

Контрольный
экземпляр

СГАУ: 6
С 387

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. Королева

СИНТЕЗ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания

Самарский Государственный
аэрокосмический университет
№ 662.662
Научно-техническая
библиотека

САМАРА 2003

СГАУ: 6(075)+621.382.049.77(075)

Составитель С.А. Матюнин

47.14.07

УДК 621.383

Синтез и технология изготовления тонкопленочных оптических элементов микроэлектроники: Метод. указания/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. С.А. Матюнин. Самара, 2003. 42 с.

Даются основные положения теории спектрального взаимодействия во многокомпонентных оптоэлектронных элементах, рассматриваются вопросы проектирования и технологии изготовления тонкопленочных оптических элементов микроэлектроники с заданными характеристиками.

Методические указания могут быть использованы для подготовки к практическим занятиям и выполнения лабораторных работ по курсам "Интегральная оптоэлектроника", "Технология деталей", "Спецвопросы микроэлектроники и технологии", "Функциональная микроэлектроника".

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензент д-р техн. наук, проф. Л. И. Калакутский

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения и сокращения	4
1. Оптоэлектронные элементы и устройства систем управления, контрольно-измерительной и вычислительной техники	6
2. Обобщенная математическая модель МОС	15
3. Оптимальный синтез спектроформирующих элементов МОС	22
4. Технологические особенности изготовления МОС.....	29
Список литературы	40

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МОС	многокомпонентные оптронные структуры спектрального взаимодействия
МОЭ	многокомпонентные оптоэлектронные элементы спектрального взаимодействия как составная часть МОС
ОЭУ	оптоэлектронное устройство
ОЭЭ	оптоэлектронный элемент
ИИ	источник излучения
ПИ	приемник излучения
СР	среда распространения излучения
ОС	оптическая система ОЭУ. В общем случае включает в себя среду распространения излучения
МТП	многослойные тонкопленочные покрытия
ТКФ	термокомпенсирующий фильтр
ВДФ	внешние дестабилизирующие факторы
СФЭ	спектроформирующий элемент
ФД	фотодиод
ПТП	просветляющее термокомпенсирующее покрытие
ВАХ	вольт-амперная характеристика
ЭО	элементарный оптрон
ФПП	фотоэлектрический преобразователь перемещения
ОД	оптический дефлектор
КН	коммутатор напряжения
КФП	кодирующий фотоприемник

* * *

Общепризнанно, что применение оптоэлектроники в измерительной технике и системах управления позволяет добиться высоких метрологических характеристик, устойчивости к электромагнитным воздействиям, позволяет создавать быстродействующие помехоустойчивые каналы связи, элементы практически идеальной гальванической развязки измерительных, управляющих и силовых цепей и т.д.

При разработке оптоэлектронной аппаратуры всегда приходится учитывать возможность ее эксплуатации при жестких внешних воздействиях естественного и искусственного происхождения. Наряду с высокой устойчивостью к электромагнитным наводкам и практически идеальной гальванической развязкой оптоэлектронным элементам и устройствам, особенно полупроводниковым, присуща низкая температурная стабильность. Так, величина температурного коэффициента изменения мощности излучения полупроводникового инфракрасного излучающего диода доходит до 1,5 %/°С. Сильное влияние на характеристики ОЭЭ оказывают ионизирующее излучение, вибрационное воздействие и др. Применение известных методов температурной стабилизации (за исключением термостатирования) лишает оптоэлектронику основного ее преимущества - идеальной гальванической развязки, в значительной мере усложняет схемотехнические решения, возникают сложности электропитания гальванически развязанных ОЭЭ. Эффективный выход из сложившейся ситуации - серийный выпуск и применение многокомпонентных оптронных структур (МОС) и элементов (МОЭ), термокомпенсированных по оптическому каналу. Такая компенсация может быть осуществлена посредством взаимодействия спектральных характеристик ОЭЭ со спектральными характеристиками специальных тонкопленочных покрытий, наносимых в процессе изготовления ОЭЭ на их поверхность.

Метод спектрального взаимодействия позволяет реализовывать простые по конструктивному исполнению, точные и эффективные

датчики линейных и угловых перемещений, коммутаторы оптических сигналов, дефлекторы некогерентного излучения, устройства кодирования и спектрального уплотнения оптических сигналов. Здесь выходная характеристика устройства получается в результате взаимодействия спектральных характеристик элементов, в него входящих, и специального спектроформирующего элемента (СФЭ). Изменяя характеристику пропускания СФЭ, можно в широких пределах изменять вид выходных характеристик всего устройства. Наилучшей линейностью выходных характеристик обладают устройства со сложной, специальным образом сформированной характеристикой пропускания СФЭ.

Известно большое разнообразие подходов к формированию спектральной характеристики СФЭ [3-5, 9, 13, 15, 16, 27]. Однако эти методики позволяют контролировать лишь интегральные характеристики СФЭ - полосу пропускания, длину волны максимума пропускания и т.д. При реализации метода спектрального взаимодействия необходима реализация СФЭ с заданной формой спектральной характеристики. Вопросам реализации таких спектроформирующих элементов и посвящена настоящая работа.

1. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Известно, что обобщенную структуру ОЭУ можно представить в виде, изображенном на рис. 1, причем в каждом конкретном случае структура реализуется лишь частью блоков. Можно выделить следующие основные группы ОЭУ: 1- оптоэлектронные элементы (источники излучения, элементы оптической системы, приемники излучения); 2 - элементарные оптроны (используют блоки источник излучения - оптическая система - приемник излучения); 3 - оптоэлектронные преобразователи (содержат совокупность элементарных оптронов, устройств согласования и управления).

Источники излучения предназначены для формирования светового потока с заданными пространственными, энергетическими, спектральными и волновыми характеристиками. В качестве ИИ могут выступать как естественные (природные), так и искусственные излучатели [25]. К последним относятся лампы накаливания, светоизлучающие диоды, полупроводниковые лазеры и др.

