

УДК 520.353:520.8

ДИХРОИЧНЫЙ АНАЛИЗАТОР КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОСНОВНОГО ЗВЕЗДНОГО СПЕКТРОГРАФА БТА

© 2016 Г. А. Чунтонов*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 23 мая 2016 года; принята в печать 22 августа 2016 года

Описан дихроичный анализатор круговой поляризации с двойным резателем изображений по семь срезов на каждую поляризацию, разработанный для Основного звездного спектрографа 6-м телескопа БТА. Он предназначен для измерений магнитных полей звезд по эффекту Зеемана и представляет собой более совершенную версию по сравнению с анализаторами поляризации, использовавшимися ранее. Приведены его характеристики и оценки точности проводимых измерений.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — техники: спектроскопические — техники: поляриметрические*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на многих больших и средних телескопах ведутся измерения магнитных полей звезд. Используемые для этого устройства можно разделить на два типа: 1) построенные по схеме Бэбкока [1] с анализатором круговой поляризации Зеемана (в САО РАН на 6-м телескопе БТА и на 1-м телескопе Цейсс-1000, на 2-м телескопе в Шемахинской астрофизической обсерватории, на телескопе 2.6 м в КрАО, на FORS2/VLT ESO) и 2) новое поколение спектрополяриметров с использованием оптического волокна (EsPaDO_nS/CFHT, NARVAL/TBL, HARSPol/VLT ESO).

В 70–80-х и в начале 90-х годов для измерений магнитных полей звезд на БТА использовался сначала анализатор со слюдяным фазовым элементом, а потом анализатор круговой поляризации на основе ромбов Френеля [2, 3], которые были изготовлены из стекла ЛК-4. Он содержит ромб Френеля на входе, лучеразводящий цилиндр из исландского шпата и ромб Френеля на выходе, возвращающий пучок света на ось телескопа и превращающий его на выходе цилиндра из линейно поляризованного в поляризованный по кругу. Ромб на входе анализатора позволил значительно расширить спектральный рабочий диапазон, а ромб на выходе — выровнять интенсивности спектров в левой и правой круговых поляризациях, т.к. спектрограф одинаково пропускает левую и правую круговые поляризации. Это было важно при использовании в качестве светоприемника фотопластинок с малым

динамическим диапазоном и нелинейным откликом. Диагональное зеркало БТА вносило заметный фазовый сдвиг (22°) и линейную поляризацию (3%), поэтому, чтобы избежать влияния второго наклонного плоского зеркала на измерения, анализатор пришлось установить перед этим зеркалом, что привело к его большим размерам и потерям света.

Более компактным был анализатор с поворачиваемой суперхроматической фазовой пластиной и пластиной Савара в качестве лучеразводящего элемента [4]. Пластина Савара размещалась после диафрагмы, поэтому пучки света не переналагались на кассетной части ОЗСП [5], как это иногда происходило при наблюдениях с ромбовым анализатором. Поворачиваемая фазовая пластинка [6] позволяла менять местами компоненты зеемановского спектра, что дало возможность отказаться от измерений стандартов нулевого поля. В этой схеме плоскости поляризации пучков на выходе анализатора были под углом 45° к штрихам решетки, что также обеспечивало их одинаковое прохождение через спектрограф.

Еще одним анализатором, использовавшимся на БТА, был анализатор на основе ромба Муни [3, 7]. У ромба Муни угол при вершине составляет 60° . Плоское зеркало перед щелью ОЗСП отклоняет свет в сторону диафрагмы под углом 65° , поэтому ромб Муни пришлось изготовить слегка деформированным с углом при вершине $61^\circ 25'$, чтобы им можно было заменить плоское зеркало. Таким образом, ромб стал играть двойную роль: как широполосный ахроматический четвертьволновой фазовый элемент и элемент, заменяющий плоское

*E-mail: chunt@sao.ru

зеркало. Как и в предыдущем случае, пластина Савара располагалась за диафрагмой. После просветления входной и выходной граней ромба потери света стали меньше, чем от зеркала. Для перемены спектров в ортогональных поляризациях местами в схему была введена поворачиваемая на 45° полуволновая пластина.

