

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 520.36

ДИСПЕРГИРУЮЩАЯ СИСТЕМА СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА С КВАЗИЛИНЕЙНЫМ ХРОМАТИЗМОМ

© 2005 г. Ю. С. Иванов, И. И. Синявский

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г. Киев

E-mail: iva@mao.kiev.ua, syn@mao.kiev.ua

Обосновано применение призмных дисперсионных систем для работы в широком спектральном диапазоне в поляризованном свете. Предложена методика выбора необходимых пар оптических сред для призмных систем с квазилинейным хроматизмом; приведены таблицы пар стекол для работы в ближнем ультрафиолетовом–видимом диапазоне. Показано, что энергетическая эффективность таких систем может быть приближена к теоретически возможной.

Коды OCIS: 120.2130, 120.6200.

Поступила в редакцию 09.06.2004.

Введение

Для разложения в спектр исследуемого излучения используют различные диспергирующие элементы – призмы или дифракционные решетки. Известны также их комбинации, системы решеток и сложные призмы – Амичи, Резерфорда, Аббе [1].

Одним из недостатков призмных систем является неравномерность дисперсии, вследствие чего спектр в коротковолновой части оказывается растянутым, а в длинноволновой – сжатым. Дифракционные решетки свободны от этого недостатка. Сочетание линейности дисперсии и высокого разрешения способствует их широкому применению в различных спектральных приборах [2]. Недостатками обычных дифракционных решеток являются наложение спектров различных порядков, невысокая эффективность (не более 0,7) и ограниченный спектральный диапазон (не более одной октавы [1, 2]). Голографические толстослойные решетки могут иметь высокую эффективность, но в узком спектральном диапазоне. Затруднительным также является применение дифракционных решеток в поляризованном свете вследствие различной и плохо прогнозируемой эффективности в лучах, поляризованных параллельно и перпендикулярно относительно штрихов.

В приборах низкого и умеренного разрешения, работающих в поляризованном свете в широком спектральном диапазоне, предпочтительны призмы. Однако при использовании матричных приемников излишнее “растягивание” коротковолнового участка

приведет к падению эффективности работы устройства в этой области. В астрономии, где выигрыш даже в одну звездную величину существенно расширяет круг решаемых задач, такое падение является нежелательным. Поэтому предлагается использование призмных систем, обладающих искусственным (квази)линейным хроматизмом и дающих спектр с уменьшенной неравномерностью дисперсии.

В литературе достаточно полно описаны обычные хроматические аберрации и методы их устранения [3, 4], однако информация о системах с особым ходом дисперсии, в том числе линейным, отсутствует.

Вывод основных зависимостей

Угловая дисперсия одиночного клина определяется углом при его вершине и дисперсией вещества $dn/d\lambda$. Поскольку $dn/d\lambda = f(\lambda)$, то, как упоминалось выше, дисперсия клина в различных спектральных участках будет разной, причем ход этой зависимости существенно зависит от сорта стекла. Для решения поставленной задачи необходимо найти пары стекол, дающие в сумме максимальную среднюю дисперсию при минимальной ее разнице на краях выбранного диапазона.

Ход дисперсии по спектру индивидуален для каждого стекла и заметно различается даже у стекол одной группы. Кроме того, применимость стекол может ограничиваться химической и радиационной устойчивостью, технологичностью, стоимостью и т. д., поэтому анализировались все стекла, произво-

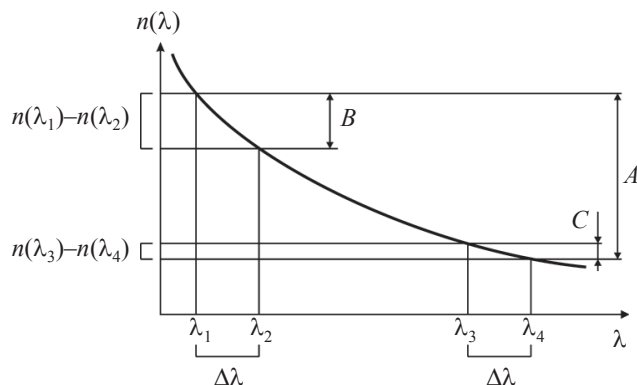


Рис. 1. Зависимость $n(\lambda)$ для оптических сред.

димые в СНГ, а также стекла фирмы “Schott”. Аналитические выражения $dn/d\lambda$, выводимые из аппроксимирующих формул Шотта, Герцбергера и пр., весьма громоздки и плохо подходят для сравнения стекол между собой, поэтому анализ проводился посредством численных методов на конечных интервалах длин волн.

Рассмотрим зависимость показателя преломления n среды от длины волны λ (рис. 1).

