

Криогенный изолятор Фарадея

Д.С.Железнов, В.В.Зеленогорский, Е.В.Катин, И.Б.Мухин, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов

Описан изолятор Фарадея, в котором тепловые эффекты подавлены за счет охлаждения до азотных температур. Приведены принципиальная схема, основные характеристики и модификации устройства. Экспериментально исследована степень изоляции при субкиловаттном уровне средней мощности лазерного излучения. Показана возможность использования изолятора при мощности в десятки киловатт.

Ключевые слова: изолятор Фарадея, термонаведенная деполяризация, Sm–Co-магниты, Nd–Fe–B-магниты, лазеры с высокой средней мощностью, охлаждение жидким азотом.

1. Введение

В связи с постоянным увеличением средней мощности излучения как импульсно-периодических, так и непрерывных лазеров, все более актуальной представляется проблема усовершенствования оптических устройств, а ключевым требованием становится подавление термонаведенных эффектов, возникающих из-за поглощения излучения. К устройствам, подверженным тепловому самовоздействию из-за относительно высокого (10^{-3} – 10^{-2} см⁻¹ [1–7]) поглощения в магнитооптических элементах (МОЭ), изготовленных из кристалла TGG, относятся изоляторы Фарадея (ИФ). Поглощение излучения приводит к термонаведенной деполяризации [8], которая зависит от мощности лазерного излучения и может значительно ухудшить степень изоляции – важнейшую характеристику ИФ. В мощных лазерах именно термонаведенная деполяризация определяет степень изоляции, поскольку так называемая холодная деполяризация, связанная с неидеальностью МОЭ и с неоднородностью магнитного поля, как правило, мала ($\sim 10^{-4}$).

Существует несколько способов уменьшения термонаведенной деполяризации в МОЭ. Разбиение элемента на тонкие диски, охлаждаемые потоком газа через оптическую поверхность [9, 10], приводит к существенному уменьшению поперечного градиента температуры, а значит, и термонаведенной деполяризации. Компенсация термонаведенной деполяризации [8, 11–16] (для чего один МОЭ заменяют на два, между которыми находится взаимный оптический элемент) позволяет частично компенсировать искажения, возникшие при прохождении излучения через первый МОЭ, искажениями во втором МОЭ. Созданные на основе таких схем ИФ способны обеспечивать надежную развязку при мощности проходящего излучения киловаттного уровня [17]. В настоящей работе рассматривается другой подход к уменьшению

термонаведенной деполяризации – охлаждение МОЭ и магнитной системы до температуры кипения жидкого азота.

Охлаждение ИФ было предложено в 1967 г. [18] и мотивировалось отсутствием МОЭ хорошего качества, обеспечивающих степень изоляции более 20 дБ. Однако благодаря развитию технологий получения чистых МОЭ и высокоэнергетических ферромагнитных сплавов криогенный ИФ на долгое время был забыт. Сегодня охлаждение жидким азотом широко используется при создании мощных лазеров (для улучшения термооптических свойств [19], увеличения коэффициента усиления активных элементов [20, 21] и т.д.) и не кажется слишком сложным. В то же время очень привлекательно выглядит возможность существенного укорочения МОЭ (и, следовательно, уменьшения паразитных тепловых эффектов в нем) за счет роста как постоянной Верде в парамагнитных МОЭ [18, 22–26], так и поля постоянных магнитов [25, 27, 28]. Отметим, что охлаждение МОЭ приводит и к уменьшению холодной деполяризации [25]. ИФ с охлаждаемым до азотных температур вращателем был назван криогенным изолятором Фарадея (КИФ), и работы по его созданию были возобновлены [25, 29]. Теоретические оценки показали, что КИФ способен работать при максимальной мощности лазерного излучения до 50 кВт [29].

В настоящей работе описываются принципиальная схема и основные характеристики КИФ, а также ряд усовершенствований устройства. Экспериментально исследуются температурная зависимость магнитного поля КИФ для ферромагнитных сплавов Nd–Fe–B и Sm–Co и зависимость степени изоляции от мощности лазерного излучения. Обсуждаются полученные результаты и ближайшие перспективы создания КИФ на средней мощности лазерного излучения десятки киловатт.

2. Криогенный изолятор Фарадея

2.1. Принципиальная схема

Принципиальная схема криогенного изолятора Фарадея приведена на рис. 1, а. КИФ представляет собой вращатель Фарадея на постоянных магнитах 1, размещен-

Д.С.Железнов, В.В.Зеленогорский, 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: steel@sandy.ru

Поступила в редакцию 12 ноября 2009 г.

