

УДК 681.7.068

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯТОРА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

С.А. Миронов

Рассмотрена схема 3-портового оптического циркулятора микрооптического типа. Проведен расчет вносимых потерь в каналах, величины изоляции, возвратных потерь и уровня перекрестной помехи поляризационно-независимого циркулятора, предназначенного для работы в аппаратуре волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: ВОЛС, двунаправленная передача, невзаимные устройства, оптические циркуляторы, вносимые потери, изоляция, перекрестная помеха, возвратные потери.

Введение

Интенсивное развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и телекоммуникационных сетей базируется на разработке новых оптических приборов, обеспечивающих расширение функциональных возможностей аппаратуры. В последнее время совершенствование техники оптической связи связано с внедрением нового класса оптических устройств, обладающих невзаимными свойствами, в частности, оптических циркуляторов (ОЦ) [1, 2]. Невзаимность свойств ОЦ обусловлена эффектом невзаимного поворота плоскости поляризации излучения (магнитооптический эффект Фарадея) в магнитоупорядоченных кристаллах, например, в кристаллах ферритов-гранатов.

ОЦ представляет собой пассивное 3- или 4-портовое устройство, которое благодаря своим невзаимным свойствам может распределять поступающее оптическое излучение в различные порты в зависимости от направления распространения излучения. При этом входной порт изолируется от обратно распространяющегося сигнала, который направляется в другой выходной порт. Использование ОЦ, который объединяет в себе функцию как оптического разветвителя, так и изолятора, существенно снижает потери и улучшает эффективность ВОЛС. В настоящее время ОЦ находят применение как замена традиционных разветвителей в одноволоконных дуплексных ВОЛС, в оптических усилителях для повышения эффективности накачки в активном волокне, в оптических рефлектометрах и оптических локаторах для увеличения дальности действия приборов, а также в волоконно-оптических измерительных и диагностических системах (датчиках), работающих в режиме «на отражение» [3, 4].

В оптическом приборостроении для целей ВОЛС существуют два основных технологических направления разработки ОЦ: на основе микрооптических элементов и на основе элементов интегральной оптики. Однако в настоящий момент только ОЦ микрооптического типа, где используются миниатюрные дискретные элементы стандартной объемной оптики (линзы, призмы, кристаллические элементы и т.д.), в которых отсутствует эффект волноводного распространения света, доведены до параметров, необходимых для применения в аппаратуре ВОЛС. ОЦ интегральнооптического типа на основе полосковых оптических волноводов еще не вышли из стадии лабораторных исследований.

В настоящее время предложено несколько схем ОЦ, изготовленных по микрооптической технологии (см., например, [5, 6]), где магнитооптический элемент – фарадеевский ротатор – используется для невзаимного поворота поляризации, а различные поляризационные призмы – для изменения хода лучей внутри прибора. Однако следует отметить, что такая стандартная схема ОЦ является поляризационно-зависимой, т.е. потери устройства зависят от поляризации входного излучения, и работа прибора возможна только с линейно поляризованным светом. При включении такого ОЦ непосред-

ственно в волоконный тракт, где состояние поляризации излучения может изменяться из-за внешних воздействий на волокно, потери устройства также будут изменяться, что приводит к флуктуациям передаваемого сигнала и появлению ошибок.

Для исключения таких искажений необходимо, чтобы характеристики передачи ОЦ не зависели от поляризации излучения, поступающего на его порты. Некоторые схемы поляризационно-независимых ОЦ описаны в сообщениях [7, 8], однако расчет их характеристик не приводится. В настоящей работе рассмотрена одна из простых схем поляризационно-независимого ОЦ, основанного на принципе смещения пучков в двулучепреломляющих элементах, который применяется в современных ВОЛС [9]. Представлена методика расчета основных технических характеристик, выполнены численные оценки достижимых параметров ОЦ.

Структура и принцип работы ОЦ

Структура рассматриваемого 3-портового ОЦ (Y-типа) и ход лучей с различной поляризацией показаны на рис. 1, а, б. Буквами А–G обозначены поперечные сечения в рассматриваемых позициях между элементами; 1–3 – волоконные коллиматоры; 4 – поворотная призма со щелью; 5–9 – двулучепреломляющие элементы; 6 – 45°-ый фарадеевский ротатор.