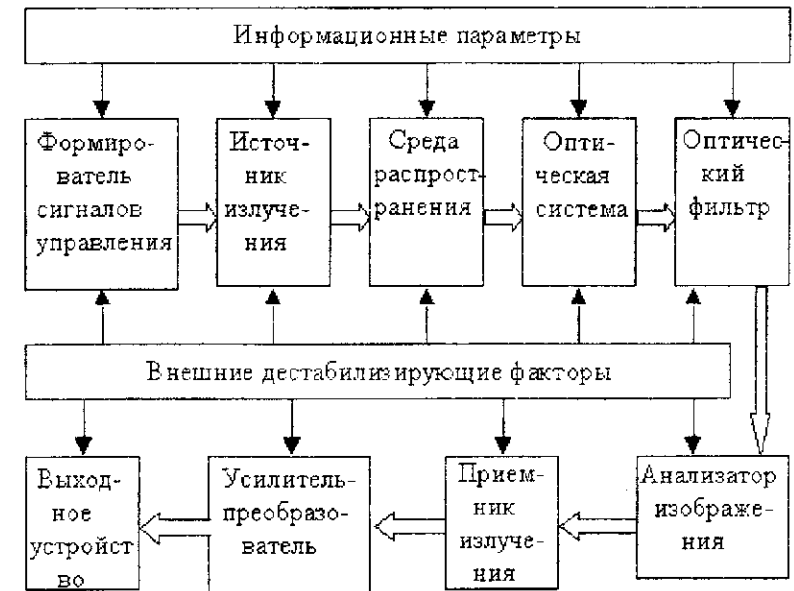


Рис. 1. Обобщенная структура оптоэлектронного устройства

Среда распространения (СР) пропускает через себя излучение от источника излучения к потребителям оптического излучения. Ею могут быть вакуум, газы, жидкости и твердые оптически прозрачные для излучения тела. При прохождении через СР энергетические параметры излучения претерпевают изменения, связанные с рассеиванием, поглощением, преломлением, изменением степени и ориентации поляризации, направления и скорости распространения.

Оптическая система осуществляет функции формирования пространственных, волновых, спектральных параметров излучения в соответствии с заданными требованиями.

При использовании некогерентного излучения функции оптических систем ограничиваются формированием и фокусировкой изображения, диспергированием излучения по спектральному составу и степени поляризации, расщеплением, суммированием и изменением направления распространения излучения. При использовании когерентного излучения с помощью ОС можно создавать излучающие

системы с заданными пространственно-амплитудными, частотными и фазовременными характеристиками.

Оптический фильтр (спектроформирующий элемент) избирательно по спектральному составу пропускает проходящий через него поток. Существует большое многообразие оптических фильтров, реализованных на различных физических эффектах. Классификационная схема оптических фильтров приведена на рис. 3.

В общем случае любой оптический элемент обладает определенными селективными свойствами и его необходимо рассматривать как спектроформирующий элемент. Например, узел формирования светового зонда считывания оптоэлектронного датчика перемещения, состоящий из щелевой диафрагмы и проецирующей изображение щелевой диафрагмы на плоскость фотоприемника линзы, представляет из себя фильтр фокальной изоляции (рис. 2). В определенной области спектра он может использоваться как отрезающий длинно- или коротковолновый фильтр.

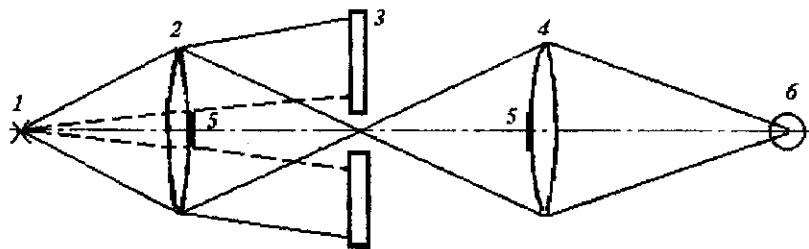


Рис. 2. Фильтр фокальной изоляции

В качестве элементов, выделяющих излучение нужного спектрального состава, используются различные спектроформирующие элементы, характеристики которых, так же как и характеристики ОЭЭ, зависят от температуры окружающей среды [1, 8-10, 13, 17-19, 22-24, 27]. По используемым физическим принципам СФЭ можно разделить на интерференционные, поглощающие, дисперсионные, фильтры фокальной изоляции и комбинированные. По типу спектральной характеристики - на отрезающие (коротко- и длинноволновые), полосовые и узкополосные, а также фильтры со специально сформированной спектральной характеристикой.

В конструктивном и технологическом отношении удобно использование в МОС многослойных тонкопленочных покрытий.

Поэтому рассмотрим более подробно процессы взаимодействия оптического излучения с МТП. Выделим при этом два класса МТП: 1 - однослойные (просветляющие) тонкопленочные покрытия (ПТП); 2 - многослойные спектроформирующие покрытия.

При падении излучения на границу раздела двух сред с показателями преломления n_i, n_j под углом φ_i к границе раздела френелевские коэффициенты отражения $r_{i,j}^{S,P}$ и пропускания $t_{i,j}^{S,P}$ на границе раздела сред i, j определяются из выражений [13]:

$$r_{i,j}^S = \frac{n_i \cos \varphi_i - n_j \cos \varphi_j}{n_i \cos \varphi_i + n_j \cos \varphi_j}, \quad r_{i,j}^P = \frac{n_i \cos \varphi_j - n_j \cos \varphi_i}{n_i \cos \varphi_j + n_j \cos \varphi_i}$$

$$t_{ij}^P = \frac{2n_i \cos \varphi_i}{n_i \cos \varphi_j + n_j \cos \varphi_i}, \quad t_{ij}^S = \frac{2n_i \cos \varphi_i}{n_i \cos \varphi_i + n_j \cos \varphi_j}$$

где индекс P, S сверху параметров означает, что параметр относится к P -компоненте падающего потока излучения, когда вектор электрического поля колеблется в плоскости падения, или к S -компоненте, когда вектор электрического поля колеблется в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

Если между этими средами помещена однородная прозрачная (просветляющая) пленка толщиной d_2 с показателем преломления n_2 , то согласно [28] абсолютная спектральная характеристика пропускания определяется выражением

$$T_A^{S,P}(\lambda) = \frac{T_{32}^{S,P} T_{21}^{S,P}}{1 + (r_{32}^{S,P} r_{21}^{S,P})^2 + 2r_{32}^{S,P} r_{21}^{S,P} \cos[\frac{4\pi n_2 d_2}{\lambda} \cos \varphi_2]}, \quad (1)$$

