

07

Волоконный поляризатор на основе W-световода Panda

© А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов

Филиал ФГУП „ЦЭНКИ“ – „НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова“, Москва
E-mail: akurbatov54@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2011 г.

Описаны три вида волоконного W-поляризатора Panda: с длинами 200 м, 1 м и 50 мм. В первых двух дихроизм превышает 30 dB, в третьем он составляет более 15 dB. Особенностью 50-мм поляризатора является рассеивающий слой в кварцевой оболочке. Для каждого случая описаны наиболее вероятные физические причины дихроизма.

Перевод оптической компонентной базы на волоконную основу начался много лет назад [1]. Здесь мы рассмотрим волоконные поляризаторы на базе световодов Panda [1] с W-профилем [2] показателя преломления (ПП).

Ранее [3] мы сообщали о 500-м W-световоде Panda с дихроизмом. В настоящей работе сообщается о дихроизме в разработанных нами световодах с длинами 200 м, 1 м и 50 мм, а также описываются наиболее вероятные физические механизмы этого дихроизма с кратким описанием способов его расчета для первых двух световодов. Световоды изготавливались в период с 2003 по 2007 г. в соответствии с техническим заданием и технологией, разработанными авторами настоящей статьи, в различных организациях России, обладающих производственной базой для изготовления оптического волокна.

На рис. 1 изображено поперечное сечение W-световода Panda, имеющего германатную световедущую жилу 1 с ПП = n_1 , фтористую отражающую оболочку 2 с ПП = n_2 , кварцевую оболочку 3 с ПП = n_3 , а также круговые нагружающие стержни 4, легированные окисью бора и наводящие линейное двулучепреломление. Дополнительный рассеивающий слой 5 имеет место лишь в третьем (50-мм) световоде. В таблице перечислены параметры всех трех световодов.

На рис. 2, а даны спектральные потери x - и y -мод в 200-м световоде. На рис. 2, б, относящемся к 1-м световоду, кривые 1 и 2 — это

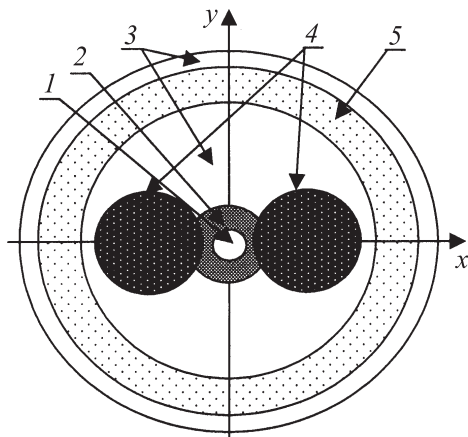


Рис. 1. Поперечное сечение W-световода Panda.

потери x - и y -мод в прямом световоде, кривые 3 и 4 — в намотанном с диаметром 60 mm (3 витка). В каждом случае излучение с x - и y -поляризацией поочередно возбуждалось источником белого света. К сожалению, возможности измерений ограничены длиной волны $\sim 1.7 \mu\text{m}$, поэтому мы не видим полностью окон дихроизма. В случае 200-м световода это окно находится правее рабочего диапазона ($1.55 \mu\text{m}$), но при меньшем радиусе намотки оно сместится влево по спектру.

Параметры поляризующих W-световодов Panda

Параметр	200-м световод	1-м световод	50-мм световод
ПП световедущей жилы	1.465	1.4626	1.462
ПП фтористой оболочки	1.451	1.4567	1.4566
Линейное двулучепреломление	$4.7 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Диаметр световедущей жилы, μm	9.0	9.5	8
Диаметр фтористой оболочки, μm	27	22.8	19.2
Диаметр световода, μm	95	125	125