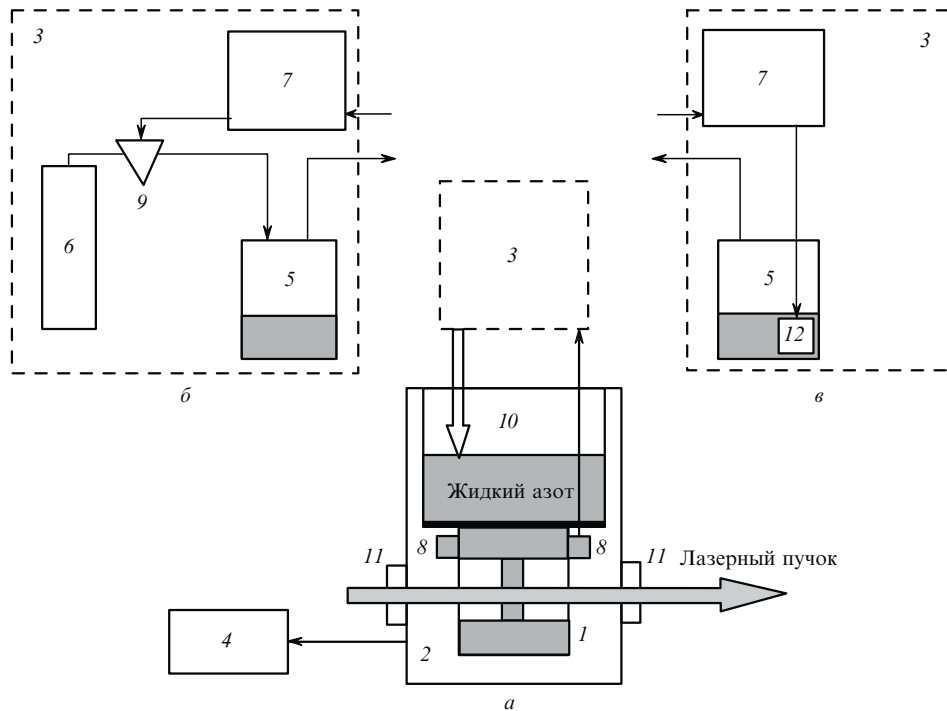


Рис.1. Принципиальная схема КИФ:

1 – вращатель Фарадея; 2 – оптический криостат; 3 – система охлаждения; 4 – форвакуумный насос; 5 – сосуд Дьюара; 6 – газовый баллон; 7 – персональный компьютер; 8 – термодатчики; 9 – электромагнитный клапан; 10 – азотный танк; 11 – окна; 12 – электрический нагревательный элемент.

ный внутри автоматизированной криогенной системы (АКС), который состоит из оптического криостата 2, системы охлаждения 3 и форвакуумного насоса 4 (марка НВПР-5ДМ). Система охлаждения 3 (рис.1,б) представляет собой сосуд Дьюара 5 с жидким азотом, поступающим в криостат под давлением газообразного азота из баллона 6. Управление процессом охлаждения осуществляется посредством персонального компьютера 7 с оригинальной программой, считывающей показания измеряющих температуры датчиков 8 через аналого-цифровой преобразователь и выдающей управляющий сигнал на электромагнитный клапан 9, который регулирует подачу газа в сосуд Дьюара.

Криостат 2 представляет собой алюминиевый корпус с двумя съемными фланцами из нержавеющей стали – верхним и нижним. К верхнему фланцу на четырех трубках подвешен азотный танк 10 общим объемом 3.2 л, в который подается жидкий азот. Верхние части трубок являются портами для заливки хладагента. В нижней части азотного танка расположен геттер (поглотитель), поддерживающий давление в криостате менее 8×10^{-4} Тор при $T < 100$ К. В качестве поглощающего вещества используется активированный уголь. Азотный танк сделан из нержавеющей стали, за исключением дна, выполненного из меди толщиной 12 мм. Вращатель Фарадея 1 находится в тепловом контакте с наружной стороной дна танка 10. В корпусе криостата имеются четыре порта, на два из которых установлены кварцевые окна 11 толщиной 10 мм (большая толщина позволяет избежать прогиба окон под действием атмосферного давления и вызванных этим поляризационных искажений излучения), а на два других – вакуумный переходник для подключения вакуумметра и электрический разъем для считывания показаний с термодатчиков 8.

