

# Охлаждение и термостабилизация вращателей Фарадея в диапазоне температур 300–200 К при помощи элементов Пельтье

О.В.Палашов, И.В.Иевлев, Е.А.Перевезенцев, Е.В.Катин, Е.А.Хазанов

*Предложен и экспериментально продемонстрирован новый способ охлаждения и термостабилизации вращателей Фарадея при помощи элементов Пельтье. Схема термостабилизации магнитооптических элементов обеспечивает надежную работу устройства при поглощенной мощности  $\sim 2$  Вт, что соответствует мощности проходящего лазерного излучения 1.5 кВт. Результаты работы позволяют рассчитывать на высокую эффективность данного способа при лазерной мощности в десятки киловатт.*

*Ключевые слова:* эффект Фарадея, постоянные магниты, стабилизация температуры.

## 1. Введение

В связи с интенсивным развитием лазерной техники и ростом средней мощности как непрерывного, так и импульсно-периодического излучения становится актуальной задача уменьшения паразитных тепловых эффектов (термонаведенная деполяризация [1], тепловая линза [2]), возникающих в различных оптических элементах из-за поглощения лазерного излучения. Одним из таких устройств является вращатель Фарадея (ВФ), обладающий относительно высоким поглощением ( $10^{-3}$  см $^{-1}$  [3, 4]) в магнитооптических элементах (МОЭ). Существует несколько подходов к проблеме уменьшения термонаведенной деполяризации в МОЭ ВФ. В основе одного из них лежит идея вычитания фазового набега при помощи замены одного МОЭ, поворачивающего плоскость поляризации на  $45^\circ$ , на два 22.5-градусных МОЭ и взаимный оптический элемент между ними [1, 5]. Искажения, возникающие при прохождении через первый элемент, частично компенсируются при прохождении второго элемента.

Другой подход заключается в увеличении магнитного поля за счет использования в конструкции магнитной системы (МС) либо магнитопроводов [2], либо магнитов с неортогональной осью намагниченности [6], что позволяет сокращать длину МОЭ и соответственно уменьшать количество поглощенного тепла. Третий подход – это разбиение МОЭ на несколько тонких дисков, охлаждаемых через оптическую поверхность [7, 8]. Такая геометрия приводит к существенному уменьшению поперечного градиента температуры. Четвертый подход – охлаждение парамагнитного МОЭ до температуры жидкого азота [9–11]. Поскольку постоянная Верде в парамагнетиках обратно пропорциональна температуре [9, 12], а величина магнитного поля для некоторых ферромагнитных сплавов растет при охлаждении магнитной системы, можно также суще-

ственно уменьшить длину МОЭ. При этом дополнительно улучшается теплопроводность кристалла [13] и уменьшается холодная деполяризация в нем [9]. Однако данный способ достаточно дорогой и очень трудоемкий. Существенно уменьшить температуру МОЭ можно более простым способом – при помощи элементов Пельтье (ЭП). В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты по достижению температуры  $\sim 200$  К при использовании двух коммерчески доступных ЭП.

Все перечисленные методы позволяют достигать непрерывной лазерной мощности  $P_L \sim 1$  кВт (и более), сохраняя при этом высокую ( $\sim 30$  дБ) степень изоляции ВФ. Однако даже при меньших уровнях мощности наиболее распространенные на сегодняшний день первые два метода имеют существенный недостаток. Степень изоляции – главная характеристика ВФ – становится нестационарной из-за неизбежного и относительно высокого тепловыделения в МОЭ. Действительно, характерная длина МОЭ в мощных ВФ равна  $\sim 1$  см, поэтому выделяемая тепловая мощность в МОЭ при киловаттном уровне мощности лазера составляет  $\sim 1$  Вт. Выделяемое тепло, как правило, через втулки отводится на МС. В результате из-за зависимости от температуры постоянной Верде МОЭ и магнитных свойств МС угол поворота ВФ с течением времени уменьшается. Это приводит к ухудшению степени изоляции устройства. Характерное время установления квазистационарного режима, при котором угол поворота практически не изменяется, зависит от многих факторов (теплоотвод от МОЭ, геометрия и конструкция МС) и может составлять десятки минут. С помощью ЭП возможна термостабилизация МОЭ на заранее выбранной температуре независимо от величины тепловыделения, что может быть удобным при использовании ВФ в схемах с перестраиваемой лазерной мощностью.