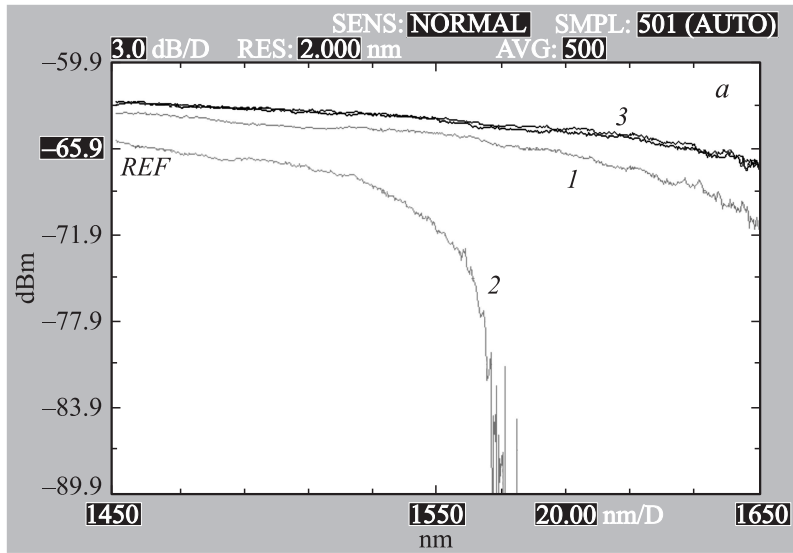


Рис. 2. Спектральные потери основных x - и y -поляризационных мод в световоде с длиной 200 м (кривые 1 и 2) и спектр излучения источника (3). Цена деления по вертикальной оси (уровень мощности) — 3 dB, по горизонтальной (длина волны) — 20 nm (a). Спектральные потери основных x - и y -поляризационных мод в прямом световоде с длиной 1 м (кривые 1 и 2) и в намотанном с диаметром 60 мм (кривые 3 и 4). Цена деления по вертикальной оси (уровень мощности) — 5 dB, по горизонтальной (длина волны) — 40 nm (b).

Рассмотрим подробнее 200-м световод. Имевшие в [3] отличное сходство с экспериментом наши модели изгибных потерь здесь дали слишком медленный рост спектральных потерь x - и y -мод по сравнению с рис. 2, a. Поэтому мы рассмотрели еще один механизм потерь: микроизгибы. Мы обобщили модель микроизгибных потерь в обычных прямых световодах [4] на случай изогнутого световода с любым профилем ПП и PML-слоем [5]. Профиль ПП изогнутого световода соотносится с профилем $n_0(x, y)$ прямого как $n^2(x, y) = n_0^2(x, y)(1 + x/R)$ [5] (R — радиус изгиба). Излучение в изогнутом световоде можно описать в виде супермод [6] с полями ψ_j . Одна из них, ψ_{j0} (выделенная), по форме всегда похожа на основную моду обычного двухслойного прямого

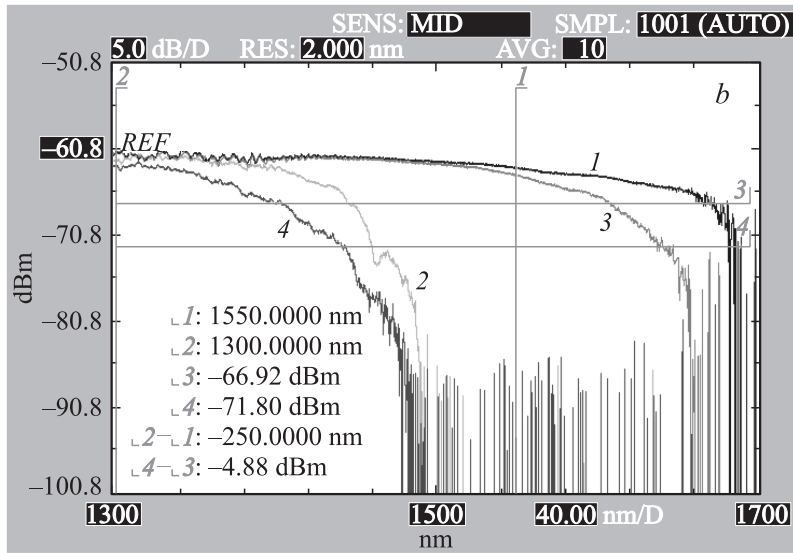


Рис. 2 (продолжение).

световода, а ее коэффициент микроизгибных потерь имеет вид:

$$2\gamma = k^2 \sum_j |C_j|^2 \Phi(\Delta\beta_j) / (\text{Re}\beta_{j0} \text{Re}\beta_j). \quad (1)$$

Здесь k — волновое число в вакууме, C_j — коэффициент связи выделенной и j -й супермод $C_j = \langle \psi_j | x \psi_{j0} \rangle / (\langle \psi_{j0} | \psi_{j0} \rangle \langle \psi_j | \psi_j \rangle)^{1/2}$, $\langle A | B \rangle = \int dx dy A^*(x, y) B(x, y)$ (* — комплексное сопряжение), $\Delta\beta_j = \text{Re}(\beta_{j0} - \beta_j)$ — разность постоянных распространения (синхронизм) выделенной и j -й супермод. В гауссовой модели микроизгибов с длиной корреляции L_c имеем [4]

$$\Phi(\Delta\beta_j) = 2\pi^{1/2} \sigma^2 L_c \exp[-(\Delta\beta_j L_c / 2)^2], \quad (2)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение обратного радиуса микроизгибов. Мы применили (1) и (2) к выделенным супермодам с x - и y -поляризациями (далее — x - и y -моды) 200-м световода. Расчет при $L_c \sim 1.5$ mm дал уже хорошее сходство с графиками на рис. 2, а.