2.2. Основные характеристики АКС

Управление охлаждением рабочего объема криостата осуществляется при помощи оригинального программного кода, который, обрабатывая показания термодатчиков, выдает управляющий сигнал на регулирующий подачу хладагента электромагнитный клапан. Время, на которое открывается клапан, не изменяется в процессе охлаждения и составляет 200 мкс. Управляющий код через каждые 3 с рассчитывает период P_i открывания регулирующего клапана; для расчета используется известный [30] принцип пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования температуры. В соответствии с этим принципом искомая величина является суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально разности текущей температуры криостата T_i и температуры кипения азота T_{ng} , второе пропорционально интегралу отклонения текущей температуры от расчетной температурной зависимости T_i^{theor} и третье пропорционально разнице производных текущей и расчетной температур:

$$P_i = K_1(T_i - T_{ng}) + K_2 \sum_{n=1}^i (T_n - T_n^{theor}) + K_3[(T_{i-1}^{theor} - T_{i-1}) - (T_i^{theor} - T_i)], \quad (1)$$

где K_1 , K_2 , K_3 – коэффициенты пропорциональности; P_i измеряется в секундах.

Для исследования поведения постоянных магнитов был реализован широкий спектр режимов охлаждения. В результате АКС позволяет достичь температуры менее 90 К за времена от нескольких (~ 8) часов до нескольких (2.5–3) суток по заранее заданной функции температуры рабочей области криостата от времени (функции Лоренца, Гаусса и т. д.). В процессе охлаждения точность «по-

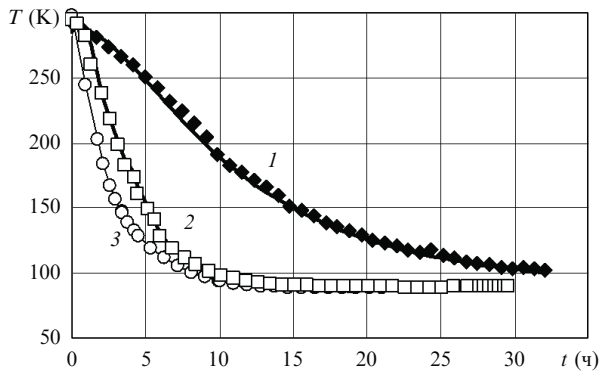


Рис.2. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости температуры КИФ от времени при использовании АКС с газовым баллоном (1), с электрическим нагревателем (2) и с квази-прерывным режимом подачи жидкого азота (3).

падения» в температуру T_i^{theor} не хуже 10 К. При выходе на стационар изменения температуры на протяжении 7 ч не превысили 2 К.

В экспериментах мы использовали температурную зависимость в виде функции Лоренца:

$$T_i^{\text{theor}} = T_{\text{ng}} + \frac{T_0 - T_{\text{ng}}}{1 + (t_i/\tau)^2}, \quad (2)$$

где t_i – текущий момент времени; τ – характерное время изменения температуры; T_0 – комнатная температура. При $\tau = 11.1$ ч, $K_1 = 3.8$, $K_2 = 50$, $K_3 = 7$, $T_{\text{ng}} = 78$ К, $T_0 = 293$ К характерное время охлаждения системы до $T = 100$ К составило ~ 30 ч (рис.2, кривая 1).

2.3. Модификации КИФ

Для уменьшения габаритных размеров КИФ была предпринята успешная попытка отказаться от самой громоздкой части АКС – газового баллона 6 (см. рис.1,б). Идея реконструкции системы охлаждения (рис.1,б) состояла в создании избыточного давления в сосуде Дьюара 5. При помощи электрического нагревателя 12 жидкий азот испарялся внутри сосуда и под действием избыточного давления подавался в переливную трубку. Мощность нагревателя 12 (4 Вт) была достаточной для создания избыточного давления и гарантировала безопасность при полном испарении жидкого азота на длительное (около суток) время.

Управление нагревателем также осуществлялось программным кодом по формуле (1), однако параметр продолжительности подачи азота (200 мкс) стал иметь смысл параметра продолжительности включения нагревателя. Поскольку процесс кипения азота гораздо более инерционен, продолжительность работы нагревателя была увеличена до 1 с. Кроме того, такая конструкция АКС при каждом новом старте процесса охлаждения требовала включения нагревателя на 23 мин для создания избыточного давления в сосуде Дьюара, достаточного для охлаждения системы переливных трубок. На рис.2 приведена экспериментальная временная зависимость температуры КИФ с характерным временем охлаждения системы ~ 10 ч (кривая 2). При этом параметры программного кода были таковы: $\tau = 3.7$ ч, $K_1 = 0.33$, $K_2 = 50$, $K_3 = 0.7$. Точность совпадения экспериментальных температур с рассчитанными по формуле (2) увеличилась до 4 К. Отметим, что обе модификации АКС (с

газовым баллоном и с электрическим нагревателем) способны обеспечить одинаково широкий спектр режимов управляемого охлаждения как по продолжительности выхода на рабочую температуру, так и по форме зависимости температуры криостата от времени. В экспериментах, описываемых в разд. 3, использовался вариант АКС с электрическим нагревателем.