где $T_{32}^{S,P} = \frac{n_2 \cos \varphi_2}{n_3 \cos \varphi_3} (t_{32}^{S,P})^2$; $T_{21}^{S,P} = \frac{n_1 \cos \varphi_1}{n_2 \cos \varphi_2} (t_{21}^{S,P})^2$;

$$r_{32}^S = \frac{n_3 \cos \varphi_3 - n_2 \cos \varphi_2}{n_3 \cos \varphi_3 + n_2 \cos \varphi_2}; \quad r_{32}^P = \frac{n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3};$$

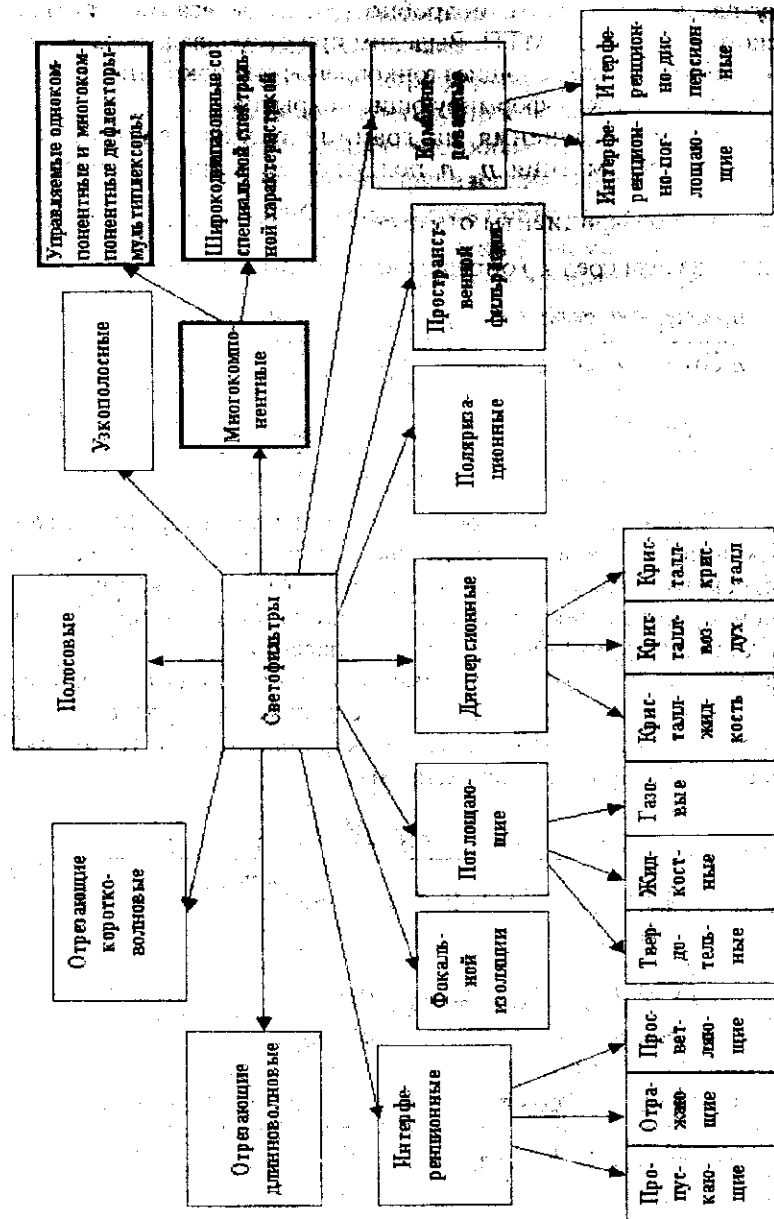


Рис. 3. Классификация оптических фильтров

$$t_{32}^S = \frac{2n_3 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_3 + n_2 \cos \varphi_2}; \quad t_{32}^P = \frac{2n_3 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3};$$

$$r_{21}^S = \frac{n_2 \cos \varphi_2 - n_1 \cos \varphi_1}{n_2 \cos \varphi_2 + n_1 \cos \varphi_1}; \quad r_{21}^P = \frac{n_2 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2};$$

$$t_{32}^S = \frac{2n_2 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_2 + n_1 \cos \varphi_1}; \quad t_{21}^P = \frac{2n_2 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2};$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ -углы падения луча света на границы раздела соответствующих сред. Для нормально поляризованного потока излучения абсолютная спектральная характеристика пропускания $T_A(\lambda)$ пленки равна:

$$T_A(\lambda) = \frac{1}{2} [T_A^S(\lambda) + T_A^P(\lambda)].$$

При нормальном падении излучения на границу раздела сред $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$ имеем:

$$r_{32}^S = r_{32}^P = \frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2}; \quad t_{32}^S = t_{32}^P = \frac{2n_3}{n_3 + n_2};$$

$$r_{21}^S = r_{21}^P = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}; \quad t_{21}^S = t_{21}^P = \frac{2n_2}{n_2 + n_1};$$

$$T_{32}^S = T_{32}^P = \frac{n_2}{n_3} (t_{32}^S)^2; \quad T_{21}^S = T_{21}^P = \frac{n_1}{n_2} (t_{21}^S)^2;$$

Из (1) имеем:

$$T_A(\lambda) \rightarrow \max \text{ при } \lambda \rightarrow \frac{4n_2 d_2}{2N - 1}, \quad T_A(\lambda) \rightarrow \min \text{ при } \lambda \rightarrow \frac{2}{N} n_2 d_2.$$

Обозначая

$$T_M = \frac{n_1 n_3 n_2^2}{(n_1 n_3 + n_2^2)^2}, \quad (2)$$

получим выражение для относительной спектральной характеристики пропускания просветленной поверхности полупроводника:

$$T(\lambda) = \frac{1}{H + D \cos B/\lambda}, \quad (3)$$

$$D = \frac{(n_2^2 - n_1^2)(n_3^2 - n_2^2)}{2(n_3 n_1 + n_2^2)^2}; \quad H = \frac{(n_1^2 + n_2^2)(n_3^2 + n_2^2) + 4n_1 n_2 n_3}{2(n_3 n_1 + n_2^2)^2};$$

$$B = 4\pi n_2 d_2.$$

На рис. 4, а изображен график функции (1) для случая просветления поверхности полупроводникового ИИ с показателем преломления $n_3=4,4$ и $n_1=1$ (без учета поглощения в пленке ПТП). Из (1, 3) следует, что при изменении угла падения излучения на ПТП наблюдается сдвиг длины волны максимума пропускания и незначительное изменение ширины спектральной характеристики (см. рис. 4).