Покрывают по новой технологии плоского диагонального зеркала БТА и плоского зеркала перед щелью спектрографа не показывают фазового сдвига. Это было проверено при измерениях по следующей схеме. В стакане первичного фокуса БТА на поворотном столе размещался источник линейно поляризованного излучения в виде лазерной указки с длиной волны 532 нм. Свет от нее направлялся в сторону диагонального зеркала и на балконе Несмит-2 собирался линзовой системой на фотодиод с большой чувствительной площадкой. Перед фотодиодом размещался пленочный поляризатор, который можно было поворачивать. Плоскость поляризации света от указки была установлена под 45° к плоскости пучка. Вращая поляризатор, мы измеряли интенсивность света после поляроида. Обнаружилось, что малая ось эллипса поляризации составляла менее 0.5% от большой оси. Таким образом, отсутствие фазового сдвига позволяет размещать элементы анализатора после плоского зеркала ближе к щелевой части, т.е. изготавливать их с меньшей апертурой.

Все описанные выше анализаторы имеют недостаток, состоящий в больших потерях на щели. Так, ширина обычной щели спектрографа ОЗСП эквивалентна $0''5$, а среднее изображение звезды — $2''5$. Чтобы устранить этот недостаток, в новом дихроичном анализаторе использованы два резателя изображений на каждую поляризацию. Кроме того, для разделения пучков света по ортогональным поляризациям разработана призма с многослойными диэлектрическими покрытиями.

2. ДИХРОИЧНЫЙ АНАЛИЗАТОР КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Свет от звезды поступает на главное 6-метровое зеркало, потом на вторичное гиперболическое и диагональным плоским зеркалом выводится на балкон Несмит-2. Далее он отражается плоским зеркалом в сторону щелевой части спектрографа ОЗСП.

Дихроичный анализатор [4, 8] устанавливается вместо штатной щели. Перед диафрагмой расположены четвертьволновая фазовая пластинка, которая может устанавливаться в положения 0° или 90° , и порядкоразделительный фильтр. Схема анализатора представлена на рис. 1.

На рис. 2 приведена зависимость фазового сдвига и положения оптической оси для четвертьволновой ахроматической фазовой пластинки от длины волны в нанометрах. В третьем порядке решетки в синей части спектра обратная дисперсия составляет $0.12 \text{ \AA} \text{ px}^{-1}$ и используется просветленный фильтр СЗС-21 (см. рис. 3), а во втором порядке в красной области обратная дисперсия составляет $0.18 \text{ \AA} \text{ px}^{-1}$ и используется стеклянный фильтр ЖС-16 [9].

Выделенный участок спектра направляется на входную диафрагму анализатора, а часть света от ее краев поступает на телевизионный подсмотр. В качестве поляризующего лучеразводящего элемента использована полупрозрачная призма. Она повернута вокруг оптической оси на 36° . За призмным поляризатором расположен двойной резатель изображений по семь срезов на каждую поляризацию, который позволил повысить эффективность измерений в несколько раз.

Рассмотрим прохождение света, поляризованного по кругу (\mathbf{S}), через фазовую пластинку $\lambda/4$ на одной длине волны 4500 \AA в положениях 0° и 90° ($\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_{90}$) и поляризатор в положении 45° (\mathbf{P}_{45}), используя формализм матриц Мюллера и векторов Стокса [10, 11].

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{P}_{45} \times \mathbf{F}_0 \times \mathbf{S}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & \mu \\ 0 & 0 & -\mu & \beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для пластинки, повернутой на 90° :

$$\mathbf{S}_{90} = \mathbf{P}_{45} \times \mathbf{F}_{90} \times \mathbf{S}. \quad (5)$$

