

УДК 681.7.068

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕЗАВИСИМОГО ОПТИЧЕСКОГО
ИЗОЛЯТОРА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

С.А. Миронов

Рассмотрена схема поляризационно-независимого оптического изолятора микрооптического типа, основанного на принципе смещения пучков. Проведен расчет вносимых потерь, изоляции и возвратных потерь изолятора, предназначенного для работы в аппаратуре волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: ВОЛС, невзаимные приборы, защита излучателей, оптические изоляторы, вносимые потери, изоляция, возвратные потери.

Введение

В современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) для обеспечения стабильного режима одномодовой генерации полупроводникового лазера необходимо защитить его резонатор от воздействия случайных внешних отражений прямого излучения, поступающих из волоконного тракта. Отражения могут происходить от различных неоднородностей в тракте передачи, включая френелевские отражения от разъёмных соединителей и мест сварки оптических волокон, а также от поверхностей элементов объёмной оптики в функциональных устройствах ВОЛС. Кроме того, обратное релеевское рассеяние, возникающее в оптическом волокне, может вносить заметный вклад в обратно возвращающийся сигнал. В результате воздействия отражений возникают хаотические осцилляции выходной мощности, сдвиг и расширение спектра излучения, увеличение уровня шумов и даже коллапс когерентности лазера [1]. К числу объектов, требующих защиты излучателей, относятся высокоскоростные цифровые ВОЛС, аналоговые системы кабельного телевидения, когерентные ВОЛС, ВОЛС с оптическими усилителями, а также волоконно-оптические датчики интерферометрического типа [2].

Для защиты излучателей в аппаратуре ВОЛС используются оптические изоляторы (ОИ) [3], принцип действия которых основан на магнитооптическом эффекте Фарадея. ОИ является невзаимным оптическим прибором, коэффициент передачи которого изменяется в зависимости от направления распространения оптического излучения. Идеальный ОИ передает световую волну без затухания в одном (прямом) направлении и полностью ослабляет волну, распространяющуюся в обратном направлении. В настоящее время предложено несколько схем ОИ, изготовленных по микрооптической технологии [4–7]. Однако стандартная схема построения ОИ [4, 5] является поляризационно-зависимой, т.е. потери устройства зависят от поляризации входного излучения. Она может быть использована только в специальных случаях, когда состояние поляризации оптического излучения остается неизменным, например, непосредственно на выходе лазера. ОИ, устанавливаемые в аппаратуре линейного тракта ВОЛС, должны быть поляризационно-независимыми, чтобы исключить замирания передаваемого сигнала. Некоторые схемы таких устройств описаны в [3, 6, 7], однако расчет их характеристик не приводится.

В настоящей работе рассмотрена одна из простых схем поляризационно-независимого ОИ, основанного на принципе смещения пучков, который применяется в современных ВОЛС. Представлена методика расчета основных технических характеристик: потерь мощности излучения для прямого направления (вносимые потери), потерь для обратного направления (изоляция) и возвратных потерь (обратные отражения) от входа устройства. Выполнены численные оценки величин достижимых параметров ОИ.

