

УДК 621.373

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В ОВС С СОБСТВЕННЫМИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ МОДАМИ

Г. Б. Малыкин

Рассмотрена пространственная эволюция состояния поляризации когерентного излучения в одномодовых анизотропных волоконных световодах с различной эллиптичностью собственных мод и ее связь с измерением двулучепреломления с помощью эффекта Фарадея. Предложен способ измерения степени эллиптичности, а также ориентации главных осей собственных мод ОВС при его запитке линейно поляризованным светом. Показано, что при запитке ОВС светом с круговой поляризацией методика измерения двулучепреломления существенно упрощается, однако в этом случае определить эллиптичность и положение осей собственных мод ОВС невозможно.

Одним из важнейших параметров одномодовых волоконных световодов (ОВС), характеризующих их способность поддерживать устойчивую линейную поляризацию излучения, является величина его линейного двулучепреломления $\beta = (k_2 - k_1)$ рад/м, где k_1 и k_2 — постоянные распространения для двух взаимно ортогональных собственных мод ОВС — быстрой и медленной, и связанная с ним эффективная разность показателей преломления для двух ортогональных мод:

$$\Delta n = \lambda\beta/2\pi, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения.

При экспериментальном исследовании, как правило, величина β определяется по длине ОВС L_6 , на которой разность фаз оптического излучения взаимно ортогональных мод составляет 2π (длина поляризационных биений)

$$L_6 = \lambda/\Delta n = 2\pi/\beta. \quad (2)$$

Существует ряд методов измерения величины L_6 [1–3], однако наибольшее распространение получила методика [4], основанная на регистрации модуляции состояния поляризации в ОВС при наложении локального продольного переменного магнитного поля на участок ОВС длиной $\Delta l \ll L_6$ (из-за эффекта Фарадея). Глубина модуляции состояния поляризации пропорциональна степени линейной поляризации излучения в месте приложения магнитного поля. При запитке обеих мод происходят биения состояния поляризации излучения и при перемещении зазора электромагнита вдоль волокна глубина модуляции будет меняться от максимального значения в точках, где имеет место линейная поляризация, до нуля в точках с круговой поляризацией излучения. К преимуществам данного метода относится как возможность измерения конкретных значений L_6 на любом участке ОВС, так и определения с высокой точностью (за счет усреднения) значения L_6 для различных участков ОВС. Важным параметром ОВС кроме величины β является также степень приближения его двулучепреломления к линейному, поскольку из-за всякого рода технологических аспектов при изготовлении могут появиться факторы типа закрутки, приводящие к тому, что собственные моды ОВС становятся эллиптическими. Очевидно, что в этом случае при любом азимуте запитки ОВС линейно поляризованным

светом будут происходить биения состояния поляризации, иными словами, имеет место как бы регулярная связь ортогональных линейно поляризованных мод. На появление эллиптичности собственных мод ОВС есть указания в [4, 5].

Цель настоящей работы состоит в анализе характера пространственных поляризационных биений вдоль световода с собственными в общем случае эллиптическими модами и определении как величины L_{σ} , так и степени эллиптичности собственных мод ОВС.

Отметим, что метод с магнитным полем позволяет измерять период поляризационных биений как в ОВС с линейным двулучепреломлением, так и с эллиптическим, причем запитка ОВС может осуществляться как линейно поляризованным излучением, так и излучением с круговой поляризацией. В принципе, можно проводить измерения при запитке ОВС эллиптически поляризованным светом, однако это вносит дополнительную сложность при интерпретации результатов измерений, в дальнейшем этот вопрос рассматриваться не будет.

Если же ОВС обладает чисто циркулярным двулучепреломлением, то при распространении излучения вдоль волокна форма эллипса поляризации не меняется, а происходит лишь вращение его азимута (степень линейной поляризации меняться не будет), и, следовательно, данный метод непригоден для измерения циркулярного двулучепреломления. В этом случае следует использовать наложение на ОВС поперечного электрического (эффект Керра) или поперечного магнитного (эффект Коттона—Мутона) полей, что не входит в круг вопросов, обсуждаемых в данной работе.

