод, обеспечивающий непрерывный процесс амплитудной модуляции излучения, получаемой в одном из двух выходных каналов кольцевого волоконно-оптического резонатора в результате управляемого перераспределения искусственных световых потерь, выводимых этими выходными каналами, при постоянном необходимом уровне энергии в кольцевом резонаторе, что позволяет значительно уменьшить величину управляющего электрического напряжения [6]. Возможность реализации данного метода обеспечивается сохранностью свойств временной когерентности одномодовым волноводом [7].

Оптическая схема амплитудного волоконно-оптического модулятора на базе многолучевой интерференции представлена на рис. 1. Цифрами на рисунке показаны: 1 – первый Y-образный разветвитель, 2 – кольцевой резонатор, 3 – второй Y-образный разветвитель, 4 – первая волоконно-оптическая брэгговская решетка, 5 – третий Y-образный разветвитель, 6 – вторая волоконно-оптическая брэгговская решетка, 7 – волоконно-оптический фазовый электрооптический элемент, 8 – фотоприемник цепи обратной связи, 9 – средство для коррекции длины оптического пути резонатора. Первый, второй и третий Y-образные разветвители представляют собой два отрезка оптического волокна,

имеющие оптический контакт – т.е. оптически связанные друг с другом через спадающие поля.

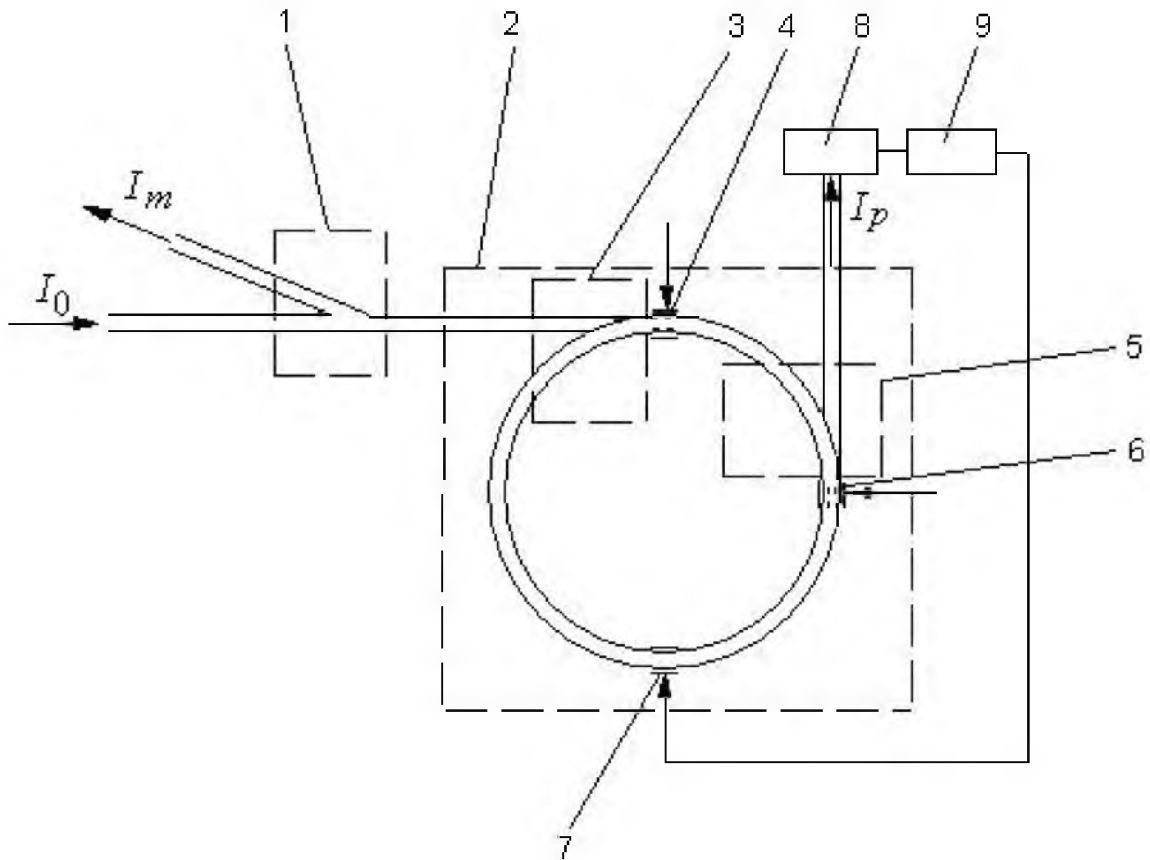


Рис. 1. Оптическая схема амплитудного волоконно-оптического модулятора на базе многолучевой интерференции

Управляемые волоконно-оптические брэгговские решетки представляют собой отрезки электрооптического волокна, в сердцевине которых записаны брэгговские решетки для различных длин волн, а снаружи нанесены управляющие электроды [8, 9]. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первой и второй волоконно-оптических брэгговских решеток (рис. 2) 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. Волоконно-оптический фазовый электрооптический элемент может быть выполнен в виде отрезка электрооптического волокна с наружными управляющими электродами.

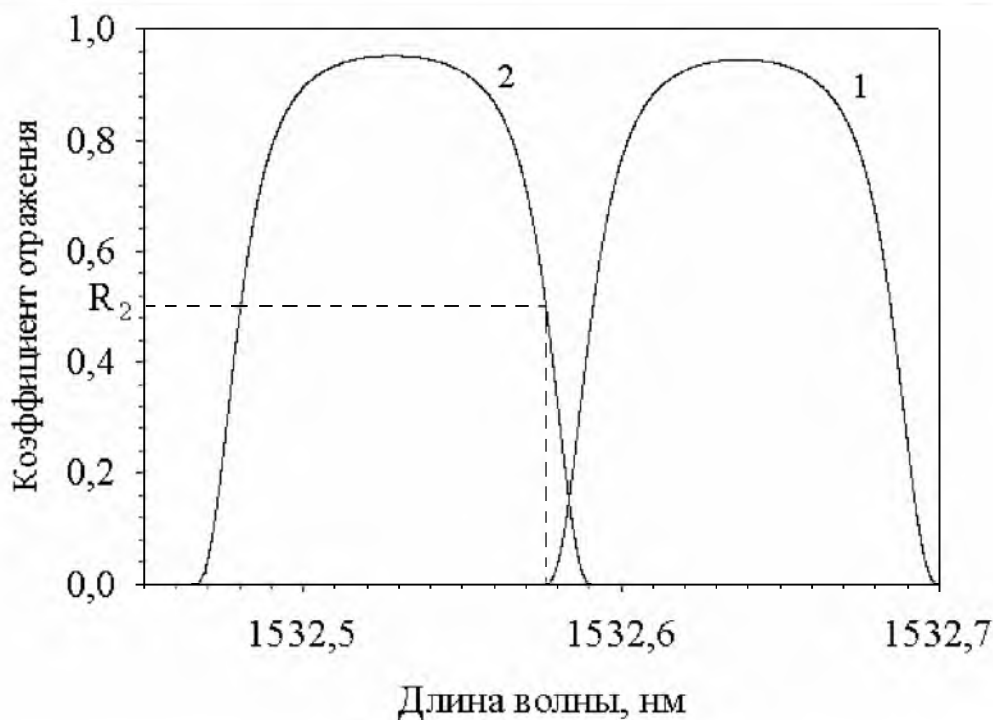


Рис. 2. Спектральные характеристики коэффициентов отражения первой и второй волоконно-оптических брэгговских решеток

