

Широкоапертурный изолятор Фарадея для излучения с киловаттной средней мощностью

А.В.Войтович, Е.В.Катин, И.Б.Мухин, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов

Изготовлен и экспериментально исследован изолятор Фарадея со световой апертурой 20 мм и компенсацией термонаведенных поляризационных и фазовых искажений лазерного излучения. Продемонстрировано существенное увеличение степени изоляции по сравнению с традиционными изоляторами Фарадея. При мощности до 750 Вт степень изоляции составила 24–26 дБ и ограничивалась исключительно качеством кристаллов TGG.

Ключевые слова: изолятор Фарадея, степень изоляции, компенсация деполаризации, термонаведенное двулучепреломление, тепловая линза.

1. Введение

Основной фундаментальной проблемой, ограничивающей использование изоляторов Фарадея (ИФ) в лазерах с большой средней мощностью излучения, является неизбежное тепловыделение в магнитоактивных элементах. Неравномерное распределение температуры по объему образца приводит к появлению фазовых искажений (тепловая линза), неоднородному распределению угла поворота плоскости поляризации, вызванному зависимостью постоянной Верде от температуры, к появлению механических напряжений и, как следствие, к линейному двулучепреломлению (фотоупругий эффект).

Тепловая линза не влияет на степень изоляции ИФ, однако приводит к сильным фазовым искажениям излучения. Такие искажения могут быть скомпенсированы при помощи разъюстированного телескопа [1] или поглощающей среды с тепловой линзой, имеющей знак, противоположный знаку тепловой линзы магнитоактивной среды [2–4]. В работе [5] показано, что в отсутствие компенсации искажений при мощности гауссова пучка 150 Вт более 95 % мощности трансформируется тепловой линзой в высшие поперечные моды, тогда как при компенсации искажений кристаллом DKDP с отрицательной тепловой линзой трансформируется не более 5 %.

Степень изоляции определяется поляризационными искажениями, вызванными фотоупругим эффектом, а вклад температурной зависимости постоянной Верде пренебрежимо мал [6, 7]. Следовательно, появляется ограничение на среднюю мощность проходящего через ИФ излучения при заданной степени изоляции. Для компенсации таких поляризационных искажений в работе [6] предложены новые схемы ИФ, которые согласно теоретическим предсказаниям могут обеспечивать высокую степень изоляции при киловаттной средней мощности

проходящего через них излучения. Экспериментально эффективная работа таких ИФ была продемонстрирована при мощности менее 100 Вт [8]. Представленные в [9] результаты, полученные при киловаттной мощности, значительно хуже теоретических предсказаний [6].

В настоящей работе экспериментально продемонстрировано существенное уменьшение фазовых и поляризационных искажений в ИФ при мощности излучения до 750 Вт. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями. Обсуждается возможность использования таких ИФ для излучения с мощностью несколько киловатт.

2. ИФ с компенсацией поляризационных искажений

Рассмотрим принципы работы традиционной схемы ИФ (рис.1,а) и новой схемы – с компенсацией деполаризации (рис.1,б). Идея компенсации состоит в замене одного магнитооптического элемента, вращающего поля-

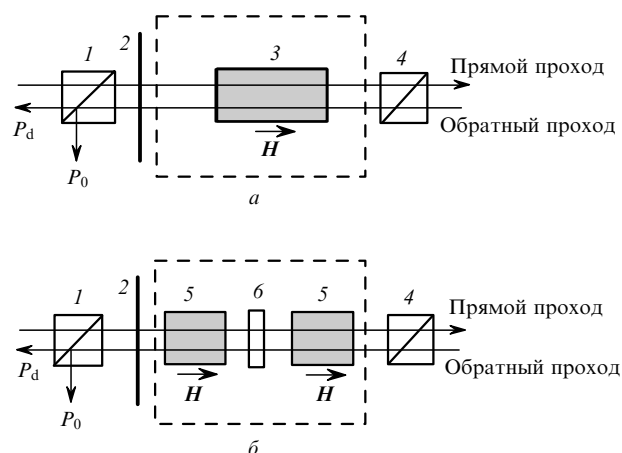


Рис.1. Традиционная схема ИФ (а) и схема ИФ с компенсацией деполаризации [6] (б):

1, 4 – поляризаторы; 2 – пластинка $\lambda/2$; 3 – 45°-ный магнитооптический элемент; 5 – 22.5°-ный магнитооптический элемент; 6 – 67.5°-ный взаимный вращатель поляризации; штриховыми прямоугольниками выделена магнитная система ИФ.

А.В.Войтович, Е.В.Катин, И.Б.Мухин, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 7 ноября 2006 г., после доработки – 13 декабря 2006 г.

