

СВЕТОФИЛЬТРЫ ВЫСОКОЙ КОНТРАСТНОСТИ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Ф. А. Королев, А. Ю. Клементьева, Т. Ф. Мецержакова и И. А. Рамазина

Рассмотрены теоретически многослойные контрастные светофильтры с несколькими разделительными слоями, имеющие полосу пропускания шириной от тысячи до нескольких ангстрем. Описаны свойства экспериментальных образцов контрастных светофильтров на основе покрытий $\text{PbF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ и $\text{ZnS-Na}_3\text{AlF}_6$. Показан ряд преимуществ контрастных светофильтров перед светофильтрами «классического типа».

Введение

Развитие экспериментальных методов нанесения многослойных покрытий в вакууме за последнее время, а также разработка методов расчета и синтеза покрытий с помощью электронно-вычислительной техники позволяют осуществлять все более совершенные по свойствам светофильтры, зеркала и другие системы.

В настоящем сообщении рассматривается один из видов многослойных диэлектрических систем — многослойные светофильтры высокой контрастности. Величина фона таких светофильтров уменьшена на один или несколько порядков по сравнению с интерференционными светофильтрами типа Фабри—Перо с одним разделительным слоем [1].

Применение контрастных светофильтров приносит ценные результаты в тех исследованиях, где слабые монохроматические сигналы должны быть зарегистрированы на сильном фоне других светящихся объектов. Подобные условия почти всегда наблюдаются в астрономических исследованиях, например, в исследованиях процессов, происходящих в короне Солнца, в исследованиях газовых туманностей и прочих сильно удаленных объектов. Немаловажную роль играют на практике малые габариты и хорошая стабильность свойств светофильтров.

Теория простого и контрастного светофильтра

Напомним, что обычный диэлектрический интерференционный светофильтр имеет в составе 2 многослойных зеркала, представляющих чередующиеся слои двух диэлектриков с высоким и низким n , и разделительный слой толщины $k\frac{\lambda}{2}$. Светофильтр характеризуется постепенным спадом интенсивности при удалении от максимума полосы.

Для ширины полосы $2\delta\lambda$ и величины контрастности C такого светофильтра имеют место соотношения

$$\frac{T_{\min}}{T_{\max}} = \frac{1}{C} = \left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2, \quad 2\delta\lambda = \frac{\lambda_{\max}}{k_0 + A} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}, \quad (1)$$

где R — коэффициент отражения диэлектрических зеркал в области плато отражения, k_0 — порядок светофильтра, A — поправка, связанная

с дисперсией фазового скачка на диэлектрическом зеркале. Из соотношений (1) вытекает, что для обычного светофильтра нет возможности уменьшить значение фона при фиксированном значении ширины полосы пропускания. И хотя полоса пропускания таких светофильтров может быть сделана малой вплоть до нескольких ангстрем, суммарное пропускание за счет фона составит значительную величину. По оценке Розенберга [2], эта величина составляет около 20% от мощности излучения, пропускаемого фильтром (светофильтры с зеркалами $R = \text{const}$ в некоторой области длин волн). Путем наложения специальных блокирующих систем фон в ряде участков спектра может быть сильно уменьшен, однако контур полосы исправить нельзя.

Более широкие возможности для монохроматизации света представляют многослойные диэлектрические системы, состоящие из нескольких многослойных четвертьволновых зеркал и нескольких разделительных слоев толщиной порядка $k \frac{\lambda}{2}$.

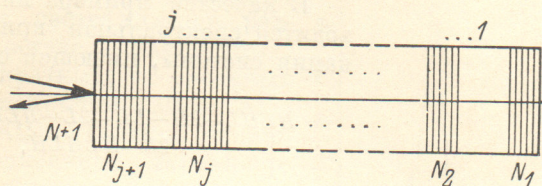


Рис. 1. Схема многослойного контрастного светофильтра. j — номер разделительного слоя, N_j — число слоев j -го многослойного зеркала.

Схематически покрытие представлено на рис. 1. Подобные системы с двумя разделительными слоями (Ag-зеркала) ранее изучались в работах Дюфура [3], Германсена [4], Синельникова [5] (60-е годы). Авторы [3-5] нашли ряд преимуществ двойных фильтров в отношении величины контрастности. Для инфракрасной области спектра двойные фильтры рассмотрены в работах Смита [6] и Ринга [7] на основе слоев Ge — криолит.