Методика измерений пространственного периода биений в ОВС с собственными линейно поляризованными модами не представляет сложности. Измерение же пространственного периода биений в ОВС с собственными эллиптическими модами представляет некоторые трудности. В таком случае с линейно поляризованным светом на входе возбуждятся две взаимно ортогональные эллиптически поляризованные моды и будут иметь место довольно сложные биения состояния поляризации. Поскольку, как было указано выше, эффект модуляции состояния поляризации пропорционален степени линейной поляризации излучения P в точке приложения переменного магнитного поля к ОВС, то необходимо получить теоретическую зависимость P от азимута $\theta_{\text{вх}}$ линейно поляризованного излучения на входе ОВС и эллиптичности собственных мод ОВС — ω ($\text{tg}|\omega| = b/a$ — отношение малой и большой осей эллипса). Заметим, что при $\omega = 0$ собственные моды ОВС имеют линейную поляризацию, при $\omega = 45^\circ$ — круговую, разность фаз в этих модах δ пропорциональна длине ОВС (при $\delta = 2\pi \Delta L = L_{\sigma}$). Используя расчетный метод Мюллера [6], получим

$$P = [1 - 4 \cos^2 2\omega \sin^2(\delta/2) (\sin 2\omega \cos 2\theta_{\text{вх}} \sin(\delta/2) - \sin 2\theta_{\text{вх}} \times \times \cos(\delta/2)^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Расчет по формуле (3) показывает, что если собственные моды ОВС линейные ($\omega = 0$), то периодичность максимумов (или минимумов) модуляции составляет $L_{\sigma}/2$, если собственные моды ОВС — эллипсы, то, вообще говоря, полный период L_{σ} , но в некоторых случаях может составлять и $L_{\sigma}/2$. Для выяснения характера изменения степени линейной поляризации P по длине ОВС был проделан численный эксперимент, его результаты представлены на рис. 1, где приводится серия из 30 зависимостей параметра P от длины ОВС при изменении разности фаз δ в ортогональных модах на 720° . Параметрами являются азимут запитки $\theta_{\text{вх}}$ ($\theta_{\text{вх}} = 0, 20, 45^\circ$) и эллиптичность ω ($\omega = 0, 5, \dots 45^\circ$). Для полного представления об эволюции состояния поляризации в ОВС на рис. 2 приводится серия из 30 зависимостей азимута наибольшей оси эллипса θ от δ для параметров $\theta_{\text{вх}} = 0; 22,5; 45^\circ$; $\omega = 0,5 \dots 45^\circ$. Из серии зависимостей на рис. 1 видно, что при запитке ОВС линейно поля-

ризованым излучением под углом 45° к осям минимумы и максимумы эффекта будут повторяться через $L_6/2$ независимо от степени эллиптичности собственных мод волокна (отличие заключается в глубине минимумов), при запитке по оси экстремумы повторяются через L_6 . При промежуточном угле запитки $0 < \theta_{вх} < 45^\circ$ для волокна с собственными линейными модами кратность экстремумов $L_6/2$, для волокон с собственными эллиптическими модами также $L_6/2$, но иногда, на опыте, можно принять за L_6 ; так как неглубокие минимумы эффекта и находящиеся слева и справа от них максимумы, из-за шумов, могут сливаться как бы в один тупой максимум. (Глубокие минимумы эффекта при этом хорошо разрешаются.)