ризации на 45° , двумя, каждый из которых вращает ее на 22.5° , и в установке между ними взаимного вращателя поляризации на 67.5° . В этом случае искажения, возникшие в первом магнитооптическом элементе, частично компенсируются при прохождении излучения через второй.

В идеальном ИФ излучение на обратном проходе полностью отразится от поляризатора I . Однако неоднородность магнитного поля, неидеальное оптическое качество элементов, а с увеличением лазерной мощности и тепловые эффекты приводят к поляризационным искажениям. В результате основная часть излучения мощностью P_0 отразится от поляризатора I , а деполаризованная составляющая мощностью P_d пройдет через него. Величина

$$\gamma = \frac{P_d}{P_d + P_0} \quad (1)$$

называется деполаризацией или неразвязкой ИФ, а его степень изоляции I , измеряемая в децибелах, определяется соотношением

$$I = -10 \lg \gamma. \quad (2)$$

На основе представленных в работе [6] результатов мы рассчитали и изготовили ИФ с компенсацией деполаризации для мощного лазерного излучения на длине волны 1.07 мкм . Конструктивно ИФ представляет собой магнитную систему (рис.1,б, штриховой прямоугольник), состоящую из набора магнитных колец из Nd-Fe-V, внутри которой расположены два кристалла тербий-галлиевого граната (TGG) и кристалл кварца между ними в качестве взаимного вращателя. Изготовленная магнитная система создает высокооднородное по апертуре кристаллов магнитное поле с напряженностью до 12 кЭ . Распределение магнитного поля вдоль оси распространения излучения показано на рис.2.

При малой мощности излучения (несколько ватт) степень изоляции ограничивается лишь неидеальным качеством кристаллов и неоднородностью магнитного поля и может существенно превышать 30 дБ . С ростом мощности степень изоляции уменьшается из-за тепловых эффектов в кристаллах TGG. Мы использовали кристаллы TGG с ориентацией $[001]$ (волновой вектор излучения направлен вдоль одной из кристаллографических осей). В новой схеме (рис.1,б) для минимальной деполаризации необходимо, чтобы в двух кристаллах TGG была одина-

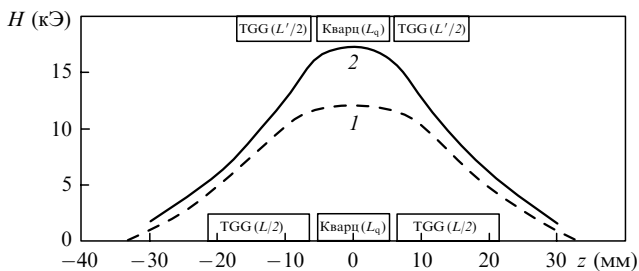


Рис.2. Распределение напряженности магнитного поля H вдоль оси магнитной системы z для исследуемого ИФ (1) и для ИФ с увеличенным магнитным полем (2). Прямоугольниками для наглядности показаны размеры и положение (вдоль горизонтальной оси) кристаллов для исследуемого ИФ (внизу) и для ИФ с увеличенным магнитным полем (вверху). Размеры прямоугольников вдоль вертикальной оси не важны.

ковая ориентация всех кристаллографических осей. Поляризация излучения значения не имеет. Для традиционной схемы ИФ термонаведенная деполаризация зависит от угла между направлением поляризации излучения и одной из кристаллографических осей, перпендикулярных волновому вектору [6]. Для минимизации деполаризации необходимо, чтобы одна из кристаллографических осей кристалла TGG составляла угол 45° с биссектрисой угла, образованного направлениями поляризаций излучения на входе и на выходе ИФ. При оптимальной настройке ИФ деполаризация ИФ без компенсации (γ_0) (рис.1,а) и с компенсацией (γ_r) (рис.1,б) определяется формулами [6]

$$\gamma_0 = A_0 p^2, \quad (3)$$

$$\gamma_r = A_r \left(1 + \frac{2}{3} \xi^2 + \xi^4 \right) p^4, \quad (4)$$

где

$$p = \frac{Q \alpha L P_L}{\lambda \kappa}; \quad \xi = \frac{2 p_{44}}{p_{11} - p_{12}}; \quad (5)$$

λ и P_L – длина волны и мощность излучения; L , α , κ , p_{ij} , Q – соответственно суммарная длина, коэффициент поглощения, теплопроводность, фотоупругие коэффициенты и термооптическая постоянная [10] магнитоактивной среды. Для гауссова распределения пучка $A_0 = 14 \times 10^{-3}$ и $A_r = 4 \times 10^{-6}$. Мы использовали два кристалла TGG ($\xi = 2.25$, $\alpha = 3 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, $\kappa = 5 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $Q = -17 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$) с суммарной длиной $L = 28 \text{ мм}$.