Сведения о свойствах более общих систем отсутствуют, имеются лишь очень краткие сообщения в журналах, не содержащие анализа систем, не описаны подробно результаты их исследования и свойства.

Свойства систем более общего типа, представленных на рис. 1, исследовались нами на основе проведения расчетов спектральных характеристик $T(\lambda)$ широкого круга систем, отличающихся параметрами, числом и расположением слоев.

Расчеты выполнялись на электронной вычислительной машине; в основу программы было положено матричное уравнение многослойной диэлектрической системы, связывающее амплитуды отраженной и проходящей волны E^- , E^+ , в $N+1$ среде с компонентами поля в 0 среде [2].

Матричное уравнение системы имеет вид

$$\begin{pmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{n_{N+1}} \\ 1 - \frac{1}{n_{N+1}} \end{pmatrix} \prod_m \begin{pmatrix} \cos \varphi_m & i \sin \varphi_m \\ i n_m \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ n_0 - n_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0^+ \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где n_{N+1} , n_0 , n_m — показатели преломления $N+1$ -, 0- и m -сред, $\varphi_m = 2\pi n_m h_m / \lambda$ — порядок интерференции m -го слоя.

Если обозначить элементы результирующей матрицы через ω_{ik} , то, определяя коэффициент пропускания как отношение потока энергии проходящей волны к потоку падающей, получим соотношения для расчета T и R в виде

$$T = \frac{n_0}{n_{N+1}} \left| \frac{E_0^+}{E_{N+1}^+} \right|^2 = \frac{n_0}{n_{N+1}} \left| \frac{1}{\omega_{11}} \right|^2, \quad R = \left| \frac{E_{N+1}^-}{E_{N+1}^+} \right|^2 = \frac{\omega_{21}}{\omega_{11}}. \quad (3)$$

Для величин R и T выполняется закон сохранения энергии в виде $R+T=1$, и, следовательно, достаточно произвести машинный расчет лишь одной величины T (или R).

Как видно из матричного уравнения, $T(\lambda)$ и $R(\lambda)$ являются функциями коэффициентов преломления, оптических толщин, числа слоев и их расположения в системе. В общем случае зависимости R и T от указанных параметров сложны, однако расчетные кривые $T(\lambda)$ для нашего случая (рис. 1) обнаруживают ряд закономерностей в свойствах.

Многослойные системы, содержащие несколько четвертьволновых зеркал и несколько разделительных слоев порядка $\lambda/2$, имеют в спектре пропускания широкую область погашения света (она несколько шире, чем у составляющих четвертьволновых зеркал); на ней расположены максимумы пропускания различной высоты. Величина фона на удалении от максимумов зависит от числа четвертьволновых слоев, уменьшаясь с ростом N .

В качестве примера на рис. 2 приводится спектральная кривая пропускания системы, имеющей состав

$$HLHL-2H-LH-2L-HLHLHLH-2L-HLHLH,$$

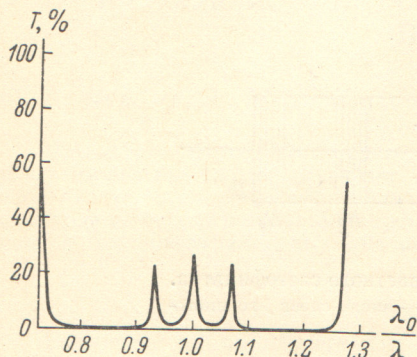


Рис. 2. Спектральная кривая пропускания системы $HLHL-2H-LH-2L-HLHLHLH-2L-HLHLH$.

Слой $ZnS-Na_3AlF_6$.

где H — четвертьволновая пленка вещества с высоким показателем преломления, L — четвертьволновая пленка вещества с низким показателем преломления.

Плато погашения системы простирается от 4700 до 8100 Å (длина волны, для которой слой кратен $\lambda/4$, равна 6000 Å). Число пиков в пределах плато погашения может быть различно. Для практики важно найти усло-

вия, при которых наблюдается единственная полоса пропускания максимальной интенсивности. Для этого, как мы видели (рис. 2), еще недостаточно, чтобы были согласованы толщины разделительных слоев, т. е. чтобы выполнялось условие $2nh_j = k_j \lambda_0$ (условие было выполнено, а полоса тройная). Анализ спектров пропускания двойных систем показывает, что одна полоса максимальной интенсивности наблюдается при условиях: 1) согласования разделительных слоев $2nh_j = k_j \lambda_0$, 2) при выполнении соотношения $N_1 + N_3 \approx N_2$.