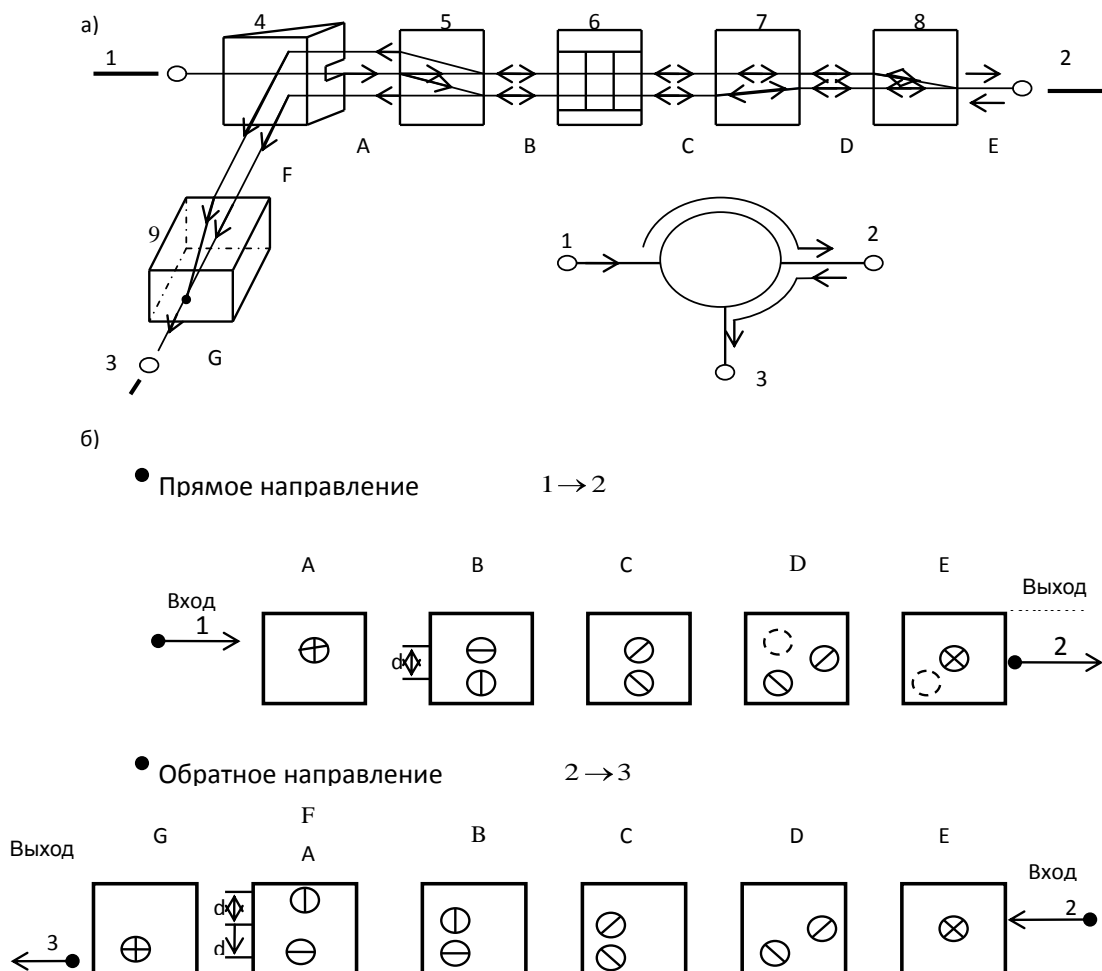


Рис. 1. Структура 3-портового поляризационно-независимого ОЦ на смещении пучков (а) и положение поляризационных компонент в различных сечениях на выходе из элементов ОЦ (б) для прямого и обратного направлений распространения