Структурная схема и принцип работы поляризационно-независимого ОИ

Базовая схема и принцип работы однокаскадного ОИ на смещении пучков показаны на рис. 1. Аналогично схеме классического ОИ [4], для получения изоляции используется невзаимный поворот плоскости поляризации в фарадеевском ротаторе (ФР). Для применения в ВОЛС, работающих в диапазоне 1,3–1,55 мкм, ФР изготавливают на основе монокристаллов (или пленок) ферритов – гранатов с высокой магнитооптической добротностью, например, из иттрий-железного граната (ИЖГ) $Y_3Fe_5O_{12}$. Следует отметить, что в коротковолновом диапазоне 0,85 мкм кристалл ИЖГ обладает значительным поглощением. Поэтому перспективными материалами являются висмут-содержащие гранаты [8], которые, в отличие от традиционных парамагнитных стекол [9], обладают большим фарадеевским вращением, не требуют сильных магнитных полей и обеспечивают малые размеры ФР. Вместо поляризатора и анализатора в схеме ОИ (рис. 1, а) используются двулучепреломляющие элементы (ДЛПЭ) из одноосных анизотропных кристаллов с большим двулучепреломлением, в частности, из рутила (TiO_2). В таких кристаллах при распространении света под углом к оптической оси происходит разделение входного излучения на две ортогонально поляризованные компоненты. Если при этом ДЛПЭ имеет форму плоскопараллельной пластинки, то на выходе появляются два параллельных луча – с обыкновенной (o) и необыкновенной (e) поляризацией, которые смещены в пространстве. Величина смещения o - и e - лучей зависит от толщины ДЛПЭ и типа кристалла. Так, например, для кристалла рутила при распространении под углом $\sim 45^\circ$ к оптической оси поперечное смещение $d \approx 0,1l$, где l – толщина ДЛПЭ. Для ввода и вывода излучения в схеме ОИ используется квазиконфокальная оптическая система, состоящая из двух линз, сопряженных с оптическими волокнами тракта ВОЛС.

На рис. 1, б, показаны пространственное положение пучков и направление поляризационных компонент для прямого и обратного распространения излучения через

ОИ. Заметим, что толщина ДЛПЭ-2 и ДЛПЭ-3 в $\sqrt{2}$ раз меньше толщины ДЛПЭ-1, а оси смещения лучей развернуты на углы 135° и 45° соответственно. При прямом распространении поступающее в ОИ через порт 1 оптическое излучение с произвольной поляризацией коллимируется линзой и попадает на ДЛПЭ-1. В ДЛПЭ-1 происходит разделение входного пучка (рис. 1, б, поз. 1) на две поляризационные компоненты (поз. 2), которые после прохождения через ФР (поз. 3), ДЛПЭ-2 (поз. 4) и ДЛПЭ-3 (поз. 5) объединяются в один общий пучок, который выходит из ОИ через порт 2. При рассмотрении обратного распространения следует учесть, что, поскольку при прохождении через ДЛПЭ-3 и ДЛПЭ-2 соблюдается закон взаимности (обратимости световых лучей), то в поз. 3 (рис. 1, б) пространственное положение o - и e - лучей и состояние поляризации в них должны быть идентичными как для прямого, так и для обратного направления. Но после прохождения ФР и дополнительного невзаимного вращения на 45° направления поляризации становятся ортогональными по отношению к входным (поз. 2). Поэтому после прохождения ДЛПЭ-1 (поз. 1) оба обратных луча не объединяются, а расходятся и оказываются смещенными на величину d относительно места входа излучения. Таким образом, обеспечивается высокая изоляция входного порта 1 независимо от поляризации обратно возвращающихся оптических сигналов.

