

07

Новый оптический W-световод Panda для чувствительной катушки волоконно-оптического гироскопа

© А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов

НИИ прикладной механики им. акад. В.И. Кузнецова, Москва

E-mail: akurbatov54@mail.ru

В окончательной редакции 22 апреля 2010 г.

На основе W-профиля показателя преломления предложены два вида одномодовых волоконных световодов: полярирующий (изгибного типа) и сохраняющий состояние линейной поляризации излучения (PM-световод) с малыми потерями (до 0.35 dB/km). Полярирующий W-световод позволяет сочетать дихроизм в широкой области спектра с возможностью иметь практически любой MFD. Низкие потери PM-световода в значительной мере обусловлены плотной упаковкой основной моды в световедущей жиле (коре). Данные световоды также могут быть сделаны радиационно-стойкими путем замены германатной световедущей жилы на азотную.

Одномодовые световоды, используемые в чувствительных катушках волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), должны обладать малыми потерями, по крайней мере, одной из поляризационных мод (далее — x -мода). Если при этом вторая поляризационная мода (далее — y -мода) обладает большими потерями, имеем полярирующий световод.

В настоящее время в катушках ВОГ используется обычный двухслойный световод с показателем преломления (ПП) световедущей жилы (СЖ), превышающим ПП кварцевой оболочки на 0.015 и более. Это дает возможность получать достаточно малые диаметры пятна основной моды (MFD), а также обуславливает крайне высокую стойкость данного световода к макро- и микроизгибам.

Однако такие световоды редко имеют потери менее 1 dB/km (зачастую — 2 dB/km). Это может быть обусловлено проникновением основной моды в нагружающие стержни, где имеет место материальное поглощение (120–150 dB/km). Повышенное содержание германия в СЖ также приводит к материальному поглощению. Помимо этого, к потерям приводит скрутка такого волокна, так как при этом на

границах нагружающих стержней и кварцевой оболочки появляется связь основной моды с затухающими высшими модами.

Кроме того, такой световод абсолютно непригоден для эксплуатации в условиях повышенной радиации. В этом случае германатную СЖ предлагается заменить азотной [1], однако из-за повышенного содержания азота возникает проблема остаточных материальных потерь на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ из-за пика поглощения азота при $1.52 \mu\text{m}$.

В качестве альтернативы для чувствительной катушки ВОГ были предложены микроструктурные световоды с воздушной СЖ [2]. Это решает сразу несколько проблем: во много раз понижается температурная чувствительность [2] и возрастает вибростойкость катушки, практически полностью подавляются эффекты Фарадея и Керра. Огромное двулучепреломление [3], наряду с отсутствием его температурных флуктуаций, в таких световодах также позволяет радикально снизить поляризационные ошибки в волоконных кольцевых интерферометрах (ВКИ) ВОГ. Наконец, такие световоды обладают большой радиационной стойкостью.

Однако на практике в этих волокнах до сих пор не преодолены многие базовые ограничения: потери велики, о поляризационных характеристиках практически ничего неизвестно, стыковка с канальными волноводами Y-разветвителя в ВКИ затруднена (как технологически, так и по перекрытию полей мод, поскольку воздушная СЖ волокна с большим двулучепреломлением эллиптически [3]). Уже этого, на наш взгляд, достаточно, чтобы обратить внимание на W-световоды [4]. Конечно, они обладают намного более ограниченными возможностями, чем микроструктурные световоды, но они способны заметно улучшить характеристики ВКИ уже в настоящее время.

В качестве нового световода для чувствительной катушки мы предлагаем световод типа Panda с W-профилем ПП [5]. Перечисленные ранее виды волноводных потерь в этом световоде крайне низки. Материальные же потери, в случае азотной СЖ, будут малы из-за достаточно низкого уровня легирования СЖ азотом. Поляризационные характеристики предлагаемого световода, по крайней мере, не хуже таковых в обычных световодах, а кроме того, есть возможность получить ощутимый поляризующий эффект (дихроизм).

