

УДК 520.224.5:520.39

## АНАЛИЗАТОР ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ КУДЕ-ФОКУСА 1-М ТЕЛЕСКОПА САО РАН. УСТРОЙСТВО, ПАРАМЕТРЫ, ПОГРЕШНОСТИ

© 2008 В. Д. Бычков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Ставропольский государственный университет

Поступила в редакцию 1 декабря 2006 г.; принята в печать 18 октября 2007 г.

В работе представлено описание анализатора циркулярной поляризации для куде-фокуса 1-м телескопа САО РАН — его устройство, параметры и исследование инструментальных погрешностей. Высокое качество анализатора продемонстрировано на примере измерения магнитных стандартов  $\alpha^2 CVn$  и  $53 Cam$ , а также при исследовании магнитного поведения одного из уникальных объектов — магнитной Ар-звезды  $\gamma Equ$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальнейших астрофизических задач является исследование звездного магнетизма. В этом направлении за последнее время достигнут значительный прогресс. Он связан с широким применением твердотельных многоканальных светоприемников, существенным ростом числа крупных телескопов и спектрометров высокого спектрального разрешения, оснащенных анализаторами циркулярной поляризации. Большую ценность для исследования звездного магнетизма имеют длительные ряды наблюдений с целью изучения магнитной переменности. Вследствие загруженности 6-м телескопа большим количеством разнообразных задач трудно регулярно получать наблюдательное время в требуемых количествах. Гораздо доступней в этом смысле 1-м телескоп, на котором можно получать зеemanовские спектры звезд до  $7^m$ . Количество объектов, для которых длительные наблюдения представляют интерес, доходит до тысячи. Естественно, из такого количества выбираются объекты с самыми интересными изменениями магнитного поля [1]. К настоящему времени изучена магнитная переменность около 140 объектов, половина из которых требует повторных наблюдений для уточнения параметров магнитной переменности [2]. Даже среди ярких Ар-звезд магнитное поле измерялось менее чем у 10%. Для успешного выполнения магнитного мониторинга относительно ярких объектов вполне подходящим является эшелле-спектрометр SEG5, установленный в фокусе куде 1-м телескопа [3].

Ранее, когда основным светоприемником являлась фотоэмульсия, для получения зеemanовских

спектров устанавливался анализатор циркулярной поляризации перед входом высокодисперсионных классических спектрографов [4] и [5]. Для определения величины инструментального сдвига линий использовались линии спектра сравнения (узкие резкие линии эталонного источника), который для этого впечатывался симметрично с двух сторон зеemanовского спектра [4], [6] и [7]. Используемые спектрографы обладали большой стабильностью позиционных характеристик, вследствие чего было легко исследовать и учитывать все инструментальные эффекты. Пространственное разведение спектров в ортогональных поляризациях происходит перпендикулярно направлению дисперсии, т.е. приводит к появлению второй координаты в измерениях, что заставляет обрабатывать зеemanовские спектрограммы как двухмерные изображения.

Переход на новые твердотельные светоприемники, имеющие ограниченные линейные размеры, потребовал использования эшелле-спектрометров, которые регистрируют одновременно различные порядки спектров, благодаря чему на относительно небольшом по площади светоприемнике регистрируется большой интервал длин волн.

В эшелле-спектрометре SEG5 спектральные порядки имеют вид дуг с постоянно меняющейся кривизной. Кроме этого меняется наклон линий относительно направления дисперсии. То есть при обработке необходимо учитывать большое количество геометрических искажений. Для оснащения эшелле-спектрометров, расположенных в куде-фокусе 1-м телескопа, был разработан и изготовлен анализатор циркулярной поляризации, устанавливаемый перед щелью спектрометра SEG5,

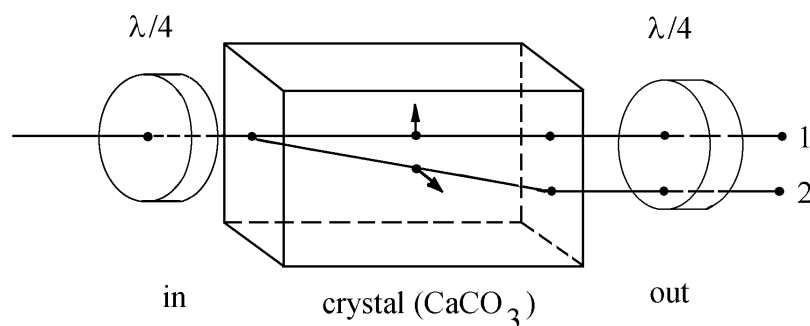


Рис. 1. Оптическая схема анализатора циркулярной поляризации.

в котором входная четвертьволновая фазосдвигающая пластинка может поворачиваться на  $90^\circ$  вокруг оптической оси. При повороте на  $90^\circ$  четвертьволновой пластинки зеемановские компоненты меняют знак без позиционного смещения, что существенно облегчает выделение и учет инструментальных эффектов. Подобное конструктивное решение применялось ранее Матисон и Стенфлю [8] в ESO на телескопе 3.6 м для куде-эшелле-спектрометра CASPEC. Отличие заключается в том, что в качестве элемента, разводящего линейно поляризованные лучи, в нашем случае применялся кристалл исландского шпата ( $CaCO_3$ ), а Матисон и Стенфлю [8] использовали призму Волластона, изготовленную из плавленого кварца.

Цель данной работы — представить полное описание анализатора, а также исследовать инструментальные эффекты, возникающие при его работе с целью их дальнейшего учета и повышения точности получаемых оценок магнитного поля. Это необходимо по той причине, что с помощью данного анализатора получено большое количество зеемановских спектрограмм (более 2000 в период с 1993 по 2005 годы) по различным научным программам. В настоящее время он также используется при исследовании звездного магнетизма.

## 2. АНАЛИЗАТОР КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ОПИСАНИЕ

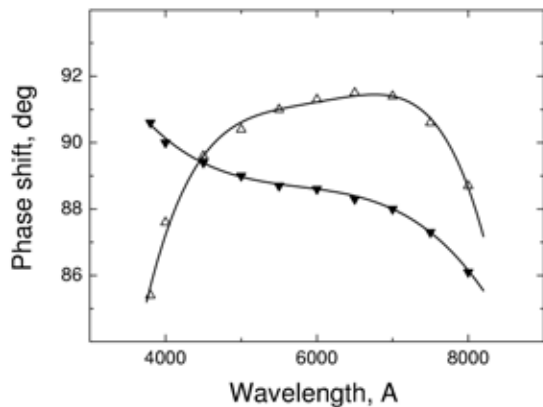
Анализатор циркулярной поляризации для эшеллевого спектрометра в куде-фокусе 1-м телескопа САО РАН был разработан и изготовлен автором в 1993 году по схеме, изображенной на рис.1. При разработке и изготовлении этого анализатора соблюдались следующие требования.