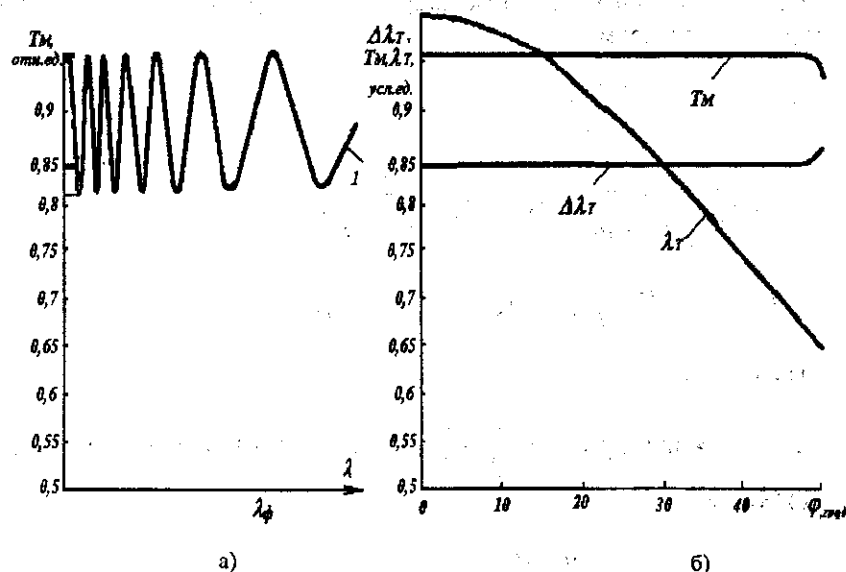


Рис. 4. Спектральная характеристика ПТП (а); зависимость характеристики ПТП от угла падения излучения (б)

В общем случае, при оптимизации параметров ПТП необходимо учитывать поглощение излучения в пленке и дисперсию показателей преломления. Для больших значений дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения величины H, B, D , определяемые из выражений (1), (3), также являются функциями частоты излучения ν . С учетом дисперсии показателей преломления и поглощения излучения в ПТП спектральную характеристику пропускания ПТП при нормальном падении светового потока можно определить из выражения [8, 13, 28]

$$T_A(\nu) = \frac{T_{32}(\nu)T_{21}(\nu)e^{-x_2 d_2}}{1 + R_{12}(\nu)R_{23}(\nu)e^{-2x_2 d_2} + 2\sqrt{R_{12}(\nu)R_{23}(\nu)}e^{-x_2 d_2} \cos(2\delta_2 - \Delta\phi)}, \quad (4)$$

$$\text{где } T_{32}(\nu) = \frac{4n_2(\nu)[n_2^2(\nu) + k_2^2(\nu)]}{n_3(\nu)[(n_2(\nu) + n_3(\nu))^2 + (k_2(\nu) + k_3(\nu))^2]},$$

$$T_{21}(\nu) = \frac{4n_1(\nu)[n_1^2(\nu) + k_1^2(\nu)]}{n_2(\nu)[(n_1(\nu) + n_2(\nu))^2 + (k_1(\nu) + k_2(\nu))^2]},$$

$$R_{12}(\nu) = \frac{[n_2(\nu) - n_1(\nu)]^2 + [k_2(\nu) - k_1(\nu)]^2}{[n_2(\nu) + n_1(\nu)]^2 + [k_2(\nu) + k_1(\nu)]^2};$$

$$R_{23}(\nu) = \frac{[n_3(\nu) - n_2(\nu)]^2 + [k_3(\nu) - k_2(\nu)]^2}{[n_3(\nu) + n_2(\nu)]^2 + [k_3(\nu) + k_2(\nu)]^2};$$

$$\delta_2 = \frac{2\pi n_2(\nu)d_2\nu}{c}; \quad \Delta\phi = \phi_{12} + \phi_{23};$$

$$\phi_{12} = \text{arctg} \frac{2[n_1(\nu)k_2(\nu) - n_2(\nu)k_1(\nu)]}{[n_1^2(\nu) + k_1^2(\nu)] - [n_2^2(\nu) + k_2^2(\nu)]};$$

$$\phi_{23} = \text{arctg} \frac{2[n_2(\nu)k_3(\nu) - n_3(\nu)k_2(\nu)]}{[n_2^2(\nu) + k_2^2(\nu)] - [n_3^2(\nu) + k_3^2(\nu)]};$$

$x_2 = 4\pi k_2(\nu)\nu/c$; $k_i(\nu); n_i(\nu)$ - зависимость показателя поглощения, безразмерного показателя поглощения и показателя преломления среды i от частоты излучения.

Как видно из (4), дисперсия показателей преломления и поглощения полупроводниковых материалов и материала ПТП "деформируют" спектральную характеристику ПТП и сдвигают ее максимум:

$$\nu_T = \frac{\pi(2N-1) + \phi_{12}^* + \phi_{23}^*}{4\pi n_2 d_2},$$

где $\phi_{12}^*, \phi_{23}^*, n_2$ - средние величины функций $\phi_{12}(\nu), \phi_{23}(\nu), n_2(\nu)$ в рассматриваемом спектральном диапазоне.

Аналогичные процессы наблюдаются и в многослойных тонкопленочных покрытиях. Так, спектральная характеристика пропускания узкополосного фильтра описывается выражениями (1-3). Однако в силу большего коэффициента отражения зеркальных слоев фильтра повышается добротность и, соответственно, сужается полоса пропускания. Изменяя коэффициент отражения зеркальных составляющих путем изменения величины D , можно существенно изменить и полосу пропускания фильтра (рис. 5).

Анализатор изображения (модулятор) преобразует распределение яркости в пространстве предметов во временную последовательность проходящего через него потока излучения, деление освещенности в пространстве изображений. Если до анализаторов изображения информация, содержащаяся в излучении, является функцией нескольких переменных (координат, длины волны, степени поляризации, времени), то на выходе анализаторов вся информация определяется потоком излучения и его изменением во времени.

