

угольным характером передаточной функции оконтуривающего фильтра. Уменьшить эту погрешность можно путем дополнительной аподизации этой функции.

Результаты лабораторных испытаний прибора ЛДИ, в котором реализован способ двойной фильтрации, согласуются в основном с расчетными. Экспериментально достигнутый уровень погрешности измерения 0,2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении.— Л.: Машиностроение, 1978.
2. Бычков Р. М., Коронкевич В. П., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резьбы когерентно-оптическим методом.— ОМП, 1977, № 11.
3. Бычков Р. М., Коронкевич В. П., Соловьев Н. Г., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резьбовых изделий по пространственному спектру.— В кн.: Всесоюз. конф. по голографии: Тез. докл. Ульяновск, 1978.
4. Астафьева Т. Б. и др. Применение методов когерентной оптики для контроля геометрических параметров изделий.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Всесоюз. конф. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
5. Бахрах Л. Д., Колосов Ю. А., Курочкин А. П., Троицкий В. И. Решение задачи синтеза при помощи когерентной оптической системы.— В кн.: Антенны/Под ред. А. А. Цистолькорса. М.: Связь, 1969, вып. 5.
6. Митрофанов А. С., Тарлыков В. А. Влияние положения щели в гауссовом пучке на точность определения ее размера по дифракционной картине Фраунгофера.— В кн.: Вопросы квантовой электроники: Труды ЛИТМО. Л., 1978.
7. Blodgett J. A., Easton R. L. Two-stage spatial filtering for diffraction pattern analysis.— Appl. Opt., 1980, vol. 20, N 6.
8. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике.— М.: Мир, 1971.
9. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Качественное оконтуривание двумерных теневых изображений.— Автометрия, 1979, № 1.

Поступила в редакцию 16 января 1984 г.

УДК 681.7.06 : 681.723.24

В. П. ПЕТРОВ, С. И. СОСКИН

(Новосибирск)

МИКРОЛИНЗОВЫЕ ЭКРАНЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

Экраны оптических проекционных приборов в значительной мере определяют яркость и качество наблюдаемого оператором изображения, а также возможность работы с проектором в незатемненном помещении. При этом реализация высокой разрешающей способности достигается путем уменьшения размеров светорассеивающих элементов, а улучшение энергетических характеристик — путем повышения светопропускания и формирования диаграммы с направленным светорассеянием. В настоящее время одним из лучших серийно выпускаемых экранов является восковой экран (ЭВ), но он имеет невысокое светопропускание и излишне широкую диаграмму рассеяния. Вопросы улучшения энергетических характеристик посвящены статьи [1, 2]. Характерная черта этих экранов — многослойность их конструкций. На один из слоев проецируется изображение, остальные — формируют диаграмму рассеяния и увеличивают пропускание экрана. Однако технология изготовления этих экранов довольно сложна.

В данной работе приводятся результаты исследования микролинзовых экранов (ЭМЛ) со случайным расположением микролинз. При простой технологии изготовления ЭМЛ не уступают по своим характери-

кам экранам, предложенным в [1, 2]. Для изготовления ЭМЛ использован метод химического травления шлифованного стекла, ранее предложенный Дайсоном [3] для создания направленных рассеивателей осветителей микроскопов. Подобные рассеиватели, но с более крупными микролинзами применяются в осветителе микроскопа ВК-50×70 (К. Цейсс, Йена) [4]. Однако возможность использования этого метода для изготовления экранов проекционных приборов ранее не рассматривалась.

Определим выигрыш по яркости, создаваемый ЭМЛ по сравнению с идеальным ламбертовым рассеивателем. В соответствии с [3] микролинзовые экраны имеют гауссово распределение яркости B_ϕ в диаграмме направленности:

$$B_\phi = B_0 \exp[-\ln 2(\phi/\psi)^2], \quad (1)$$

где B_0 — яркость в центре диаграммы, ϕ — угол отклонения от нормали к экрану, ψ — полуширина, определяемая по уровню $B_0/2$. Интегрируя (1) по телесному углу с учетом светопропускания t , получим, что

$$B_0 = Et \ln 2 / [\pi \psi^2 \{1 - \exp[-\ln 2(\pi/2\psi)^2]\}], \quad (2)$$

где E — освещенность непосредственно перед экраном. В то же время яркость идеального ламбертова рассеивателя $B_\pi = E/\pi$. Принимая во внимание, что $\psi \ll \pi/2$, определим выигрыш по яркости за счет направленности ЭМЛ:

$$K = B_0/B_\pi \approx t \ln 2/\psi^2. \quad (3)$$

Отсюда следует, что повысить выигрыш K можно путем увеличения светопропускания t и уменьшения угла рассеяния ψ .