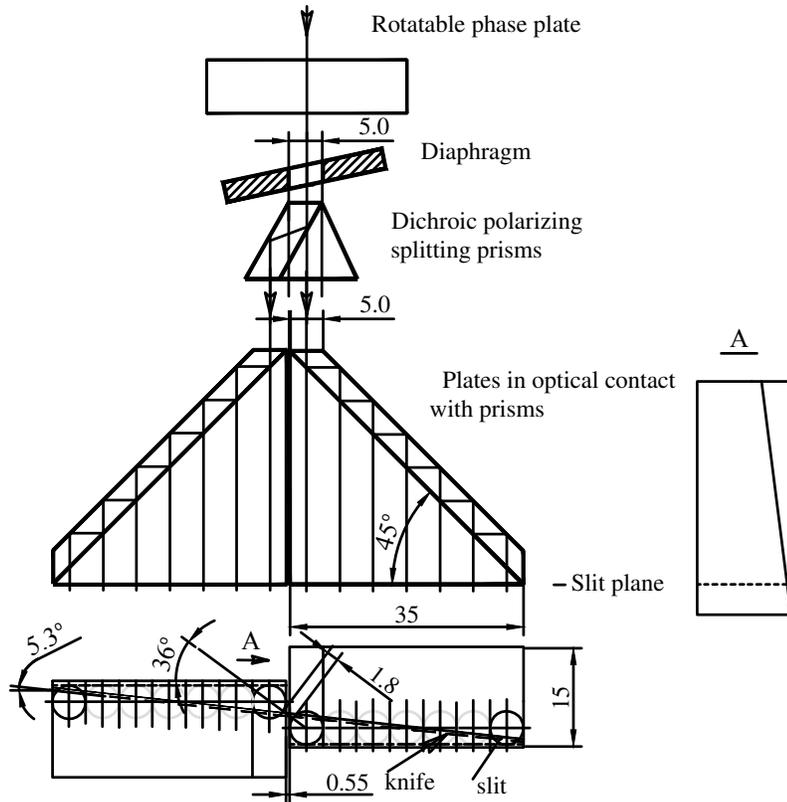


Рис. 1. Схема дихроичного анализатора круговой поляризации.

Здесь:

$$F_{90} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & -\mu \\ 0 & 0 & \mu & \beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После перемножения матриц получаем вектора Стокса S_0 и S_{90} :

$$S_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \mu \\ 0 \\ 1 + \mu \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$S_{90} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \mu \\ 0 \\ 1 - \mu \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Отношение интенсивностей у векторов составит:

$$I_{S0}/I_{S90} = (1 + \mu)/(1 - \mu), \quad (9)$$

где $\mu = \sin \delta$.

Для наибольшего отклонения фазы четверть-волновой пластинки на длине волны 4500 \AA по рис. 2, $\delta = 94^\circ$, отношение составит 820:1.

На рис. 4 приведен пример слайсерного спектра звезды 53 Cam, полученного с ПЗС-матрицей 4600×2000 Deep Depletion. Число строк, занимаемых спектром, составляет около 420. Камера спектрографа ОЗСП вносит заметные искажения. Программы Д. О. Кудрявцева [12] и А. В. Шатилова и Г. А. Чунтонова [13] в пакетном режиме исправляют искажения и объединяют семь верхних полос в вектор, соответствующий одной поляризации, и семь нижних полос в вектор ортогональной поляризации. На выходе анализатора высота четырнадцати изображений составляет около 70 мм, поэтому затвор выполнен в виде полого цилиндра с двумя прорезями. Он установлен на валу небольшого двигателя, поворачивающего цилиндр на 90° туда и обратно.

После экстракции и объединения семи верхних и семи нижних спектров с учетом искажений спектрографа получаем два вектора для одного кадра в

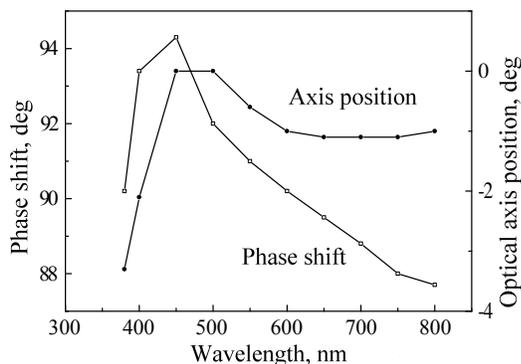


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига и положения оптической оси для четвертьволновой ахроматической фазовой пластинки от длины волны в нанометрах.