Принцип работы ОЦ заключается в следующем. Прямой канал 1–2 фактически является одноступенчатым изолятором, работающим в прямом направлении. Поступающее в ОЦ через порт 1 оптическое излучение с произвольной поляризацией коллимируется линзой 1 и попадает через щель в призме 4 на первый двулучепреломляющий элемент (ДЛПЭ) 5 из анизотропного одноосного кристалла, например, рутила (позиция А). При прохождении через этот ДЛПЭ входной пучок разделяется на два луча с ортогональной поляризацией – обыкновенный (*o*-луч) и необыкновенный (*e*-луч), при этом *e*-луч отклоняется от первоначального направления и на выходе ДЛПЭ оказывается смещенным относительно *o*-луча на расстояние d , которое зависит от длины ДЛПЭ (позиция В). Далее эти лучи проходят через фарадеевский ротатор (ФР) поляризации 6, выполненный из кристалла с высокой магнитооптической добротностью, например, из кристалла иттрий-железного граната (ИЖГ). Здесь плоскости поляризации обоих лучей поворачиваются на 45° (позиция С). Затем лучи проходят через второй 7 и третий 8 ДЛПЭ, где также происходит отклонение лучей (позиции D, E). Поскольку длина и ориентация второго и третьего ДЛПЭ относительно первого выбраны соответствующим образом ($l_2 = l_3 = l_1/\sqrt{2}$), то два ортогонально поляризованных луча объединяются в один луч (позиция С), который выходит из ОЦ через порт 2. Таким образом, оптический сигнал с произвольной поляризацией передается из порта 1 в порт 2 с малыми потерями, а порт 3 оказывается полностью изолированным от порта 1.

При работе в обратном направлении, когда входной сигнал поступает в ОЦ через порт 2, он проходит те же функциональные элементы, но в обратном направлении. Однако в результате невзаимного поворота плоскости поляризации в ФР 6 два луча, распространяющиеся в обратном направлении, будут поляризованы ортогонально по сравнению с прямым направлением (позиция В). Поэтому после прохождения через первый ДЛПЭ 5 эти лучи не сходятся в один луч, а расходятся на удвоенное расстояние $2d$ (позиция А) и не попадают в порт 1 через щель в призме 4. Следовательно, в этом случае имеет место изоляция порта 1 от порта 2, как в обычном оптическом изоляторе. Пучки, симметрично смещенные относительно щели, отклоняются призмой 4 под углом 90° и направляются в отраженный канал – порт 3 (позиция F), где установлен ДЛПЭ 9. Длина элемента $l_4 = 2l_1$ и его ориентация выбраны так, чтобы поступающие *o*-и *e*-лучи объединились в один луч, который выходит из ОЦ через порт 3 (позиция G). Таким образом, при использовании двух соседних портов ОЦ функционирует как поляризационно-независимый оптический изолятор, а при использовании всех трех портов может осуществляться двунаправленная передача с разделением прямого и обратного сигналов. Оптическое излучение, которое поступает через порт 1, выходит через порт 2, однако излучение, поступающее через порт 2, направляется в порт 3, а не в порт 2.

Расчет оптической системы и выбор элементов

Для эффективной работы ОЦ необходимо, чтобы передача оптического излучения между портами осуществлялась посредством коллимированных пучков. Формирование таких пучков осуществляется оптической системой (рис. 1), состоящей из коллиматоров на основе сферических микролинз и состыкованных с ними оптических волокон. Для уменьшения потерь передачи между портами необходимо, чтобы оптическая система обеспечила продольное согласование пучков, т.е. чтобы сформированные линзами гауссовы пучки имели одинаковые размеры и положения перетяжек для прямого и обратного направления распространения. При этом положение перетяжек на оси распространения пучков должно быть смещено относительно фокусов линз на расстояние, обеспечивающее размещение элементов ОЦ (ДЛПЭ и ФР) в пространстве между линзами (квази-конфокальная система).