## 2. Охлаждение и термостабилизация с помощью элементов Пельтье

Схема термостабилизации, приведенная на рис.1, состоит из элемента Пельтье 1, термодатчика 3 и блока управления 2. Теплоотвод с внешнего торца ЭП осуществляется с помощью охлаждаемого водой радиатора 5.

О.В.Палашов, И.В.Иевлев, Е.А.Перевезенцев, Е.В.Катин, Е.А.Хазанов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: palashov@appl.sci-nnov.ru; ererezentsev@gmail.com

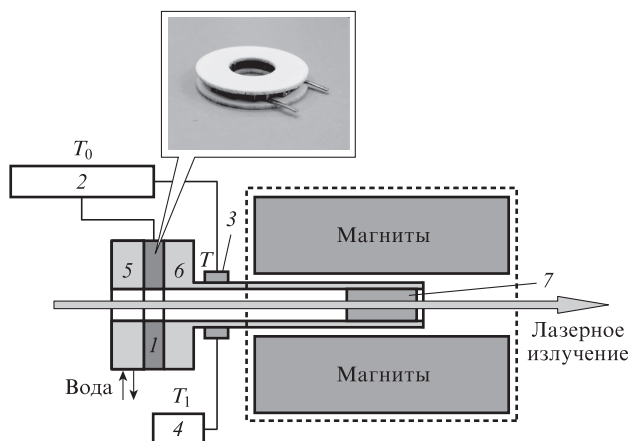


Рис.1. Схема термостабилизации:  
1 – элемент Пельтье; 2 – блок управления ЭП; 3 и 4 – термодатчики; 5 – охлаждаемый водой радиатор; 6 – медная втулка; 7 – МОЭ.

Внутренний торец прикреплен к медной втулке 6, на конце которой находится МОЭ 7, помещенный внутрь магнитной системы ВФ.

Принцип работы элемента Пельтье основан на термоэлектрическом эффекте, при котором происходит выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока в месте контакта двух (пары) разнородных проводников [14]; количество пар определяет мощность ЭП. В используемом ЭП (ТВ-38-1.0-1.5СНР, КРИОТЕРМ, С.-Петербург), содержащем 38 пар контактов, максимальная отводимая мощность составляет 9 Вт. Блок управления 2 представляет собой источник питания ЭП с возможностью управления мощностью теплоотода и подстройки (при помощи резистора с переменным сопротивлением) температуры «уставки»  $T_0$ . В качестве датчика температуры 3 использовался кремниевый транзистор 2N5551 в диодном режиме, имеющий линейную зависимость напряжения от температуры (2.6 мВ/град).

Термостабилизация осуществляется следующим образом. Показания термодатчика 3, измеряющего температуру втулки  $T$ , поступают на блок управления и сравниваются с температурой  $T_0$ . При выполнении условия  $T > T_0$  на ЭП подаются прямоугольные импульсы напряжения с заданной амплитудой  $U_0$ . Длительность импульсов  $\tau$  могла изменяться в диапазоне  $(0.1-0.5)\tau_0$  ( $\tau_0 \sim 1$  мс) и определялась разностью температур  $T - T_0$ . Результат работы схемы термостабилизации анализировался по показаниям температуры  $T_1$  термодатчика 4 (рис.1). Отметим, что  $T_1$  – температура не самого МОЭ, а точки на медной втулке, расположенной на расстоянии  $\sim 3$  см от него, так как разместить термодатчик 4 (его линейный размер  $\sim 5$  мм) внутри МС ВФ (зазор  $\sim 0.5$  мм) технически невозможно. Однако, согласно проведенным расчетам, разность температур между местом крепления датчика 4 и местом расположения МОЭ ( $\sim 0.1$  °С) не превышает погрешности измерений температуры.