Расчет подтверждает, что при наложении любого числа симметричных светофильтров (пусть даже с различным числом слоев в зеркалах, но через слой $\lambda_0/4$) полоса пропускания остается единственной с высоким пропусканием.

Для определения коэффициента пропускания системы, состоящей из слоев с толщиной, кратной $\lambda_0/4$, удобно пользоваться правилом, установленным Жиакомо [8]. Правило состоит в том, что, исключая из системы симметричные покрытия (не оказывающие влияния на пропускание системы), ее можно привести к одному из трех вариантов: 1) к 0 покрытию, в этом случае для λ_0 получаем максимальное пропускание, равное T подложки, 2) система сводится к слою с низким показателем преломления, тогда этот слой оказывает просветляющее действие и $T_{\lambda_0} > T$ подложки; 3) система сводится к слою с высоким показателем преломления (или к нескольким слоям толщины $\lambda_0/4$), тогда пропускание при λ_0 будет меньше единицы на величину, отражаемую этими остающимися слоями.

Свойства светофильтров высокой контрастности. Ширина полосы. Форма контура полосы. Контрастность

1. Расчет показывает, что при наложении симметричных светофильтров ширина полосы пропускания имеет величину такого же порядка, как у наиболее узкополосного светофильтра, входящего в состав сложного. Если соединены одинаковые светофильтры, ширина полосы сохраняется примерно той же величины, которую имеет одинарный светофильтр. Изменяя последовательно число слоев в зеркалах и толщину разделительных слоев простых светофильтров, входящих в контрастный, мы имеем возможность получить целый ряд значений ширины полосы пропускания при высокой контрастности светофильтра. Это свойство контрастных систем имеет большую ценность на практике, являясь основой получения светофильтров с заданной шириной полосы.

В табл. 1 приводятся значения ширины полосы пропускания контрастных светофильтров различного состава — двукратных, трех-, пятикратных, построенных на основе покрытий $\text{ZnS-Na}_3\text{AlF}_6$ и $\text{PbF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$. Таблица иллюстрирует описанные закономерности для ширины полосы; она показывает, что контрастные светофильтры могут быть получены с полосой от тысячи ангстрем шириной до нескольких ангстрем.

2. Контур полосы пропускания контрастного светофильтра характеризуется резким спадом интенсивности на крыльях, как это показывает рис. 3, б и в. В тех случаях, когда при соединении светофильтров коэффициенты их отражения достаточно близки к нулю и $N_1 + N_3 > N_2$, контур полосы приближается к прямоугольной форме (рис. 3, б). В максимуме полосы наблюдается небольшая структура. Интересно заметить, что форма контура очень чувствительна к небольшим изменениям R соединяемых светофильтров (т. е. к их асимметрии). Это свойство можно использовать для получения образцов светофильтров с той или иной формой полосы, а также для плавной регулировки ширины полосы.

При наложении каждого следующего светофильтра контрастность полосы возрастает, полоса становится более «прямоугольной». На рис. 4 показаны спектральные кривые двух светофильтров: трех- и четырехкратного наложения; из рисунка хорошо видно, как возрастает «прямоугольность» полосы.

3. Величина фона, контрастность. Конкретное выражение для фона системы, состоящей из нескольких зеркал и разделительных слоев, в общем случае найти трудно. Однако для систем, состоящих из нескольких одинаковых узкополосных светофильтров, можно найти простое выражение.

Для случая узкополосных светофильтров имеем

$$\frac{1}{C} = \left(\frac{1}{C}\right)^N, \quad (4)$$

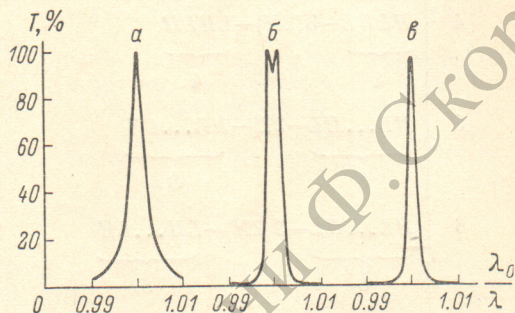


Рис. 3. Контур полосы пропускания простого и контрастных светофильтров.