Смещение области перетяжки осуществляется за счет перемещения торца волокна на расчетное расстояние относительно фокуса линзы. Если ввести следующие обозначения: $\sum l_3$ – сумма длин всех элементов, $\sum l_3$ – сумма воздушных зазоров между элементами, $\sum \delta_3 = \sum (n_3 - 1) / n_3$ – суммарное удлинение хода лучей при прохождении через элементы (n_3 – показатель преломления), S_F – фокальный отрезок линзы, то длина рабочей области для размещения элементов может быть записана как $L = \sum l_3 + \sum l_3 - \sum \delta_3 - 2S_F$. В соответствии с законом преобразования гауссова пучка линзой положение сформированной перетяжки z'_0 может быть рассчитано по формуле [10]:

$$z'_0 = \frac{L}{2} = \frac{f^2 z_0}{z_k^2 + z_0^2}, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние линзы, $z_k = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ – конфокальный параметр, ω_0 – радиус пучка в перетяжке, z_0 – положение перетяжки исходного пучка до линзы. Из (1) можно определить искомую величину расфокусировки оптической системы, т.е. смещение торца волокна относительно фокуса линзы на входе коллиматора:

$$z_0 = \frac{f^2 \pm \sqrt{f^4 - 4z_0'^2}}{2z_0'}, \quad (2)$$

при этом на практике используется обычно меньшее значение z_0 . Расчеты по (2) показывают, в частности, что необходимое для установки элементов в канале передачи 1–2 положение перетяжки $z'_0 = 5,3$ мм достигается при величине расфокусировки $z_0 = 14$ мм, когда используются коллиматоры на основе сферических микролинз диаметром 1,5 мм из стекла К8 ($f = 1125$ мкм) и стандартного одномодового волокна типа SMF-28 ($z_k = 56$ мкм).

Как отмечалось ранее, в поляризационно-независимых ОЦ для разведения и сведения пучков с различной поляризацией используются ДЛПЭ на основе одноосных оптических кристаллов, обладающих большим двулучепреломлением. В таких ДЛПЭ длиной l , когда направление распространения излучения составляет примерно 45° к оптической оси кристалла, o - и e -лучи получают пространственное разведение на величину $d \approx 0,1l$, необходимую для изоляции портов. В рассматриваемой структуре ОЦ (рис. 1) используются ДЛПЭ из кристаллов рутила (TiO_2 , $n_o = 2,47$, $n_e = 2,71$, $\Delta n = 0,24$) различной длины ($l = 3,5$ мм, 5 мм и 10 мм). Возможно также применение для этой цели традиционного кристалла кальцита (CaCO_3 , $n_o = 1,64$, $n_e = 1,48$, $\Delta n = 0,16$) или нового материала – кристалла ванадата иттрия (YVO_4 , $n_o = 1,94$, $n_e = 2,14$, $\Delta n = 0,20$) с оптическими характеристиками, аналогичными рутилу, но более технологичного при обработке.

Для ФР, предназначенных для работы в диапазонах длин волн 1,3 мкм и 1,55 мкм, используется, как правило, кристалл иттрий-железного граната ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$). При этом длина ФР, необходимая для 45° -го вращения на этих длинах волн, составляет около 2,2 мм и 2,6 мм соответственно. Перспективным материалом для ФР являются монокристаллические пленки ферритов-гранатов, содержащих ионы Bi, например, $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ или $(\text{BiCaV})_3(\text{InFe})_5\text{O}_{12}$. Большая величина константы фарадеевского вращения позволяет уменьшить необходимую длину ФР до 0,3–0,5 мм, кроме того, снижаются требования к величине магнитного поля. Однако необходима дальнейшая отработка технологии эпитаксиального выращивания таких толстых монокристаллических пленок с целью снижения оптического поглощения и рассеяния на дефектах.

Расчет характеристик ОЦ

Вносимые потери. Вносимые потери в прямом канале 1–2 рассчитываются по формуле

$$A_{12} = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

где P_2 – мощность, измеренная на выходе порта 2, P_1 – мощность, поступающая на входной порт 1. Величина A_{12} определяется суммарным значением потерь различных элементов в структуре ОЦ:

$$A_{12} = A_{\text{ос}} + A_{\text{ДЛПЭ}} + A_{\text{ФР}} + A_{\text{тех}}. \quad (4)$$

