

Компенсация температурного дрейфа длины волны настройки акустооптического спектрофотометра

А.В.Виленский, Б.Г.Лысой, О.Б.Чердниченко

Показано, что для компенсации температурного изменения длины волны настройки акустооптических спектрофотометров целесообразно использовать опорный канал спектрофотометра, в котором в качестве реперных точек используются линии поглощения алюмоиттриевого граната с неодимом.

Ключевые слова: акустооптика, спектрофотометрия, температурный дрейф.

Акустооптические спектрофотометры [1] имеют ряд преимуществ перед классическими, однако не свободны от недостатков. Как было показано в работе [2], длина волны настройки такого спектрофотометра смещается при изменении температуры звукопровода акустооптического фильтра (АОФ). Так, в частности, при использовании коллинеарных АОФ на кристалле CaMoO_4 для длины волны $\lambda = 633$ нм вблизи комнатной температуры указанное относительное смещение

$$\xi_{\text{CaMoO}_4} = \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \approx 7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Длина волны настройки коллинеарных АОФ определяется по формуле

$$\lambda = V\Delta n/f, \quad (1)$$

где V – скорость акустической волны, распространяющейся в звукопроводе АОФ; $\Delta n = n_e - n_o$ – разность показателей преломления материала АОФ для необыкновенного и обыкновенного лучей света (далее мы будем называть ее двулучепреломлением); f – частота акустической волны. Частота f задается частотой подаваемого на пьезопреобразователь АОФ высокочастотного напряжения и может быть установлена и стабилизирована с высокой точностью. Однако величины V и Δn являются характеристиками материала звукопровода и зависят от его температуры, что и приводит к рассматриваемому температурному смещению длины волны настройки.

Стандартным способом уменьшения влияния температурной зависимости является термостабилизация чувствительного к температуре элемента. В настоящей работе предлагается более простой, на наш взгляд, способ компенсации температурной зависимости.

В спектрофотометре формируется опорный канал, в который помещается эталонная среда, имеющая узкую линию поглощения, положение которой слабо зависит от температуры среды. В качестве такой среды использовалась плоскопараллельная пластина из кристалла алю-

моиттриевого граната с неодимом АИГ: Nd^{3+} толщиной 3 мм.

Кристалл АИГ: Nd^{3+} был выбран по следующим причинам: он характеризуется широким набором узких линий поглощения (спектр пропускания АИГ: Nd^{3+} при комнатной температуре, а также длины волн минимумов пропускания ряда линий поглощения представлены на рис.1), он относительно доступен благодаря его широкому применению в качестве активной лазерной среды, а также, как показано в конце настоящей работы, в нем вблизи комнатной температуры относительное температурное смещение выбранной нами линии поглощения ($\lambda_0 = 795.5$ нм) удовлетворяет условию

$$\xi_{\text{YAG}} \ll \xi_{\text{CaMoO}_4}.$$

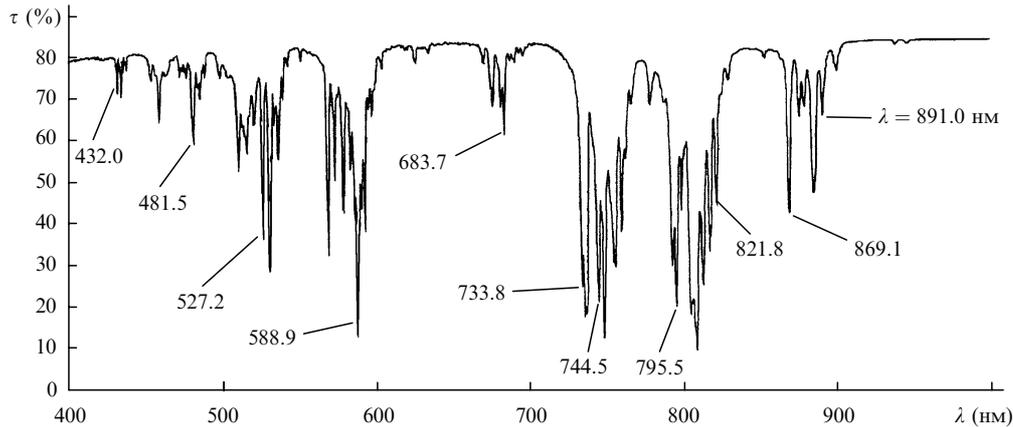
Функциональная схема спектрофотометра, реализующая предложенный способ компенсации температурного дрейфа, представлена на рис.2. Свет от источника 1 проходит через акустооптический монохроматор 2. Выходящее из 2 монохроматическое излучение попадает на исследуемый образец 4 и фиксируется фотоприемником 5. Находящаяся перед контролируемым образцом отводящая пластинка 3 направляет часть света на фотоприемник опорного канала 7. Перед фотоприемником 7 располагается плоскопараллельная пластина 6, изготовленная из АИГ: Nd^{3+} .