Рассмотрим основные закономерности функционирования такого амплитудного модулятора. Пусть на вход первого Y-образного разветвителя поступает постоянное световое излучение с интенсивностью  $I_0$ . С выхода первого Y-образного разветвителя излучение последовательно проходит через второй Y-образный разветвитель, через первую волоконно-оптическую брэгговскую решетку, так как в исходном состоянии величина функции пропускания первой волоконно-оптической брэгговской решетки максимальна  $R_1 = 0$ . Далее оно проходит третий Y-образный разветвитель, вторую волоконно-оптическую брэгговскую решетку с коэффициентом светопропускания равным  $T_2 = 1 - R_2$ , волоконно-оптический фазовый электрооптический элемент на второй цикл прохождения по кольцевому резонатору и т.д. При этом на выходе второго Y-образного разветвителя в результате многолучевой интерференции мы будем иметь световое поле с амплитудой электрического вектора световой волны  $E_k$  равной:

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

где  $E_0$  – амплитуда поля поступающей световой волны;  $T_k$  – энергетический коэффициент светопропускания волоконного кольца;  $T_p$  – энергетический коэффициент суммарного светопропускания

волоконно-оптических брэгговских решеток;  $\delta$  – разность фаз между интерферирующими в кольце световыми волнами.

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

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

Выражение для определения интенсивности света на выходе третьего Y-образного разветвителя  $I_p$  будет иметь следующий вид:

$$I_p = \frac{I_0 R_2}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}. \quad (3)$$

В случае если первая волоконно-оптическая брэгговская решетка полностью пропускает световое излучение, то  $T_p = T_2$ . Тогда выражения (2) (3) примут вид:

$$I_k = \frac{I_0}{1 + T_k T_2 - 2\sqrt{T_k T_2} \cos \delta}, \quad (2a)$$

$$I_p = \frac{I_0 R_2}{1 + T_k T_2 - 2\sqrt{T_k T_2} \cos \delta} = \frac{I_0 (1 - T_2)}{1 + T_k T_2 - 2\sqrt{T_k T_2} \cos \delta}, \quad (3a)$$

где  $R_2 = 1 - T_2$  – коэффициент отражения второй волоконно-оптической брэгговской решетки 6.

С выхода третьего Y-образного разветвителя световой поток падает на фотоприемник цепи обратной связи, на выходе которого появляется сигнал, пропорциональный интенсивности света в волоконном кольце. Этот сигнал поступает на вход устройства коррекции длины оптического пути резонатора. Это устройство вырабатывает управляющий электрический сигнал, который подается на волоконно-оптический фазовый электрооптический элемент, корректирующий длину оптического пути кольцевого резонатора. Оптическая длина пути должна быть кратна длине волны поступающего излучения  $\lambda$ , что обеспечивает необходимый стабильный уровень световой энергии в кольцевом резонаторе.

При подаче на управляющие электроды первой и второй волоконно-оптических брэгговских решеток управляющих синусоидальных электрических сигналов свет поступает через первый и второй Y-образные разветвители к первой волоконно-оптической брэгговской решетке. Управляющее напряжение, подаваемое на ее управляющие электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала, в котором сформирована брэгговская решетка, по закону:

$$n = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} \frac{U}{d}, \quad (4)$$

где  $n_o$  – показатель преломления обыкновенной волны в электрооптическом материале,  $U$  – приложенное напряжение,  $d$  – расстояние между управляющими электродами волоконно-оптической брэгговской решетки (ширина волновода),  $r_{33}$  – электрооптический коэффициент. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а следовательно – к соответствующему изменению длины световой волны  $\lambda_B$  (брэгговской длины волны), при которой отражение от первой волоконно-оптической брэгговской решетки максимально. Поэтому величина интенсивности света на выходе первой волоконно-оптической брэгговской решетки будет падать в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения. Отраженный от первой волоконно-оптической брэгговской решетки световой поток поступает в обратном направлении через второй Y-образный разветвитель к первому Y-образному разветвителю, через который направляется на выход в качестве модулируемого сигнала  $I_m$ . Величину этого сигнала можно определить из следующего выражения:

$$I = \frac{I_o R_1}{1 + T_k T_p - 2\sqrt{T_k T_p} \cos \delta}, \quad (5)$$

где  $R_1$  – коэффициент отражения первой волоконно-оптической брэгговской решетки 4.