1. Обеспечить возможность смены знака циркулярной поляризации на выходе путем поворота входной четвертьволновой фазосдвигающей пластинки на  $90^\circ$  при полном сохранении оптического пути.

2. Обеспечить ахроматичность в широком интервале длин волн, покрывающем наиболее интересный для магнитных измерений диапазон от  $3300\text{Å}$  до  $9000\text{Å}$ .
3. Время эксплуатации — не менее 30–40 лет. То есть за это время анализатор не должен изменить свои характеристики.
4. Анализатор устанавливается перед щелью спектрометра в сходящемся пучке с апертурой 1:36.
5. Анализатор должен быстро и однозначно устанавливаться при помощи специально изготовленного унифицированного механического узла, быть простым и надежным в эксплуатации. Последнее важно для обеспечения длительных рядов наблюдений и различных программ, т. к. позволяет легко обеспечить достаточное количество подготовленных наблюдателей.

Характеристики анализатора приведены в табл. 1–2.

Первые успешные испытания анализатора были проведены 28/29 ноября 1993 г. на 1-м телескопе САО РАН с эшелле-спектрометром СЕГС и эшелле-решеткой 37.5 штр/мм. Светоприемник — штатная ПЗС-матрица  $580 \times 520$  элементов [9]. Использована система сбора информации DECH [10]. Вследствие того, что зеемановские спектры шире по сравнению с обычными в среднем в 3 раза, наблюдалось “слипание” соседних порядков, особенно в красной области спектра. Из-за этого перешли на решетку 75 штр/мм с классическим углом блеска —  $63.5^\circ$ , обеспечивающую достаточное разведение порядков. С этой решеткой, начиная с 29/30 ноября 1993 г., и проводятся наблюдения с анализатором циркулярной поляризации. Но при этом большое разведение порядков имеет следующие недостатки:



**Рис. 2.** Величина сдвига фазы в зависимости от длины волны. Треугольниками обозначены экспериментальные (паспортные) данные, кривые — это аппроксимация этих данных полиномами.

**Таблица 1.** Параметры анализатора

Рабочий диапазон	3300–9000 Å
Световой диаметр	26 mm
Поглощение на 3300 Å	1 зв. вел.
На 5000 Å	0.50 зв. вел.
На 7000 Å	0.36 зв. вел.
Габариты:	
Ширина	88 mm
Длина	66 mm
Разность интенсивностей спектров в поляризациях О и Е	до 15%

1. Регистрируется вдвое меньше порядков, чем с эшелле-решеткой 37.5 штр/мм.
2. Регистрируется не весь спектр, а с некоторыми “разрывами”. Величина “разрывов” зависит от линейных размеров ПЗС-матрицы. При использовании малоформатной матрицы величина “разрывов” доходит до 50% и уменьшается до 20% на матрицах большего формата.

Аналогичный анализатор циркулярной поляризации для получения зеэмановских спектров в фокусе Н1 6-м телескопа САО РАН был изготовлен в 1999 году Бычковым [11].

**Таблица 2.** Параметры входной (*in*) и выходной (*out*) четвертьволновых фазосдвигающих пластинок: сдвиг фазы и пропускание на разных длинах волн

$\lambda$ в Å	Сдвиг фазы в градусах	Сдвиг фазы в градусах	Пропускание	
	$\delta$ in	$\delta$ out	$\tau$ in	$\tau$ out
3800	90.6	85.4	75	62
4000	90.0	87.6	78	76
4500	89.4	89.6	84	84
5000	89.0	90.4	86	86
5500	88.7	91.0	88	88
6000	88.6	91.3	88	88
6500	88.3	91.5	89	89
7000	88.0	91.4	89	89
7500	87.3	90.6	90	90
8000	86.1	88.7	92	90

### 3. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЮСТИРОВКИ АНАЛИЗАТОРА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД

Рассмотрим, какие ошибки вносят неточности изготовления и установки анализатора. В табл. 2 приведены параметры ахроматических линейных фазосдвигающих пластинок  $\lambda/4$ , использованных в анализаторе:  $\delta$  — сдвиг фазы в градусах,  $\tau$  — пропускание в процентах.

На рис.2 изображены изменения сдвига фазы с длиной волны для этих пластин. Эти зависимости хорошо аппроксимируются полиномами, вписанными методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \delta_{in} &= 123.0376 - 0.01728\lambda + \\ &+ 2.94287 \times 10^{-6} \lambda^2 - 1.69902 \times 10^{-10} \lambda^3, \\ \delta_{out} &= -170.51 + 0.17353 \lambda - \\ &- 4.33614 \times 10^{-5} \lambda^2 + \\ &+ 4.82861 \times 10^{-9} \lambda^3 - 2.01711 \times 10^{-13} \lambda^4, \end{aligned} \quad (1)$$

где коэффициенты выражены в градусах, а длина волны в Å. Среднеквадратичный разброс табличных значений относительно найденных зависимостей составляет для входной пластинки  $\sigma_{in} = 1.97^\circ$

и для выходной  $\sigma_{out} = 1.80^\circ$ . Аналитическое выражение (1) дает возможность вычислить сдвиг фазы на любой длине волны. Отклонение луча четвертьволновыми пластинами вследствие непараллельности рабочих поверхностей согласно паспортным данным составляет для входной пластины не более  $10''$ , а для выходной — не более  $20''$ . Рабочие грани кристалла параллельны в пределах  $10''$ , согласно паспортным данным. Влияние непараллельности всех поверхностей минимизировалось юстировкой. В результате не было заметно различия в положении эшелле-спектров на ПЗС-матрице при ориентации входной фазовой пластинки  $\lambda/4$  осью наибольшей скорости относительно оси наибольшей скорости кристалла под углами  $45^\circ$  или  $-45^\circ$ .

Установка пластин относительно оси наибольшей скорости кристалла исландского шпата ( $CaCO_3$ ) осуществлялась с помощью специально собранной лабораторной установки с фотоэлектрическим контролем точностью порядка  $20'$ . Элемент, разводящий в пространстве два ортогонально линейно поляризованных луча, выполнен из природного кристалла исландского шпата (кальцита,  $CaCO_3$ ) “экстракласса” марки “У” (ультрафиолетовый) толщиной вдоль оптической оси 25 мм. Оптические свойства природных кристаллов существенно разнятся, поэтому конкретно для этого кристалла в табл. 3 приводятся его паспортные данные по измерениям, выполненным в региональном геологическом управлении “Кварцсамоцветы”, Москва, ФГУП “Шпат”.