Управление спектрофотометром осуществляется блоком управления и регистрации (БУР), связанным через последовательный порт с персональным компьютером. По командам компьютера БУР вырабатывает высокочастотное напряжение необходимой частоты f , подаваемое на АОФ монохроматора. Фотоэлектрические сигналы с фотоприемников 5, 7 поступают в БУР, где оцифровываются и передаются для дальнейшей обработки в компьютер.

Перед каждым циклом измерения спектральной характеристики образца 4 с помощью фотоприемника 7 в автоматическом режиме проводится спектрофотометрирование линии поглощения АИГ: Nd^{3+} ($\lambda_0 = 795.5$ нм) в 7 эквидистантных точках в диапазоне длин волн 794.5–796.5 нм.

Далее методом наименьших квадратов по указанным 7 точкам проводится параболическая аппроксимация ли-

ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3;
тел./факс: (095) 333-04-56, e-mail: norma-polyus@mtu-net.ru

Рис.1. Спектр пропускания τ аллюмоитриевого граната с неодимом.

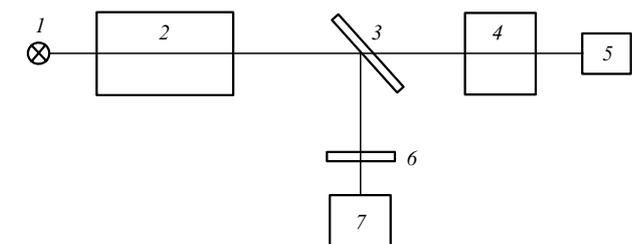
нии поглощения, в результате которой определяется регистрируемая прибором длина волны минимума пропускания λ_{01} . Причиной отличия разности

$$\delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_{01} \quad (2)$$

от нуля считается отличие температуры материала звукопровода АОФ от номинальной (т.е. от той температуры, для которой была получена зависимость $\lambda(f)$).

Таким образом, опорный канал на рис.2 в данной схеме фактически является измерителем ухода температуры звукопровода АОФ от номинальной. Сигнал рассогласования $\delta\lambda$ можно было бы подавать в качестве сигнала обратной связи на термостат АОФ, однако этого не требуется (так же как и вообще не требуется термостатировать АОФ). Достаточно при спектрофотометрировании образца 4 вводить (что и было реализовано в настоящей работе) в зависимость $\lambda(f)$ динамическую поправку.

В общем случае поправка зависит от длины волны. Для выявления этой зависимости был поставлен следующий эксперимент. На акустооптическом спектрофотометре AOS-3S были прописаны эмиссионные спектральные линии неона (728.1, 865.5, 966.5 и 1152.3 нм). Источником спектральных линий служил разряд смеси гелия и неона в трубке от He-Ne-лазера ОКГ-13. Измерения проводились при двух фиксированных температурах АОФ: $T_1 = 291.5$ К и $T_2 = 303.5$ К. Погрешность измерения температуры составляла ± 0.5 К. Экспериментальные данные сведены в табл.1, где f_1 и f_2 – частоты управляющего сигнала, который подается на АОФ для выделения света с длиной волны λ при температурах T_1 и T_2 соответственно, а $\Delta f = f_1 - f_2$.

Рис.2. Схема спектрофотометра с оптической компенсацией температурного дрейфа зависимости $\lambda(f)$:

1 – лампа; 2 – акустооптический монохроматор; 3 – отводящая пластинка; 4 – держатель с измеряемым образцом; 5 – фотоприемник рабочего канала; 6 – пластинка из АИГ: Nd^{3+} ; 7 – фотоприемник опорного канала.

Табл.1.

λ (нм)	f_1 (кГц)	f_2 (кГц)	Δf (кГц) (при $T_2 - T_1 = 12$ К)
728.1	34222	34178	44
865.5	26270	26231	39
966.5	22494	22461	33
1152.3	17870	17842	28

Зависимость $\Delta f(\lambda)$ приведена на рис.3, из которого следует, что ее можно записать в виде эмпирической формулы

$$\Delta f = \Delta f_0 [1 + k(\lambda - \lambda_0)], \quad (3)$$

где $k = -9 \times 10^{-4} \text{ нм}^{-1}$; Δf_0 – разность управляющих частот, соответствующая температурному сдвигу $\delta\lambda$ (2). Погрешность аппроксимации не превышает 4.5%, что в худшем случае дает погрешность установки длины волны около 0.004 нм.