Рассмотрим задачу выбора параметров микролинз ЭМЛ и условий наблюдения, исходя из требуемых разрешения и размеров диаграммы направленности. Угол рассеяния ψ должен быть таким, чтобы обеспечить возможность наблюдения в зоне размером l , т. е.

$$\psi = l/2D, \quad (4)$$

где D — расстояние от экрана до плоскости наблюдения. Поскольку этот угол обуславливается рефракцией и дифракцией лучей на микролинзах, то в первом приближении

$$\psi = (d/2f + \lambda/2)/2 \quad (5)$$

(d, f — средние диаметр и фокусное расстояние микролинз).

В оптимальных условиях наблюдения разрешение прибора δ должно быть согласовано с разрешением глаз оператора, т. е.

$$\delta\Gamma/D = \varepsilon, \quad (6)$$

где ε — угловая разрешающая способность глаза, Γ — увеличение проектора. Введем в рассмотрение параметр

$$N = (\delta\Gamma/d)^2, \quad (7)$$

равный среднему числу микролинз, попадающих в разрешаемый по Рэлю элемент изображения на экране. Очевидно, что параметр N характеризует также степень пространственной когерентности изображения, образованного экраном; его увеличение приводит к снижению мерцаний экрана. Приравнявая выражения (5) и (6) и подставляя выражение (7) в (6), найдем

$$d = (l\varepsilon/\sqrt{N} - \lambda)2f/d; \quad D = d\sqrt{N}/\varepsilon. \quad (8)$$

В табл. 1 приведены расчетные характеристики экрана, полученные при $N = 100$, $l = 80$ мм, $\varepsilon = 2,9 \cdot 10^{-4}$ рад, $\lambda = 0,55$ мкм, $t = 0,9$, в зависимости от относительного отверстия (d/f) микролинз. Из таблицы следует, что при заданном уровне мерцаний ($N = \text{const}$) уменьшение светосилы микролинз приводит к увеличению их допустимого размера d , одновременно уменьшается угол рассеяния ψ и увеличиваются расстояние до экрана D и коэффициент выигрыша по яркости K .

Таблица 1

d/f	d , мкм	D , мм	ψ , рад	K
1:2	7,1	244	0,114	23
1:3	10,6	366	0,109	52
1:5	17,7	610	0,066	145
1:6,5	23	793	0,05	245
1:8	28	976	0,04	371
1:9,6	34	1172	0,034	535

Рассмотрим возможность наблюдения с расстояния наилучшего зрения. Полагая $l=80$ мм, $D=250$ мм, из (3) и (4) получим, что

$$K=32; \quad \psi=0,14 \text{ рад.} \quad (9)$$

Может показаться (см. табл. 1), что наблюдение с расстояния $D=250$ мм возможно только при светосильных

микрولينзах. В действительности это не так. Уменьшение d/f по (5) приводит к уменьшению части ψ , обусловленного рефракцией. Однако путем уменьшения размера микролинз d можно увеличить дифракционную часть ψ и реализовать его по (9). При этом одновременное уменьшение d/f и d выгодно, поскольку позволяет увеличить число рассеивающих центров, что снизит уровень мерцаний экрана. Однако технологически реализовать эти условия трудно. Например, при умеренных $d/f=1:5$ необходимо, чтобы $d=3$ мкм.

Образцы ЭМЛ на стеклах типа крона и флинта диаметром до 80 мм изготавливались методом, аналогичным [3]. Одна из поверхностей полированной пластины стекла шлифовалась алмазным порошком М10, а затем травилась в концентрированном растворе плавиковой кислоты. Критерием готовности экрана являлся максимум светопропускания (при одновременном отсутствии нерассеянной компоненты): нить лампы, расположенной на расстоянии 1 м от экрана, не должна быть видна через него.

Из серии изготовленных экранов, удовлетворяющих критерию готовности, были отобраны три образца с наиболее характерными признаками, и на них проведены измерения микрогеометрии рабочей поверхности экранов, а также исследована зависимость свойств экранов от их микрогеометрии.