Свет, прошедший через первую волоконно-оптическую брэгговскую решетку, поступает через третий Y-образный разветвитель на вторую волоконно-оптическую брэгговскую решетку. Управляющее напряжение, подаваемое на ее управляющие электроды, изменяет показатель преломления электрооптического материала, в котором сформирована брэгговская решетка, по такому же закону (4) как и в первой волоконно-оптической брэгговской решетке. Изменение показателя преломления приводит к смещению спектральной характеристики коэффициента отражения, а, следовательно, к соответствующему изменению длины световой волны  $\lambda_B$  (брэгговской длины волны), при которой отражение от второй волоконно-оптической брэгговской решетки максимально. Поэтому величина интенсивности света на выходе второй волоконно-оптической брэгговской решетки будет увеличиваться в зависимости от величины прикладываемого управляющего напряжения, что обеспечивает необходимый стабильный уровень световой энергии в кольцевом резонаторе.

Расчеты показывают, что при световых потерях в волокне кольцевого резонатора порядка 1%, для излучения с резонансной длиной волны  $\lambda_p$  существует максимум интенсивности света на выходе модулятора при коэффициенте отражения брэгговской дифракционной решетки равном порядка 1%. По мере увеличения потерь в кольцевом резонаторе максимум интенсивности излучения смещается в сторону меньших значений коэффициента пропускания первой волоконно-оптической брэгговской решетки.

Рассмотренный амплитудный модулятор может обладать управляющим напряжением на два порядка меньшим чем существующие амплитудные модуляторы любых типов, то есть порядка 20 мВ. Следовательно, для такого модулятора требуемая управляемая электрическая мощность составляет величину  $10^{-4}$  меньшую, чем у существующих на данный момент времени. Все это открывает путь к управляемой амплитудной модуляции излучения с рабочими частотами терагерцового диапазона.

1. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света.. М.: Наука, 1970. 295 с.
2. Shimotsu S., Oikawa S., Saitou T., Mitsugi N. Single side-band modulation performance of a LiNbO<sub>3</sub> integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides // IEEE Photonics Technology Letters. - 2001. - Vol.13, No.4. - P.364-366.
3. Krähenbühl R., Howerton M.M. Investigations on short-path-length high-speed optical modulators in LiNbO<sub>3</sub> with resonant-type electrodes // J. Lightwave Technology. - 2001. - Vol.19, No.9. - P.1287-1297.
4. Chiu Yi-Jen, Kaman V., Zhang S.Z., Bowers J.E. Distributed effects model for cascaded traveling-wave electroabsorption modulator // IEEE Photonics Technology Letters. - 2001. - Vol.13, No.8. - P.791-793.
5. Takeuchi T., Saitoh T., Ito H. High-speed electroabsorption modulators with traveling-wave electrodes // Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference (OFC-2002). March 17-22, 2002. - Anaheim, California. - P.336-338.
6. Пат. 8174 РБ, МПК<sup>7</sup>: G01F 1/03. Электрооптический амплитудный модулятор / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, В.К. Кулешов, В.Ф. Ярмолицкий
7. Булушев А.Г. и др. Волоконная оптика // Труды ИОФАН, - М.: Наука, Т.23. 1990, с.159.
8. Srinivasan B., Jain R.K. First Demonstration of thermally poled electrooptically tunable fiber Bragg gratings // IEEE Photonics Technology Letters, -2000. -Vol.12, No. 2. - P.170-172.
9. Pilipovich V.A., Esman A.K., Goncharenko I.A., Kuleshov V.K. High-speed continuous tuneable fibre and waveguide lasers with controllable Bragg grating // Optics Communications. - 2002. - Vol.203, Nos.3-6. - P.289-294.