ПИ преобразуют оптическое излучение в электрические сигналы. Существует большое разнообразие типов приемников излучения, отличающихся физическими принципами работы, спектральной чувствительностью, составом элементов, конструктивным исполнением, пороговой чувствительностью, обнаружительной способностью, шумовыми и спектральными характеристиками, быстродействием и др.

В усилительно-преобразующем устройстве осуществляется усиление и обработка электрического сигнала. Содержание и последовательность обработки сигналов в нем зависят от конкретного типа ОЗУ и решаемых им задач. Как правило, в этих устройствах осуществляется усиление сигнала по амплитуде и мощности, фильтрация полезного

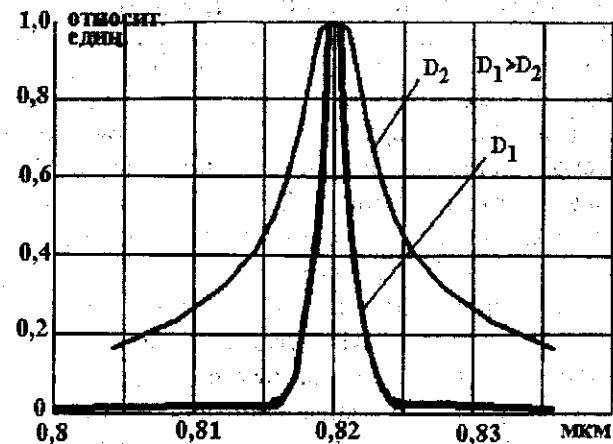


Рис. 5. Зависимость спектральной характеристики МТП от добротности D

сигнала от помех, решение задач обнаружения и селекции, декодирование и др. Часто в состав систем обработки и усиления входят электромеханические исполнительные устройства.

2. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОС

Воздействие информационных параметров в оптоэлектронных устройствах происходит в основном двумя способами: 1 - путем пространственно - временной модуляции светового потока некогерентного излучения (к этому же сводится изменение степени и направления поляризации излучения); 2 - путем интерференционного взаимодействия когерентных компонент излучения и их модуляции, т.е. путем воздействия на амплитуду (интенсивность) и фазу световой волны.

Например, в устройствах гальванической развязки аналоговых цепей - оптронах - воздействие информационного параметра осуществляется посредством управления режимом работы ИИ (интенсивностью его излучения), а в оптоэлектронных аналого-цифровых датчиках перемещения - посредством пространственной модуляции излучения в канале оптической связи источника и приемника излучения.

В то же время, использование принципа спектрального взаимодействия позволяет получить простые по конструктивному исполнению устройства с уникальными характеристиками [17]. В многокомпонентных оптронных структурах спектрального взаимодействия (рис.6) на поверхность ОЭЭ, т.е. источников излучения (1), оптической системы (4) и приемников излучения (7), наносится дополнительный ряд компонент (2,3,5,6), выполняемых обычно в виде многослойных тонкопленочных покрытий. Эти компоненты, выполняя спектроформирующую функцию, функции избирательной, временной и пространственной фильтрации, модуляции и коммутации, существенно изменяют свойства ОЭЭ. Здесь воздействие информационных параметров происходит в результате спектрального взаимодействия многокомпонентных оптоэлектронных элементов - в результате взаимного движения их спектральных характеристик. Такое движение спектральных характеристик может быть осуществлено различными путями: воздействием тепловых, электрических, магнитных, акустических, механических полей, изменением угла падения излучения и др.

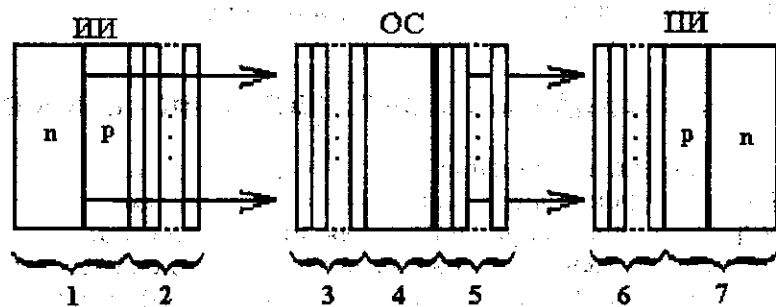


Рис. 6. Структурная схема МОС

В результате такого взаимодействия становится возможным добиться инвариантности параметров ОЭУ к внешним дестабилизирующим факторам - температуре окружающей среды, вибрации и т.д., реализовать функцию временной и пространственной модуляции, коммутации, спектрального уплотнения, создать прецизионные оптоэлектронные элементы и устройства систем управления, измерения и контроля [16-24].

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать следующее определение МОС.

Многокомпонентные оптронные структуры (многокомпонентные оптоэлектронные элементы) спектрального взаимодействия - это оптоэлектронные устройства (элементы), в оптическую цепь которых введены (на поверхность которых нанесены) дополнительные оптические компоненты, выполняющие спектроформирующую, спектровзаимодействующую, термокомпенсирующую функции, функции пространственной и временной модуляции и др., воздействие информационных параметров в которых происходит в результате взаимодействия их спектральных характеристик.

Обозначим через $\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi)$, $T^*(\lambda, t, \tau, U_T)$, $S^*(\lambda, t, \tau, U_S)$ абсолютные спектральные характеристики излучения ИИ, пропускания оптической системы и чувствительности ПИ, через U_ϕ, U_T, U_S - управляющие сигналы источника излучения, оптической системы и приемника излучения, а через $\Phi_n^i(\lambda, t, \tau)$,

$T_n^j(\lambda, t, \tau)$, $S_n^k(\lambda, t, \tau)$ - абсолютные спектральные характеристики пропускания i, j, k -го МТП, нанесенных на поверхности ИИ, оптическую систему и ПИ соответственно. Тогда для последовательно соединенных МОЭ (рис. 6) спектральный состав излучения $I^*(\lambda, t, \tau)$, падающего на фоточувствительную площадку ПИ, определится из выражения

$$I^*(\lambda, t, \tau) = \{\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) \cdot \prod_{i \in I} \Phi_n^i(\lambda, t, \tau)\} \cdot \{T^*(\lambda, t, \tau, U_T) \times \prod_{j \in J} T_n^j(\lambda, t, \tau)\} \cdot \{S^*(\lambda, t, \tau, U_S) \cdot \prod_{k \in K} S_n^k(\lambda, t, \tau)\},$$