Выделим в начале и в конце заданного спектрального диапазона два участка одинаковой ширины $\Delta\lambda$. Обозначим полную дисперсию среды во всем диапазоне A , а частные дисперсии в поддиапазонах $\Delta\lambda$ – B и C соответственно.

Тогда

$$A = \alpha(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_4}), \quad (1)$$

где α – угол при вершине клина.

Аналогично запишем частные дисперсии для поддиапазонов $\Delta\lambda$:

$$B = \alpha(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}), \quad (2)$$

$$C = \alpha(n_{\lambda_3} - n_{\lambda_4}). \quad (3)$$

Поскольку для всех стекол в области их прозрачности величины A , B и C имеют один знак, то неравномерность дисперсии может быть устранена, если использовать комбинацию из двух клиньев, изготовленных из разных типов стекла, показанную на рис. 2.

Запишем уравнение равномерности дисперсии для блока в целом

$$\alpha_1 B_1 - \alpha_2 B_2 = \alpha_1 C_1 - \alpha_2 C_2, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму клиньям соответственно.

Отсюда находим, что

$$\alpha_2 = \alpha_1 (B_1 - C_1) / (B_2 - C_2). \quad (5)$$

Тогда общая дисперсия блока будет равна

$$D = \alpha_1 A_1 - \alpha_2 A_2. \quad (6)$$

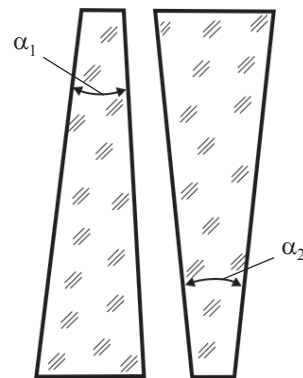


Рис. 2. Сочетание двух клиньев.

Очевидно, следует подбирать пары стекол, обеспечивающих максимальное значение D при соблюдении условия (5).

Предварительный отбор стекол

Для дальнейшего анализа стекла выбирались из двух каталогов: ГОСТ 3514-76 и “Schott 2000” [5, 6] по критерию прозрачности при 0,365 мкм (коэффициент пропускания не менее 0,8 при толщине 10 мм). Всего анализировалось более 70 стекол.

Для предварительного отбора введем так называемый коэффициент “прямызны”

$$E = A / (B - C). \quad (7)$$

Вычисления коэффициентов E проводились для клиньев с углом $\alpha = 10^\circ$ в диапазоне 370–870 нм. В результате вычислений стекла были разбиты на две группы с контрастными значениями E . В табл. 1 представлены стекла с малыми E , а в табл. 2 – стекла с высокими E .

Таблица 1. Флинты

№	Марка	ТКР	A	B	C	E
1	Ф8	91	0,62	0,26	0,03	26,46
2	Ф2	70	0,59	0,25	0,02	26,65
3	Ф13	70	0,60	0,25	0,02	26,65
4	Ф1	70	0,58	0,24	0,02	26,75
5	F2*	82	0,60	0,25	0,03	26,80
6	F5*	80	0,55	0,23	0,02	26,89
7	Ф6	69	0,55	0,23	0,02	26,94
8	БФ12	82	0,56	0,23	0,02	27,00
9	БФ21	71	0,53	0,22	0,02	27,13
10	LF5*	91	0,49	0,20	0,02	27,34
11	ЛФ7	71	0,49	0,20	0,02	27,36
12	ЛФ5	68	0,48	0,20	0,02	27,46
13	LLF1*	81	0,41	0,16	0,02	28,16
14	ЛФ11	71	0,41	0,16	0,02	28,24
15	БФ25	66	0,45	0,18	0,02	28,26
16	БФ6	77	0,39	0,15	0,02	28,55
17	ОФ4	44	0,51	0,20	0,02	28,75
18	ОФ3	48	0,48	0,19	0,02	28,86
19	БФ7	68	0,36	0,14	0,02	29,38

* Стекла из каталога “Schott 2000” [6].

Таблица 2. Кроны

№	Марка	ТКР	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>
1	N-SK5*	60	0,32	0,12	0,02	30,80
2	K14	64	0,28	0,11	0,01	30,82
3	K19	74	0,28	0,10	0,01	30,83
4	БК13	62	0,30	0,11	0,02	30,90
5	БК8	56	0,29	0,11	0,01	31,13
6	K3	74	0,27	0,10	0,01	31,19
7	N-FK51*	133	0,19	0,07	0,01	31,25
8	N-PSK3*	62	0,29	0,11	0,02	31,29
9	N-ZK7*	50	0,28	0,10	0,01	31,33
10	N-BK7*	71	0,27	0,10	0,01	31,47
11	K8	68	0,27	0,10	0,01	31,56
12	ФК11	78	0,25	0,09	0,01	31,60
13	ЛК8	54	0,23	0,08	0,01	31,96
14	ЛК6	80	0,23	0,09	0,01	32,01
15	N-FK5*	92	0,23	0,08	0,01	32,23
16	ЛК7	40	0,24	0,09	0,01	32,30
17	N-BK10*	58	0,25	0,09	0,01	32,38
18	Кварц пл.	20	0,22	0,08	0,01	32,42
19	ЛК5	33	0,24	0,09	0,01	32,66

* Стекла из каталога “Schott 2000” [6].