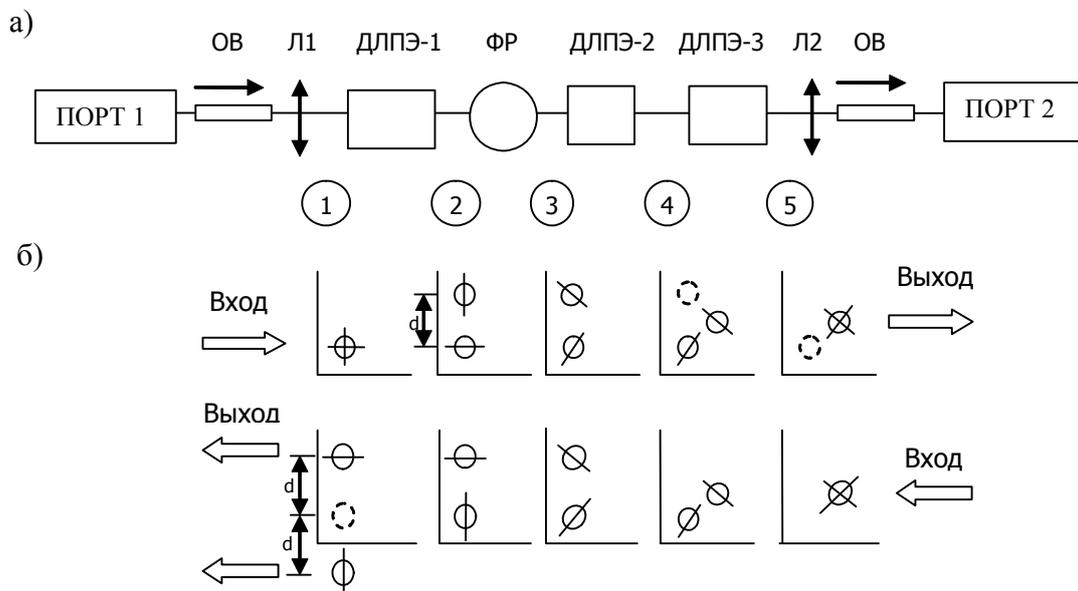


Рис. 1. Структурная схема однокаскадного ОИ (а) и положение поляризационных компонент на выходе из элементов ОИ для прямого и обратного направления (б). Цифрами 1–5 обозначены поперечные сечения в рассматриваемых позициях между элементами. ДЛПЭ – двулучепреломляющие элементы, ФР – фарадеевский ротатор, ОВ – оптическое волокно, Л – линза

Расчет характеристик ОИ

Вносимые потери ОИ A_{12} , т.е. потери для прямого направления распространения, рассчитываются по формуле

$$A_{12} = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где P_2 – оптическая мощность, измеренная на выходе ОИ (порт 2), P_1 – мощность, поступающая на вход (порт 1). Величина A_{12} может быть представлена в виде суммы потерь различных элементов в структуре ОИ:

$$A_{12} = A_{oc} + A_{длпэ} + A_{фр} + A_{тех}, \quad (2)$$

где A_{oc} – потери в оптической системе, $A_{длпэ}$ – потери в двулучепреломляющих элементах, $A_{фр}$ – потери в фарадеевском ротаторе, $A_{тех}$ – технологические потери.

Потери A_{oc} обусловлены абберационными потерями линз коллиматоров ($A_{аб}$), потерями, вызванными френелевскими отражениями на торцах ОБ и поверхностях линз ($A_{отр}$), а также потерями из-за погрешности юстировки элементов ($A_{юст}$):

$$A_{oc} = A_{аб} + A_{отр} + A_{юст}. \quad (3)$$

На практике при использовании в оптической системе коллиматоров на основе сферических микролинз из стекла К8 диаметром 1,5 мм типичные значения потерь составляют: $A_{аб} \approx 0,2$ дБ, $A_{отр} \approx 0,1$ дБ, $A_{юст} = 0,3–0,5$ дБ. Для системы на градиентных линзах, где снижены абберационные потери, значение A_{oc} обычно составляет 0,2–0,4 дБ.

Потери в двулучепреломляющих элементах $A_{длпэ}$ возникают в результате поглощения и рассеяния излучения внутри элемента $A_{пр}$ и френелевских отражений на рабочих поверхностях $A_{отр}$, следовательно,

$$A_{длпэ} = A_{отр} + A_{пр}. \quad (4)$$

Для ДЛПЭ, изготовленных из высококачественных монокристаллов рутила, $A_{пр} \approx 0$, поэтому $A_{длпэ} \approx A_{отр} = 0,05–0,1$ дБ. Таким образом, суммарные потери для трех ДЛПЭ составляют 0,2–0,3 дБ.

Потери в фарадеевском ротаторе рассчитываются аналогичным образом:

$$A_{фр} = A_{отр} + A_{пр} + A(\Delta\varphi_F). \quad (5)$$

Здесь $A(\Delta\varphi_F)$ – дополнительные потери, вызванные отклонением угла фарадеевского вращения от 45° , которые рассчитываются по формуле [7]

$$A(\Delta\varphi_F) = -10\lg[\cos^2(\Delta\varphi_F)] \text{ [дБ]}. \quad (6)$$

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 кристаллов ИЖГ имеем $A_{фр} \approx 0,1–0,2$ дБ.