Схема охлаждения оптического элемента приведена на рис.2. Оптический элемент 6 припаивался индием к медной пластине 5, которая охлаждалась с помощью ЭП 4. «Горячая» сторона ЭП 4 (FROST-74, КРИОТЕРМ, С.-Петербург, максимальная разность температур 74 К и отводимая мощность 65 Вт) охлаждалась посредством ЭП 3 (DRIFT-0.6, максимальная разность температур 69 К, отводимая мощность 220 Вт), для охлаждения «горячей» стороны которого использовался водяной радиатор 1. Мощ-

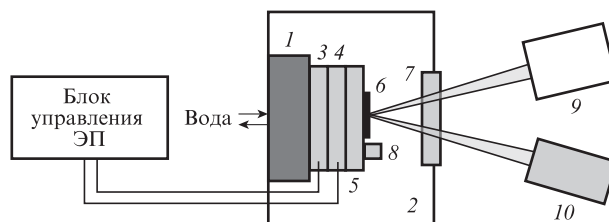


Рис.2. Схема охлаждения оптического элемента:  
1 – водяной радиатор; 2 – вакуумная камера; 3 и 4 – элементы Пельтье; 5 – медная пластина; 6 – оптический элемент; 7 – окно с просветляющим покрытием; 8 – термодатчик; 9 – «греющий» лазер; 10 – поглотитель.

ность ЭП плавно регулировалась с помощью блока управления. При использовании только одного из указанных ЭП удавалось получить охлаждение до 235–240 К. Дополнительное понижение температуры оптического элемента требует применения двух ЭП. Существенно понизить температуру оптического элемента путем простого увеличения количества ЭП не удастся, поскольку разность температур между горячей и холодной гранями элемента стремится к нулю при уменьшении его средней температуры. Оптический элемент помещался в вакуумную камеру 2, чтобы на нем не образовывался конденсат. Через окно с просветляющим покрытием 7 происходил нагрев оптического элемента непрерывным излучением лазера 9. Температура медной пластины измерялась термодатчиком 8.

### 3. Экспериментальные результаты

Схема экспериментальной установки, на которой исследовалась термостабилизация ВФ, представлена на рис.3. Излучение одномодового иттербиевого волоконного лазера 1 на длине волны 1076 нм с максимальной мощностью  $P_L = 330$  Вт (IPG Photonics) использовалось в качестве греющего и зондирующего одновременно. Линейно поляризованное излучение после шпатового клина 2 проходило через МОЭ ВФ 3, термостабилизированного с помощью ЭП 4. Далее основная часть мощности излучения отражалась глухим зеркалом 8, проходила второй раз через МОЭ и отраженная от поляризатора 7 попадала на поглотитель 6. Такая схема позволяет увеличить максимальный нагрев МОЭ в два раза. Часть лазерного излучения, прошедшая сквозь зеркало 8, дополнительно ослаблялась на кварцевом клине 5, проходила призму Глана 9, установленную на лимбовом столе, и регистрировалась CCD-камерой 10. Нагрев МОЭ вызывает уменьшение постоянной Верде, что приводит к уменьшению угла поворота ВФ и, следовательно, к увеличению мощности излучения деполаризованной компоненты  $P_d$ , регистрируемой CCD-камерой.

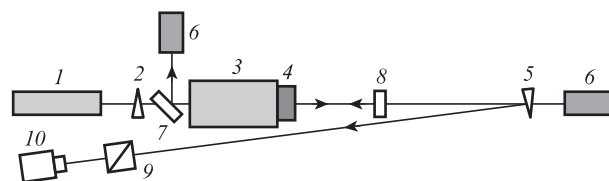


Рис.3. Схема экспериментальной установки:  
1 – волоконный иттербиевый лазер; 2 – шпатовый клин; 3 – вращатель Фарадея; 4 – система термостабилизации; 5 – кварцевый клин; 6 – поглотитель; 7 – поляризатор; 8 – зеркало; 9 – призма Глана; 10 – CCD-камера.