Таким образом, для расчета динамической поправки в диапазоне длин волн 720–1175 нм достаточно измерить отклонение частоты, соответствующее минимальному пропусканию пластины из АИГ: Nd^{3+} на $\lambda_0 = 795.5$ нм, от расчетного значения и воспользоваться выражением (3).

Для проверки предложенного способа компенсации температурного дрейфа был собран макет акустооптического спектрофотометра по схеме, приведенной на рис.2.

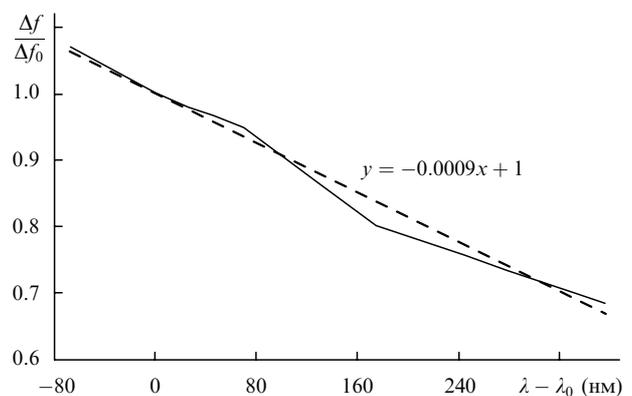


Рис.3. Экспериментальная зависимость относительного сдвига управляющей частоты от длины волны света и ее линейная аппроксимация (штриховая линия).

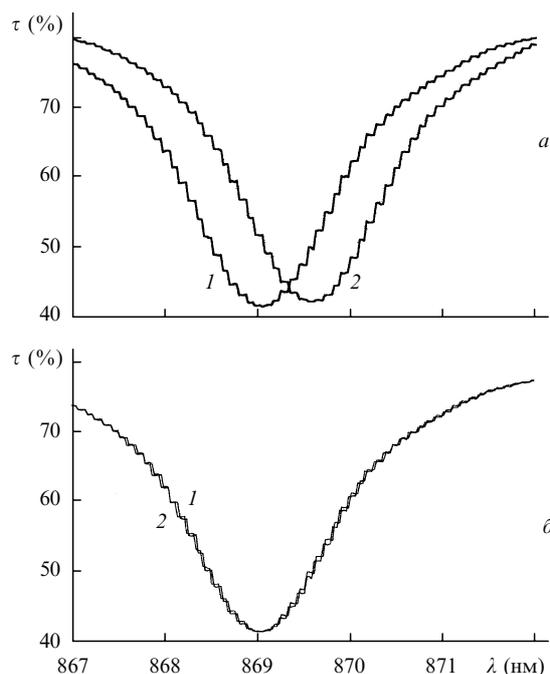


Рис.4. Стабильность определения положения спектральной линии акустооптическим спектрофотометром в режиме с температурной коррекцией (б) и без нее (а) сразу после включения прибора (1) и после 1 ч работы прибора (2).

В рабочий канал спектрофотометра в качестве измеряемого образца также был помещен кристалл АИГ: Nd³⁺ (толщиной 5.5 мм), однако для него наблюдение велось за линией поглощения с $\lambda = 869.1$ нм.

На рис.4,а представлены спектры пропускания этого кристалла, зарегистрированные сразу после включения спектрофотометра (кривая 1) и после часа непрерывной работы спектрофотометра (кривая 2) в режиме без компенсации температурного дрейфа. Сдвиг по длинам волн кривой 2 относительно кривой 1 обусловлен разогревом звукопровода АОФ в процессе работы спектрофотометра. На рис.4,б те же спектры, полученные при работе с компенсацией температурного дрейфа, демонстрируют эффективность предложенного и реализованного метода.