Оптические потери $A_{тех}$, связанные с технологическими допусками на изготовление и установку элементов при производстве ОИ, могут находиться на уровне $A_{тех} \approx 0,1–0,3$ дБ. Таким образом, расчетное значение прямых потерь ОИ может составлять $A_{12} = 0,7–1,3$ дБ в зависимости от уровня развития технологической базы.

Важной характеристикой ОИ, характеризующей изменение вносимых потерь, является поляризационная чувствительность (ПЧ). ПЧ определяется максимальной величиной изменения уровня выходного сигнала ОИ, которая возникает при вращении плоскости поляризации оптического излучения, подаваемого на вход ОИ. Как отмечалось ранее, для рассматриваемой схемы идеального ОИ (рис. 1) вносимые потери не зависят от поляризации распространяющегося излучения, т.е. такой ОИ является поляризационно-независимым устройством. Однако реальный ОИ обладает некоторой ПЧ, даже когда имеет место полное сведение пучков на выходе (рис. 1, б). Типичная величина ПЧ в этом случае составляет 0,1–0,2 дБ и обусловлена различием коэффициентов передачи o - и e -лучей (дихроизмом) при прохождении через элементы ОИ. Снижение ПЧ достигается поляризационным контролем и отбором элементов с идентичными коэффициентами поглощения, отражения и рассеяния для обеих поляризационных компонент.

Следует отметить, что в некоторых ОИ из-за неточностей изготовления и сборки элементов o - и e -лучи не сводятся в один пучок, и между ними на выходе ОИ (после ДЛПЭ-3) образуется пространственное рассогласование. Тогда ПЧ устройства может увеличиваться из-за погрешности установки выходного ОБ относительно оптимального положения, соответствующего минимальной ПЧ.

Изоляция характеризует потери передачи оптической мощности при обратном направлении распространения излучения через ОИ (т.е. из порта 2 в порт 1) и определяется следующей формулой:

$$I = A_{21} = -10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

где P_1 – оптическая мощность, измеренная на входном порте 1, когда мощность P_2 поступает на порт 2.

На практике величина изоляции конкретного ОИ определяется несколькими причинами. Теоретически максимальная достижимая изоляция может быть рассчитана в соответствии с принципом работы ОИ (см. рис. 1) как потери между двумя гауссовыми пучками, смещенными в поперечном направлении:

$$A_{21}^{\text{см}} = -10 \lg \exp \left[- \left(\frac{d}{\omega'} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где d – пространственное смещение o - и e - лучей в ДЛПЭ, ω' – радиус модового поля пучка, сформированного коллиматором оптической системы. Из (8) следует, что для получения большой изоляции необходимо увеличивать смещение пучков в ДЛПЭ и уменьшать диаметр коллимированного пучка. На рис 2 приведены расчетные зависимости (8) потерь A_{21} (изоляции) от поперечного смещения d для пучков с различным радиусом модового поля ω' . Как видно из рис. 2, значительная величина изоляции (~ 50 дБ) достигается при достаточно малом относительном смещении $d\omega' = 3,4$.