а — система $\frac{HL \dots HL - 2H - LH \dots LH}{8}$, б — система $\frac{HL \dots HL - 2H - LH \dots LH - 2H - LH \dots LH}{15}$, в — система $\frac{HL \dots HL - 2H - LH \dots LH}{17}$.

Таблица 1
Ширина полосы пропускания светофильтров контрастного типа

Номер п./п.	Основа контрастного светофильтра	2λ однократ- ного фильтра, Å	2λ двукрат- ного фильтра, Å	2λ трех- и пятикрат- ного фильтра, Å
I. Покрытия ZnS-Na ₃ AlF ₆ (λ = 6000 Å)				
1	HL-2H-LH	885	—	600
2	HL-3(2H-HL)	370	300	300
3	HLHL-2H-LHLH └───┘ └───┘ 4 4	265	—	300
4	HLHL-3(2H)-LHLH └───┘ └───┘ 4 4	—	90	90
5	HL...HL-2H-HL...LH └───┘ └───┘ 8 8	29	30	—
6	HL...HL-3(2H)-LH...LH └───┘ └───┘ 8 8	13.8	14	—
7	HL...HL-2H-LH...LH └───┘ └───┘ 10 10	10	9-10	—
8	HL...HL-3(2H)-LH...LH └───┘ └───┘ 10 10	3.5	3.5	—
II. Покрытия PbF ₂ -Na ₃ AlF ₆ (λ = 3000 Å)				
9	HL...HL-2H-LH...LH └───┘ └───┘ 6 6	125	120	—
10	HL...HL-2H-LH...LH └───┘ └───┘ 8 8	60	60	—
11	HL...HL-2H-LH...LH └───┘ └───┘ 10 10	30	25	—

где N — число светофильтров в составе сложного. Расчетные данные для контрастных светофильтров других типов показывают, что контрастность возрастает, следуя подобному закону:

$$C_{\text{сложн.}} \approx C_1 C_2 \dots C_N. \quad (5)$$

Монохроматические контрастные светофильтры

Сужение полосы до нескольких ангстрем достигается за счет увеличения отражательной способности зеркал каждого составляющего светофильтра, а также за счет увеличения порядка разделительных слоев. Так, светофильтр, основой которого является серия 10 слоев — $\lambda/2$ —10 слоев, имеет полосу шириной 10 Å (слои ZnS-Na₃AlF₆), а с серией 12 слоев — $\lambda/2$ —12 слоев — имеет полосу шириной около 4 Å.

При такой ширине полосы начинает сказываться влияние неоднородностей и структуры диэлектрических слоев на свойства светофильтра. В качестве примера на рис. 5 приведена спектрограмма полосы пропускания монохроматического светофильтра с полосой $5 \text{ \AA}$ (светофильтр с одним разделительным слоем, выделяющий линию H_γ). Из рис. 5 видно, что соседние участки светофильтра пропускают неодинаковые длины волн; появилась нежелательная структура полосы, снижающая эффективность действия фильтра. Линейный размер этих неоднородностей в плоскости поверхности фильтра — порядка десятых и сотых долей мм.

Оценка влияния дефектов на границах и внутри разделительного слоя может быть сделана с помощью простой формулы для максимума полосы пропускания

$$2nh = k\lambda_{\max}, \text{ отсюда } \Delta\lambda_{\max} = \frac{\Delta(2nh)}{k}. \quad (6)$$

Как показывает формула, дефекты в разделительном слое непосредственно влияют на смещение полосы пропускания. Ясно также, что влияние микронеоднородностей можно уменьшить, переходя к более высоким порядкам интерференции разделительного слоя. Чем больше толщина разделительного слоя, тем «идеальнее» по структуре полоса пропускания. Однако сильное увеличение порядка k тоже нежелательно вследствие появления побочных максимумов в области погашения и ухудшения прочности покрытия.