Итак, профиль ПП материнской заготовки для предлагаемого нами световода изображен на рис. 1. Данное волокно, помимо германатной СЖ, имеет фтористую отражающую оболочку (ОО) с пониженным ПП,

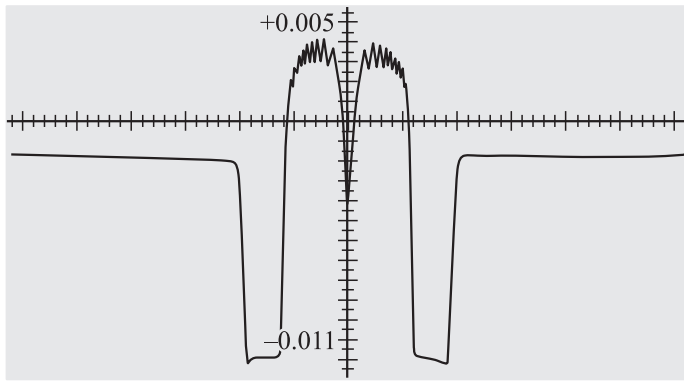


Рис. 1. Профиль ПП материнской заготовки для W-световода Panda.

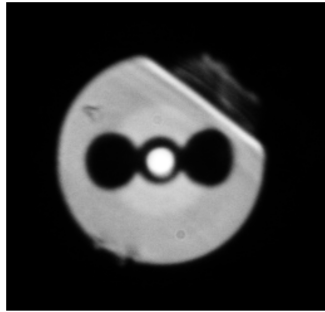


Рис. 2. Фотография поперечного сечения W-световода PANDA.

кварцевую (внешнюю) оболочку и защитно-упрочняющее покрытие. На основе изображенной на рис. 1 структуры мы получили анизотропный световод типа PANDA, фотография поперечного сечения которого представлена на рис. 2. Более темные области соответствуют более низким ПП. Величины ПП в разных областях этого световода перечислены в таблице.

Нами были получены два световода: с диаметрами 80 и 90 μm . На основе первого из них мы получили поляризующий световод, на

основе второго — сохраняющий поляризацию и обладающий потерями, достигающими 0.35 dB/km.

Поляризующий световод длиной 500 м, благодаря его намотке в катушку с диаметром 60 мм, имел потери x -моды 3 dB/km и дихроизм 30 dB/km. Ширина спектра источника излучения в этих измерениях составляет порядка 20 нм. Это хороший результат, учитывая, что величина двулучепреломления достаточно скромна — всего $3.4 \cdot 10^{-4}$. Поскольку намотка данного световода с большим, нежели 60 мм, диаметром не приводила к дихроизму, ясно, что мы получили поляризатор изгибного типа.

W-световод известен тем, что даже его основная мода может претерпевать отсечку при конечной длине волны излучения. Под отсечкой понимается тот факт, что эффективный ПП моды становится равным ПП кварцевой оболочки:

$$n_{eff} = n_3.$$

Расчет длины волны (порога) отсечки основной моды W-световода достаточно прост. Однако далеко не всегда отсечка моды означает ее сильное затухание. По этой причине следует выявлять механизмы реальных потерь основной моды. В качестве главных из них рассмотрим следующие два:

- 1) туннелирование излучения основной моды во внешнюю кварцевую оболочку и касание поглощающего покрытия (в прямом световоде);
- 2) изгибные потери.

В нашем световоде длина волны отсечки основной моды равна приблизительно $2.2 \mu\text{m}$. Первый из механизмов потерь, как показывает расчет, приводит к тому, что потери основной моды заметны уже на длине волны $1.8 \mu\text{m}$. Изгибные же потери из-за намотки в катушку с диаметром 40 мм сдвигают начало этих потерь приблизительно до $1.55 \mu\text{m}$. Далее будем рассматривать только изгибные потери.