Учет термического коэффициента расширения (ТКР), приведенного в таблицах, дает возможность оценить в дальнейшем возможность склейки компонентов в моноблок.

Расчет полной дисперсии блока

После предварительного выбора стекол по формулам (5), (6) можно вычислить отношения углов α_2/α_1 клиньев и полную дисперсию блока. Эти вычисления выполнялись в следующей последовательности:

поочередно составлялись все возможные пары стекол из табл. 1 и 2;

подстановкой данных из табл. 1 и 2 в (5), (6) находились углы клиньев α_2 для флинтowych стекол при заданном $\alpha_1 = 10^\circ$.

Всего было рассмотрено 19^2 пар. Варианты с наибольшей дисперсией приведены в табл. 3.

Сравнительные характеристики

На рис. 3 приведены результаты расчетов хода лучей через простую призму и через призмennую систему, построенную по данным табл. 3.

Видно, что дисперсия блока стала почти равномерной, хотя и ожидаемо уменьшилась приблизительно в пять раз (что следует из сопоставления

Таблица 3. Пары стекол с выровненной дисперсией в диапазоне 370–870 нм

Марка стекла	$D \times 10^3$, град α_2 , град								
	Ф8	Ф2	Ф13	Ф1	F2	F5	Ф6	БФ12	БФ21
ЛК5	45,7	44,4	44,3	43,6	43,2	42,5	42,2	41,8	40,8
	3,16	3,33	3,29	3,40	3,31	3,58	3,58	3,57	3,76
N-BK10	45,1	43,6	43,6	42,8	42,4	41,7	41,4	41,0	39,9
	3,26	3,43	3,39	3,51	3,41	3,69	3,70	3,68	3,87
N-PSK3	44,6	42,9*	42,8*	41,9*	41,4	40,6	40,2*	39,6	38,4*
	3,95	4,16	4,11	4,25	4,14	4,48	4,48	4,47	4,70
БК13	43,6	41,8*	41,7*	40,8*	40,2	39,3	38,9*	38,3	37,0*
	4,21	4,43	4,38	4,53	4,41	4,77	4,77	4,76	5,00
ЛК7	43,4	42,0	42,0	40,7	40,2	39,5	39,1	38,6	37,5
	3,18	3,35	3,31	3,42	3,33	3,61	3,61	3,59	3,78
BK8	43,4	41,7	41,6	40,7	40,2	39,4	39,0	38,4	37,2
	3,98	4,19	4,14	4,28	4,16	4,51	4,51	4,49	4,73
K8	43,1	41,5*	41,5*	40,2*	39,5	39,1	38,6*	37,5	35,6*
	3,62	3,81	3,76	3,89	3,79	4,10	4,10	4,09	4,30
N-ZK7	42,9	41,2	41,1	40,3	39,8	39,0	38,7	38,1	37,0
	3,77	3,97	3,92	4,05	3,94	4,27	4,27	4,26	4,48
N-BK7	42,5	40,9*	40,9*	40,1*	39,6*	38,8*	38,5*	38,0	36,8*
	3,63	3,82	3,78	3,91	3,80	4,12	4,12	4,10	4,32
ФК11	40,5	39,0*	39,0*	38,2*	37,8*	37,1*	36,7	36,3*	35,2*
	3,37	3,55	3,51	3,63	3,53	3,83	3,83	3,81	4,01
K3	40,5	38,9*	38,8*	38,0*	37,6	36,8*	36,4*	35,9*	34,8*
	3,66	3,86	3,81	3,94	3,84	4,16	4,16	4,14	4,36

* Пары стекол с малой разницей ТКР, пригодные для склейки в моноблок.