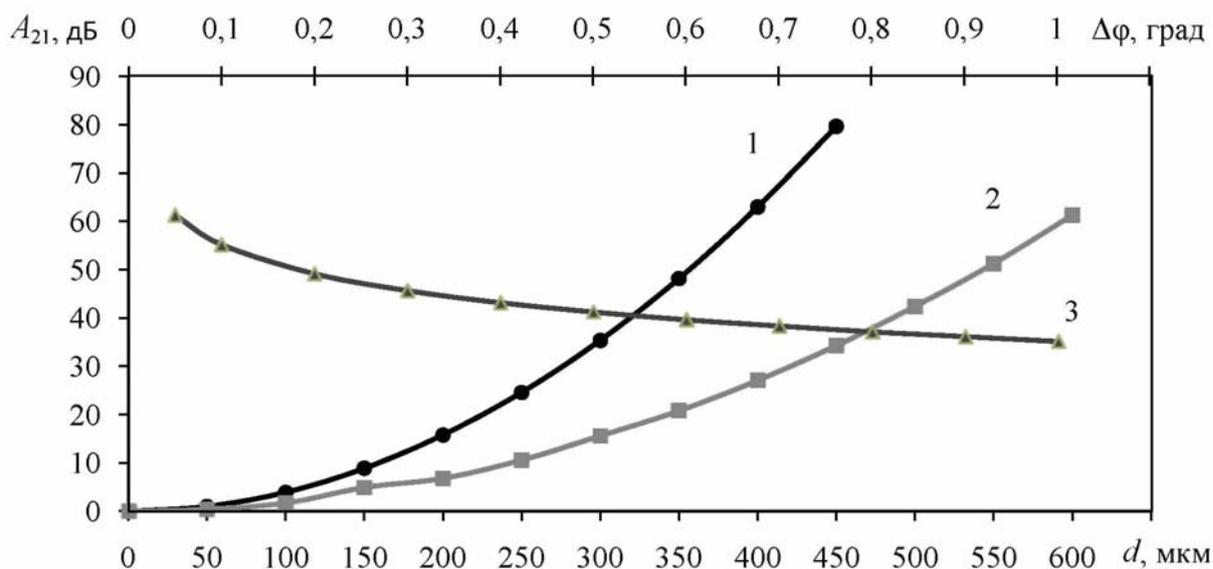


Рис. 2. Зависимость изоляции от величины смещения пучков (1, 2) и погрешности угла фарадеевского вращения (3) для различных пучков. Радиус модового поля:

1 – $\omega' = 105$ мкм, 2 – $\omega' = 160$ мкм

Однако в процессе изготовления ОИ из-за неточностей при юстировке и сборке устройства возможно уменьшение величины изоляции вследствие возникновения паразитных поляризационных компонент, которые достигают входа ОИ без смещения. Среди таких причин можно выделить, во-первых, угловое рассогласование взаимной ориентации ДЛПЭ (рис. 1, б), а также отклонение угла фарадеевского вращения от 45° . Значение изоляции определяется в этом случае выражением [7]

$$A_{21}^{\text{угл}} = -10 \lg [\sin^2(\Delta\phi)] \text{ [дБ]}, \quad (9)$$

где $\Delta\phi$ – величина угловой ошибки. На рис. 2 показано рассчитанное по (9) снижение уровня изоляции при возрастании отклонения угла фарадеевского вращения $\Delta\phi$ от номинального значения 45° . Для современного уровня технологии возможно получить $\Delta\phi \approx 0,1-0,2^\circ$, что ограничивает изоляцию на уровне 50–55 дБ. Во-вторых, это вторич-

ное переотражение в ФР, возникающее в результате несовершенства просветляющих покрытий [4]. Уровень изоляции при этом с учетом поперечного смещения пучка при прохождении через ФР можно оценить как

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

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 модового поля пучка, γ – угол наклона рабочих поверхностей ФР к оси распространения. Если взять, например, типичные значения: $2A_{\text{отр}} = 40\text{--}50$ дБ (коэффициент отражения покрытий $R = 0,3\text{--}1\%$), $t = 2,6$ мм, $n = 2,2$ (кристалл ИЖГ, длина волны 1,55 мкм), $\omega' = 105$ мкм и угол $\gamma = 1^\circ$, то оценка согласно (10) показывает ограничение изоляции на уровне $A_{21} \approx 41\text{--}51$ дБ. Еще одна причина снижения изоляции – рассеянное излучение в ДЛПЭ и ФР, возникающее вследствие наличия различных дефектов в кристаллах. Обычный уровень такого рассеянного неполяризованного излучения в стандартных кристаллах рутила и ИЖГ составляет $A_{\text{тех}} = 40\text{--}45$ дБ. Поэтому величина изоляции реального устройства определяется не теоретическим значением A_{21} , рассчитанным согласно (8), а ограничена наименьшим значением изоляции, обусловленным одной из перечисленных выше причин. Для рассмотренного однокаскадного ОИ типичное значение изоляции составляет $A_{21} = 40\text{--}45$ дБ. Для получения более высокой изоляции необходимо использовать многокаскадные ОИ [8, 9].