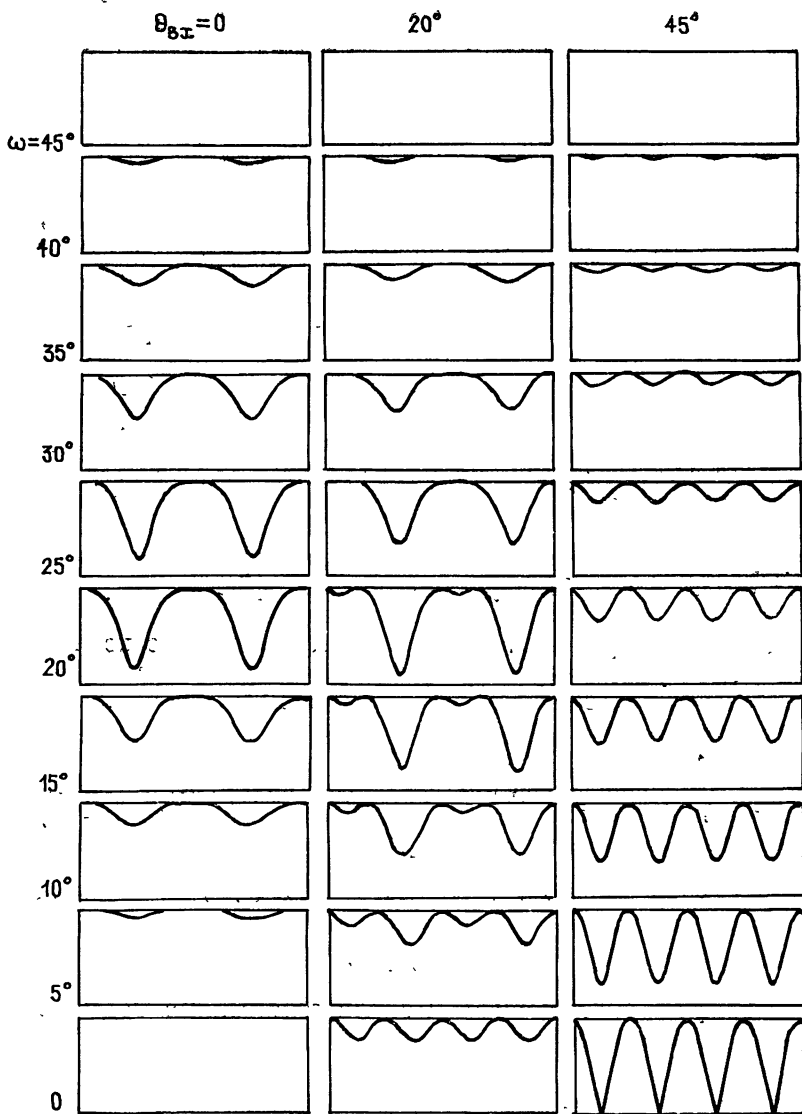


Рис. 1. Серия зависимостей степени линейной поляризации излучения P от разности фаз в ортогональных модах δ при азимуте запитки $\theta_{вх}=0; 20; 45^\circ$ и эллиптичности собственных мод ОВС $\omega=0; 5, \dots, 45^\circ$. По оси x $\delta=0 \div 720^\circ$, по оси y $P=0 \div 1$

Заметим, что небольшое неравенство минимумов в экспериментальной зависимости $P(\delta)$ впервые наблюдалось уже в [4], однако авторы не уделили этому внимания. В [5] те же авторы добились значительного неравенства этих минимумов, закручивая ОВС, т. е. создавая соб-

ственные эллиптические моды, что интерпретируется авторами с помощью сферы Пуанкаре.

На эксперименте найти собственные оси эллиптических мод в ОВС довольно непросто. Поэтому можно рекомендовать при изменении длины биений L_6 вводить излучение под рядом углов $\theta_{вх}$ в ОВС и просматривать периодичность эффекта при перемещении магнита вдоль волокна, и если при каких-то углах $\theta_{вх}$ будет заметно «удвоение» количества минимумов, то более плавной регулировкой уравнивать глубокие и неглубокие минимумы. Этот угол будет соответствовать условию $\theta_{вх} = 45^\circ$, расстояние между соседними минимумами (максимумами) составляет $L_6/2$. Этот же метод позволяет находить положение осей ОВС на входе волокна.

Отметим также, что по характеру зависимостей на рис. 1 при $\theta_{вх} = 45^\circ$ можно определить степень эллиптичности собственных мод ОВС. Для этого нужно найти соотношение величины эффекта в максимуме и минимуме и затем определить значение ω либо по серии рис. 1, либо по формуле

$$\omega = (1/2) \arccos \sqrt{1 - (P_{\min}/P_{\max})^2}, \quad (4)$$

которую можно получить из соотношения (3) при $\theta_{вх} = 45^\circ$.