3. Экспериментальные результаты

Для подтверждения эффекта компенсации деполаризации были проведены эксперименты с ИФ, собранным по схеме с компенсацией деполаризации и без нее. Схема измерений представлена на рис.3. Мы использовали неполяризованное излучение непрерывного волоконного лазера I (YLS-750-SM, НТО «ИРЭ-Полнос») с длиной волны 1.07 мкм и мощностью P_L , изменяемой в диапазоне $0-750 \text{ Вт}$. Поперечное распределение интенсивности пучка было близко к гауссову. На шпатовом клине 3, размещенном вплотную к ИФ, пучок делился на два, равных по мощности и имеющих ортогональные поляризации. Поскольку диаметры этих пучков равны $\sim 12 \text{ мм}$, а угол между ними составляет менее 0.5° , пучки в кристаллах TGG проходили практически по одному и тому же пути. Это позволило использовать для нагрева излучение с обеими поляризациями. После ИФ один из пучков отводился на поглотитель 8, а другой, с которым проводились измерения деполаризации, падал на шпатовый клин 4 (повернутый относительно клина 3 на 22.5°). На этом клине происходило разделение деполаризованной (P_d) и поляризованной (P_0) компонент излучения. Используя измеренные значения P_0 и P_d , по формуле (1) вычислялась деполаризация γ в зависимости от мощности лазера P_L . В эксперименте с компенсацией деполаризации (рис.3,а) ИФ настраивался на максимальную компенсацию при мощности 750 Вт . В другом эксперименте – без компенсации деполаризации – кварцевый вращатель 7 вынимался из ИФ и ставился за ним (рис.3,б). Положение кристаллов TGG не менялось. Это позволяло проводить измерения без перестройки шпатовых клиньев.

Для компенсации тепловой линзы мы использовали кристалл DKDP 2 (рис.3) толщиной 5.5 мм [4, 5] с опти-

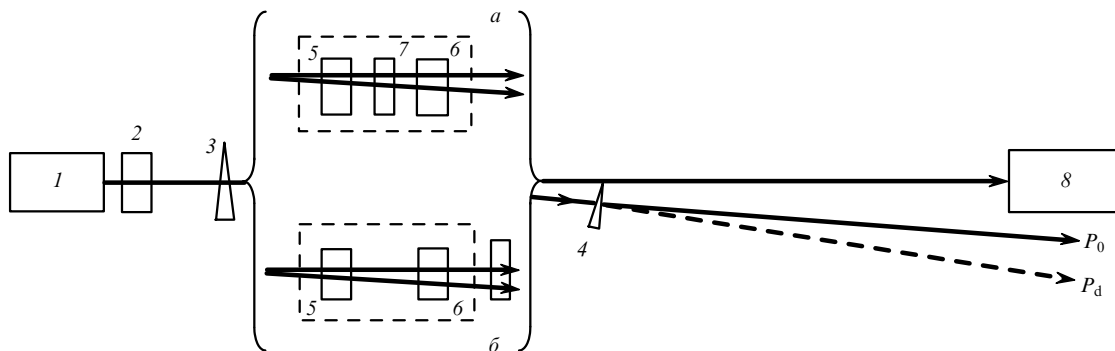


Рис.3. Схемы измерения деполаризации в ИФ с компенсацией деполаризации (а) и без нее (б): 1 – лазер YLS-750-SM; 2 – кристалл DKDP; 3, 4 – шпатовые клинья; 5, 6 – кристаллы TGG; 7 – кристалл кварца; 8 – поглотитель; штриховыми прямоугольниками выделена магнитная система ИФ.

ческой осью, расположенной под углом $\sim 30^\circ$ к оси кристалла. Он создает отрицательную тепловую линзу, но не деполаризует излучение. Согласно данным, представленным в работе [5], при мощности ~ 1 кВт расходимость пучка по сравнению с дифракционной должна увеличиться в 4.5 раза при использовании кристалла DKDP и в 20 раз – без него.

Результаты измерений деполаризации приведены на рис.4. Для ИФ без компенсации поляризационных искажений при мощности пучка менее 100 Вт деполаризация определяется как мощностью пучка, так и «холодной» деполаризацией. Степень изоляции при такой мощности составляет ~ 30 дБ, что удовлетворяет требованиям большинства приложений. При увеличении мощности излучения деполаризация растет квадратично, что согласуется с формулой (3) (кривая 1), и при мощности 750 Вт составляет 4.5×10^{-2} .