Физически совместное действие изгиба и микроизгибов может выглядеть следующим образом. С ростом длины волны улучшается синхронизм x - и y -мод с остальными супермодами (уменьшается $\Delta\beta_j$). От него (и от L_c) зависит резкость роста спектральных потерь на микроизгибах (2), т.е. ширина окна дихроизма. Что касается его положения, то из-за изгибного искажения полей x - и y -мод [7] коэффициенты C_j их связи с остальными супермодами растут, а кривые потерь — смещаются влево по спектру. Изгиб здесь может регулировать положение окна дихроизма, а микроизгибы — его ширину.

Перейдем к 1-м световоду. В [8] описан W-световод с окном дихроизма в видимой области спектра (относительная ширина — 5%), задаваемым порогами отсечки основных x - и y -мод. От изгиба это окно смещается влево по спектру и сужается. В [9] описан W-световод с окном дихроизма 13% в области $0.85\ \mu\text{m}$. Здесь порог отсечки сохраняемой x -моды бесконечен, так что окно дихроизма должно быть ограничено лишь снизу. Но с ростом длины волны x -мода проникает в кварцевую оболочку, касаясь покрытия, ее спектральные потери растут, отчего окно дихроизма ограничено также и сверху.

Итак, мы получили W-световод Panda, который на длине $\sim 1\ \text{m}$ может дать дихроизм $\sim 30\ \text{dB}$ и более, благодаря разности порогов отсечки x - и y -мод [8]. Для нормализованной частоты отсечки V_{cut} основной моды при не очень узкой фтористой оболочке (наш случай) мы получили аппроксимацию $V_{cut} \approx 0.333 + 1.859 \cdot \Lambda^{1/2} + 0.078 \cdot \Lambda - 5.035 \cdot 10^{-4} \Lambda^2$, где $\Lambda \equiv (n_3^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_3^2)$. Полагая, что двулучепреломление имеется лишь в световедущей жиле и фтористой оболочке, мы получили положение окна дихроизма в прямом световоде. Изгиб сужает его, в основном, из-за потерь x -моды (рис. 2, *b*), которые хорошо описываются нашими моделями изгибных потерь [3]. Впрочем, двулучепреломление в данном световоде не столь велико для таких задач (см. таблицу). Поскольку его вполне реально увеличить до уровня ~ 0.001 , можно получить заметное улучшение характеристик световода с таким же профилем ПП.

К сожалению, наши модели изгибных потерь адекватны лишь если последние велики до порога отсечки, что, видимо, связано с недостатками принятой модели PML-слоя. На рис. 2, *b* изгибные потери y -моды невелики даже после порога отсечки. Однако можно рассчитать потери y -моды для прямого световода другими методами [6,10], и

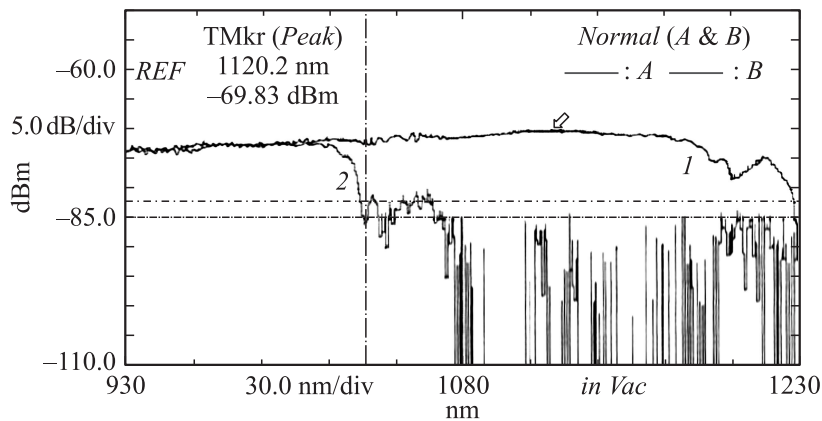


Рис. 3. Спектральные кривые потерь основных x - и y -поляризационных мод в световоде с длиной 50 мм (кривые 1 и 2). Цена деления по вертикальной оси (уровень мощности) — 5 dB, по горизонтальной (длина волны) — 30 nm.