Измерение температурного смещения линии поглощения кристалла АИГ: Nd³⁺ с $\lambda_0 = 795.5$ нм вблизи комнатной температуры проводилось на установке, схема

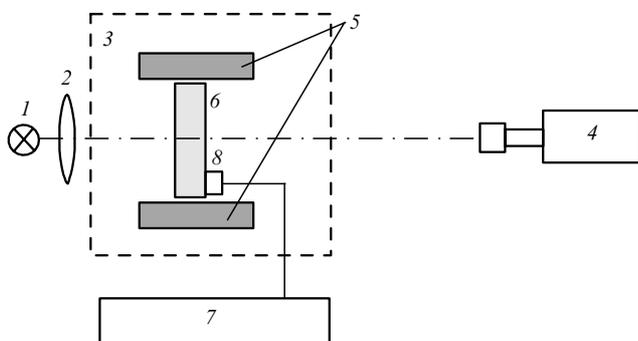


Рис.5. Схема экспериментальной установки для измерения температурной зависимости спектрального положения линий поглощения неодима в гранате:

1 – лампа; 2 – линза; 3 – кюветное отделение установки; 4 – монохроматор; 5 – термостат; 6 – пластинка из АИГ: Nd³⁺; 7 – измеритель температуры; 8 – термодатчик.

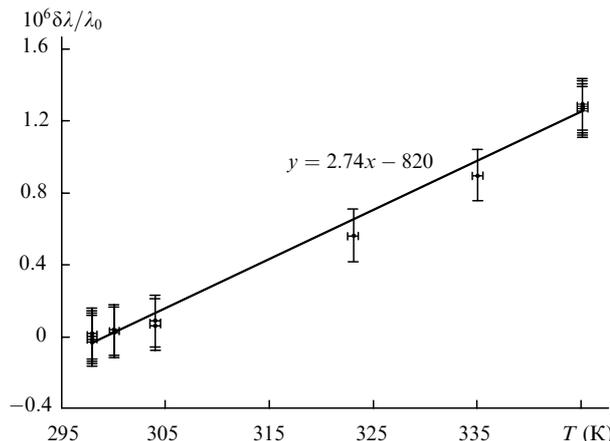


Рис.6. Относительное изменение длины волны линии поглощения неодима в гранате ($\lambda_0 = 795.5$ нм) при изменении температуры кристалла.

которой приведена на рис.5. Свет от галогенной лампы 1 собирался линзой 2 и через кюветное отделение установки 3 направлялся на входной объектив монохроматора 4 акустооптического спектрофотометра АОС-3С. В кюветное отделение помещался термостат 5 с установленной в нем пластинкой из АИГ: Nd³⁺ 6. Температура контролировалась измерителем 7. Термодатчик 8 этого измерителя, реализованный на основе микросхемы AD590, через термопроводящую пасту прижимался непосредственно к поверхности кристалла вне световой зоны.

Температура термостата изменялась в диапазоне 298–345 К и измерялась с погрешностью ± 0.5 К. Спектрофотометрирование производилось в диапазоне 792.25–798.75 нм с шагом 3.25×10^{-2} нм. При каждом значении температуры спектр фиксировался не менее 5 раз. Далее для каждого спектра методом наименьших квадратов по 31 точке вблизи минимума коэффициента пропускания путем параболической аппроксимации вычислялись координаты этого минимума. Погрешность определения таким способом длины волны минимума пропускания не превышала $\pm 3 \times 10^{-3}$ нм. Изменение температуры в помещении за время эксперимента не превышало 1 К. Для контроля возможного дрейфа длины волны настройки акустооптического спектрофотометра сразу после измерения спектра нагретого кристалла АИГ: Nd³⁺ в кюветное отделение помещался другой, не нагретый кристалл АИГ: Nd³⁺ и прописывался его спектр.

В результате эксперимента было обнаружено, что при увеличении температуры кристалла АИГ: Nd³⁺ на 47 ± 0.5 К спектральная линия поглощения смещается в длинноволновую область на 0.101 ± 0.003 нм. Результаты эксперимента представлены на рис.6.

Обработка экспериментальных результатов для $\lambda_0 = 795.5$ нм в предположении линейности зависимости от температуры T дает $\xi_{\text{YAG}} \approx (2.7 \pm 0.1) \times 10^{-6}$ К⁻¹, что много меньше ξ_{CaMoO_4} .

Таким образом, линия поглощения с $\lambda_0 = 795.5$ нм кристалла АИГ: Nd³⁺ может быть использована в качестве эталона длины волны для акустооптических спектрофотометров на АОФ из молибдата кальция.

1. Копылов С.М., Лысой Б.Г., Михайлов Л.К., Соловьев А.А., Чердиченко О.Б. *Лазерная техника и оптоэлектроника*, № 1-2, 54 (1993).
2. Виленский А.В., Лысой Б.Г., Чердиченко О.Б. *Лазерные новости*, № 1-2, 50 (2001).