где I, J, K - множество индексов компонент МТП, нанесенных на ИИ, элементы оптической системы и ПИ соответственно.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования с достаточной степенью точности и независимо от физической природы процессов, происходящих в ОЭЭ, позволяют аппроксимировать их абсолютные спектральные характеристики разностными функциями вида

$$\begin{aligned}\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) &= \Phi_m(t, \tau, U_\phi) \cdot \Phi[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)], \\ T^*(\lambda, t, \tau, U_T) &= T_m(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)], \\ S^*(\lambda, t, \tau, U_S) &= S_m(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_S(t, \tau)],\end{aligned}\quad (5)$$

где $\Phi[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)]$, $T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)]$, $S[\lambda - \lambda_S(t, \tau)]$ - относительные спектральные характеристики мощности излучения ИИ, пропускания оптической системы и чувствительности ПИ соответственно; $\Phi_m(t, \tau, U_\phi)$, $T_m(t, \tau, U_T)$, $S_m(t, \tau, U_S)$ - температурно-временные зависимости изменения максимумов, а $\lambda_\phi(t, \tau)$, $\lambda_T(t, \tau)$, $\lambda_S(t, \tau)$ - температурно-временные зависимости длин волн максимумов соответствующих спектральных характеристик.

С учетом (5) спектральные характеристики МОЭ определяются:

$$\begin{aligned}\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi, U_{n\phi}^i, U_{n\lambda\phi}^i) &= \Phi_m(t, \tau, U_\phi) \cdot \Phi[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)] \cdot \prod_{i \in I} \Phi_{im}^i(t, \tau, U_{n\phi}^i) \cdot \Phi[\lambda - \lambda_{\phi m}^i(t, \tau, U_{n\lambda\phi}^i)], \\ T^*(\lambda, t, \tau, U_T, U_{nT}^j, U_{n\lambda T}^j) &= T_m(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)] \cdot \prod_{j \in J} T_{jm}^j(t, \tau, U_{nT}^j) \cdot T[\lambda - \lambda_{Tm}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)], \\ S^*(\lambda, t, \tau, U_S, U_{nS}^k, U_{n\lambda S}^k) &= S_m(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_S(t, \tau)] \cdot \prod_{k \in K} S_{km}^k(t, \tau, U_{nS}^k) \cdot S[\lambda - \lambda_{Sm}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)],\end{aligned}$$

где $U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k$ - управляющие воздействия на максимумы пропускания соответствующих МТП, $U_{n\lambda\phi}^i, U_{n\lambda T}^j, U_{n\lambda S}^k$ - управляющие воздействия на длины волн максимумов спектральных характеристик МТП.

Так как в общем случае для МОЭ наблюдается двухкоординатная зависимость их спектральных характеристик, то их абсолютные спектральные характеристики (обозначены знаком "***") запишутся в виде

$$\begin{aligned}\Phi^{***}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_\phi^{**}) &= \Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi, U_{n\phi}^i, U_{n\lambda\phi}^i) \cdot G_\phi(x, y, z), \\ T^{***}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_T^{**}) &= T^*(\lambda, t, \tau, U_T, U_{nT}^j, U_{n\lambda T}^j) \cdot G_T(x, y, z), \\ S^{***}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_S^{**}) &= S^*(\lambda, t, \tau, U_S, U_{nS}^k, U_{n\lambda S}^k) \cdot G_S(x, y, z),\end{aligned}$$

где $G_\phi(x, y, z)$, $G_T(x, y, z)$, $G_S(x, y, z)$ - весовые функции, учи-

тывающие координатные зависимости соответствующих спектральных характеристик ИИ, оптической системы и ПИ соответственно, а $U_\phi^{**}, U_T^{**}, U_S^{**}$ - множество управляющих воздействий МОЭ.

Тогда, с учетом выражения для освещенности чувствительной площадки $P_{П}$ ПИ от смещенного относительно него на величину x_0, y_0 ИИ с излучающей площадкой $P_{И}$, получим обобщенное выражение для величины выходного сигнала ПИ в виде

$$\begin{aligned}J(t, \tau, U_\phi, U_T, U_S, U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k, U_{n\lambda\phi}^i, U_{n\lambda T}^j, U_{n\lambda S}^k) &= \\ = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \int_{P_{П}} \int_{P_{И}} \frac{\Phi^{***}(x_0, y_0, z_0, \lambda, t, \tau, U_\phi^{**}) \cdot T^{***}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_T^{**}) \cdot S^{***}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_S^{**}) \cdot dx dy dz}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]} d\lambda. & (6)\end{aligned}$$

Выражение (6) позволяет учесть как влияние информационных и управляющих воздействий на МОЭ, так и влияние внешних дестабилизирующих факторов.

Как видно из (6) **выходной сигнал ПИ определяется** величиной излучаемого ИИ светового потока, спектральными характеристиками МОЭ и **взаимодействием спектральных характеристик**. Причем этим **взаимодействием можно управлять** как путем изменения соответствующих управляющих воздействий, так и изменением крутизны и взаимного расположения спектральных характеристик МОЭ.

Например, пусть МОЭ состоит из ИИ и ПИ, а оптическая система содержит два спектроформирующих элемента (СФЭ). Допустим также, что ИИ питается от стабильного источника питания и характеризуется равномерной плотностью потока излучения по поверхности, а управляющие сигналы воздействуют только на элементы оптической системы.

Тогда выходной сигнал ПИ для стационарного режима работы определится из выражения

$$\begin{aligned}J(U_{n\lambda T}^1, U_{n\lambda T}^2, U_{nT}^1, U_{nT}^2) &= \{\Phi_m \cdot T_m \cdot S_m\} \cdot T_{m1}^1(U_{nT}^1) \cdot T_{m2}^2(U_{nT}^2) \times \\ \times \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \{\Phi[\lambda - \lambda_\phi] \cdot T[\lambda - \lambda_T] \cdot S[\lambda - \lambda_S] \times & (6^*) \\ \times T_n^1[\lambda - \lambda_{Tn}^1(U_{n\lambda T}^1)] \cdot T_n^2[\lambda - \lambda_{Tn}^2(U_{n\lambda T}^2)] \cdot d\lambda.\end{aligned}$$

Пусть, для определенности, СФЭ сформированы на базе интерференционных фильтров, для которых характерно изменение длины волны максимума пропускания при изменении оптической толщины резонансных слоев (например, при изменении углов падения излучения ψ_1, ψ_2 на их поверхность):

$$T_n^1[\lambda - \lambda_{Tn}^1(U_{n\lambda T}^1)] = \frac{1}{1 + D_1 \cdot \cos\left[\frac{d_1}{\lambda} \cos \psi_1\right]}$$

$$T_n^2[\lambda - \lambda_{Tn}^2(U_{n\lambda T}^2)] = \frac{1}{1 + D_2 \cdot \cos\left[\frac{d_2}{\lambda} \cos \psi_2\right]}$$

где D_1, D_2 - определяют полуширины пропускания СФЭ (определяются конструктивными параметрами); d_1, d_2 - оптические толщины резонансных слоев фильтров.