Сравним описываемый ИФ без компенсации деполаризации с серийными моделями разных производителей. Результаты измерений, полученные для этих моделей,

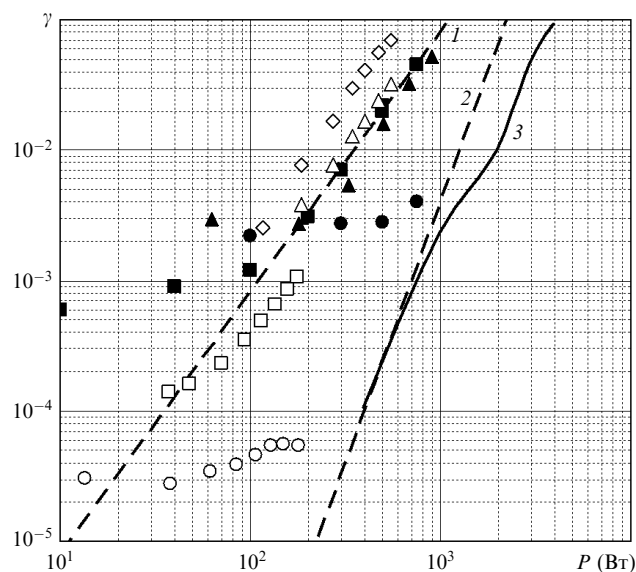


Рис.4. Зависимости деполаризации γ от мощности излучения P в исследуемом ИФ без компенсации (■, 1) и с компенсацией (●, 2, 3) деполаризации, в серийных ИФ фирм Litton (◇) [9], Linos (△) [9], EOT (▲) [9], а также в ИФ с увеличенным магнитным полем с компенсацией (○) и без компенсации (□) [4]. Кривые 1 и 2 построены по формулам (3) и (4) соответственно, кривая 3 – результат численного расчета.

взяты из работы [9]. Из рис.4 видно, что наш ИФ по степени изоляции не уступает ИФ других производителей. Отметим, что в нашем ИФ кристаллы находятся не в максимуме магнитного поля, поскольку это место конструктивно предназначено для отсутствующего в такой схеме кварцевого вращателя (рис.2). Перемещение кристаллов в максимум поля позволит уменьшить их длину с 28 до 20 мм, что согласно (3), (5) приведет к уменьшению деполаризации в два раза.

В случае компенсации поляризационных искажений (рис.4, темные кружки), деполаризация полностью определяется качеством кристаллов TGG в диапазоне мощностей 0–500 Вт. Поляризационные искажения эффективно компенсируются, и лишь в диапазоне 500–750 Вт наблюдается рост деполаризации. При мощности 750 Вт удалось уменьшить γ в 11 раз, а степень изоляции составила 24 дБ. Выражение (4) получено при условии $p \ll 1$. Однако при киловаттной мощности излучения это условие, строго говоря, неверно, и для определения γ_T необходим численный расчет, результаты которого приведены на рис.4 (кривая 3). Видно, что данный ИФ может обеспечить степень изоляции 20 дБ при мощности 2 кВт.

4. Обсуждение результатов

При мощности излучения 1 кВт в кристаллах TGG будет выделяться тепло с мощностью ~ 8 Вт. Такое тепловыделение может привести не только к существенному градиенту температуры, но и к повышению общей средней температуры кристаллов и, как следствие, к изменению угла поворота плоскости поляризации [11]. При увеличении температуры TGG на 30°C угол поворота поляризации в ИФ уменьшится на 4.5° , что вызовет уменьшение степени изоляции до 22 дБ. Во избежание этого необходимо обеспечить надежный теплоотвод от кристаллов. В эксперименте с компенсацией деполаризации при мощности 750 Вт в течение 20 мин заметного увеличения деполаризации не наблюдалось, что говорит о достаточно эффективном теплоотводе от кристаллов.

Степень изоляции описанного в работе ИФ составила 24 дБ при мощности излучения 750 Вт и ограничивалась качеством кристаллов. Проведенные эксперименты свидетельствуют о возможности использования ИФ с компенсацией деполаризации для излучения со средней мощностью до 2 кВт. Дальнейшее увеличение мощности излучения возможно за счет усовершенствования рассматриваемого ИФ. Мы разработали и изготовили новую магнитную систему, увеличение магнитного поля внутри

которой позволило уменьшить суммарную длину кристаллов с $L = 28$ мм до $L' = 18$ мм (рис.2) при сохранении апертуры 20 мм. Необходимо отметить, что увеличение напряженности магнитного поля H является сложной задачей по двум причинам. Во-первых, увеличение H подразумевает уменьшение длины магнитооптического элемента, что накладывает дополнительные требования на поперечную однородность магнитного поля. Во-вторых, это увеличение приводит к росту массы магнитов, что влечет за собой усиление взаимного размагничивающего действия соседних магнитов.