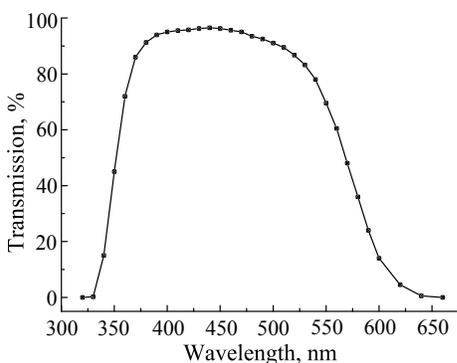


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания просветленного фильтра СЗС-21 в % от длины волны в нанометрах.



Рис. 4. Фрагмент слайсерного спектра звезды 53 Cam.

положении фазовой пластинки 0° и два для другого с поворотом фазовой пластинкой на 90° .

Резатель изображения расположен под углом $5:3$ по отношению к щели. Таким образом, плоскость поляризации одного из пучков на выходе поляризатора составляет около 30° относительно штрихов решетки, а не 45° , как хотелось бы. Возможно, вследствие этого в синей области один из пучков оказывается интенсивнее другого на 16%, как можно видеть на рис. 5, где показан поперечный разрез спектра звезды HD 182255. В красной области на длине волны около 6100 \AA пучки регистрируются с одинаковой эффективностью.

Ромбовый анализатор находится на каретке пе-

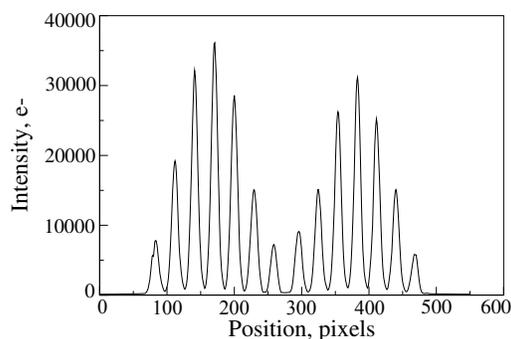


Рис. 5. Поперечный разрез спектра для звезды HD 182255.

ред щелью ОЗСП и может быть введен на ось спектрографа. Ромб на выходе на длине волны 4500 \AA по расчетам вносит фазовый сдвиг $89:4$, что близко к идеальному значению 90° . На выходе ромбового анализатора формируются два пучка света, поляризованные по левому и правому кругу. Один из этих пучков был использован для изучения свойств дихроичного анализатора. Свет от лампы сплошного спектра по схеме искусственной звезды через ромбовый анализатор подавался на диафрагму дихроичного анализатора. На выходе спектрографа с помощью матрицы ПЗС измерялись интенсивности пучков света в ортогональных круговых поляризациях. В положении фазовой пластинки 0° отношение их интенсивностей составило 1:19, а в положении пластинки 90° — 31:1. Это приводит к занижению оценки величины магнитного поля на 5% и 3% соответственно.

Поведение регистрируемой степени поляризации в области линии $H\gamma$ для звезды HD 215441 ($B8$, $m_V = 8.8$ [14]), которая определялась как отношение разностей интенсивностей в ортогональных поляризациях к их сумме, продемонстрировано на рис. 6. Черным цветом изображена поляризация для верхних спектров в двух последовательно зарегистрированных кадрах, а серым — для нижних.

На рис. 7 приведена фотография анализатора со слайсером и волоконно-линзово-призменной системой ввода света на край изображения спектра. Такая система позволяет контролировать стабильность спектрографа в процессе экспозиции путем одновременного «впечатывания» спектра сравнения.

Коэффициенты пропускания для прошедшего прямо пучка света, поляризованного в плоскости поляризатора (P -polarization), и в случае, когда плоскость поляризации пучка на входе призмы повернута на 90° (S -polarization), представлены на рис. 8. В коэффициент пропускания вносят вклад и потери света на входной и выходной гранях поляризатора. Эти грани просветлены.

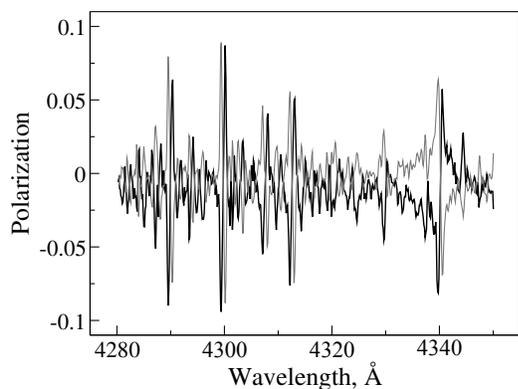


Рис. 6. Зависимость степени поляризации от длины волны в области Hγ у звезды HD 215441.