Величина разведения обыкновенного и необыкновенного лучей для исландского шпата составляет  $1/10-1/11$  от длины кристалла вдоль главной оптической оси. Использованный в анализаторе кристалл разводит лучи на 2.3 мм при длине вдоль главной оптической оси 25 мм (разведение  $1/10.8$ ), что составляет  $13''$  дуги в фокусе куде 1-м телескопа.

Пропускание спектрометра существенным образом зависит от ориентации линейно поляризованного света, подаваемого на вход [12], [13], [14], [8]. Этот эффект приводит к заметным различиям в интенсивности разной круговой поляризации: левой (LCP) и правой (RCP). В конечном счете различие в интенсивности спектров в двух разных поляризациях может давать некоторую потерю точности при измерениях. Согласно исследованиям Чунтонова [14], интенсивность выходящего после спектрометра излучения может меняться до 10 раз в зависимости от ориентации входящего линейно поляризованного излучения. Для устранения этого эффекта в анализаторе устанавливается выходная четвертьволновая пластинка, которая преобразовывает линейно поляризованные лучи в циркулярно поляризованные, не чувствительные к ори-

**Таблица 3.** Пропускание кристалла  $CaCO_3$  в % на различных длинах волн

$\lambda$ в $\text{Å}$	Пропускание в %
3000	65.4
3500	74.5
4000	77.8
4500	79.7
5000	80.6
5500	81.0
6000	81.0
6500	81.1
7500	81.1
8000	81.1
8500	81.2
9000	81.2
9500	81.2
10000	81.2
11000	81.2

ентации спектрометра. С целью повышения пропускания анализатора выходная четвертьволновая фазосдвигающая пластинка склеена с кристаллом исландского шпата оптическим акриловым клеем. Пропускание склеивающего слоя, согласно [15], составляет не менее 98% в диапазоне от 3000 до 11000  $\text{Å}$ . Зависимость пропускания от длины волны отдельно для обыкновенного “O” и необыкновенного “E” лучей в процентах от интенсивности входного пучка показана на рис.3, эти же данные приводятся в табл. 4. Там же приведено суммарное пропускание анализатора.

Входная “in” и выходная “out” пластинки не являются идеальными фазосдвигающими элементами (см. рис. 2 и табл. 2). Используя формализм Мюллера [16], запишем матричные уравнения, описывающие преобразования вектора Стокса  $S = S(I, Q, U, V)$  для света, прошедшего сквозь анализатор. При двух рабочих положениях входной четвертьволновой пластинки  $in1$  и  $in2$  вектор Стокса  $S$  будет преобразован согласно матричным уравнениям:

$$S'_{in1}^o = F_{out} \times F_o \times F_{in1} \times S, \tag{2}$$

$$S'_{in1}^e = F_{out} \times F_e \times F_{in1} \times S.$$

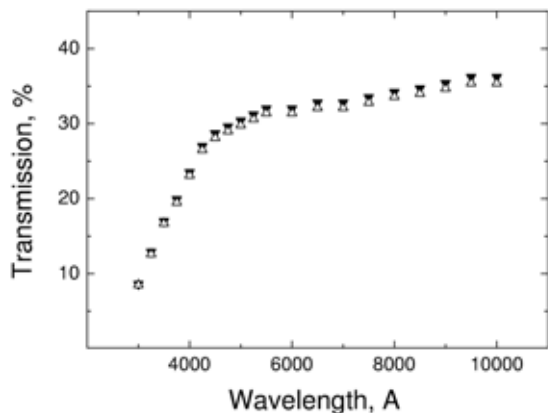


Рис. 3. Пропускание анализатора для обыкновенного луча “*O*” (темные треугольники) и необыкновенного луча “*E*” (светлые треугольники).

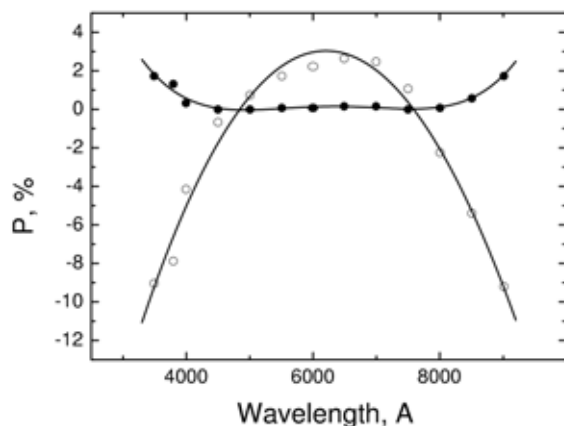


Рис. 4. Величина инструментальных параметров Стокса  $Q$  (светлые кружочки) и  $U$  (темные кружочки) в зависимости от длины волны, рассчитанные на табличные значения. Кривые — аппроксимация этих данных полиномами.

При положении входной четвертьволновой фазосдвигающей пластинки  $in2$  вектор Стокса  $S$  будет преобразован:

$$\begin{aligned} S'_{in2}^o &= F_{out} \times F_o \times F_{in2} \times S, \\ S'_{in2}^e &= F_{out} \times F_e \times F_{in2} \times S, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F_{in1}, F_{in2}$  — матрицы Мюллера, соответствующие двум положениям входной фазосдвигающей пластинки,  $F_o, F_e$  — матрицы, описывающие прохождение “обыкновенного” и “необыкновенного”

Таблица 4. Пропускание обыкновенного “*O*” и необыкновенного “*E*” лучей, а также всего анализатора в зависимости от длины волны

$\lambda$ в Å	$\tau\%$ <i>O</i>	$\tau\%$ <i>E</i>	$\tau\%$ <i>O + E</i>
3000	8.6	8.5	17.1
3250	12.9	12.6	25.5
3500	17.0	16.7	33.7
3750	19.9	19.5	39.4
4000	23.5	23.1	46.6
4250	27.0	26.5	53.5
4500	28.7	28.1	56.8
4750	29.6	29.0	58.6
5000	30.4	29.8	60.2
5250	31.2	30.6	61.8
5500	32.0	31.4	63.4
6000	32.0	31.4	63.4
6500	32.8	32.1	64.9
7000	32.8	32.1	64.9
7500	33.5	32.8	66.3
8000	34.2	33.6	67.8
8500	34.7	34.0	68.7
9000	35.4	34.7	70.1
9500	36.2	35.4	71.6
10000	36.2	35.4	71.6

луча через кристалл исландского шпата,  $F_{out}$  — матрица, описывающая выходную фазосдвигающую пластинку, а  $S$  — вектор Стокса, описывающий состояние входящего пучка света. Вычисления проводились для интервала длин волн от 3500 до 9000 Å, результаты представлены в табл. 5.