Если зафиксировать один из фильтров неподвижно, а второй смещать относительно него на некоторый угол, то вследствие спектрального взаимодействия их спектральных характеристик выходной сигнал ПИ будет определяться изменением угла наклона второго фильтра. Кроме того, как видно из (1-3), имеется возможность управления выходным сигналом ПИ путем изменения величины максимума пропускания фильтров.

На рис. 7 изображены схема и семейство позиционных характеристик преобразователя угловых перемещений, реализованного на принципе спектрального взаимодействия, при различной

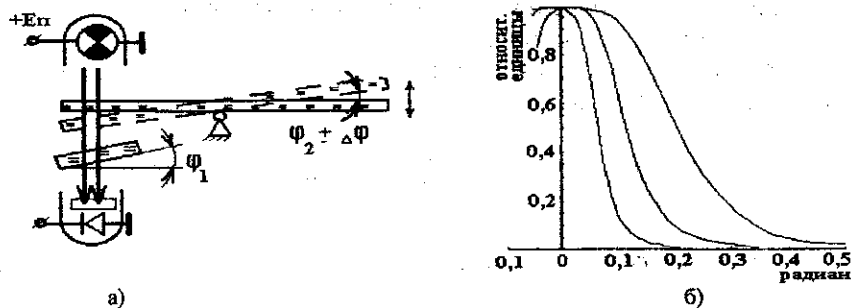


Рис. 7. Схема и позиционные характеристики преобразователя угловых перемещений

крутизне спектральной характеристики фильтра. Как видно из рисунка, даже при небольших наклонах фильтра (наклон в 0,1 радиана при размере фильтра 10 мм соответствует линейному перемещению в 1 мм) наблюдается существенное изменение выходного сигнала ПИ.

Если принять, что управляющие воздействия на МОЭ неизменны во времени, отсутствует координатная зависимость спектральных характеристик элементов, а внешние дестабилизирующие факторы проявляются только в температурных изменениях характеристик элементов, то температурную зависимость выходного сигнала ПИ можно определить из (7).

Откуда следует, что температурная зависимость выходного сигнала ПИ также определяется температурными зависимостями спектральных характеристик МОЭ и их взаимодействием.

$$J(t) = \{\Phi_M(t)T_M(t)S_M(t)\}T_M^1(t) \times \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \{\Phi[\lambda - \lambda_{\Phi M}(t)]T[\lambda - \lambda_{T_M}(t)]S[\lambda - \lambda_{S_M}(t)]\}T_n^1[\lambda - \lambda_{T_n}(t)]d\lambda \quad (7)$$

Если учесть, что при изменении температуры МОЭ наблюдается сдвиг их спектральных характеристик, то из условия

$$\int_{t_H}^{t_B} [J(t) - J_0]^2 dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $J_0 = \frac{1}{t_B - t_H} \int_{t_H}^{t_B} J(t) dt$ - среднее значение интегральной чув-

ствительности $J(t)$ в диапазоне рабочих температур, можно определить оптимальную характеристику многослойного термокомпенсирующего покрытия $T_M^1(t)T_n^1[\lambda - \lambda_{T_n}(t)]$, обеспечивающего необходимую температурную стабильность параметров ПИ.

Ясно, что для реализации термокомпенсированных МОЭ и прецизионных измерительных устройств спектрального взаимодействия необходимо применение спектроформирующих элементов, реализующих с высокой степенью точности требуемую спектральную характеристику.

3. ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СПЕКТРОФОРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МОС

Возможны следующие варианты реализации СФЭ с заданной спектральной характеристикой.

1. Формирование спектральной характеристики пропускания поглощающих СФЭ.

Известно, что введением в состав СФЭ различных поглощающих примесей, изменяя их состав и концентрацию, можно сформировать фильтр с заданными спектральными характеристиками [9, 10]. Однако реализация таких СФЭ с одновременно заданными спектральными и температурными характеристиками встречает серьезные затруднения, трудно добиться высокой точности формирования кривой спектральной характеристики.

2. Формирование спектральной характеристики пропускания СФЭ с помощью набора "элементарных" фильтров.

В [13, 28] разработана методика проектирования интерференционных СФЭ с заданной величиной пропускания (просветления) для определенных спектральных диапазонов, рассматриваются вопросы контроля СФЭ в процессе их изготовления. В методике используются усредненные (интегральные) характеристики спектральных кривых - величина пропускания в максимуме, полоса пропускания и т.д. Однако при построении прецизионных МОС используются не интегральные величины, а форма спектральной характеристики. Поэтому возникает необходимость в разработке методики проектирования СФЭ, реализующих заданную спектральную характеристику с высокой точностью.

На рис. 8, 9 изображены возможные варианты реализации спектральной характеристики пропускания СФЭ путем последовательного или параллельного расположения "элементарных" фильтров.