Возвратные потери. Возвратные (или обратные) потери ОИ характеризуют потери мощности поступающего входного сигнала в результате частичного отражения от входного порта. Они могут быть рассчитаны по формуле

$$A_{11} = -10 \lg \frac{P'_1}{P_1} \text{ [дБ]}, \quad (11)$$

где P_1 – оптическая мощность, вводимая во входной порт 1, P'_1 – мощность, возвращенная обратно из этого же порта. В ОИ (рис. 1) источниками обратных френелевских отражений являются свободный торец ОВ, поверхности линзы входного коллиматора, а также поверхности ДЛПЭ и ФР. Для уменьшения отражений торец ОВ, как правило, имеет просветляющее покрытие и наклонен к оси волокна. В этом случае уровень обратных отражений от входного ОВ можно рассчитать по формуле

$$A_{11}^{\text{об}} = A_{\text{отр}}^{\text{об}} - 10 \lg \exp \left[- \left(\frac{2\alpha}{\theta} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (12)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{об}}$ – потери, определяемые коэффициентом отражения просветляющего покрытия на ОВ, α – угол наклона торца ОВ к оси, θ – угол распространения излучения в ОВ, определяемый его числовой апертурой. Если взять коэффициент отражения покрытия $R = 0,3\%$, то $A_{\text{отр}}^{\text{об}} \approx 25$ дБ, и при $\alpha = 5,5^\circ$ и $\theta = 3,5^\circ$ получаем $A_{11}^{\text{об}} \approx 68$ дБ.

Возвратные потери, вызванные отражениями от поверхностей ДЛПЭ и ФР, описываются выражением

$$A_{11}^{\text{э}} = A_{\text{отр}}^{\text{э}} - 10 \lg \exp \left[- \left(\frac{2\psi}{\theta'} \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (13)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{э}}$ – потери просветляющего покрытия, ψ – угол наклона поверхности элемента к оси, $\theta' = \lambda/\pi\omega'$ – угловая расходимость пучка, сформированного входным коллимато-

ром. В случае использования просветляющих покрытий с коэффициентом отражения $R = 1\%$ имеем $A_{\text{отр}}^{\ominus} = 20$ дБ. Тогда для углов $\psi = 0,5^\circ$ и $\theta' \approx 0,29^\circ$ ($\omega' = 105$ мкм) получаем величину обратных потерь $A_{11}^{\ominus} \approx 73$ дБ.

Возвратные потери, обусловленные френелевскими отражениями от линзы входного коллиматора, могут быть записаны в следующем виде:

$$A_{11}^{\text{л}} = A_{\text{отр}}^{\text{л}} + A^{\text{л}}(r, x), \quad (14)$$

где $A_{\text{отр}}^{\text{л}}$ – потери отражения просветляющего покрытия на линзе. Для коэффициента отражения $R = 0,3\%$ получаем $A_{\text{отр}}^{\text{л}} \approx 25$ дБ. Второе слагаемое $A(r, x)$ в (14) является функцией радиуса линзы и ее положения относительно оси пучка. Экспериментально установлено [15], что для сферической микролинзы диаметром порядка 1 мм величина $A^{\text{л}}(r, x) \approx 40$ дБ. Таким образом, расчетный уровень обратных отражений от линзы составляет $A_{11}^{\text{л}} \approx 65$ дБ. В заключение следует отметить, что величина возвратных потерь всего устройства A_{11} определяется наименьшим значением возвратных потерь, обусловленных отражением от его компонентов ($A_{11}^{\text{об}}$, A_{11}^{\ominus} , $A_{11}^{\text{л}}$), и на практике обычно находится в пределах 55–60 дБ.