вместе с изгибными потерями x -моды принять это как худший вариант окна дихроизма.

Изгиб почти не смещает окно дихроизма нашего световода (в отличие от [8]). На наш взгляд, для не слишком узких фтористых оболочек это можно объяснить, считая изгибные потери основной моды следствием ее изгибной связи с модами излучения [11]. Если для основной моды, грубо говоря, имеем $V_{cut} > 2.4$ –2.6, то она упакована в световедущей жиле плотно и имеет достаточно слабую связь с модами излучения, т. е. малые изгибные потери даже в режиме отсечки. В противном случае — наоборот. В нашем световоде можно считать, что $V_{cut} \approx 2.8$ для y -моды велико, а $V_{cut} \approx 2.2$ для x -моды — мало.

Недостатком полученного световода является необходимость его намотки без осевой скрутки. На наш взгляд, это обусловлено следующим. При моделировании изгибных потерь мы видели, что они сильно зависят от ориентации нагружающих стержней в плоскости изгиба, т. к. последние имеют пониженный ПП. При намотке со скруткой угол этой ориентации непрерывно меняется, и в кольцах имеются длительные участки с самой неблагоприятной ориентацией. В пользу этого объяснения говорит то, что изгибные потери можно заметно

снизить, укладывая световод без скрутки. Одним из способов решения данной проблемы является опять же увеличение двулучепреломления.

Изгибное сужение окна дихроизма наводит на мысль о коротких поляризаторах (~ 50 мкм). Однако эксперименты с такими отрезками W-световодов Panda, в которых при длине 1 м дихроизм был ~ 30 дБ, дали дихроизм $\sim 1 - 3$ дБ. Поэтому для подавления у-моды мы применили рассеивающий слой у границы оболочки с воздухом [12,13] (рис. 1). На рис. 3 даны графики спектральных потерь такого W-световода с длиной 50 мкм (диапазон $1.15 \mu\text{m}$), к концам которого приварены одномодовые PM-световоды Panda. Видно, что дихроизм составляет уже не менее 15 дБ в диапазоне ~ 90 нм. Здесь у-мода рассеивается дополнительным слоем в другие моды, затухающие в покрытии следующего PM-световода. Сам слой изготавливался внесением в него примесей (в основном, иттербия). Последние имеют узкие полосы поглощения, вряд ли дающие затухание у-моды во всем окне дихроизма, которое, на наш взгляд, определяется именно рассеянием, не столь чувствительным к длине волны.

Итак, для получения широкополосных PZ-световодов, в общем, необходимо: 1) избегать слишком широких фтористых оболочек, мешающих подавлению нежелательной поляризационной у-моды, выбирая минимальную ширину, при которой изгибные потери х-моды имеют приемлемую величину; 2) наращивать двулучепреломление до уровня ~ 0.001 . Остальные параметры профиля ПП в случае световода с длиной ≤ 1 м подбираются из расчета порогов отсечки основных х- и у-мод (при отсечке у-моды $\sim 1.4 - 1.5 \mu\text{m}$). В случае же длинных световодов остальные параметры профиля ПП подбираются моделированием изгибных потерь основных х- и у-мод.

Список литературы

- [1] Noda J. et al. // Journal of Lightwave Technology. 1986. V. 4. N 8. P. 1071.
- [2] Kawakami S., Nishida S. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1974. V. QE-10. N 12.
- [3] Курбатов А.М., Курбатов Р.А. // Письма в ЖТФ. 2010. V. 36. B. 17. С. 23.
- [4] Bjarklev A. // Journal of Lightwave Technology. 1986. V. 4. N 3. P. 341.
- [5] Tsuchida Y. et al. // Optics Express. 2005. V. 13. P. 4770.
- [6] Francois P.L., Vassallo C. // App. Opt. 1983. V. 22. N 19. P. 3109.
- [7] Garth S.J. // Journal of Lightwave Technology. 1989. V. 7. N 12. P. 1889.

- [8] *Simpson J.R.* et al. // Journal of Lightwave Technology. 1983. V. 1. N 2. P. 370.
- [9] *Messerly M.* et al. // Journal of Lightwave Technology. 1991. V. 9. N 7. P. 817.
- [10] *Renner H.* // IEEE Photonics Technology Letters. 1991. V. 3. N 1. P. 31.
- [11] *Gambling W.A.* et al. // Opt. and Quant. Electronics. 1979. V. 11. P. 43.
- [12] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Патент РФ № 2250481. Зарегистрирован 20.04.05.
- [13] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Патент РФ № 2269147. Зарегистрирован 27.01.06.