Микрогеометрия рассеивающей поверхности экранов изучалась в режиме «На отражение» с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4. На рис. 1 показаны фрагмент изображения поверхности ЭМЛ (а), интерферограмма в плоскости (б), а также изображение того же фрагмента при фокусировке микрообъектива МИИ-4 на плоскость изображений источника, формируемых в центре кривизны микролинз (в). По измерению продольной перефокусировки микрообъектива между положениями по рис. 1, а, в определялся радиус кривизны R микролинз. Он оказался на всех образцах приблизительно одинаковым для всех микролинз экранов. По интерферограмме рассчитывался фазовый профиль микролинз. Видно, что апертура и фазовый профиль случайны. В то же время профиль микролинз близок к сферическому. Часть линз (эллиптические интерференционные кольца на рис. 1, б) аномальна. Установлено, что, как и в [3], микролинзы являются отрицательными. Результаты измерения и расчета параметров микрогеометрии d , R , f , d/f , h приведены в табл. 2, где размер микролинз d получен путем усреднения $20 \div 30$ результатов измерений. Аналогично определен радиус кривизны, а среднее фокусное расстояние f и стрелка h микролинз рассчитаны по известным формулам

$$f=R/(n-1), \quad h=d^2/2R \quad (10)$$

при значении показателя преломления $n=1,6$. Образцы ЭМЛ отличались

Таблица 2

Типы экранов	d , мкм	R , мкм	f , мкм	d/f	h , мкм	t , %	ψ , рад	K_{KB}	K	N
ЭМЛ 1	6,2	24	40	1:6,5	0,8	89	0,06	18,6	160	538
ЭМЛ 2	12,8	50	83	1:6,5	1,6	91	0,037	66,7	573	228
ЭМЛ 3	14,3	83	138	1:9,6	1,2	91	0,023	183	1572	324
ЭВ	—	—	—	—	—	60	0,22	1	8,6	—