Важнейшим вопросом является зависимость изгибных потерь от параметра $\chi = \tau/\rho$, где τ — радиус ОО, а ρ — радиус СЖ. Как показывает расчет, ОО нашего световода может быть произвольно узкой, поскольку рабочая длина волны ($1.55 \mu\text{m}$) находится далеко от порога отсечки основной моды ($2.2 \mu\text{m}$).

На рис. 3 представлено поведение длины волны излучения λ_0 , при которой изгибные потери равны 1 dB/km, в зависимости от параметра χ (это можно условно назвать изгибным порогом отсечки основной моды). На том же рисунке приведен график изменения диаметра

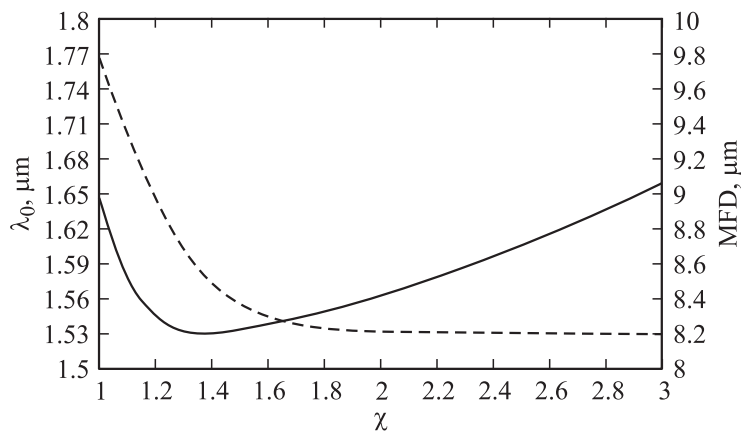


Рис. 3. Поведение длины волны излучения λ_0 , при котором изгибные потери равны 1 dB/km (сплошная линия), и поведение MFD основной моды (штриховая линия) в зависимости от ширины ОО.

пятна основной моды в зависимости от χ . Для расчетов влияния изгиба мы обобщили подход, развитый в работе [6] для обычных двухслойных волокон. В подтверждение этих результатов мы также провели моделирование методом супермод [7,8], которые рассчитывали методом конечных разностей (одна из супермод всегда очень похожа на основную моду прямого световода, так что ее затухание и определяет изгибные потери).

Из графиков видно следующее. Во-первых, ни при каких χ изгибное смещение отсечки основной моды не опускается ниже $1.55 \mu\text{m}$. Во-вторых, эта кривая сначала идет вниз, затем в области $1.3 < \chi < 1.42$ имеет приблизительно постоянный уровень ($1.55 \mu\text{m}$), после чего медленно растет. Такое поведение кривой $\lambda_0(\chi)$ объясняется с помощью модели связи основной моды с высшими затухающими модами. Коэффициенты связи этих мод монотонно уменьшаются с ростом χ . Синхронизм же этих мод сначала резко улучшается и превалирует над уменьшением коэффициентов связи (потери растут), затем улучшается, но уже плавно (потери не меняются) и, наконец, стабилизируется (потери падают).

В-третьих, MFD при $\chi < 1.6$ резко возрастает и это накладывает на ширину ОО ограничение снизу, так что нам следует использовать ОО, для которой $\chi > 1.6$.

Показатели преломления (ПП) разных областей поперечного светодиода Panda

Параметр	Величина параметра
ПП световедущей жилы, n_1	1.4655
ПП отражающей оболочки, n_2	1.451
ПП внешней оболочки, n_3	1.46
ПП нагружающих стержней	1.4515

Как показывает расчет, описанными выше способами, при двулучепреломлении более $8 \cdot 10^{-4}$ можно получить световод с большим дихроизмом в широком диапазоне (100 нм и выше) и малыми потерями. Также для увеличения дихроизма можно применять поглощающие/рассеивающие материалы, размещенные в кварцевой оболочке [9,10].