Основной интерес представляет параметр Стокса  $V$ , поскольку он является основным носителем информации о величине магнитного поля. Был вычислен параметр  $V_{calc.}$ , который показывает, как преобразовывался параметр  $V$  попадающего на вход анализатора света вследствие неидеальности поляризационных элементов. Величина деполаризации, характеризующая процент ослабления сигнала, несущего информацию, находилась как

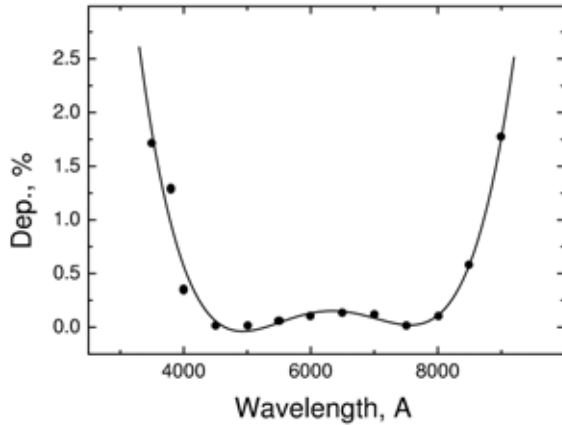


Рис. 5. Изменение параметра Стокса  $V$  в зависимости от длины волны.

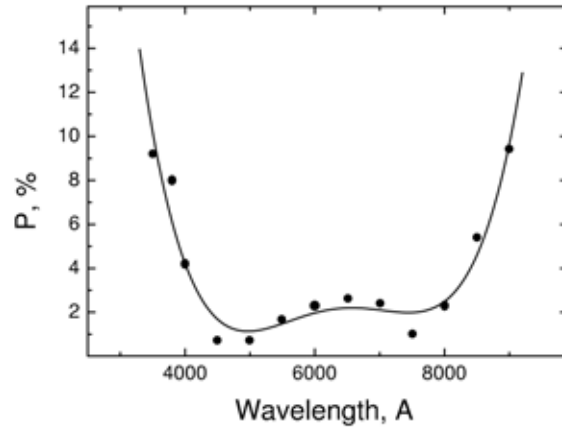


Рис. 6. Величина инструментальной линейной поляризации в зависимости от длины волны.

$$Dep = 100\% \times \frac{V_{input} - V_{calc.}}{V_{input}}. \quad (4)$$

Результаты вычислений представлены на рис. 4–6 и в табл. 5, где последовательно приводятся длина волны, параметры Стокса  $Q$  и  $U$ , величина изменения параметра  $V$ , найденная в процентах от величины исходного сигнала, величина линейной поляризации  $P$  и позиционный угол  $\theta$  в градусах.

Зависимость возникающей в анализаторе инструментальной поляризации от длины волны представлена на рис. 6. Кривые на рисунках — это аппроксимация зависимостей с помощью полиномов. Зависимость изменения параметра Стокса  $V$  от длины волны показана на рис. 5. Она хорошо описывается полиномом четвертой степени, коэффициенты которого найдены методом наименьших квадратов:

$$dep = 74.8935 - 0.0500134\lambda + 1.23271 \times 10^{-5}\lambda^2 - 1.32904 \times 10^{-9}\lambda^3 + 5.29439 \times 10^{-14}\lambda^4, \quad (5)$$

где коэффициенты представлены в процентах, а длина волны в Å. Стандартный среднеквадратичный разброс точек относительно аппроксимационной кривой составляет 0.2%. Как видно из рис. 3–6, а также из табл. 3–4, наиболее эффективно анализатор работает в диапазоне от 4000 до 8500 Å.

На рис. 6 приводится зависимость линейной поляризации от длины волны, а на рис. 7 — изменение позиционного угла  $\theta$  с длиной волны.

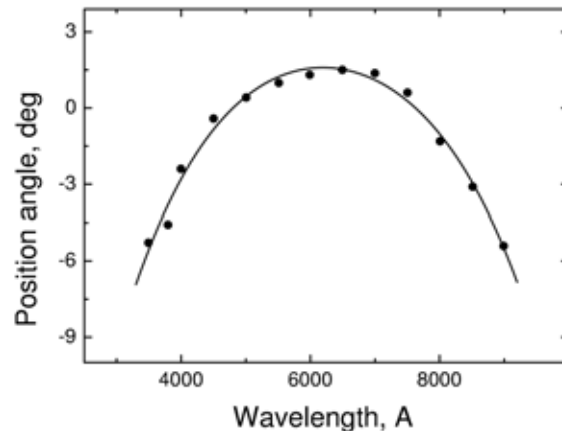


Рис. 7. Изменения позиционного угла в зависимости от длины волны.

Теперь рассмотрим возможные последствия неточности ориентации оси наибольшей скорости входной (*in*) и выходной (*out*) фазосдвигающих четвертьволновых пластинок относительно оси наибольшей скорости линейного поляроида (кристалла) под углом  $+45^\circ$ . Матрица поворота на произвольный угол  $\theta$  в общем виде:

**Таблица 5.** Вычисленная инструментальная поляризация для  $Q$  и  $U$  параметров Стокса, деполаризация (ослабление) параметра  $V$  в процентах от исходной величины, линейная поляризация и позиционный угол

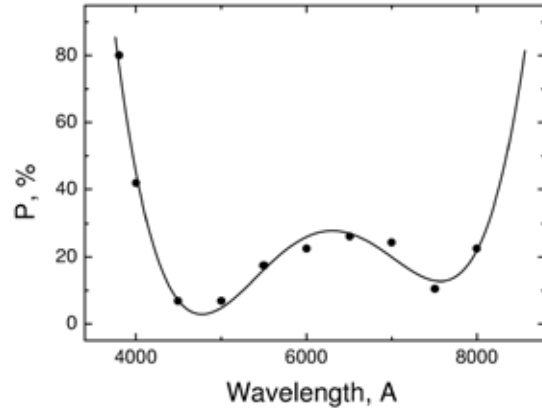
$\lambda$ в Å	$Q$	$U$	dep $V$	$P$	$\theta$
3500	-9.04	1.69	1.71	9.2	-5.3
3800	-7.89	1.27	1.29	8.0	-4.6
4000	-4.16	.35	.35	4.2	-2.4
4500	-.69	.00	.01	.7	-.4
5000	.69	.00	.01	.7	.4
5500	1.74	.06	.06	1.7	1.0
6000	2.26	.10	.10	2.3	1.3
6500	2.61	.13	.14	2.6	1.5
7000	2.43	.11	.12	2.4	1.4
7500	1.04	.02	.02	1.0	.6
8000	-2.26	.10	.10	2.3	-1.3
8500	-5.36	.58	.58	5.4	-3.1
9000	-9.20	1.75	1.77	9.4	-5.4