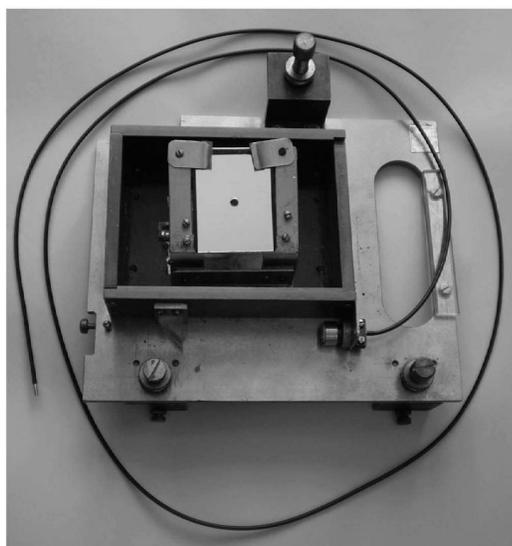


Рис. 7. Анализатор с волоконно-линзово-призменной системой ввода спектра сравнения на край поля.

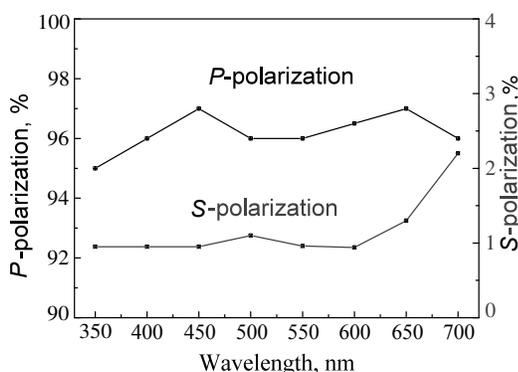


Рис. 8. Зависимость коэффициентов пропускания P-поляризации и S-поляризации в процентах от длины волны в нанометрах для поляризатора.

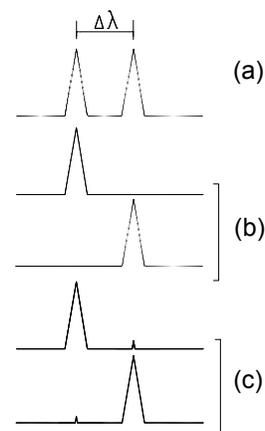


Рис. 9. Упрощенная схема расщепления эмиссионной линии в магнитном поле: (a) без анализатора, (b) с идеальным анализатором и (c) с реальным анализатором.

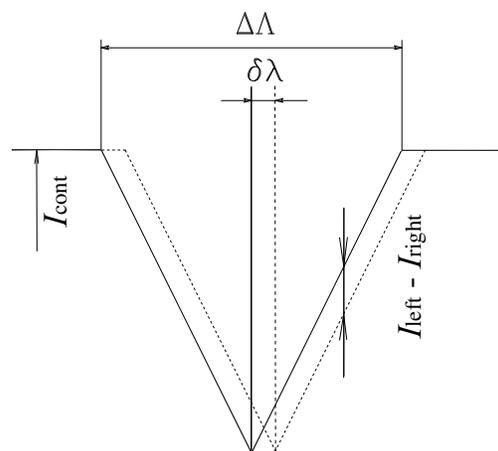


Рис. 10. Упрощенная картина расщепления линии поглощения в магнитном поле.

Упрощенные схемы расщепления в виде дублета спектральной линии приведены на рис. 9: (a) без анализатора, просто спектрографом; (b) идеальным анализатором, не вносящим искажения; (c) реальным анализатором. В случае (c) на месте вторых компонент в ортогональных спектрах появляются «духи». В результате центры тяжести компонент линий в одной и другой поляризациях оказываются сдвинутыми, так что расстояние между ними уменьшается. Это приводит к занижению измеряемого значения магнитного поля.