Эксперимент проводился в два этапа. Сначала нагрев МОЭ лазерным излучением, регистрируемый измерителем температуры 4 (рис.1), осуществлялся при выключенной схеме термостабилизации. На втором этапе исследовался режим термостабилизации МОЭ. На блоке управления (рис.1) задавалась температура уставки, удовлетворяющая условию  $T_0 < T_c$  ( $T_c \sim 20^\circ\text{C}$ ). Поэтому с блока управления на ЭП подавалось напряжение  $U(t)$ , в результате чего температура МОЭ  $T_1$  уменьшалась и стабилизировалась. Лазерное излучение мощностью  $P_L$  поступало на ВФ (рис.3) в момент времени  $t = 0$ .

Экспериментально исследовались три вращателя Фарадея. Первым был исследован ВФ, построенный по традиционной схеме – на одном МОЭ, выполненном из магнитооптического стекла МОС-04 (поглощение  $\alpha = 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , длина  $L = 15 \text{ мм}$ , диаметр  $d = 10 \text{ мм}$ ) [3, 4], с ЭП круглой формы. Результаты измерений приведены на рис.4 (треугольники). При выключенной схеме термостабилизации ( $\Delta$ ) и  $P_L = 330 \text{ Вт}$  (мощность тепловыделения  $\sim 0.5 \text{ Вт}$ ) МОЭ нагревался на  $7^\circ\text{C}$  за 30 мин. Включенная термостабилизация с температурой уставки  $T_0 = 20.5^\circ\text{C}$  ( $\Delta$ ) за те же 30 мин существенно уменьшала нагрев:  $T_1 = 21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; при температуре уставки  $18^\circ\text{C}$  ( $\blacktriangle$ ) температура МОЭ стабилизировалась при  $T_1 = 18.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ .

В качестве второго экспериментального образца исследовался широкоапертурный ВФ, работающий по схеме с компенсацией термодеполаризации [1, 5]. В качестве МОЭ использовались два кристалла тербий-галлиевого граната (ТГГ) ( $d = 30 \text{ мм}$ , суммарная длина  $L = 22 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 2.7 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , мощность тепловыделения  $\sim 2 \text{ Вт}$  при  $P_L = 330 \text{ Вт}$ ), которые размещались на концах медных втулок, помещенных с противоположных сторон ВФ. Стабилизация температуры осуществлялась ЭП квадратной формы марки ТВ-31-1.4-1.15 того же производителя (максимальная отводимая мощность  $\sim 19 \text{ Вт}$ ). На каждую втулку  $b$  (рис.1) с противоположных сторон относительно оси симметрии крепились по два ЭП. Выбор ЭП другого типа обусловлен отсутствием серийно выпускаемых ЭП с внутренним отверстием более 20 мм. Без термостабилизации МОЭ нагревался за 30 мин на  $5^\circ\text{C}$  (рис.4, белые квадраты), а при термостабилизации ( $T_0 = 17^\circ\text{C}$ ) температура МОЭ оставалась неизменной в течение всего времени наблюдения (рис.4, серые квадраты).

В рассмотренных выше случаях термостабилизация МОЭ осуществлялась при помощи ЭП, охлаждаемых водой. Водяное охлаждение ЭП выбрано из соображений

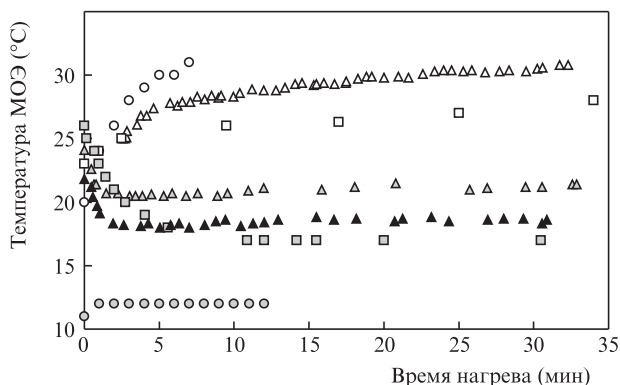


Рис.4. Зависимость температуры МОЭ от времени его нагрева в ВФ с круглым ЭП (треугольники), прямоугольным ЭП (квадраты) и без ЭП с водяным охлаждением (кружки) в режиме без термостабилизации (белые точки) и с термостабилизацией (темные точки).