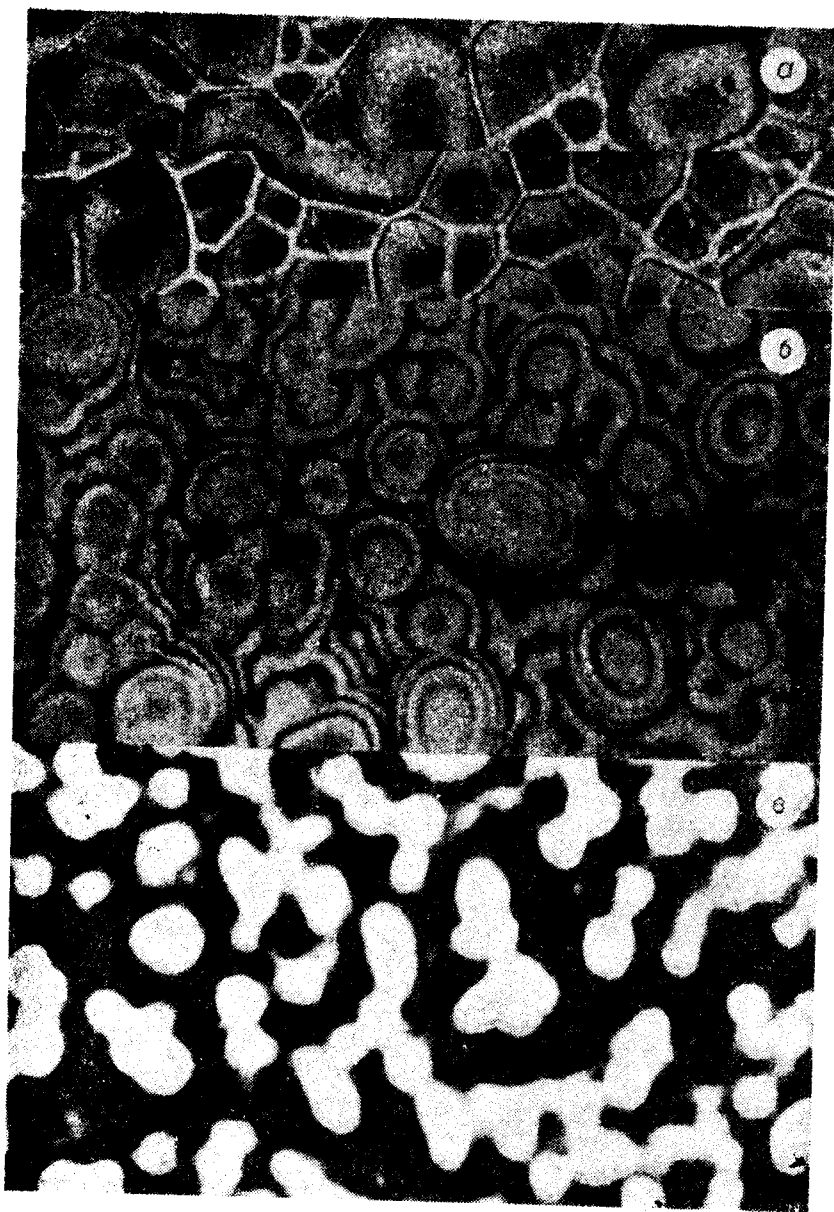


Рис. 1. Микрофотографии образца 1:
a — изображение фрагмента травленной поверхности; *б* — интерферограмма в той же плоскости; *в* — изображение в плоскости, проходящей через центры кривизны микролина.

временем травления (минимальное — для образца 1, максимальное — для образца 3), при этом третий из них не травлен по критерию готовности. Из табл. 2 видно, что нормально изготовленные образцы имеют $d = 6 \div 12$ мкм при постоянном относительном отверстии (1:6,5). При увеличении времени травления одновременно возрастают d и R , однако рост R опережает увеличение d , вследствие чего относительное отверстие уменьшается, уменьшается и глубина травления h , что приводит к появлению нерассеянной компоненты.

Исследование диаграмм рассеяния и контроль качества изображения проводились на макете проектора с $\Gamma = 50^\times$, $\sin U = 0,15$ (U — передний апертурный угол проекционного объектива). Для удобства экспериментов все элементы макета (лампа КГМ-12-100, конденсор, светофильтр, проекционный объектив, экран) располагались на станине оптической скамьи ОСК-2. В качестве проекционного объектива использовался объектив 10^\times микроскопа УИМ-29, который работал в режиме с увеличением 50^\times с полем зрения в плоскости предмета 1,6 мм.

Экраны располагались рассеивающей поверхностью к наблюдателю. Аберрационные расчеты и испытания макета показали, что для $\lambda = 0,589$ мкм геометрический кружок рассеяния в поле зрения не превышал 2 мкм, а волновые аберрации для осевой точки — не более $0,05\lambda$. Светофильтр ЖС-18, действуя совместно с кривой видности глаза, обеспечивал практически безаберрационное изображение в спектральном диапазоне $0,5 \div 0,76$ мкм.

Проведены сравнительные испытания ЭМЛ и ЭВ (из проекционной насадки микроскопа УИМ-29), являющегося одним из лучших серийно выпускаемых экранов. При измерении коэффициента пропускания экранов диаметр светового пучка, освещающего экран, ограничивался до 4 мм. Фотоприемник устанавливался вплотную к экрану. Это позволило снизить ошибки измерения до 2%. При исследовании диаграмм рассеяния экран освещался пучком света диаметром 4 мм. Распределение света в плоскости наблюдения измерялось с помощью фотоприемника (с диафрагмой), перемещающегося перпендикулярно оптической оси.

Визуальное разрешение макета с различными экранами определялось тремя операторами на расстоянии наилучшего зрения по критерию надежного обнаружения малоразмерных элементов, а также отдельных штрихов в бинарной решетке. В качестве тест-объекта использовался шаблон, изготовленный фотолитографическим способом на микрофотонаборной машине (материал — хром). Шаблон содержал одиночные квадратные элементы (светлые на темном фоне и темные на светлом фоне), а также бинарные решетки со скважностью, равной двум, при размере минимальных элементов 1,4 мкм. Наблюдения проводились при освещенности экрана $E = 200$ лк в затемненном и незатемненном помещениях. В последнем случае посторонняя засветка, равная 400 лк, создавалась лампой накаливания, освещающей экран со стороны оператора.