Высокая стабильность поля магнитных систем из исследуемых сплавов по отношению к скорости охлаждения (см. разд. 3) позволяет задачу управления охлаждением рабочего объема АКС применительно к КИФ свести к задаче наиболее быстрого охлаждения криостата до азотных температур. Очевидно, наиболее быстрого охлаждения можно достичь при непрерывной подаче жидкого азота в криостат. Необходимо лишь не допустить переполнения азотного танка криостата. Для этого использовался поплавковый регулятор [31], фиксирующий заданный уровень жидкого азота в криостате. В один из четырех портов азотного танка помещался поплавок из ПВХ, в верхней части которого находился электрод, второй электрод размещался на некоторой высоте над верхним фланцем криостата, так, чтобы электрическая цепь замыкалась, когда уровень азота в танке достигал 12 см, и подача жидкого азота прекращалась, пока хладагент в криостате не испарялся настолько, что поплавок опускался, разрывая цепь. В таком режиме характерное время охлаждения системы КИФ составило ~ 8 ч (рис.2, кривая 3).

3. Измерение магнитного поля

3.1. Схема эксперимента

Схема экспериментальной установки, на которой посредством измерения угла поворота плоскости поляризации излучения исследовалась температурная зависимость магнитного поля, приведена на рис.3,а.

Непрерывное линейно поляризованное излучение одномодового иттербиевого волоконного лазера 1 (IPG Photonics) на длине волны 1076 нм служило зондирующим излучением. Лазерный пучок диаметром 3 мм и мощностью 0.5 Вт под малым углом к нормали заводился через вакуумное окно 3 в криостат 2 и попадал на МОЭ 4, помещенный в поле магнитной системы 5. В качестве МОЭ использовался кристалл TGG с ориента-

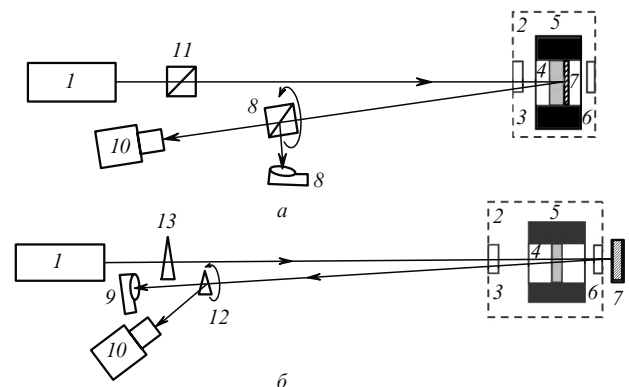


Рис.3. Схема измерений угла поворота плоскости поляризации и степени изоляции КИФ:

1 – иттербиевый волоконный лазер; 2 – криостат; 3, 6 – окна криостата; 4 – МОЭ; 5 – магнитная система; 7 – зеркало; 8, 11 – призмы Глана; 9 – поглотитель; 10 – измеритель мощности (CCD-камера); 12, 13 – клинья из исландского шпата.

цией [001], диаметром 9 мм и длиной 3.5 мм. На заднюю оптическую поверхность кристалла было нанесено зеркально отражающее покрытие (свыше 99.5%), что обеспечивало два прохода излучения через МОЭ. Пучок, вышедший из криостата, проходил через помещенную на лимбовый стол призму Глана 8 и делился на две части. Основная, мощная, часть пучка отводилась на поглотитель 9, а ортогонально поляризованная компонента попадала на измеритель мощности 10. Угол поворота плоскости поляризации φ пропорционален длине МОЭ L , постоянной Верде V и напряженности поля H , в которое был помещен МОЭ:

$$\varphi = VHL. \quad (3)$$

В процессе охлаждения из-за зависимости H и V от температуры [18, 25, 26, 29] угол φ изменялся; это изменение измерялось поворотом лимба оптического стола призмы Глана 8. Поскольку $V \sim 1/T$ [18, 26], а длина кристалла меняется пренебрежимо мало, несложно выделить температурную зависимость напряженности магнитного поля $H(T)$. Для удобства интерпретации $\varphi(T)$ и $H(T)$ нормировались на соответствующие значения при комнатной (293 К) температуре:

$$\varphi_{\text{norm}} = \frac{\varphi(T)}{\varphi(T = 293 \text{ К})}, \quad H_{\text{norm}} = \frac{H(T)}{H(T = 293 \text{ К})}.$$

В работе исследовались два ферромагнитных сплава: Sm–Co и Nd–Fe–В. Магниты из Nd–Fe–В в настоящее время наиболее распространены в ИФ, работающих при комнатной температуре. Выбор Sm–Co-магнитов, несмотря на то что они слабее, был обусловлен большей устойчивостью магнитного поля по отношению к скорости охлаждения магнитов и отсутствием вырождения оси легкой намагниченности [29] в диапазоне температур от комнатных до азотных.