$$T_{2\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Вычисления преобразований вследствие поворота на угол  $\theta$  проводятся согласно известному матричному уравнению:

$$[P_\theta] = [T(-2\theta)][P_0][T(2\theta)], \quad (7)$$

где  $P_0$  — исходная матрица, описывающая поляризационные свойства устройства до поворота, а  $\theta$  — угол поворота. Вычисления проводились в пределах, превышающих точности выставления пластинок на 50%, т. е. угол  $\theta$  менялся в интервале от  $-30'$  до  $30'$  с шагом  $6'$ . В результате было получено, что в этом интервале параметр  $Q$  меняется от  $-0.001\%$  до  $0.001\%$ , параметр  $U$  меняется от  $0.03\%$  до  $-0.03\%$ , а параметр  $V$  меняется на величину, меньше  $0.001\%$ . Из результатов этих вычислений следует, что точность ориентации оси наибольшей скорости пластин относительно оси наибольшей скорости кристалла шпата вполне достаточная и



**Рис. 8.** Доля линейной поляризации, проходящей через анализатор в зависимости от длины волны.

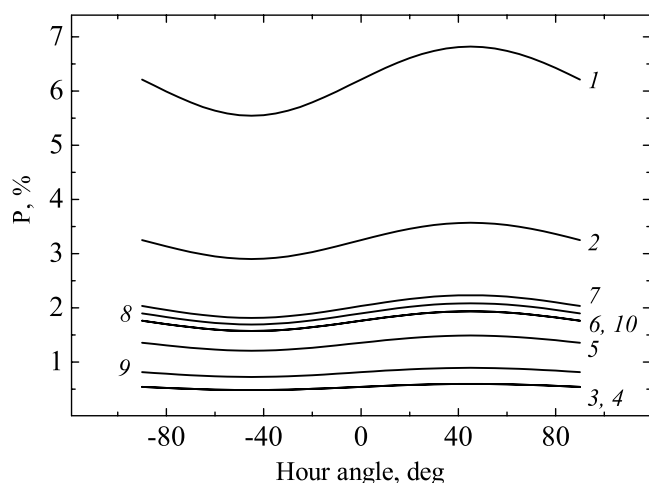
не может вносить сколь-нибудь заметных дополнительных искажений.

Так как при прохождении кудэ-зеркал свет частично поляризуется [17], [18], то следует рассмотреть, к каким эффектам это приведет. При этом следует помнить, что величина и направление инструментальной поляризации зависят также от длины волны и координат наблюдаемого объекта. Как было показано выше, наиболее заметные отклонения от “идеальности” в работе анализатора наблюдаются на длинах волн короче  $3800\text{Å}$  и длиннее  $8000\text{Å}$ . Поэтому имеет смысл рассмотреть работу анализатора именно на этих длинах волн. Если на вход анализатора подается эллиптически поляризованное излучение, то, используя матричные уравнения 2 и 3, вычисляем долю линейной поляризации  $\tau_p = (P_{in}/P_{out}) \times 100\%$ , передаваемой анализатором (см. рис. 8). Зависимость  $\tau_p$  от длины волны хорошо аппроксимируется полиномом, найденным методом наименьших квадратов:

$$\tau_p = 6971.68 - 4.73188 \lambda + 0.00118345 \lambda^2 - 1.29118 \times 10^{-7} \lambda^3 + 5.19361 \times 10^{-12} \lambda^4, \quad (8)$$

где коэффициенты выражены в процентах, а длина волны в Å. Средний разброс точек относительно аппроксимационной кривой составляет 2.6%. При этом дополнительная циркулярная поляризация, возникающая вследствие неидеальности анализатора, не превышает 0.05%. Это существенно меньше (на порядок и более), чем инструментальная поляризация, возникающая от системы переброса оптического пучка в фокус кудэ [17], [18].

Величина и ориентация инструментальной поляризации взяты из работ Бычкова и др. [17], [18].



**Рис. 9.** Зависимость величины линейной поляризации, проходящей через анализатор, от часового угла  $t$  для разных длин волн. Нумерация кривых соответствует: 1 — 8000, 2 — 7500, 3 — 7000, 4 — 6500, 5 — 6000, 6 — 5500, 7 — 5000, 8 — 4500, 9 — 4000 и 10 — 3800 Å.

Для примера на рис. 9 изображена зависимость линейной инструментальной поляризации от часового угла и длины волн для объекта, расположенного на небесном экваторе.

На зеемановских спектрах, полученных в фокусе кудэ 1-м телескопа, наблюдается разность интенсивности, доходящая в некоторых случаях до 15% в красном диапазоне спектра. Рассмотрим возможные причины этого эффекта. Прямые вычисления дают разность интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей до 2% в красной области. Это, конечно, только частично объясняет наблюдаемый эффект.

Из рис. 8 видно, что линейная инструментальная поляризация наиболее сильно изменяется с длиной волны вблизи границ рабочего участка. Именно там следует ожидать наиболее заметных разностей в интенсивности обыкновенного “O” и необыкновенного “E” спектров.

Следующий по значимости эффект, приводящий к разности интенсивности этих лучей — значительное различие в величине коэффициента преломления исландского шпата для обыкновенного “O” и необыкновенного “E” лучей, достигающее 10%.

На рис. 10 показано изменение коэффициента преломления исландского шпата с длиной волны для обыкновенного и необыкновенного лучей. Пропускание анализатора для необыкновенного луча в среднем на 2.2% ниже, чем обыкновенного вследствие более протяженного оптического пути. То есть в результате этих двух эффектов пропускание необыкновенного луча уже меньше на 4.2%, чем обыкновенного. Но, тем не менее, этих двух

эффектов не достаточно для полного объяснения наблюдаемой разности интенсивности.

Оценить погрешности, возникающие вследствие возможной неточной ориентации фазосдвигающих пластин, а также их реальных параметров (зависимость величины сдвига фазы от длины волны), можно с помощью выражений, полученных Унно [19] для двухлучевого анализатора. Для обыкновенного луча:

$$I_{o,\delta} = \frac{1}{2}(I - Q\sin 2\phi \cos \delta + U\cos \delta \cos 2\phi + V\sin \delta) \quad (9)$$

и необыкновенного:

$$I_{e,\delta} = \frac{1}{2}(I + Q\sin 2\phi \cos \delta - U\cos \delta \cos 2\phi - V\sin \delta), \quad (10)$$

где  $\phi$  — угол поворота пластины, а  $\delta$  — сдвиг фазы.