Диаграммы рассеяния ЭМЛ и ЭВ приведены на рис. 2; в табл. 2 даны значения светопропускания t , угла рассеяния ψ , энергетического выигрыша ЭМЛ по сравнению с

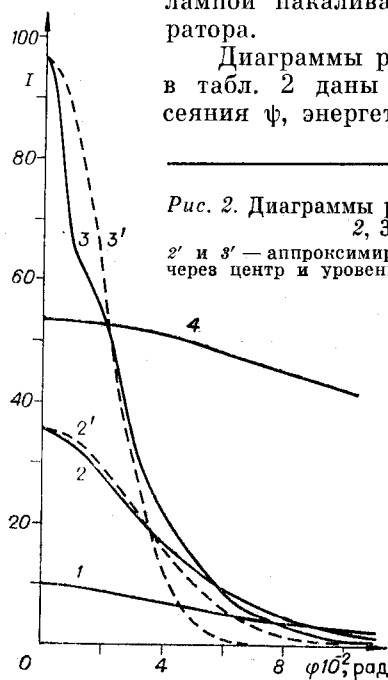


Рис. 2. Диаграммы рассеяния ЭМЛ (образец 1 — кривая 1, 2 — кривая 2, 3 — кривая 3) и воскового экрана; 2' и 3' — аппроксимирующие гауссовы кривые образцов 2 и 3, проведенные через центр и уровень 0,5 от максимальной яркости. Масштаб по оси ординат для ЭВ в 100 раз крупнее.

Таблица 3

Тип экрана	$E_{\text{п}}$	Надежное обнаружение, мкм			Предельное разрешение, мкм
		Одиночный элемент		Элементы решетки	
		Светлый	Темный		
ЭМЛ 1	0	2,3	5,5	4,5	2,6
	400	2,3	5,5	4,5	2,6
ЭВ	0	2,3	3,9	3,3	2,5
	400	3,4	3,9	4,5	2,6
Без экрана	0	—	—	—	2,5

ЭВ K/K_v , а также выигрыша K по отношению к ламбертову рассеивателю. Здесь ψ и K/K_v определены из графиков рис. 2 (K получен по данным работы [3]).

Из табл. 2 следует, что светопропускание ЭМЛ является практически предельным. Ограничение связано с френелевыми потерями (экраны не просветлены). В то же время для ЭВ оно в 1,5 раза меньше из-за потерь на поглощение в материале экрана. Направленные свойства ЭМЛ обеспечивают получение существенного выигрыша по яркости по сравнению с восковым экраном и тем более по сравнению с ламбертовым рассеивателем. Для нормально изготовленных образцов $K_v > 50$, $K > 500$. Из диаграммы рис. 2 видно, что для перетравленных образцов ЭМЛ и ЭВ (кривые 1, 2, 2', 4) диаграммы рассеяния по форме близки к гауссовым. Для перетравленного образца (кривые 3, 3') диаграмма существенно отличается от гауссовой.

Сравним полученные в эксперименте значения ψ , K (см. табл. 2) с расчетными, исходя из экспериментальных значений параметров d и d/f . Для образцов 1 и 2 экспериментальная ширина диаграммы оказывается в 1,4 ÷ 1,6 раза меньше расчетной, выигрыш K — в 1,9 ÷ 2,6 раза больше расчетного; для образца 3 параметры ψ и K — в 1,85 и 3,4 раза соответственно. Указанное различие связано для нормально изготовленных образцов с приближенностью формулы (5). Действительно, если для расчета параметра K по (3) использовать экспериментальные значения ψ из табл. 2, то значение K совпадает с экспериментальным с точностью до 10% для образца 1 и 25% для образца 2. Для ЭМЛ 1 и 2 значение K совпадает с точностью до 10% с экспериментальными результатами из [3] при тех же размерах микролинз; для ЭМЛ [3] параметр K намного больше, чем в работе [3], что, по-видимому, связано с отличиями режима травления.