удобства. Такое решение не было принципиальным, и водяное охлаждение могло быть заменено на воздушное. Однако осуществить термостабилизацию МОЭ можно и без ЭП, используя, например, только водяное охлаждение. Для этого был проведен эксперимент на ВФ, выполненном по схеме с компенсацией термодеполаризации при световой апертуре 20 мм. В качестве МОЭ использовались два кристалла ТГГ (суммарная длина  $L = 20 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 1.7 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , мощность тепловыделения  $\sim 2 \text{ Вт}$  при  $P_L = 612 \text{ Вт}$ ). Торцевое охлаждение медных втулок (рис.1) осуществлялось с помощью водоохлаждаемых радиаторов (температура воды  $\sim 10^\circ\text{C}$ ) с двух сторон корпуса ВФ.

В режиме без термостабилизации (рис.4, белые кружки) МОЭ быстро нагревается (на  $10^\circ\text{C}$  за 5 мин). Уменьшение постоянной Верде от температуры из-за нагрева МОЭ приводит к уменьшению угла поворота ВФ. На рис.5 показана экспериментальная зависимость отклонения угла поворота плоскости поляризации  $\Delta\varphi$ , регистрируемая с помощью призмы Глана и CCD-камеры (рис.3). Для этого призма Глана вращается на некоторый угол  $\theta$ , при котором величина деполаризации, измеряемой CCD-камерой, минимальна в режиме без термостабилизации (рис.5, белые кружки) и с термостабилизацией (рис.5, серые кружки). При этом поперечная структура пучка имеет ярко выраженную форму мальтийского креста с осями симметрии, повернутыми на угол  $\theta/2$ . В режиме термостабилизации температура МОЭ при включении лазера незначительно увеличивается за первую минуту и затем термостабилизируется (рис.4, серые кружки). Исходя из данных об изменении температуры (рис.4) и учитывая температурную зависимость постоянной Верде, можно рассчитать  $\Delta\varphi$  в режиме без термостабилизации (рис.5, белые треугольники) и с термостабилизацией (рис.5, серые треугольники). На рис.5 также показана зависимость от времени степени изоляции  $I = 10 \lg(P_L/P_D)$  для измеренного угла поворота плоскости поляризации  $\Delta\varphi$  (рис.5, белые квадраты).

Модельные эксперименты по охлаждению при помощи ЭП проводились на дисковом активном элементе  $b$  (рис.2) из кристалла Yb:ИАГ (содержание Yb 10%) толщиной 400 мкм и диаметром 10 мм. На одну сторону элемента было нанесено диэлектрическое просветляющее покрытие, а на другую – зеркальное. Через окно с просветляющим покрытием происходил нагрев оптического элемен-

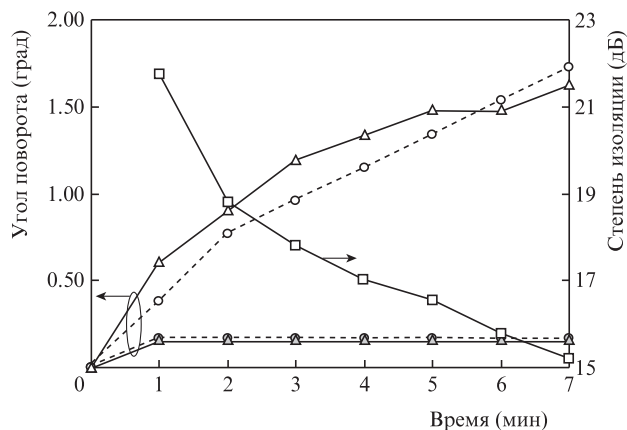


Рис.5. Экспериментальные (кружки) и расчетные (треугольники) зависимости отклонения угла поворота плоскости поляризации  $\theta$  в режиме без термостабилизации (белые точки) и с термостабилизацией (серые точки) и расчетная зависимость степени изоляции  $I$  (квадраты) от времени нагрева МОЭ лазерным излучением мощностью 612 Вт.