Результаты вычислений интенсивности для “O” и “E” по Унно [19] хорошо согласуются с результатами, полученными с использованием формализма Мюллера [16]. Но полную разность интенсивности, наблюдаемую в двух поляризациях, они не объясняют. Заметное различие в интенсивности (в некоторых случаях до 15% в красном конце рабочего диапазона) объясняется конструктивными особенностями самого спектрометра, в котором элемент скрещенной дисперсии — блок призм — следует за эшелле-решеткой. Как известно, дифракционная эшелле-решетка обладает значительными поляризующими свойствами, вследствие чего поляризованные пучки света с различающейся ориентацией попадают на наклонные грани призмы. Интенсивности отраженных и пропущенных пучков зависят от ориентации векторов, и это отчасти объясняет наблюдаемое различие интенсивности выходных пучков.

Наблюдается также некоторая разница в фокусировке на матрице LCP и RCP спектров, что вполне естественно, т. к. оптический путь различен из-за разницы коэффициентов преломления в кристалле исландского шпата (см. рис. 10). В принципе, от этого эффекта можно избавиться, используя пластинку Савара в качестве элемента, разводящего пучки. Для этого необходимо разрезать кристалл исландского шпата поперек оптической оси на две равные половинки и склеить, развернув одну половинку на 90° вокруг оптической оси [20], [21]. Таким образом, оптический путь для обоих лучей станет одинаков. Но и такой способ имеет недостатки, т. к. разводящая способность пластины Савара на 50% меньше, чем у кристалла. Поскольку разница в фокусе незначительная и практически не влияет на качество спектров, то в данном конкретном случае было решено не избавляться от этого эффекта.



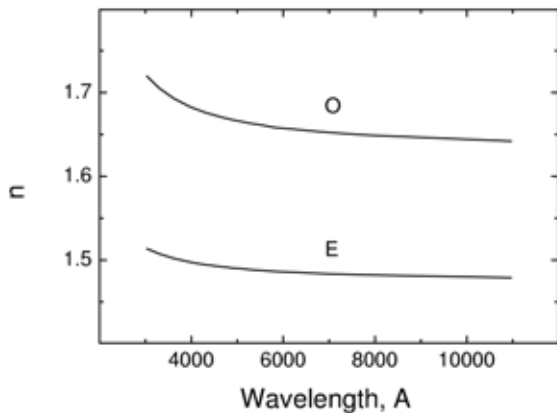


Рис. 10. Изменение коэффициента преломления исландского шпата от длины волны для обыкновенного "О" и необыкновенного "Е" лучей.

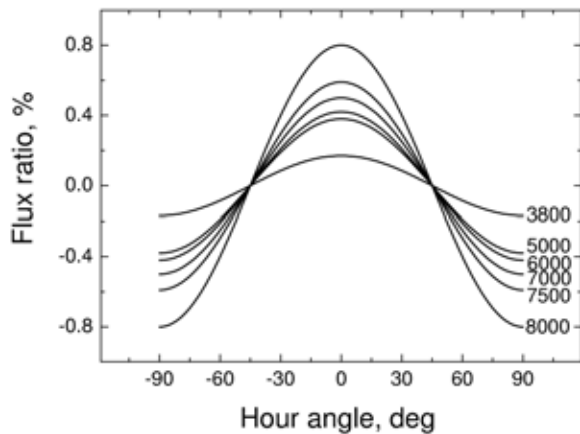


Рис. 11. Разница в интенсивности для обыкновенного  $I_o$  и необыкновенного  $I_e$  луча, найденная согласно выражениям 9 и 10 из работы Унно [19]. Зависимости получены для различных длин волн.

#### 4. МОДЕРНИЗАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА CEGS ДЛЯ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

За время использования спектрометра CEGS для спектрополяриметрических наблюдений был выявлен ряд недостатков технического плана, которые были устранены. 1. Полностью переделана механическая часть фокусирующего узла камеры. Он стал более жестким, надежным. Положение ПЗС-матрицы относительно фокальной плоскости теперь контролируется с помощью микрометров. 2.

Изготовлен механизм плавного поворота платформы с эшелле-решетками по углу  $\gamma$ . Установлены высокоточные датчики контроля положения платформы. Это существенно облегчило и сократило процедуру настройки спектрометра при переходе от варианта наблюдений с эшелле-решеткой 37.5 штр/мм к варианту с эшелле-решеткой 75 штр/мм и обратно. 3. Изготовлено и установлено специальное устройство, оснащенное лазером для удобства юстировки спектрометра. Устройство может вводиться на оптическую ось спектрометра; располагается перед его входной щелью. Луч лазера направляется сквозь щель на коллиматор. Реализованы два фиксированных положения для крепления лазера: I. Луч лазера направляется точно вдоль оптической оси через центр щели в центр коллиматора. II. Луч лазера направляется под углом к оптической оси через центр щели на коллиматор. При этом все устройство крепления лазера может с помощью специального механизма поворачиваться на  $360^\circ$  вокруг оптической оси. При этом световое пятно от лазера описывает круг относительно центра коллиматора радиусом 90 мм. Угол наклона луча лазера к оптической оси составляет  $44.1^\circ$ . Устройство крепления лазера позволяет быстро и однозначно переходить из положения I в положение II и обратно.

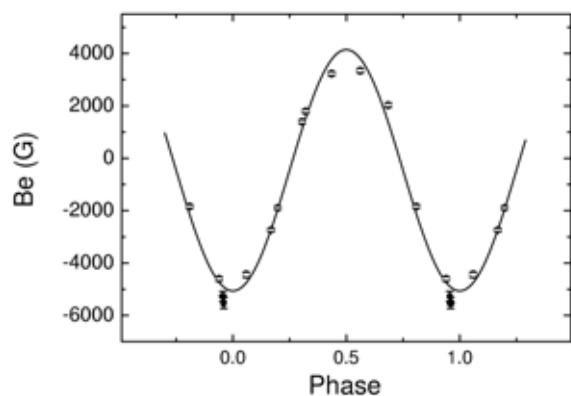
Устройство постоянно находится в щелевой части кюде-спектрометра и всегда готово к работе. Сейчас для того, чтобы проверить правильность юстировки всех основных оптических элементов, требуется всего около 10 минут.

4. Эшелле-решетки в кюде-эшелле-спектрометре были обращены рабочей поверхностью вверх и наклонены на  $26.5^\circ$  относительно горизонта, т.е. под рабочим углом в  $63.5^\circ$  к горизонтально распространяющемуся коллимированому пучку. Вследствие длительных наблюдений с использованием спектрометра на рабочей поверхности решеток осаждалась пыль. Сейчас решетки повернуты на  $180^\circ$ , т.е. обращены рабочей поверхностью вниз, что существенно снижает их загрязнение.