Спектральная и температурная область работы ОИ

При эксплуатации ОИ в составе ВОЛС важное значение приобретают такие характеристики, как спектральный диапазон и температурный интервал работы устройства, в пределах которых вносимые потери и изоляция удовлетворяют требуемым значениям. Ширина спектрального диапазона $\Delta\lambda$ определяется совместным действием различных причин: дисперсией показателей преломления материалов, из которых изготовлены элементы, характеристиками просветляющих покрытий, а также дисперсией фарадеевского вращения в кристалле ФР. Обычно спектральный диапазон работы ОИ является достаточно узким, $\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 1\text{--}2\%$ (здесь $\lambda_0 = 1545$ нм – рабочая длина волны). Поэтому можно считать, что характеристики покрытий и материалов в этом диапазоне при $\Delta\lambda$ от -15 нм до $+15$ нм изменяются незначительно и практически не влияют на величину вносимых потерь и изоляции, а основное влияние оказывает дисперсия фарадеевского вращения. Для кристалла ИЖГ спектральная зависимость удельного фарадеевского вращения $\varphi'_F(\lambda)$ является нелинейной, но в узкой области в окрестности $\lambda_0 = 1545$ нм, где $\varphi'_F(\lambda_0) = 173,1$ град/см [4], возможна линейная аппроксимация с коэффициентом $d\varphi'_F/d\lambda \approx -0,2$ град/(см·нм). Тогда на краях диапазона, где $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$, отклонение угла фарадеевского вращения ФР от номинального значения 45° можно определить по формуле

$$\Delta\varphi_F(\lambda) = \left| 45^\circ - \varphi_F(\lambda) \right| = \left| \frac{d\varphi'_F}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \right| \cdot t, \quad (15)$$

где t – длина ФР. В этом случае вносимые потери и изоляцию можно рассчитать согласно (6) и (9) соответственно. Расчеты показывают, что при изменении длины волны на $\Delta\lambda$ от λ_0 происходит монотонное снижение изоляции. Так, при $\Delta\lambda = 15$ нм, когда отклонение угла фарадеевского вращения составляет $\Delta\varphi_F \approx 0,8^\circ$, изоляция в соответствии с (9) составляет ~ 37 дБ, а при $\Delta\lambda = 20$ нм имеем $\Delta\varphi_F \approx 1^\circ$ и величину изоляции ~ 35 дБ. Что касается вносимых потерь, то в соответствии с (6), даже на краях диапазона, когда $\Delta\lambda = 20$ нм, увеличение вносимых потерь составляет не более 0,005 дБ и может не учитываться. Та-

ким образом, ширина спектрального диапазона работы ОИ определяется допустимым уровнем снижения изоляции и составляет на практике 30–40 нм.

Изменение вносимых потерь и изоляции может происходить также при воздействии температуры T , что обусловлено, главным образом, температурной зависимостью фарадеевского вращения. Изменение T вызывает отклонение угла поворота плоскости поляризации в ФР от оптимального значения $\varphi_F = 45^\circ$. Температурные зависимости вносимых потерь и изоляции, также как и рассмотренные ранее спектральные зависимости, могут быть рассчитаны по формулам (6) и (9) для различных отклонений $\Delta\varphi_F(T)$, определенных аналогично $\Delta\varphi_F(\lambda)$ (15).

Для кристалла ИЖГ известно, что в интервале T от 0°C до 47°C температурный коэффициент удельного фарадеевского вращения $d\varphi'_F/dT \approx -0,13$ град/(см·К) [10]. Проведенные расчеты показывают, что при длине ФР $t=0,26$ см и удельном вращении ИЖГ $\varphi'_F=173,1$ град/см (для $T_o=20^\circ\text{C}$ и $\lambda_o=1545$ нм) отклонение угла фарадеевского вращения от 45° составляет $\Delta\varphi_F \approx 1^\circ$ в интервале температур T от -10°C до $+50^\circ\text{C}$. Тогда в соответствии с (9) на краях указанного температурного интервала изоляция уменьшается до уровня ~ 35 дБ, но при этом согласно (6) увеличение вносимых потерь пренебрежимо мало ($<0,005$ дБ).