Здесь $A_{\text{ос}}$ – потери в оптической системе, которые обусловлены аберрациями линз коллиматоров, френелевскими отражениями на торцах ОБ и поверхностях линз, а также погрешностью юстировки коллиматоров:

$$A_{\text{ос}} = A_{\text{аб}} + A_{\text{отр}} + A_{\text{юст}}. \quad (5)$$

Согласно проведенным оценкам, для используемых на практике коллиматоров на основе сферических микролинз диаметром 1,5 мм из стекла К8 и одномодовых оптических волокон $A_{\text{аб}} \approx 0,15\text{--}0,2$ дБ, $A_{\text{отр}} \approx 0,1\text{--}0,15$ дБ, $A_{\text{юст}} = 0,1\text{--}0,15$ дБ, что дает окончательную величину потерь $A_{\text{ос}} \approx 0,4\text{--}0,5$ дБ. Потери в двулучепреломляющих элементах $A_{\text{ДЛПЭ}}$ возникают в результате поглощения и рассеяния излучения внутри элемента $A_{\text{пр}}$ и френелевских отражений от его рабочих поверхностей $A_{\text{отр}}$:

$$A_{\text{ДЛПЭ}} = A_{\text{отр}} + A_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Для ДЛПЭ, изготовленных из высококачественных кристаллов рутила, $A_{\text{пр}} \approx 0$, поэтому $A_{\text{ДЛПЭ}} \approx A_{\text{отр}} = 0,05\text{--}0,08$ дБ. Таким образом, суммарные потери для трех ДЛПЭ, находящихся в прямом канале 1–2, составляют $A_{\text{ДЛПЭ}} \approx A_{\text{отр}} = 0,15\text{--}0,25$ дБ.

Потери в фарадеевском ротаторе рассчитываются аналогичным образом:

$$A_{\text{ФР}} = A_{\text{отр}} + A_{\text{пр}} + A(\Delta\varphi_F). \quad (7)$$

Здесь $A(\Delta\varphi_F)$ – дополнительные потери, вызванные отличием угла фарадеевского вращения от 45° , которые рассчитываются по формуле [11]

$$A(\Delta\varphi_F) = -10 \lg[\cos^2(\Delta\varphi_F)] \text{ [дБ]}. \quad (8)$$

Но следует отметить, что даже при значительном отклонении $\Delta\varphi_F = 1^\circ$, что легко регистрируется, величина $A(\Delta\varphi_F) < 0,005$ дБ, т.е. может не учитываться. Для ротаторов на основе кристалла ИЖГ имеем $A_{\text{ФР}} \approx 0,1\text{--}0,2$ дБ. Оптические потери $A_{\text{тех}}$, связанные с технологическими допусками на изготовление и установку элементов при производстве ОЦ, могут находиться на уровне $A_{\text{тех}} \approx 0,1\text{--}0,2$ дБ. Таким образом, расчетное значение вносимых потерь в прямом канале ОЦ (1–2) может составлять $A_{12} = 0,8\text{--}1,1$ дБ в зависимости от уровня развития технологической базы.

Потери в отражательном канале (2–3) практически лежат в том же интервале, поскольку поворотная призма 4 и дополнительный ДЛПЭ 9 обладают малыми потерями ($\leq 0,1$ дБ): $A_{23} = 0,9\text{--}1,2$ дБ.

Следует подчеркнуть, что для рассматриваемой схемы идеального ОЦ, когда имеет место полное сведение поляризационных пучков на выходе (см. рис. 1, б), вносимые потери в каналах A_{12} и A_{23} не зависят от поляризации распространяющегося излучения, т.е. такой ОЦ является поляризационно-независимым устройством. Однако реальный ОЦ обладает некоторой поляризационной чувствительностью (0,1–0,2 дБ), что обусловлено различием коэффициентов передачи o - и e - лучей (дихроизмом) при прохождении через элементы ОЦ и погрешностями изготовления и сборки.