В новом ИФ применялись коэрцитивные магниты, остаточная намагниченность которых выдерживает более сильные внешние поля. Это позволило повысить напряженность магнитного поля внутри ИФ за счет изменения конструкции магнитной системы и увеличения массы магнитов вдвое. Деполяризация в ИФ с увеличенным магнитным полем измерена при мощности до 180 Вт [4]. Из рис.4 видно, что деполяризация в нем существенно меньше, чем во всех других ИФ – как с компенсацией деполяризации, так и без нее. Теоретические оценки показывают, что этот ИФ можно использовать при мощности вплоть до 3 кВт.

Дальнейшее увеличение предельно допустимой мощности для ИФ с компенсацией деполяризации может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра кристаллов при сохранении габаритов ИФ. Расчеты показывают, что уменьшение апертуры с 20 до 10 мм позволит уменьшить суммарную длину кристаллов L с 18 до 12 мм. Дополнительно уменьшить L можно, заменив кварцевый вращатель на угол 67.5° на эквивалентные ему две пластинки $\lambda/2$ с углом между осями $67.5^\circ/2$. Поскольку длина кристалла кварца $L_q = 10.7$ мм, а длина одной пластинки составляет менее 1 мм, такая замена позволит уменьшить расстояние между кристаллами TGG на ~ 8 мм. В этом случае кристаллы TGG попадут в более сильное магнитное поле (рис.2), что даст возможность уменьшить их длину до 10–11 мм. Уменьшение L с 18 до 11 мм согласно (4), (5) приведет к увеличению предельной мощности с 3 до 5 кВт.

Другой способ увеличения мощности – уменьшение коэффициента поглощения α в кристаллах. Замена используемых в работе кристаллов TGG с коэффициентом поглощения $\alpha = 3 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ на кристаллы TGG с $\alpha = 1.5 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ [12] позволит увеличить предельную мощность до ~ 10 кВт.

Отметим, что уменьшение длины и поглощения магнитоактивных элементов приведет к одинаковому уменьшению не только поляризационных, но и фазовых искажений. Следовательно, с помощью предлагаемых ИФ можно не только эффективно развязать излучение мощностью до 10 кВт, но и сохранить его оптическое качество.

5. Заключение

При мощности 750 Вт поляризационные искажения в ИФ (апертура 20 мм) с компенсацией термонаведенных поляризационных и фазовых искажений лазерного излучения уменьшены в 11 раз. Степень изоляции составила 24 дБ и ограничивалась лишь качеством кристаллов TGG. Согласно теоретическим оценкам данный ИФ способен обеспечить надежную изоляцию излучения при мощности до 2 кВт. Модернизация магнитной системы, уменьшение рабочей апертуры ИФ до 10 мм и использование кристаллов TGG с меньшим коэффициентом поглощения позволят создать ИФ для излучения мощностью до 10 кВт.

1. Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **30**, 147 (2000).
2. Mueller G., Amin R.S., Guagliardo D., McFeron D., Lundock R., Reitze D.H., Tanner D.B. *Classical and Quantum Gravity*, **19**, 1793 (2002).
3. Khazanov E.A., Andreev N.F., Mal'shakov A.N., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Zelenogorsky V.V., Ivanov I., Amin R.S., Mueller G., Tanner D.B., Reitze D.H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 1500 (2004).
4. Zelenogorsky V.V., Kamenetsky E.E., Shaykin A.A., Palashov O.V., Khazanov E.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5975**, 59750I-1 (2006).
5. Zelenogorsky V., Palashov O., Khazanov E. *Opt. Commun.* (to be published).
6. Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **26**, 59 (1999).
7. Khazanov E.A., Kulagin O.V., Yoshida S., Tanner D., Reitze D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 1116 (1999).
8. Андреев Н.Ф., Палашов О.В., Потемкин А.К., Райтци Д.Х., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **30**, 1107 (2000).
9. Nicklaus K., Daniels M., Hohn R., Hoffmann D., in *Advanced Solid-State Photonics* (Incline Village, Nevada, USA, 2006).
10. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л.: Машиностроение, 1986).
11. Barnes N.P., Petway L.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **9**, 1912 (1992).
12. Ivanov I.A., Bulkanov A.M., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V., Tsvetkov V.B., Popov P.A. *Proc. Int. Conf. on High Power Laser Beams* (N.Novgorod, 2006).