Таким образом, и ширина спектрального диапазона, и величина температурного интервала работы ОИ определяются допустимым уровнем снижения величины изоляции.

Заключение

Рассмотрена схема однокаскадного поляризационно-независимого оптического изолятора, основанного на принципе смещения пучков, который используется в аппаратуре ВОЛС. Рассчитаны основные технические характеристики – вносимые потери, изоляция и возвратные потери. Показано, что при современном уровне технологии практически достижимые параметры составляют: вносимые потери 0,7–1,3 дБ, изоляция 40–45 дБ, возвратные потери 55–60 дБ. Улучшение этих характеристик возможно при изготовлении элементов ОИ (ДЛПЭ, ФР) из оптически однородных кристаллов со сниженным до 50–60 дБ уровнем рассеянного излучения, потерями не более 0,05 дБ и просветляющими покрытиями с коэффициентом отражения не более 0,1 %. Предложенная методика может быть использована для расчета более сложных структур многокаскадных оптических изоляторов [11, 12] и циркуляторов [13, 14].

Литература

1. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE Journal on Quantum Electronics. – 1980. – Vol. QE-16. – P. 347–352.
2. Pan J.J., Shih M., Shih K. High-performance fiberoptic systems rely on special isolators // Laser Focus World. – 1993. – №6. – P. 167–169.
3. Chang K.W., Schmidt S., Sorin W.V. et al. A high-performance optical isolator for lightwave systems // Hewlett-Packard Journal. – 1991. – № 2. – P. 45–50.
4. Fischer G. The Faraday optical isolator // Journal of Optical Communications. – 1987. – V. 8. – № 1. – P. 18–21.
5. Green A.F., Georgiou G. Compact bulk optical isolator with monomode fibre pigtailed for use at $1.3 \mu\text{m}$ // Electronics Letters. – 1986. – V. 22. – № 10. – P. 1045–1046.
6. Shirasaki M., Asama K. Compact optical isolator for fibers using birefringent wedges // Applied Optics. – 1982. – V. 21. – № 23. – P. 4296–4299.

7. Chang K.W., Sorin W.V. Polarization independent isolator using spatial walkoff polarizers // IEEE Photonics Technology Letters. – 1989. – V. 1. – P. 68–70.
8. Tsushima K. A compact high-performance optical isolator // JEE. – 1984. – V. 21. – № 205. – P. 78–80.
9. Kuwahara H., Onoda Y., Sasaki M. An optical isolator for semiconductor lasers in the 0,8 μm range // Optical Communications. – 1984. – V. 40. – № 2. – P. 99–104.
10. Matsumoto S., Suzuki S. Temperature-stable Faraday rotator material and its use in high-performance optical isolators // Applied Optics. – 1986. – V. 25. – № 12. – P. 1940–1945.
11. Shiraishi K., Kawakami S. Cascaded optical isolator configuration having high-isolation characteristics over a wide temperature and wavelength range // Optics Letters. – 1987. – V. 12. – № 7. – P. 462–464.
12. Chang K.W., Sorin W.V. High-performance single-mode polarization-independent isolators // Optics Letters. – 1990. – V. 15. – № 8. – P. 449–451.
13. 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.
14. Koga M., Matsumoto T. High-isolation polarization-insensitive optical circulator for advanced optical communication systems // Journal of lightwave technology. – 1992. – V. 10. – № 9. – P. 1210–1217.
15. Drögemüller K. A compact optical isolator with a plano-convex YIG lens for laser-to-fiber coupling // Journal of lightwave technology. – 1989. – V. 7. – № 2. – P. 340–346.

Миронов Сергей Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физико-математических наук, ст.н.с., доцент, s.a.mironov@inbox.ru