При запитке ОВС циркулярно поляризованным светом можно показать [6], что P следующим образом зависит от $\theta_{вх}$, ω и δ :

$$P = 2[\cos^2 2\omega \sin^2(\delta/2) (\sin^2 2\omega \sin^2(\delta/2) + \cos^2(\delta/2))]^{1/2}. \quad (5)$$

При этом максимумы и минимумы эффекта располагаются равномерно через $L_6/2$, и измерение величины L_6 не составляет сложности. Однако в этом случае нельзя судить о степени эллиптичности собственных мод ОВС, так как из формулы (5) видно, что в минимумах ($\delta = \pi N$) эффект падает до нуля.

При использовании описанной выше методики измерялось L_6 у ≈ 30 образцов ОВС ($\lambda = 0,63$ мкм), как правило, с сильным двулучепреломлением. Схема экспериментальной установки отличалась от приведенной в [4] только тем, что на входе в ОВС имелась $\lambda/4$ фазовая пластинка и призма в поворотном устройстве, позволявшие вводить линейно поляризованное излучение с любым азимутом. Следует отметить, что собственные моды подавляющего большинства образцов имели линейную поляризацию в пределах точности измерений, составлявшей $\Delta\omega = 3-5^\circ$. Для двух же образцов наблюдалось характерное «слияние» двух соседних максимумов эффекта при $\theta_{вх} = 20-25^\circ$, и согласно оценкам по рис. 1 эллиптичность собственных мод ω была порядка $10-15^\circ$. Отметим здесь, что точность измерения L_6 и ω определяется как превышением сигнала над шумами, так и пространственным разрешением экспериментальной установки. Первое зависит от интенсивности излучения на выходе ОВС*, произведения длины зазора электромагнита Δl на амплитуду переменного магнитного поля в зазоре (при условии $\Delta l \ll L_6$) и полосы анализа регистрирующей системы на частоте возбуждения электромагнита; второе — от величины Δl (требования к точности механической системы подачи электромагнита очевидны). Отсюда следует, что с точки зрения соотношения сигнала к шуму чрезмерное уменьшение Δl невыгодно. В наших экспериментах Δl составляла $\frac{1}{2}$ мм при $L_6 > 10-12$ мм, для ОВС с более сильным двулучепреломлением — $0,5$ мм, что позволяло четко регистрировать координаты максимумов и минимумов с точностью $\approx 0,2$ мм.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что несмотря на то, что ОВС с собственными эллиптическими модами встречаются редко, тем не менее, чтобы избежать ошибки в два раза при измерении L_6 , необходимо для проверки произвести ряд измерений при различных

* Для максимального уровня регистрации сигнала это излучение должно иметь круговую поляризацию.

значениях $\theta_{вх}$. Кроме того, как отмечалось выше, такие ОВС принципиально неспособны поддерживать линейно поляризованное излучение, что исключает их использование в ряде практических задач.