3.2. Магниты из Sm–Co

Магнитная система 5 (рис.3,а) представляет собой набор колец. Исследовались две системы из сплава Sm–Co: производства НПО «Эрга» (общая длина 76 мм, внешний диаметр 70 мм, внутренний диаметр 12 мм, максимальная индукция магнитного поля 0.6 Тл) и производства екатеринбургского Института физики металлов (длина 89 мм, внешний диаметр 54 мм, внутренний диаметр 6 мм, максимальная индукция магнитного поля 0.3 Тл). Результаты измерений температурных зависимостей φ_{norm} и H_{norm} приведены на рис.4; видно, что при охлаждении магниты от разных производителей ведут себя одинаково. В частности, во всех случаях наблюдается стабильное увеличение магнитного поля на $\sim 20\%$. Это согласуется с тем, что температурный коэффициент напряженности магнитного поля $\alpha = H^{-1}(dH/dT)$ [27] для Sm-Co-магнитов имеет отрицательное значение. Расчетная температурная зависимость напряженности магнитного поля (рис.4, штриховые линии) построена для $\alpha = -1 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

В КИФ с Sm-Co-магнитами на протяжении 7 ч поддерживалась температура 89 К (погрешность 2 К), при этом угол поворота плоскости поляризации излучения изменялся меньше, чем на 1° .

3.3. Магниты из Nd–Fe–В

Магнитная система из сплава Nd–Fe–В производства НПО «Эрга» имела следующие габариты: длина

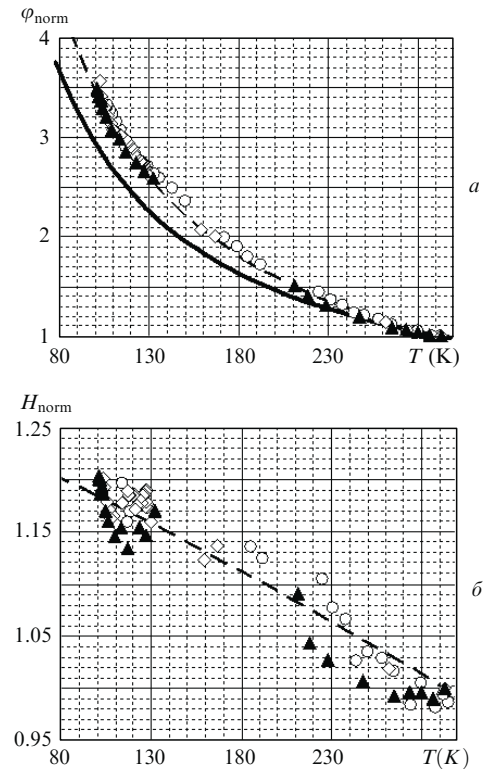


Рис.4. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости нормированного угла поворота плоскости поляризации (а) и напряженности магнитного поля (б) от температуры при использовании Sm–Co-магнитов производства екатеринбургского Института физики металлов (\diamond , \blacktriangle) и НПО «Эрга» (\circ). Сплошная кривая – теоретическая зависимость угла поворота при постоянном магнитном поле.

93 мм, внешний диаметр 70 мм, внутренний диаметр 15 мм. Максимальная индукция магнитного поля составляла 0.7 Тл. Результаты измерений приведены на рис.5. Расчетная температурная зависимость напряженности магнитного поля (рис.5, штриховые линии) построена для $\alpha = -1.3 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Представленные на рис.5 зависимости получены при разных способах подачи жидкого азота в криостат: с использованием системы охлаждения с газовым баллоном (треугольники), системы охлаждения с электрическим нагревателем (кружки) и заливки жидкого азота в криостат вручную (ромбы). Видно, что охлаждение магнитов до азотных температур не приводит к увеличению магнитного поля, а его напряженность воспроизводится в различных экспериментах с точностью не хуже 2%. Наличие экстремума на рис.5 делает привлекательным ИФ, работающий при температурах более 160 К. В таком ИФ АКС может быть заменена холодильной установкой, в которой хладагентом служит спирт, керосин или фреон 12 [32].