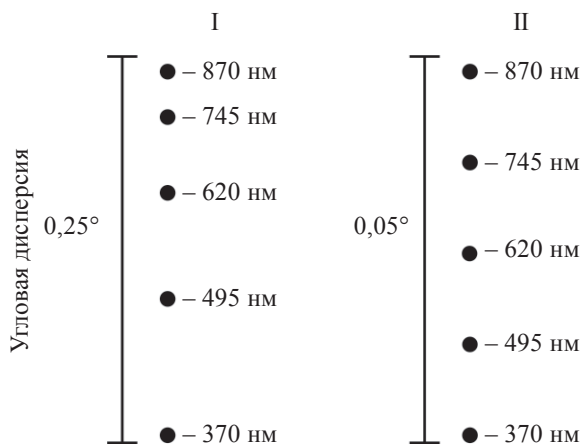


Рис. 3. Угловая дисперсия призм: I – одиночная призма из К8 ($\alpha_1 = 10^\circ$); II – блок ЛК5-Ф8 ($\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha_2 = 3,16^\circ$).

величин A из табл. 1, 2 и D из табл. 3 для соответствующих стекол).

При пространственном разнесении призмы, составляющие блок, могут размещаться в различных частях оптической системы, работающих с разным угловым увеличением. Легко показать, что при этом выражения (5) и (6) обобщаются как

$$\alpha_2 = \Gamma_{12} \alpha_1 (B_1 - C_1) / (B_2 - C_2), \quad (8)$$

$$D = \alpha_1 A_1 - \Gamma_{12} \alpha_2 A_2,$$

где Γ_{12} – угловое увеличение части оптической схемы, расположенной между клиньями.

Для обычных призмных систем величина $dn/d\lambda$ может изменяться по спектру в 4–10 раз (в зависимости от материала призм и спектрального диапазона). Теоретически предлагаемая система улучшит соотношение сигнал/шум пропорционально корню из этой величины, т. е. в 2–3 раза, а если учитывать шумы считывания матричного приемника, то выигрыш будет еще больше.

Преимущества такой системы перед дифракционными решетками иллюстрирует рис. 4. Из рисунка следует, что выигрыш будет тем больше, чем шире спектральный диапазон. Например, композиция LiF–BaF₂ хорошо линейаризуется в диапазоне 250–1000 нм, который невозможно перекрыть одной, несменной, решеткой. Кроме того, использование решеток в широкодиапазонных спектрополяриметрах проблематично из-за большой разницы в эффективности лучей разной поляризации.

Пропускание призмной системы с линейаризованной дисперсией оценено по формулам Френеля для различных вероятных ориентаций клиньев при углах падения, меньших 30° . Характеристики решеток получены от фирм-изготовителей (Holograte Ltd, Hollab Ltd).

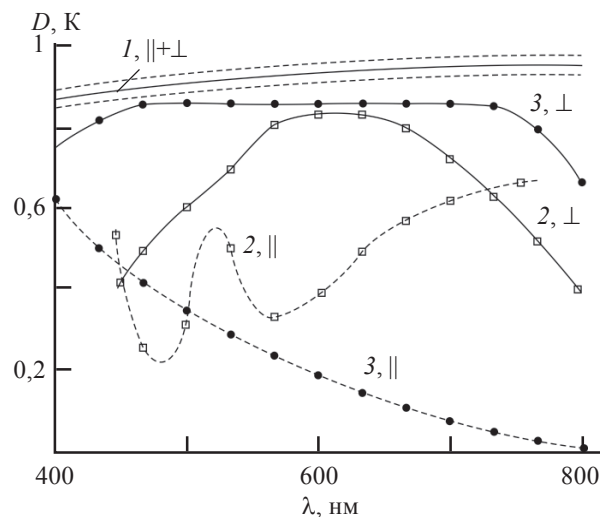


Рис. 4. Энергетическая эффективность различных диспергирующих систем. 1 – призмная система с линейаризованной дисперсией, 2 – непрофилированная голографическая решетка, 3 – профилированная голографическая решетка, || – плоскость поляризации параллельна плоскости дисперсии, ⊥ – плоскость поляризации перпендикулярна к плоскости дисперсии.

Выводы

Предложена простая диспергирующая система с линейаризованной дисперсией, которая может применяться в спектральных приборах среднего и низкого разрешения.

Особенностью предлагаемой системы является высокая энергетическая эффективность в широком спектральном диапазоне. Чем шире используемый диапазон, тем больше потенциальный выигрыш в эффективности по сравнению с обычными диспергирующими системами, в том числе в поляризованных лучах.

Приведена простая методика расчета таких систем и, как иллюстрация, таблица пар стекол, линейаризующих дисперсию в диапазоне 370–870 нм с учетом возможности их склейки в моноблок.

Работа выполнена при поддержке гранта NN43 UNTC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
2. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во МГУ, 1977. 354 с.
3. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
4. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
5. ГОСТ 3514-76. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. М.: Госстандарт, 1976.
6. Katalog Optisches Glas “SCHOTT-2000”, 2000.