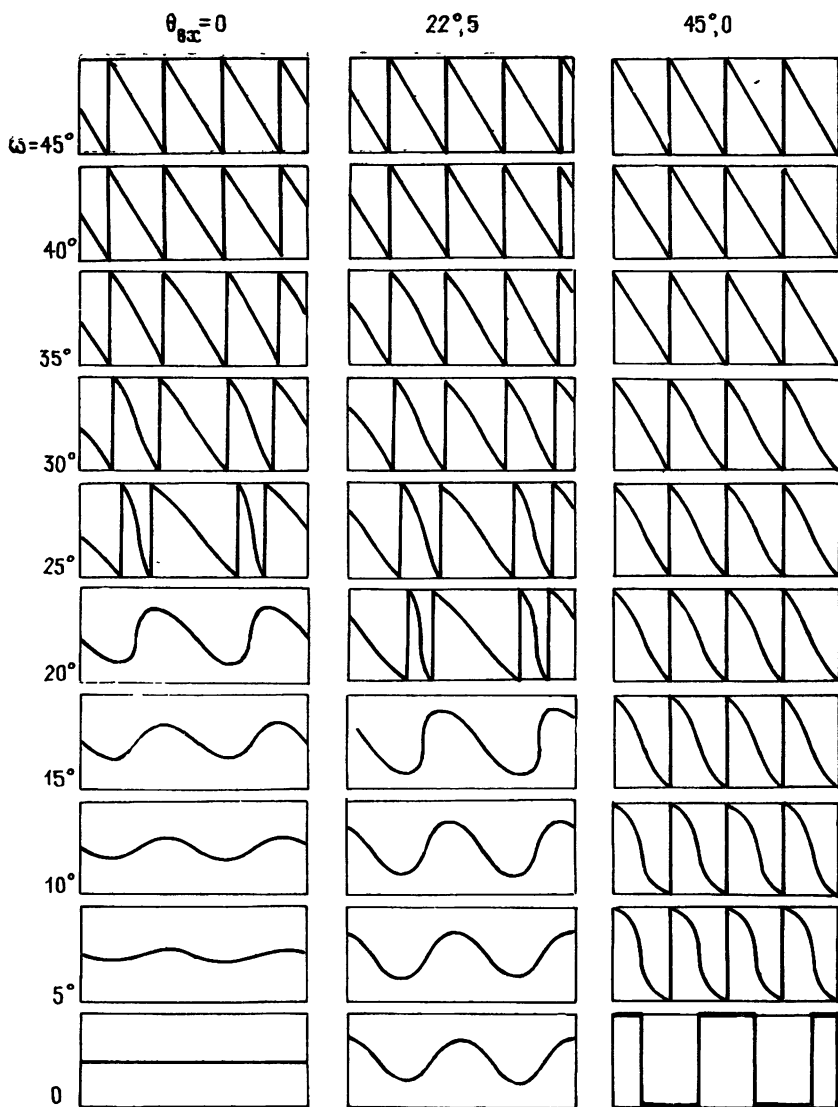


Рис. 2. Серия зависимостей азимута наибольшей оси эллипса поляризации θ от разности фаз в ортогональных модах δ при азимуте запитки $\theta_{вх} = 0; 22,5; 45^\circ$ и эллиптичности собственных мод ОВС $\omega = 0; 5, \dots, 45^\circ$. По оси x $\delta = 0 \div 720^\circ$, по оси y $\theta = -45 \div +45^\circ$.

В заключение автор выражает благодарность Ю. И. Зайцеву за постановку задачи и обсуждение результатов работы, П. А. Хандохину за консультации при проведении расчетов на ЭВМ, В. Б. Неуструеву за полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rashleigh S. C. // Opt. Lett. 1982. V. 7. № 6. P. 294.
2. Thyagarajan K., Shenoy M. R., Ramadas M. R. // Eil. Lett. 1986. V. 22. № 16. P. 832.
3. Carrara S. L., Kim K. Y., Shaw H. Y. // Opt. Lett. 1986. V. 11. № 7. P. 470.
4. Simon A., Ulrich R. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. № 8. P. 517.

5. Ulrich R., Simon A. // Appl. Optics. 1979. V. 18. № 13. P. 2241.

6. Шерклиф У. Поляризованный свет. — М.: Мир, 1965.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
4 декабря 1987 г.

ON THE PROBLEM OF MEASURING DOUBLE-REFRACTION IN SINGLE-MODE FIBRE LIGHTGUIDES WITH EIGEN ELLIPTIC MODES

G. B. Malykin

The space evolution of coherent radiation polarization is considered in single-mode anisotropic fibre lightguides with various ellipticity of eigen modes; its relation with measuring double refraction using Faraday effect is ascertained. The method is proposed to measure the degree of ellipticity and the orientation of the main axes of eigen modes of single-mode fibre lightguides due to linearly-polarized light feeding. It is shown that when single-mode fibre lightguides have a circularly-polarized light feeding, the procedure of measuring the double refraction becomes much easier; in this case, however, it is impossible to determine the ellipticity and the location of eigen modes axes of single-mode fibre lightguides.