В КИФ, использующих Nd–Fe–В-магниты, температура 89 К была стабилизирована с точностью 1 К на протяжении 10 ч (см. рис.2, кривая 2). Изменения угла поворота поляризации при этом составили $\sim 0.5^\circ$.

4. Измерение степени изоляции КИФ

Схема эксперимента по измерению степени изоляции КИФ приведена на рис.3,б. Непрерывное линейно поляризованное излучение одномодового итербиевого воло-

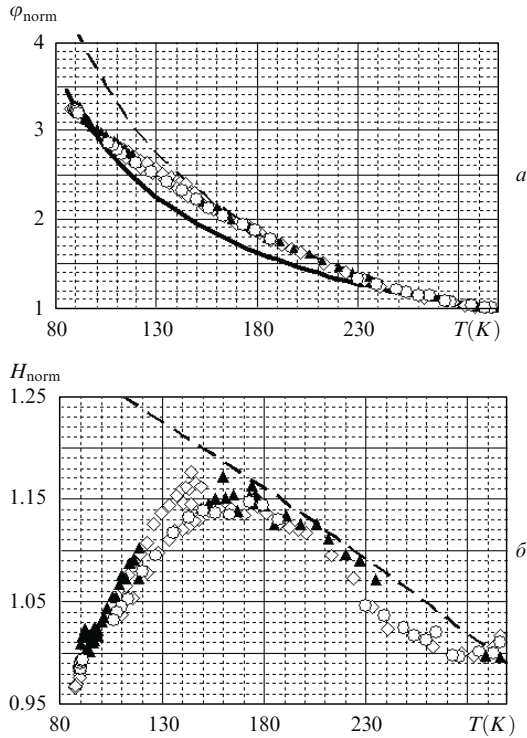


Рис.5. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости нормированных угла поворота плоскости поляризации (а) и напряженности магнитного поля (б) от температуры при использовании Nd–Fe–В-магнитов и заливке азота вручную (◊), с АКС с газовым баллоном (▲) и с электрическим нагревателем (○). Сплошная кривая – теоретическая зависимость при постоянном магнитном поле.

конного лазера *I* на длине волны 1076 нм (IPG Photonics) служило греющим и зондирующим излучением одновременно. Максимальная мощность лазера составляла 300 Вт. Излучение под малым углом заводилось через вакуумное окно 3 в криостат 2 и попадало на МОЭ 4 (TGG, [001], диаметр 12.8 мм, длина 8.1 мм), помещенный в поле магнитной системы 5 из Nd–Fe–В. Поскольку при значительном тепловыделении в МОЭ существенным становится отвод тепла, мы исследовали различные способы крепления кристалла TGG в медную втулку при помощи индия. В первом варианте боковая поверхность кристалла оборачивалась индиевой фольгой толщиной 150 мкм, после чего кристалл зажимался в медную цапговую втулку. Во втором – для улучшения теплового контакта кристалл – индиевая фольга на боковую поверхность TGG методом вакуумного испарения напылялся слой индия толщиной ~1 мкм. В третьем варианте, наиболее эффективном, МОЭ был впаян боковой поверхностью в медную втулку, а в качестве припоя использовался индий.

После выхода из криостата через окно 6 пучок излучения попадал на глухое зеркало 7, после отражения от которого его основная часть возвращалась в криостат и второй раз проходила через МОЭ. Таким образом, суммарная мощность *P* излучения, проходящего через МОЭ, изменялась в диапазоне 0–600 Вт. Нагрев МОЭ из-за поглощения приводил к термонаведенной деполяризации излучения. Угол между падающим и отраженным от зеркала 7 пучками был менее 5°. Вышедшее из криостата 2 излучение делилось клином 12 из исландского шпата. Основная часть излучения мощностью *P*₂ отводилась на

охлаждаемый водой поглотитель 9, а ортогонально поляризованная компонента мощностью *P*₁ направлялась на измеритель мощности 10.

Под деполяризацией γ мы понимаем отношение

$$\gamma = \frac{P_1}{P_1 + P_2}, \tag{4}$$

а степень изоляции ИФ *I*, измеряемую в децибелах, определяем как

$$I = 10 \lg \frac{1}{\gamma}. \tag{5}$$

Отметим, что при одних и тех же параметрах излучения величина γ может определяться либо только тепловыми эффектами, либо холодной деполяризацией (в зависимости от оптического качества МОЭ).