Учитывая это, мы пользовались третьим и пятым

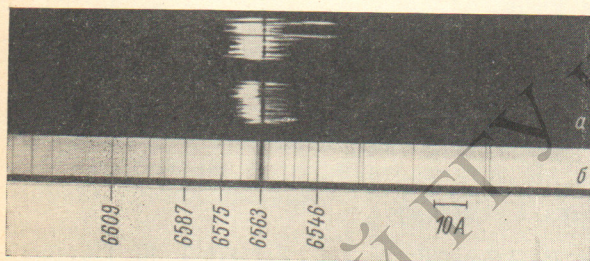


Рис. 5.

a — спектрограмма полосы пропускания светофильтра на линию $6563 \text{ \AA}$, ширина полосы $\sim 5 \text{ \AA}$; b — солнечный спектр с линиями Фраунгофера.

порядками для построения монохроматических светофильтров с полосой от 1.5 до $5 \text{ \AA}$.

В случае монохроматических контрастных светофильтров влияние микронеоднородностей сказывается в двух направлениях: как на структуре полосы, так и особенно на коэффициенте пропускания светофильтра, который может резко падать. Оптимальным порядком разделительных слоев, при котором полоса светофильтра с шириной $5\text{--}10 \text{ \AA}$ приобретает устойчивость, является третий порядок.

Оптические характеристики экспериментальных образцов контрастных светофильтров

В табл. 2 приводятся состав, ширина полосы пропускания $2\delta\lambda$, коэффициент пропускания в максимуме полосы $T_{\max}$ и фон светофильтров, полученных экспериментально, в пределах плато погашения. Нами осуществлялись в основном дву- и трехкратные светофильтры контрастного типа с различной шириной полосы пропускания.

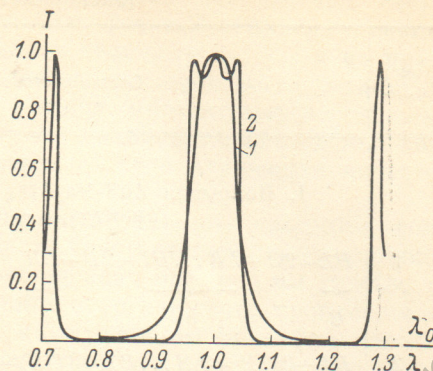


Рис. 4. Контуры полос пропускания N -кратных светофильтров, построенных на основе серии $HL-2H-LH$.

Слой $ZnS-Na_3AlF_6$; 1 — трехкратный светофильтр, 2 — четырехкратный светофильтр.

Таблица 2

Оптические характеристики светофильтров контрастного типа
(экспериментальные данные)

Номер п./п.	Состав светофильтра	$2\delta_{\lambda_{\text{исп.}}}$	$T_{\text{max}}, \%$	Фон
I. Покрытия $\text{ZnS-Na}_3\text{AlF}_6$ (видимая область спектра, $\lambda \sim 6000 \text{ \AA}$)				
1	$\underbrace{HL-2H-LH}_{2} \dots \underbrace{HL-2H-LH}_{5} \dots \underbrace{HL-2H-LH}_{2}$	650	95	$3 \cdot 10^{-2}$
2	$\underbrace{HL-3(2H)-LH}_{2} \dots \underbrace{HL-3(2H)-LH}_{5} \dots \underbrace{HL-3(2H)-LH}_{5} \dots \underbrace{HL-3(2H)-LH}_{2}$	290	95	$1 \cdot 10^{-3}$
3	$\underbrace{HL \dots HL-2H-LH}_{4} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{9} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{4}$	230	85	$2 \cdot 10^{-3}$
4	$\underbrace{HL \dots HL-2H-LH}_{8} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{17} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{8}$	30	70	$1 \cdot 10^{-4}$
5	$\underbrace{HL \dots HL-3(2H)-LH}_{8} \dots \underbrace{HL-3(2H)-LH \dots LH}_{17} \dots \underbrace{HL-3(2H)-LH \dots LH}_{8}$	11	60	$5 \cdot 10^{-5}$
6	$\underbrace{HL \dots HL-2H-LH}_{10} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{21} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{10}$	11	60	$7 \cdot 10^{-5}$
II. Покрытия $\text{PbF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ (ультрафиолетовая область спектра, $\lambda \sim 3000 \text{ \AA}$)				
7	$\underbrace{HL \dots HL-2L-HL}_{5} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{10} \dots \underbrace{HL-2H-LH \dots LH}_{4}$	110	70	$6 \cdot 10^{-3}$
8	$\underbrace{LH \dots LH-2L-HL}_{8} \dots \underbrace{LH-2L-HL \dots LH}_{13} \dots \underbrace{LH-2L-HL \dots LH}_{5}$	70	70	$1 \cdot 10^{-3}$
9	$\underbrace{LH \dots HL-2H-LH}_{9} \dots \underbrace{LH-2L-HL \dots LH}_{14} \dots \underbrace{LH-2L-HL \dots LH}_{5}$	45	70	$1 \cdot 10^{-3}$