На рис. 10 показаны идеализированные контуры спектральной линии треугольной формы в левой и правой круговых поляризациях. Пусть ширина спектральной линии составляет $\Delta\lambda$, расщепление, вызываемое магнитным полем — $\delta\lambda$, интенсивность в одной поляризации в континууме — I_{cont} , остаточная глубина линии — $r I_{cont}$, разность интенсивностей поляризаций на контуре — $I_{left} - I_{right}$. Тогда из подобных треугольников

величина сдвига будет определяться выражением:

$$\frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{(I_{\text{left}} - I_{\text{right}})}{2r I_{\text{cont}}}$$

. Чтобы оценить ошибку измерений, продифференцируем последнее выражение, допуская, что $I_{\text{left}} \simeq I_{\text{right}}$: $\Delta(\delta\lambda) = \Delta\lambda(\Delta I_{\text{left}} + \Delta I_{\text{right}})/2r I_{\text{cont}}$. При разрешении ОЗСП около 15 000 на длине волны 4500 Å обратная дисперсия составит 0.12 Å pix⁻¹. При ширине линии у звезды 1 Å на такую линию придется 8 пикселей (или столбцов матрицы ПЗС 4600 × 2000). Пусть после накопления спектра на такой ПЗС интенсивность в одном пикселе достигает середины динамического диапазона, т.е. 50 000 e⁻ pix⁻¹. Тогда, допуская, что $r = 0.2$ и $I_{\text{left}} \simeq I_{\text{right}} \simeq I_{\text{cont}}$ и что статистика пуассоновская, т.е. $\Delta I_{\text{left}} \simeq \Delta I_{\text{right}} \simeq \sqrt{I_{\text{cont}}}$, получим:

$$\Delta(\delta\lambda) \simeq 5\Delta\lambda/\sqrt{I_{\text{cont}}}. \quad (10)$$

Общее число носителей заряда на одном кадре в одной поляризации может достигать $25\,000 \times 4 \times 210 \times 8 = 1.7 \times 10^8$ e⁻. Здесь 25 000 — интенсивность на полувысоте, 4 — отношение площадей под всеми пиками на верхней части рис. 5 к площади центрального пика, 210 — число строк на матрице, занятых под половину изображения спектра, 8 — число столбцов, занимаемых линиями. Подставляя эти значения, получим $\Delta(\delta\lambda) \simeq 0.0004$ Å. По замечанию Бэбкока [1], расщеплению 0.01 Å соответствует поле 1 кГс. Отсюда следует, что по одной линии на одном кадре ошибка измерений составит 40 Гс. Чтобы повысить точность, надо усреднить измерения по нескольким линиям или сделать несколько экспозиций.

На рис. 11 приведен двойной спектр звезды о Uta ($m_V = 3.4$, F8) без магнитного поля в ортогональных круговых поляризациях, полученный за время экспозиции 2 мин. Всего было сделано четыре экспозиции с поворотом фазовой пластинки. Спектры при каждом положении пластинки очищены от следов космических частиц, усреднены и отнормированы. По программе измерений магнитного поля по методу Баньюло и др. [15], реализованной Семенко Е. А., получено значение продольной составляющей $B_z = +2 \pm 8$ Гс. На этом участке спектра было 155 спектральных линий глубже 5%. Из них при обработке программой Д. О. Кудрявцева [10] использовано 118 линий. Получено значение поля $B_z = +17 \pm 8$ Гс. По оценочной формуле (10) с учетом дисперсии 0.18 Å pix⁻¹ ошибка измерений составила 11 Гс.

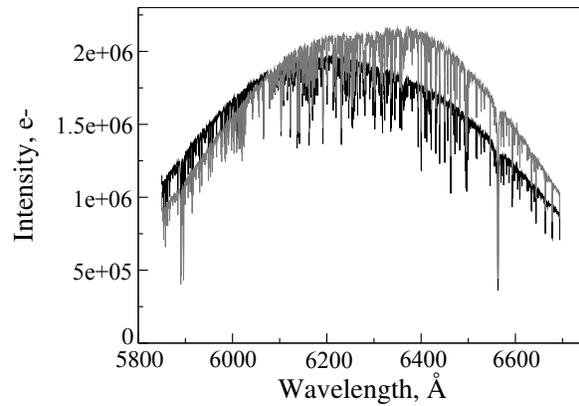


Рис. 11. Спектры звезды о Uta, $m_V = 3.4$, F8 в ортогональных круговых поляризациях.