Вообще предлагаемый W-световод сочетает в себе достоинства двух обычных световодов. Первый — это световод с разностью показателей преломления СЖ и кварцевой оболочки, равной $\Delta n_{13} = n_1 - n_3$ (см. таблицу), второй — с разностью $\Delta n_{12} = n_1 - n_2$. В первом световоде, при его намотке, можно обеспечить широкое окно однополяризационного режима, так как двулучепреломление на фоне малого Δn_{13} заметно. Однако при этом нельзя получить желаемого MFD. Во втором световоде проблем с MFD не возникает, но нельзя получить широкого окна однополяризационного режима, так как двулучепреломление на фоне большого Δn_{12} мало. Предлагаемый же W-световод имеет и широкий спектральный диапазон, как у первого световода, и возможность получить любой MFD, как у второго.

Полученный на основе той же W-структуры световод Panda с диаметром $90 \mu\text{m}$ работает как сохраняющий поляризацию (PM-световод). В этом случае дихроизм уходит в более длинноволновую область, но из-за этого также резко уменьшаются потери x -моды. В настоящее время на основе описанной выше структуры нами получены образцы PM-волокна с потерями, достигающими 0.35 dB/km, что не так уж далеко от предела 0.2 dB/km.

Малость потерь в катушке ВОГ можно использовать по-разному. Например, в ВОГ существует минимальный уровень мощности падающего на фотоприемник оптического сигнала, при котором электронные шумы фотоприемника и предварительного усилителя подавляются.

Получаемый в результате применения волокна с низкими потерями запас мощности можно использовать на то, чтобы применить другие способы дополнительной фазовой модуляции сигнала. Также можно использовать этот запас для намотки катушек длиной несколько километров, что увеличит чувствительность ВОГ.

Что касается h -параметра, то он оказался равен $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. Это хороший результат для двулучепреломления $B = 3.4 \cdot 10^{-4}$, учитывая, что h -параметр зависит от B приблизительно как B^{-2} . Дальнейшее увеличение двулучепреломления является чисто технологическим вопросом и связано с увеличением легирования нагружающих стержней.

Наконец, материальные потери в нагружающих стержнях, как показывает расчет, не превышают нескольких сотых дБ/км (вследствие плотной упаковки основной моды в СЖ). По этой же причине отсутствует чувствительность к осевой скрутке, что также дает таким световодам определенные преимущества при использовании в волоконно-оптических гироскопах.

Авторы выражают благодарность зав. лабораторией 226 ФИРЭ РАН Г.А. Иванову за помощь в изготовлении световодов.

Список литературы

- [1] *Томашук А.Л., Голант К.М., Забежайлов М.О.* // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. 2001. № 4. С. 52–65.
- [2] *Dangui V., Kim H.K., Dignonnet M.J.F., Kino G.S.* // Optics Express. 2005. V. 13. N 18. P. 6669–6684.
- [3] *Konorov S.O., Mel'nikov L.A., Ivanov A.A., Al'fimov M.V., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M.* // Laser Phys. Lett. 2005. V. 2. N 7. P. 366–368.
- [4] *Kawakami S., Nishida S.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1974. V. QE-10. N 12.
- [5] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Патент РФ № 2250482. Приоритет от 16.09.03. Зарегистрирован 20.04.05.
- [6] *Vassallo C.* // J. Lightwave Technology. 1985. V. LT-3. N 2. P. 416–423.
- [7] *Francois P.L., Vassallo C.* // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 19. P. 3109–3120.
- [8] *Besley J.A., Love J.D.* // IEE Proc. Optoelectron. 1997. V. 144. N 6. P. 411–419.
- [9] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Патент РФ № 2250481. Приоритет от 19.05.03. Зарегистрирован 20.04.05.
- [10] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Патент РФ № 2269147. Приоритет от 26.05.04. Зарегистрирован 27.01.06.