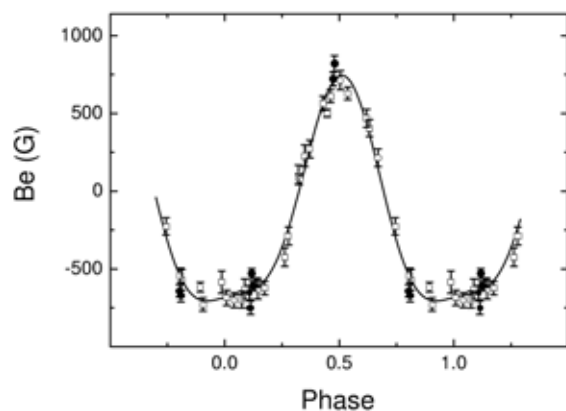
Выполнен еще ряд незначительных, но весьма полезных усовершенствований, направленных на повышение удобства эксплуатации и обслуживания спектрометра.

#### 5. НАБЛЮДЕНИЯ

После изготовления анализатора с целью его проверки были проведены наблюдения "магнитных" стандартов, т.е. Ар-звезд с хорошо изученной магнитной переменностью —  $\alpha^2 CVn$  и 53 Cam (AXCam). Результаты этих наблюдений представлены в табл. 6 и на рис. 12 и 13. Фазовая магнитная кривая для звезды 53 Cam (рис. 12) была получена по высокоточным оценкам магнитного поля



**Рис. 12.** Фазовая магнитная кривая *53 Cam*. Светлыми кружочками нанесены оценки из Wade et al.[23], темными кружочками — оценки, полученные с описываемым анализатором.



**Рис. 13.** Фазовая магнитная кривая  $\alpha^2 CVn$ . Светлыми кружочками нанесены оценки из Wade et al. [23], светлые квадратики — из работы Чадид и др. [24], темными кружочками — оценки, полученные с описываемым анализатором.

полученным LSD-методом из работы Вэйда и др. [23]. Использовался период  $P = 8^d.02681$  из работы Вэйда и др. [22]. Параметры фазовой кривой приводятся в работе Бычкова и др. [2].

Фазовая магнитная кривая для звезды  $\alpha^2 CVn$  (рис.13) была получена по высокоточным оценкам магнитного поля, полученным LSD-методом из работ Вэйда и др. [23] и Чадид и др. [24]. Параметры фазовой кривой приводятся в работе Бычкова и др. [2].

**Таблица 6.** Результаты измерений “магнитных” стандартов  $\alpha^2 CVn$  и *53 Cam*. Последовательно приводятся момент наблюдения, величина оценки и стандартной ошибки в  $G$ , а также число линий по которым проводились измерения

Название	JD	$B_e$	$\sigma B_e$	N линии
	2400000.+	G	G	
<i>53 Cam</i>	49322.613	-5265	185	233
	49322.646	-5525	210	186
$\alpha^2 CVn$	49492.308	-652	44	475
	49492.331	-750	43	452
	49492.355	-530	32	566
	49492.388	-609	30	532
	49494.305	+721	44	428
	49494.330	+821	51	442
	50119.613	-641	39	395
	50119.643	-674	37	393

Для получения тестовых оценок по магнитным стандартам специально выбирались фазы экстремального значения поля. Из рисунков видно, что наблюдается хорошее согласие с высокоточными измерениями других исследователей.

За время использования данного анализатора с 1993 по 2004 г. было получено более 2000 зеемановских спектров по различным наблюдательным программам. Полученные за этот период оценки магнитных полей звезд опубликованы более чем в 20-ти научных статьях, в том числе в ведущих западных журналах (Бычков и др. [25], [2], [26]). Этот вариант наблюдений является весьма востребованным, отлаженным, с его помощью регулярно пополняется количество измерений магнитных полей звезд. За 12 лет эксплуатации анализатора сменилось 6 ПЗС-матриц и, соответственно, столько же систем сбора. При редукации наблюдательных данных обычно используется стандартная система обработки зеемановских спектров. Программный пакет написан Мониним [27] в системе MIDAS. В качестве иллюстрации работоспособности данного варианта можно привести пример исследования вековой переменности магнитного поля магнитной Ар-звезды  $\gamma Eqr$ . В период с 1996 по 2002 год осуществлялся магнитный мониторинг этого объекта. За 7 лет наблюдений были получены 33 оценки магнитного поля. Таким образом удалось увеличить общую продолжительность магнитных наблюдений  $\gamma Eqr$  до 58 лет и окончательно решить вопрос о периоде, типе и параметрах магнитной

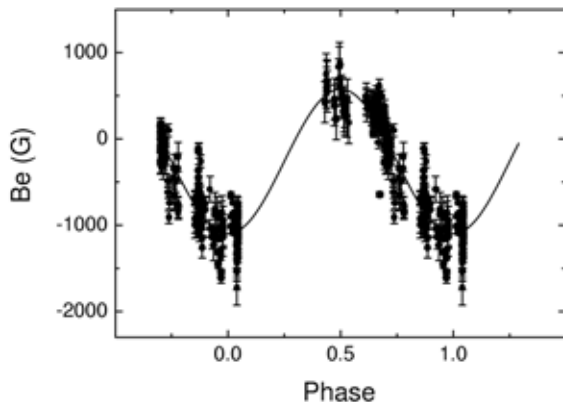


Рис. 14. Долговременное магнитное поведение  $\gamma$  Equ.

переменности этого объекта [26]. Основные параметры этой переменности:

$$P_{mag} = 33278 \pm 1327 \text{ days} = 91.1 \pm 3.6 \text{ years},$$

$$T_0 = JD2417795.0 \pm 1057.0 \text{ days},$$

$$B_0 = -262 \pm 22.4G,$$

$$B_1 = +839 \pm 22.1G,$$

$$r = -0.524 \pm 0.043.$$

На рис. 14 приводится полученная магнитная фазовая кривая для этого уникального объекта.

Метод определения параметров, а также метод оценки точности получаемых параметров, подробно описаны в работах Бычкова и др. ([2], [26]). Возможные физические причины такого магнитного поведения  $\gamma$  Equ обсуждаются в работе Бычкова и др. [26]. На рис. 14 хорошо видно, что кроме “вековой” магнитной переменности существует и более короткопериодическая переменность, зашумляющая “вековую” составляющую, которая исследовалась другими методами, на других приборах и телескопах [28]. Следует подчеркнуть, что такие интересные результаты были получены в том числе и благодаря применению описываемого анализатора.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводятся результаты исследования анализатора циркулярной поляризации, созданного для спектрометров, установленных в куде-фокусе 1-м телескопа.