Изоляция. Величина изоляции I порта 1 от порта 2 характеризует потери передачи оптической мощности при обратном направлении распространения излучения, т.е. из порта 2 в порт 1, и определяется следующей формулой:

$$I = A_{21} = -10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ [дБ]}, \quad (9)$$

где P_1 – оптическая мощность, измеренная на входном порте 1, когда мощность P_2 поступает на выходной порт 2. Как следует из принципа работы ОЦ (рис. 1), когда поперечное смещение пучков превосходит ширину щели в поворотной призме, отсутствует непосредственное прохождение излучения из порта 2 в порт 1, т.е. теоретически реализуется идеальная изоляция. Но на практике величина изоляции A_{21} определяется несколькими побочными причинами, вызывающими появление паразитных поляризационных компонент, которые распространяются без смещения по оси ОЦ и попадают во входной порт 1. Помимо отклонения угла фарадеевского вращения от 45° , наиболее существенное уменьшение изоляции происходит из-за вторичных переотражений в ФР, которые возникают вследствие несовершенства просветляющих покрытий на его рабочих поверхностях. Уровень изоляции при этом можно оценить как [12]

$$A_{21}^{\text{вт}} = 2A_{\text{отр}} - 10 \lg \exp \left[- \left(2t \frac{\sin \gamma}{n\omega'} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (10)$$

где $A_{\text{отр}}$ – потери отражения просветляющих покрытий, t – длина ФР, обеспечивающая угол вращения $\varphi_F = 45^\circ$, n – показатель преломления материала ФР, ω' – радиус распространяющегося пучка. Оценка согласно (10) показывает, что для типичных параметров ФР – $2A_{\text{отр}} = 40\text{--}50$ дБ (коэффициент отражения покрытий $R \approx 0,3\text{--}1\%$), $t = 2,6$ мм, $n = 2,2$ (кристалл ИЖГ, длина волны $1,55$ мкм), $\omega' = 105$ мкм, угол наклона $\gamma = 1^\circ$ – происходит ограничение изоляции на уровне $A_{21} \approx 40\text{--}50$ дБ. Другая причина снижения изоляции – рассеянное излучение в ДЛПЭ и ФР, возникающее вследствие наличия различных дефектов и неоднородностей в кристаллах. Экспериментально установлено, что обычный уровень такого рассеянного неполяризованного излучения в стандартных кристаллах рутила и ИЖГ составляет $A_{\text{тех}} = 40\text{--}45$ дБ. Поэтому величина изоляции реального ОЦ определяется наименьшим значением потерь, обусловленным одной из перечисленных выше причин, и составляет для рассматриваемого ОЦ $A_{21} = 40\text{--}45$ дБ.

Перекрестная помеха. Уровень перекрестной помехи на ближнем конце ОЦ может быть определен по формуле

$$A_{13} = 10 \lg \frac{P_3}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (11)$$

где P_3 – мощность, измеренная на выходном порте 3, когда мощность P_1 поступает на входной порт 1. Как видно из рис. 1, в рассматриваемой структуре ОЦ отсутствует непосредственная связь между портами 1 и 3. Поэтому величина перекрестной помехи определяется только френелевскими отражениями от торцов первого ДЛПЭ и ФР, а также рассеянием на дефектах в этих элементах:

$$A_{13} = A_{\text{отр}} (\text{ДЛПЭ, ФР}) + A_{\text{рас}} (\text{ДЛПЭ, ФР}). \quad (12)$$

При использовании в структуре ОЦ ДЛПЭ и ФР из высококачественных кристаллов рутила и ИЖГ, а также просветляющих покрытий с коэффициентом отражения $R \approx 1\%$ на наклоненных на $\approx 1^\circ$ рабочих поверхностях элементов величина перекрестной помехи у современных ОЦ может быть снижена до уровня $A_{13} = -50\text{--}60$ дБ.

Обратные отражения. Обратные отражения (так называемые возвратные потери), т.е. потери, возникающие в результате обратных отражений от входных портов ОЦ, могут быть рассчитаны по формуле

$$A_{ii} = -10 \lg \frac{P'_i}{P_i} \quad (i = 1, 2, 3) \text{ [дБ]}, \quad (13)$$

где P_i – мощность, вводимая в порт i , P'_i – мощность, возвращенная из того же порта. Источниками отражений являются свободный торец ОВ, поверхности линзы коллиматора, а также поверхности ДЛПЭ и ФР. Величины A_{ii} определяются коэффициентом отражения от торцов оптических волокон и рабочих поверхностей элементов. Для снижения уровня отражений рабочие поверхности элементов должны иметь просветляющие покрытия и быть наклонены к оси распространения излучения. Расчет возвратных потерь от различных компонентов ОЦ может быть проведен по методике, предложенной ранее для микрооптического изолятора [13]. Результаты экспериментальных проверок показывают, что наклон торцов волокон на $\approx 7^\circ$ и граней элементов на $\approx 1^\circ$ при использовании просветляющих покрытий с $R = 0,5\text{--}1\%$ приводит к возрастанию возвратных потерь, т.е. уменьшению величины обратно отраженных сигналов до уровня $A_{ii} = 55\text{--}60$ дБ.