Результаты измерений зависимости деполяризации от поглощенной мощности греющего излучения представлены на рис.6. При комнатной температуре и поглощенной мощности *P*_{abs} < 0.4 Вт деполяризация целиком определяется холодной деполяризацией в кристалле. При *P*_{abs} = 0.5 – 1 Вт более существенной становится термонаведенная деполяризация, и ее величина (рис.6, квадраты) хорошо согласуется с теоретическими расчетами [8, 12, 24]. При охлаждении ИФ до температуры 87 К (рис.6, кружки) термонаведенная деполяризация уменьшается, и при поглощенной мощности до 1.5 Вт степень изоляции устройства полностью определяется уровнем холодной деполяризации. Последняя при охлаждении увеличивается, видимо вследствие дополнительных напряжений, возникающих в кристалле из-за различия в коэффициентах теплового расширения меди и TGG. При дальнейшем увеличении поглощенной мощности степень изоляции уменьшается из-за влияния термонаведенной деполяризации, но остается больше 30 дБ при *P*_{abs} < 3 Вт.

Необходимо отметить, что для увеличения тепловой нагрузки в КИФ был использован кристалл TGG с высоким ($5 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$) коэффициентом поглощения. Поэтому поглощенная мощность 2.8 Вт (рис.6) соответствует лазерной мощности 600 Вт. Разумно предположить, что переход на кристалл с обычным поглощением ($(1.5 - 2) \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ [1, 6, 7]) позволит увеличить мощность управляемого КИФ лазерного пучка в ~3 раза, т. е. до 2кВт. В настоящее время ведутся работы по конструированию магнитной системы для КИФ, создающей поле

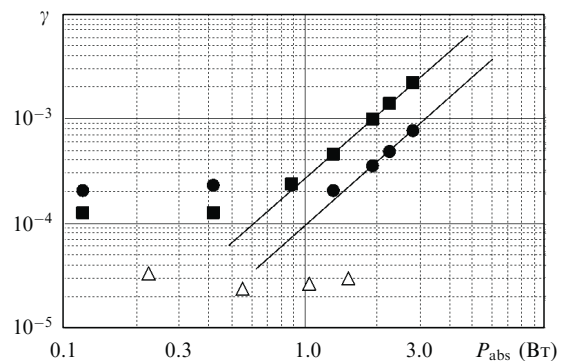


Рис.6. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости деполяризации от поглощенной в КИФ мощности излучения при комнатной температуре (■) и при температуре 87 К (●), а также уровень шумов измерительной схемы (△).

с магнитной индукцией свыше 2 Тл [33], что позволит укоротить МОЭ примерно в три раза (до 2.5–3 мм) и поднять мощность лазерного излучения до 5–6 кВт. Столь значительное укорочение кристалла даст возможность использовать дисковую геометрию МОЭ [9] и получить, согласно работе [29], дополнительное уменьшение термонаведенной деполяризации за счет торцевого теплоотвода в ~ 14 раз при аспектном отношении ~ 0.6 . Таким образом, реализовав эти шаги, можно рассчитывать на создание КИФ, обеспечивающего степень изоляции ~ 30 дБ при мощности лазерного излучения ~ 25 кВт.

5. Заключение

Исследованные КИФ на постоянных магнитах из Sm–Co и Nd–Fe–B показали приемлемую временную стабильность угла поворота плоскости поляризации при азотных температурах. При охлаждении магнитных систем имеет место рост напряженности создаваемого ими поля, причем в Sm–Co-магнитах – во всем исследуемом диапазоне температур ($T < 100$ К). В Nd–Fe–B-магнитах напряженность поля растет только до $T \sim 160$ К, при дальнейшем охлаждении она уменьшается и при рабочих температурах КИФ ($T < 100$ К) становится практически равной ее значению при комнатной температуре. Однако, несмотря на это, магниты из Nd–Fe–B, широко используемые в традиционных ИФ, являются более предпочтительными и для КИФ благодаря большей магнитной энергии и дешевизне. Описанные в работе модификации системы охлаждения КИФ (применение поплавкового регулятора и замена газового баллона нагревателем) позволили сделать КИФ более надежным и компактным.