1. Это пример удачно изготовленного и восстановленного прибора, который регулярно и достаточно интенсивно используется на протяжении более 12-ти лет. По своим техническим характеристикам созданный анализатор может еще работать не менее 20–30 лет.
2. Показано, что вклад анализатора в инструментальные эффекты вследствие неидеальности использованных элементов меньше на порядок, чем от системы переброса оптического пучка в фокус куде. Тем не менее, этот вклад тоже необходимо учитывать для получения максимально корректных оценок магнитного поля.
3. Показано, что основными элементами, определяющими качество работы анализатора и его широкополосность, являются линейные четвертьволновые ахроматические фазосдвигающие пластинки. Наиболее велики инструментальные эффекты на краях рабочего спектрального диапазона фазосдвигающих пластинок.
4. Основным недостатком данного анализатора является относительно низкое пропускание. В настоящее время рассматривается вариант создания анализатора, более эффективного в плане пропускания с использованием известных из литературы разработок [8], [29] и др. Рассматривается также возможность создания волоконного переброса света в куде-фокус, что может дать немалую выгоду как по пропусканию, так и по уменьшению инструментальных поляризационных эффектов, неизбежно возникающих при перебросе светового пучка с помощью плоских зеркал. Как было показано в работе Ключковой и др. [30], такие аппаратные решения широко используются в настоящее время.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Панчуку В. Е. за поддержку работы во время ввода в эксплуатацию анализатора, Найденову И. Д. за постоянные консультации и полезные советы, Чунтонову Г. А. за полезные дискуссии, Романенко В. П. и Викульеву Н. А. за помощь в модернизации спектрометра, Бондарю С. Ф. за изготовление электроники к лабораторной установке, Галазутдинову Г. А. и Монинову Д. Н. за помощь с математическим обеспечением при обработке зеемановских спектров, Драбеку С. В. за изготовление блока питания к лазерному устройству, Власюку В. В. за поддержку проводимых работ, Плахотниченко В. Л., Афанасьева В. Л.

и Войханскую Н. Ф. за полезные замечания во время подготовки текста. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-16995-а и польского Комитета научных исследований, грант No. 1 P03D 001 26.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. D. Bychkov, in *Magnetic fields of chemically peculiar and related stars*, Ed. by Yu. Glagolevskij and I. Romanyuk (Moscow, 2000), p.199.
2. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *Astron. Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
3. F. A. Musaev, *Astron. Lett.* **22**, 795 (1996).
4. H. W. Babcock, *Astrophys. Journal* **105**, 105 (1947).
5. V. D. Bychkov, Yu. V. Glagolevskij, V. G. Elkin, et al., in *"Magnetic Stars", Proceedings of International Conference, SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 1987*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. M. Kopylov (Nauka, Leningrad, 1988), p.12.
6. H. W. Babcock, *Astrophys. Journal Suppl.* **3**, 141 (1958).
7. Yu. V. Glagolevskij, K. I. Kozlova, I. M. Kopylov et al., *Astron. Lett.* **11**, 500 (1977).
8. G. Mathys and J. O. Stenflo, 1986, *Astron. Astrophys.* **168**, 184 (1986).
9. А. Н. Борисенко, С. В. Маркелов, В. П. Рядченко, Preprint No. 78, Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences (Nizhnij Arkhyz, 1991).
10. G. A. Galazutdinov, Preprint No. 92, Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences (Nizhnij Arkhyz, 1992).
11. V. D. Bychkov, S. N. Fabrika, D. N. Monin, and G. G. Valyavin, in *"Magnetic fields of chemically peculiar and related stars", Proceedings of International Conference, SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 1999*, Ed. Yu. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 2000), p.258.
12. D. Clarke, 1973, *Astron. Astrophys.* **24**, 165 (1973).
13. S. S. Vogt, R. G. Tull and P. Kelton, *Astrophys. Journal* **236**, 308 (1980).
14. Г. А. Чунтонов, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics, (Erevan, 1984).
15. М. Я. Кругер, В. А. Панов, В. В. Кулагин и др., *Справочник конструктора оптико-механических приборов* (Оптика и механика, Москва).
16. W. A. Schurcliff, "Polarized Light: Production and use" (Cambridge, Harvard Univ. Press, 1962).
17. V. D. Bychkov, V. P. Romanenko and L. V. Bychkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 101 (1999).
18. V. D. Bychkov, V. P. Romanenko and L. V. Bychkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **49**, 147 (2000).
19. W. Unno, *PASJap.* **8**, 108, (1956).
20. V. G. Shtol', *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **33**, 176 (1991).
21. V. G. Shtol', V. Zin'kovskij, and N. A. Vikul'ev, in *"Stellar Magnetic fields", Proceedings of International Conference, Nizhnij Arkhyz, 1996*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 1997), p. 232.
22. G. A. Wade, G. M. Hill, D. A. Bohlender et al., *MNRAS* **297**, 236 (1998).
23. G. A. Wade, J. -F. Donati, J. D. Landstreet and S. L. S. Shorlin, *MNRAS* **313**, 851 (2000).
24. M. Chadid, G. A. Wade, S. L. S. Shorlin and J. D. Landstreet, *Astron. Astrophys.* **413**, 1087 (2004).
25. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *Astron. Astrophys.* **407**, 631 (2003).
26. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *MNRAS* **365**, 585 (2006).
27. D. N. Monin, in *"Magnetic fields of chemically peculiar and related stars", Proceedings of International Conference, SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 1999*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. Romanyuk (Moscow, 2000), p.261.
28. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *Acta Astronomica* **55**, 141 (2005).
29. I. D. Najdenov and V. E. Panchuk, 1996, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **41**, 143 (1996).
30. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, V. P. Romanenko and I. D. Naidenov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 132 (2005).

## CIRCULAR POLARIZATION ANALYZER FOR THE COUDE FOCUS OF THE 1-M TELESCOPE OF THE SPECIAL ASTROPHYSICAL OBSERVATORY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES. DESIGN, PARAMETERS, AND ERRORS

V. D. Bychkov

A circular-polarization analyzer for the coude focus of the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences is described. The description of the device covers its design, parameters, and analysis of its instrumental errors. The high quality of the analyzer is demonstrated by using it to measure the magnetic standards  $\alpha^2 CVn$ , and 53 *Cam* and to analyze the magnetic behavior of a unique object—the magnetic Ap-star  $\gamma Equ$ .