3. ВЫВОДЫ

1. Дихроичный анализатор для измерений магнитных полей звезд на БТА представляет собой более совершенную версию в сравнении с анализаторами на слюдяных фазовых элементах, на ромбах Френеля, с ахроматической фазовой пластиной и пластиной Савара, на ромбе Муни и пластиной Савара. Он используется в наблюдениях на ОЗСП БТА с ноября 2004 г. до настоящего времени. За это время сменилась система ПЗС формата 2000 × 2000 на систему с числом пикселей 4600 × 2000.
2. Эффективность регистрации за счет применения резателей изображений не меняется с ухудшением изображений до 3''5, и в четыре раза выше при изображениях хуже 3''5, по сравнению со случаем без резателей.
3. По одной спектральной линии глубиной 20% при одной экспозиции можно получить точность измерений 40 Гс.
4. Анализатор занижает значение магнитного поля на 5% в положении фазовой пластинки 0° и на 3% в положении пластинки 90°.
5. По зеемановским спектрам, полученным за две минуты экспозиции для звезды стандарта нулевого поля о Uta ($m_V = 3.4$, F8) с количеством линий около 150, было измерено магнитное поле с ошибкой 8 Гс.
6. Эффективность анализатора может быть повышена путем просветления поверхностей на входе и выходе резателей изображений и фазовой пластинки на 20%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В. В. Власюка за поддержку работы, Е. И. Перепелицына — за изготовление

элементов резателя и поляризатора, сотрудников ЛИЗМ — за помощь в наблюдениях и обсуждениях. Нанесение многослойных покрытий проводилось в Институте прикладной физики РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. W. Babcock, in *Astronomical Techniques*, Ed. by W. A. Hiltner (Univ. Press, Chicago, 1962).
2. I. D. Najdenov and G. A. Chountonov, *Астрофиз. исслед.* (Известия Спец. астрофиз. обс.) **8**, 139 (1976).
3. R. W. Ditchburn, *Light* (Interscience Publ., New York, 1957).
4. G. A. Chountonov, in *Magnetic Stars*, Ed. by Y. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, (SAO RAS, N. Arkhyz, 2004), pp. 286–291.
5. A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, and A. V. Perekhod, *J. Quantum Spectrosc. Radiation Transf.* **88**, 319 (2004).
6. V. E. Panchuk, G. A. Chountonov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 339 (2014).
7. G. A. Chountonov, in *Stellar Magnetic Fields*, Ed. by Y. Glagolevskij and I. Romanyuk (SAO RAS, N. Arkhyz, 1997), p. 229.
8. G. A. Chountonov, in *Spectroscopic Methods in Modern Astrophysics*, Ed. by L. Mashonkina and M. Sachkov (Yanus-K, Moscow, 2007), pp. 336–349.
9. A. N. Zaidel, G. V. Ostrovskaja, and I. I. Ostrovskii, *Technology and Practice of Spectroscopy*, 2nd ed. (Nauka, Moscow, 1976).
10. W. A. Shurecliff, *Polarized Light* (Amer. Inst. Physics, New York, 1963).
11. A. Gerrard and J. M. Burch, *Introduction to Matrix Methods in Optics* (Wiley, New York, 1975).
12. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
13. A. V. Shatilov and G. A. Chountonov, Report No. 336, SAO RAN (Spec. Astrophys. Obs. RAS, 2011).
14. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **105**, 105 (1947).
15. S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 191 (2002).

Dichroic Circular Polarization Analyzer for the Main Stellar Spectrograph of the 6-m Telescope

G. A. Chountonov

We describe a dichroic circular polarization analyzer with a double image slicer providing seven slices for each polarization developed for the Main Stellar Spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. The analyzer is designed for measuring stellar magnetic fields using the Zeeman effect and represents an upgraded version compared to earlier used polarization analyzers. We report the parameters of the analyzer and estimate the accuracy of measurements performed with it.

Keywords: *methods: observational—techniques: polarimetric—techniques: spectroscopic*