та непрерывным излучением диодного лазера 9 (JOLD-75-CPXF-2P, JENOPTIK Laserdiode, Германия) на хорошо поглощаемой длине волны 940 нм. При выключенном лазере температура медной пластины 5 уменьшалась до 210 К. Включение лазера на полную мощность 70 Вт (что соответствует поглощенной мощности 25 Вт) приводило к увеличению минимальной температуры, при которой оптический элемент может термостабилизироваться, до 240 К. При промежуточной тепловой нагрузке зависимость минимальной температуры от поглощенной мощности можно считать линейной.

Охлаждение до 210 К благодаря укорочению МОЭ и улучшению термооптических констант, согласно [11], позволяет увеличить мощность проходящего через ВФ излучения примерно в два раза. Поглощенная мощность для рассмотренных выше ВФ составляет  $\sim 4$  Вт. Такое тепловыделение практически не сказывается на разности температур, создаваемой используемой парой ЭП.

#### 4. Заключение

В работе продемонстрирован эффективный способ охлаждения и термостабилизации магнитооптических элементов вращателей Фарадея при помощи элементов Пельтье. Экспериментально реализована стабильная работа ВФ при комнатных температурах и уровне поглощенной мощности  $\sim 2$  Вт в МОЭ из ТГГ. Использование более чистых кристаллов (сегодня коммерчески доступны являются кристаллы ТГГ с  $\alpha < 7 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ ) позволит увеличить непрерывную лазерную мощность примерно до  $\sim 1.5$  кВт.

Используя два ЭП, мы экспериментально получили термостабилизацию и охлаждение оптического элемента в диапазоне температур 300–210 К. Охлаждение до 210 К дает увеличение мощности лазерного излучения в два раза (до 3 кВт). Модельный эксперимент по охлаждению и термостабилизации оптического элемента из Yb:ИАГ в диа-

пазоне температур 300–240 К позволяет рассчитывать на эффективную работу ЭП при мощности тепловыделения до 25 Вт, что соответствует мощности лазерного излучения  $\sim 20$  кВт.

Термостабилизация МОЭ при комнатных температурах осуществлялась двумя способами: при помощи охлаждения элементами Пельтье и водяного охлаждения. Охлаждение проточной водой – наиболее простой способ, но он имеет один недостаток – нерегулируемость температуры уставки  $T_0$ . Использование же замкнутого контура водяного охлаждения влечет за собой необходимость стабилизации  $T_0$ , например за счет использования чиллера. Термостабилизация МОЭ ВФ элементами Пельтье, как показали проведенные эксперименты, является более простым, дешевым и не менее надежным способом.

1. Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **29**, 59 (1999).
2. Mukhin I.B., Voitovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. *Opt. Commun.*, **282**, 1969 (2009).
3. Зарубина Т.В., Мальшаков А.Н., Пасманик Г.А., Потемкин А.К. *Оптический журн.*, **64**, 11 (1997).
4. Зарубина Т.В., Петровский Г.Т. *Оптический журн.*, **59**, 48 (1992).
5. Войтович А.В., Катин Е.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **37**, 471 (2007).
6. Миронов Е.А., Войтович А.В., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **41**, 71 (2011).
7. Мухин И.Б., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **34**, 973 (2004).
8. Yasuhara R., Kawashima T., Furukawa H. et al. *Proc. Intern. Symp. «Topical Problem of Nonlinear Wave Physics»* (St. Petersburg–N. Novgorod, 2005, p. 135).
9. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **36**, 383 (2006).
10. Железнов Д.С., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Войтович А.В. *IEEE J. Quantum Electron.*, **43**, 451 (2007).
11. Железнов Д.С., Зеленогорский В.В., Катин Е.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **40** (3), 276 (2010).
12. Davis J.A., Bunch R.M. *Appl. Opt.*, **23**, 633 (1984).
13. Slack G.A., Oliver D.W. *Phys. Rev. B*, **4**, 592 (1971).
14. Зеерер К. *Физика полупроводников* (М.: Мир, 1977, с. 121).