Заключение

Рассмотрена схема 3-портового (Y-типа) поляризационно-независимого ОЦ, предназначенного для работы в ВОЛС в диапазонах длин волн 1,3 и 1,55 мкм с одномодовым волоконным трактом. Представлена методика расчета основных технических характеристик. Проведенные теоретические оценки показывают, что при современном уровне технологии элементов практически достижимые параметры ОЦ составляют: вносимые потери в каналах менее 1,2 дБ, изоляция более 40 дБ, уровень перекрестной помехи на ближнем конце менее –50 дБ, обратные отражения от входных портов более 55 дБ. Указанные значения рабочих параметров обеспечивают возможность широкого применения микрооптических ОЦ в аппаратуре ВОЛС различного типа и волоконно-оптических датчиках. Представленная методика может быть использована также для расчета характеристик ОЦ других типов, в том числе 4-портовых ОЦ (X типа) [8, 14, 15].

Литература

1. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
2. Mizumoto T., Isolator and Circulator // *Encyclopedic Handbook of Integrated Optics* / ed. Iga K., Kokubun Y., CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2006. – P. 104–120.
3. Заркевич Е.А., Устинов С.А., Скляр О.К. Новые фотонные технологии для развития широкополосных коммуникационных сетей // *Электросвязь*. – 2002. – № 7. – С. 25–28.
4. Mizumoto T., Polarization-Independent Optical Circulator // *Optical Devices and Fibers* / ed. Suematsu Y., Tokyo: Ohmsha. V. 3. 1982. – P.211–218.
5. Dillon J.F., Jr. Origin and uses of the Faraday rotation in magnetic crystals // *Journal of Applied Physics*. – 1968. – V. 39. – № 2. – P. 922–929.
6. Ribbens W.B. An optical circulator // *Applied Optics*. – 1965. – V. 4. – № 8. – P. 1037–1038.
7. Shirasaki M., Kuwahara H., Obakata T. Compact polarization-independent optical circulator // *Applied Optics*. – 1981. – V. 20. – № 15. – P. 2683–2687.
8. Fujii Y. High-isolation polarization-independent optical circulator coupled with single-mode fibers // *Journal of lightwave technology*. – 1991. – V. 9. – № 4. – P. 456–460.
9. Рудов Ю.К., Зингеренко Ю.А., Оробинский С.П., Миронов С.А. Применение оптических циркуляторов в волоконно-оптических системах передачи // *Электросвязь*. – 1999. – № 6. – С. 36–38.
10. Хаус Х. Поля и волны в оптоэлектронике. – М.: Мир, 1988.
11. Chang K.W., Sorin W.V. Polarization-independent isolator using spatial walkoff polarizers // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1989. – V. 1. – № 1. – P. 68–70.

12. Fischer G. The Faraday optical isolator // Journal of Optical Communications. – 1987. – V. 8. – № 1. – P. 18–21.
13. Миронов С.А. Расчет характеристик поляризационно-независимого оптического изолятора для волоконно-оптических линий связи // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5 (63). – С. 21–29.
14. Yokohama I., Okamoto K., Noda J., Polarization-independent optical circulator consisting of two fiber-optic polarizing beam splitters and two YIG spherical lenses // Electronics Letters. – 1986. – V. 22. – № 4. – P. 370–371.
15. Koga M., Matsumoto T., High-isolation polarization-insensitive optical circulator for advanced optical communication systems // Journal of lightwave technology. – 1992. – V.10. – № 9. – P. 1210–1216.

Миронов Сергей Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доцент, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, s.a.mironov@inbox.ru