Визуальная разрешающая способность макета с ЭМЛ и ЭВ определялась тремя операторами по критерию предельного разрешения при наблюдении решетки и по критерию надежного обнаружения элементов тест-объекта. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Видно, что предельное разрешение без экрана (2,5 мкм) хуже рэлеевского ($\delta = 1,83$ мкм). Этот предел практически не изменяется при работе с экранами и не зависит от наличия посторонней засветки E_n . При отсутствии посторонней засветки ($E_n = 0$) ЭМЛ уступают ЭВ по возможности обнаружения темного элемента на светлом фоне и элементов решетки. Однако при $E_n \neq 0$ элементы решетки с ЭВ и ЭМЛ разрешаются в одинаковой степени, а светлый элемент с ЭВ разрешается хуже, чем с ЭМЛ. Эксперименты показали, что ЭМЛ в отличие от ЭВ пригоден для работы в незатемненном помещении. Изображение на ЭМЛ очень яркое и контрастное, причем практически не ухудшается при $E_n = 400$ лк, на ЭВ наблюдается обратная картина. Визуально качество изображения на ЭМЛ и ЭВ отличается из-за наличия мерцаний, которые практически отсутствуют на ЭВ. Наименьшие мерцания соответствуют ЭМЛ 1, характеризующемуся минимальными размерами микролинз, т. е. наибольшим значением параметра N (см. табл. 2).

В заключение отметим, что разработанные экраны ЭМЛ обеспечивают возможность наблюдения двумя глазами на расстоянии, превышающем расстояние наилучшего зрения, поскольку экспериментальная ширина диаграммы по горизонтали ψ меньше необходимой по (9). Дополнительное уширение диаграммы по горизонтали может быть достигнуто в комбинированном экране, сочетающем ЭМЛ с низкочастотной дифракционной решеткой с вертикальным расположением штрихов. Другим путем является совершенствование технологии ЭМЛ с целью расширения диаграммы рассеяния.

Авторы выражают благодарность Л. П. Третьяковой за помощь при изготовлении микролинзовых экранов и расчете оптической схемы макета проектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kato H., Miyahara S. Read projection screens.— Publ. 11.10.77. Cl. 350/117. USA. Pat. 4053208.
2. Kato H., Miyahara S. Read projection screens.— Publ. 3.01.78. Cl. 350/126. USA. Pat. 4066332.
3. Dyson J. Optical diffusing screens of high efficiency.— JOSA, 1960, vol. 50, N 6.
4. Кнюфер Г., Бонке Г. Применение проекционного микроскопа «Е» для визуального контроля в микроэлектронике.— Йенское обозрение, 1980, № 2.

Поступила в редакцию 13 декабря 1983 г.

УДК 535.317.1

М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ, А. А. ЛАПИДЕС
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ТЕНЕВЫХ ГРАФИКОВ

Когерентно-оптический спектральный анализ функций методами теневых графиков с использованием амплитудного [1—4] или фазового [5] носителей нечувствителен к изменениям режима химической обработки [6]. По этой причине запись сигналов в силуэтной форме применяется при обработке радиолокационных сигналов [7], анализе «свернутого» спектра [8] и изготовлении пространственных фурье-фильтров [9].

Цель настоящей работы — исследование точности когерентного спектрального анализа сигналов методом теневых графиков. Расчет проводится на примере симметричной двусторонней записи сигнала (поперечной фонограммы), результаты легко обобщаются на другие аналогичные способы теневой записи сигналов [1—5].

Когерентно-оптический метод анализа сигналов, записанных в форме поперечной фонограммы, основан на том, что распределение амплитуды поля $T(x_f, y_f)$ вдоль оси x_f дает спектр Фурье анализируемого сигнала [1—5]:

$$T(x_f, y_f) = \frac{a}{i\lambda F} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin [2\pi y_f (C_f(x/v) + B)/\lambda F]}{\pi y_f / \lambda F} \exp\left(-\frac{2\pi i x_f x}{\lambda F}\right) dx, \quad (1)$$

где a — амплитуда света, λ — длина волны, F — фокусное расстояние объектива, $f(x/v)$ — анализируемый сигнал, v — скорость протяжки носителя, B — смещение, C — масштабный коэффициент. Спектр $T(x_f, y_f)$ считывается вдоль оси x_f фотоприемником с диафрагмой размерами g (ось x_f) и s (ось y_f).

На рис. 1 схематично показаны теневой график 1 синусоидального сигнала, фурье-линза 2, фурье-плоскость 3, диафрагма фотоприемника, предназначенная для сканирования спектра вдоль оси x_f , 4. Спектр гармонического сигнала изображен в виде графиков, соответствующих зависимости амплитуды поля от координаты y_f .

Размер g диафрагмы однозначно связан с частотным разрешением Δf анализатора:

$$g = \lambda F / l \quad (2)$$

(l — длина входного окна анализатора).

Ширина s определяется точностью анализа, так как распределение поля соответствует исследуемому спектру только при $y_f = 0$. Для нахождения