Интересными на практике вариантами являются светофильтры контрастного типа с широкой полосой $\sim 200-500 \text{ \AA}$ (системы 1-3 и 7-9 в табл. 2) и монохроматические светофильтры с шириной полосы $\leq 10 \text{ \AA}$ (системы 5-6 в табл. 2) и малыми значениями фона.

Коэффициент пропускания сложных светофильтров имеет такую же величину, как у однократных, несмотря на то что число слоев контрастных систем в несколько раз больше. Это явление связано с особенностями зависимости поглощения многослойной системы от ее структуры: от толщины и расположения слоев [7].

Минимальный фон опытных образцов составил величину $5-7 \cdot 10^{-5}$, т. е. тысячные доли процента. Это значение фона на 1-2 порядка меньше,

Фон

чем фон однократных светофильтров, однако имеется расхождение между экспериментальной и расчетной величинами фона контрастных светофильтров, особенно монохроматических. Так, фон светофильтра с серией 10 слоев— $\lambda/2$ —10 слоев должен составлять величину $1 \cdot 10^{-7}$, а на практике он получился 10^{-5} . Причиной является несовершенство диэлектрических слоев, наличие микроотверстий в слоях, которые сильно снижают контрастность против расчетной. Ясно, что дальнейшее повышение контраста может быть достигнуто в основном за счет улучшения качества самих слоев.

Нами оценивалась также величина интегрального значения фона контрастных светофильтров по всей области чувствительности приемников излучения. Эта величина имеет существенное значение, как мы указывали ранее, так как она может стать сравнимой с энергией света, пропускаемой полосой светофильтра. Для измерения интегрального фона был использован спектрофотометр СФ-4А, на выходе которого ставились приемники излучения ФЭУ-18, ФЭУ-69.

Измеренное значение интегральной величины фона по области чувствительности ФЭУ-69 для светофильтров, выделяющих линию $6943 \text{ \AA}$ ($2\delta\lambda = 10 \text{ \AA}$), составило величину от 1 до 3%. Светофильтры брались без отрезающих систем на стекле КС-17. Величина фона с ФЭУ-18 тех же образцов $\ll 1\%$. Таким образом, при правильном подборе приемника излучения и наличии отрезающей системы интегральная величина фона может быть сделана очень малой — порядка десятых долей процента.

Исследование многослойных диэлектрических светофильтров контрастного типа позволило выявить их ценные преимущества: значительно меньший фон, более совершенную форму контура полосы пропускания, приближающуюся к прямоугольной, высокий коэффициент пропускания, возможность построения светофильтров с заданной шириной полосы пропускания.

Все эти свойства обеспечивают контрастным системам самое широкое применение в новейшем приборостроении.

В заключение авторы благодарят А. И. Дмитриева за помощь в расчетах характеристик системы.

Литература

- [1] Ф. А. Королев, А. Ю. Клементьева, Т. Ф. Мещерякова. *Опт. и спектр.*, 9, 648, 1960.
- [2] Г. В. Розенберг. *Оптика тонкослойных покрытий*. ГИТТЛ, М., 1958.
- [3] C. Dufour. *J. Phys. Rad.*, 11, 321, 1950.
- [4] A. Hermansen. *Nature*, 174, 218, 1954.
- [5] К. Д. Синельников, И. Н. Шкляревский, И. А. Власенко. *Опт. и спектр.*, 2, 534, 1957.
- [6] S. D. Smith. *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 43, 1958.
- [7] O. S. Heavens, J. Ring, S. D. Smith. *Spectrochim. Acta*, 10, 179, 1957.
- [8] M. P. Giacomio. *Compt. Rend.*, 241, 867, 1955.

Поступило в Редакцию 13 декабря 1968 г.