Экспериментально достигнута степень изоляции КИФ более 30 дБ при поглощенной мощности лазерного излучения 2.5 Вт, что при хорошем качестве кристалла TGG соответствует мощности излучения 5 кВт. Оценки показывают, что переход к дисковой геометрии МОЭ с торцевым теплоотводом сохранит такую степень изоляции при мощности лазерного излучения в десятки киловатт. В настоящее время ведется работа по созданию КИФ с торцевым отводом тепла от МОЭ.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

- Northrop Grumman, <http://www.as.northropgrumman.com/>.
- Mansell J.D., Hennawi J., Gustafson E.K., Fejer M.M., Byer R.L., Clubley D., Yoshida S., Reitze D.H. *Appl. Opt.*, **40**, 366 (2001).
- Mueller G., Amin R.S., Guagliardo D., McFeron D., Lundoc R., Reitze D.H., Tanner D.B. *Classical and Quantum Gravity*, **19**, 1793 (2002).
- Khazanov E.A., Andreev N.F., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Mehl O., Reitze D.H. *Appl. Opt.*, **41**, 483 (2002).
- 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.A., Amin R.S., Mueller G., Tanner D.B., Reitze D.H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 1500 (2004).
- Mukhin I.B., Voitovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. *Opt. Commun.*, **282**, 1969 (2009).
- VIRGO-Collaboration. *Appl. Opt.*, **47**, 5853 (2008).
- Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **26**, 59 (1999).
- Мухин И.Б., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **34**, 973 (2004).
- Yasuhara R., Yamanaka M., Norimatsu T., Izawa Y., Kawashima T., Ikegawa T., Matsumoto O., Sekine T., Kurita T., Kan H., Furukawa H., in *Advanced Solid-State Photonics, Techn. Dig.* (Vienna: OSA, 2005, MB43).
- Nicklaus K., Daniels M., Hohn R., Hoffmann D., in *Advanced Solid-State Photonics, Techn. Dig.* (Incline Village, Nevada: OSA, 2006, MB7).
- Khazanov E., Andreev N., Palashov O., Poteomkin A., Sergeev A., Mehl O., Reitze D. *Appl. Opt.*, **41**, 483 (2002).
- Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **31**, 351 (2001).
- Khazanov E.A., Anastasiyev A.A., Andreev N.F., Voytovich A.V., Palashov O.V. *Appl. Opt.*, **41**, 2947 (2002).
- Khazanov E., Andreev N., Babin A., Kiselev A., Palashov O., Reitze D. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 99 (2000).
- Андреев Н.Ф., Палашов О.В., Потемкин А.К., Райтци Д.Х., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **30**, 1107 (2000).
- Войтович А.В., Катин Е.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **37**, 471 (2007).
- Padula C.F., Young C.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **3**, 493 (1967).
- Ripin D.J., Ochoa J.R., Aggarwal R.L., Fan T.Y. *Opt. Lett.*, **29**, 2154 (2004).
- Backus S., Bartels R., Thompson S., Dollinger R., Kapteyn H.C., Murnane M.M. *Opt. Lett.*, **26**, 465 (2001).
- Tokita S., Kawanaka J., Fujita M., Kawashima T., Izawa Y. *Appl. Phys. B*, **80**, 635 (2005).
- Barnes N.P., Petway L.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **9**, 1912 (1992).
- Davis J.A., Bunch R.M. *Appl. Opt.*, **23**, 633 (1984).
- Зарубина Т.В., Ким Т.А., Петровский Г.Т., Смирнова Л.А., Эдельман И.С. *Опт.-мех. пром.*, **11**, 33 (1987).
- Войтович А.В., Железнов Д.С., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **36**, 383 (2006).
- Валиев У.В., Кричик Г.С., Кругляшов С.Б., Левитин Р.З., Мукимов К.М., Орлов В.Н., Соколов Б.Ю. *ФТТ*, **24**, 2818 (1982).
- Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н., Гладышев П.А., Грацианов Ю.А., Зейн Е.Н., Кавалерова Л.А., Пятин Ю.М., Сасатунов Ю.С., Сергеев В.Г., Скоков А.Д., Сухоруков Р.Ю., Чернявская А.М. *Постоянные магниты: Справочник* (М.: Энергия, 1980).
- Ахиезер А.И., Ахиезер И.А. *Электромагнетизм и электромагнитные волны: Учебное пособие для вузов* (М.: Высшая школа, 1985).
- Zheleznov D.S., Mukhin I.B., Voitovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **43**, 451 (2007).
- Денисенко В. *Современные технологии автоматизации*, **4**, 66 (2006).
- Миронов К.А., Шипетин Л.И. *Автоматические регуляторы* (М.: Машгиз, 1961).
- Кошкин Н.Н., Сакун И.А., Бамбушек Е.М. *Холодильные машины* (Л.: Машиностроение, 1985).
- Palashov O.V., Voitovich A.V., Mukhin I.B., Khazanov E.A., in *CLEO/Europe and IQEC, Conf. Dig.* (Munich: OSA, 2009, CA1.6-mon).