Пропускание последовательно расположенных "элементарных" фильтров определяется произведением их спектральных характеристик:

$$J^*(\lambda, t) = \Phi^*(\lambda, t) \cdot \prod_{j \in J} T_n^{*j}(\lambda, t) \cdot S^*(\lambda, t). \quad (9)$$

Логарифмируя выражение, получим

$$\tau_A^*(\lambda, t) = \sum_{i=1}^N \tau_i^*(\lambda, t),$$

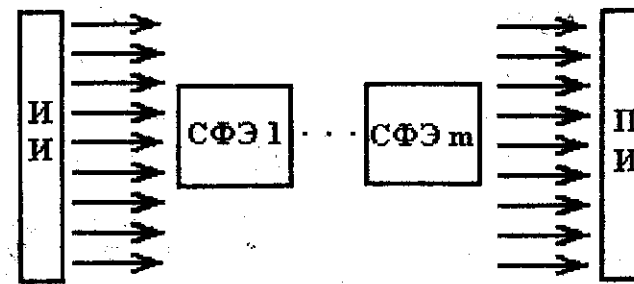


Рис. 8. Последовательное формирование спектральной характеристики СФЭ

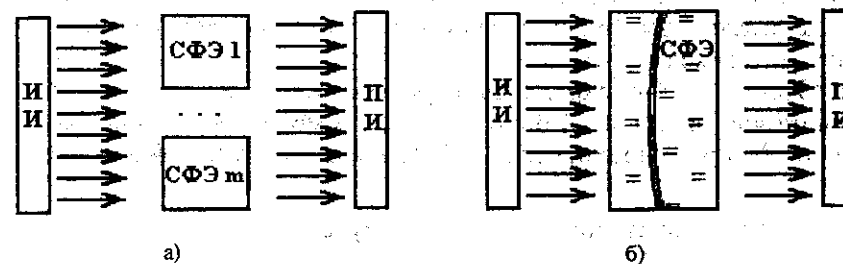


Рис. 9. Параллельно-дискретное (а) и параллельно-непрерывное (б) формирование спектральной характеристики СФЭ

где $\tau_A^*(\lambda, t) = \ln[T_A^*(\lambda, t)]$; $\tau_j^*(\lambda, t) = \ln[T_n^{*j}(\lambda, t)]$.

То есть логарифмическая спектральная характеристика пропускания последовательно расположенных фильтров определяется суммой логарифмических спектральных характеристик пропускания этих фильтров. Выбирая, например, в качестве "элементарных" фильтров ряд узкополосных фильтров с различными величинами максимумов пропускания и смещенных относительно друг друга по оси длин волн, можно синтезировать СФЭ с заданной спектральной характеристикой пропускания. При этом из условия отсутствия температурной деформации спектральной характеристики СФЭ следуют условие отсутствия температурной деформации спектральных характеристик "элементарных" фильтров и идентичность их температурных характеристик:

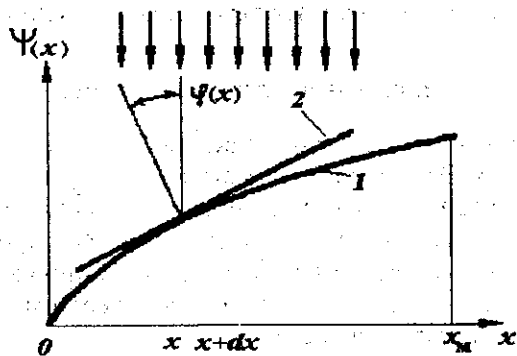


Рис. 10. Падение излучения на профилированную подложку

$$T(\lambda) = \int_0^{x_M} \frac{T_M dx}{H + D \cos\left[\frac{B}{\lambda} \cos \operatorname{arctg}\left(\frac{d\psi(x)}{dx}\right)\right]}$$

где x изменяется в пределах от нуля до x_M .

Обозначая $Y(x) = \cos \operatorname{arctg}\left(\frac{d\psi(x)}{dx}\right)$ и производя замену переменной, имеем

$$T(\lambda) = \int_{V_H}^{V_B} T^{**}(V^*, \lambda) \psi^*(V^*) dV^* \quad (10)$$

где $V^* = BY(x)$; $V_H = BY(0)$; $V_B = BY(x_M)$;

$$\psi^*(V^*) = T_M \frac{d}{dV^*} \left[Y^{-1} \left(\frac{V^*}{B} \right) \right]; \quad T^{**}(V^*, \lambda) = 1 / (A + D \cos V^* / \lambda);$$

$x = Y^{-1} \left(\frac{V^*}{B} \right)$ - функция, обратная $V^* = BY(x)$.

Таким образом, профиль подложки интерференционного СФЭ $\Psi(x)$ определяется из решения линейного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Решая интегральное уравнение (10) относительно неизвестной функции $\psi^*(V^*)$, например, численными методами [26], определим профиль подложки СФЭ:

$$\begin{cases} x = Y^{-1} \left(\frac{V^*}{B} \right) = \frac{1}{T_M} \int_{V_H}^{V^*} \psi^*(V^*) dV^*, \\ V^* = BY(x), \\ \psi(x) = \int_0^x \operatorname{tg}\{\operatorname{arccos}[Y(x)]\} dx. \end{cases} \quad (11)$$

Например. Определим профиль подложки интерференционного фильтра, спектральная характеристика пропускания которого

имеет вид $T(\lambda) = \frac{\lambda}{10\pi} \left[\operatorname{arctg}(20 \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}) - \operatorname{arctg}(20 \operatorname{tg} \frac{\pi}{2\lambda}) \right]$. Пусть

$x_M = 1$; $y(0) = 1$; $y(x_M) = 0,5$, а в качестве базового интерференционного фильтра на плоской подложке используется фильтр с параметрами: $H=201$; $D=200$; $T_M=1$ (длина волны максимума пропускания интерференционного фильтра с плоской подложкой при нормальном падении излучения на поверхность фильтра 0,5 мкм, а полуширина пропускания 50 нм). Тогда интегральное уравнение имеет вид

$$\frac{\lambda}{10\pi} \left[\operatorname{arctg}(20 \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}) - \operatorname{arctg}(20 \operatorname{tg} \frac{\pi}{2\lambda}) \right] = \int_{2\pi}^{\pi} \frac{\psi^*(V^*) dV^*}{A + D \cos V^* / \lambda} \quad (12)$$

Решая (12) методом последовательных приближений, имеем $\psi^*(V^*) = -1/\pi$. Подставляя в (11), получим

$$x = \int_{2\pi}^{V^*} \psi^*(V^*) dV^* = 2 - \frac{V^*}{\pi}; \quad V^* = By(x) = B(1 - 0,5x);$$

$$\psi(x) = \int_0^x \operatorname{tg} \operatorname{arccos}(1 - 0,5x) dx = 2 \operatorname{tg} \left| \frac{1 + \sqrt{x - 0,25x^2}}{1 - 0,5x^2} \right| - 2\sqrt{x - 0,25x^2}$$

На рис. 11, а, б изображены графики функций $\psi(x)$ и соответствующие им характеристики спектрального пропускания.

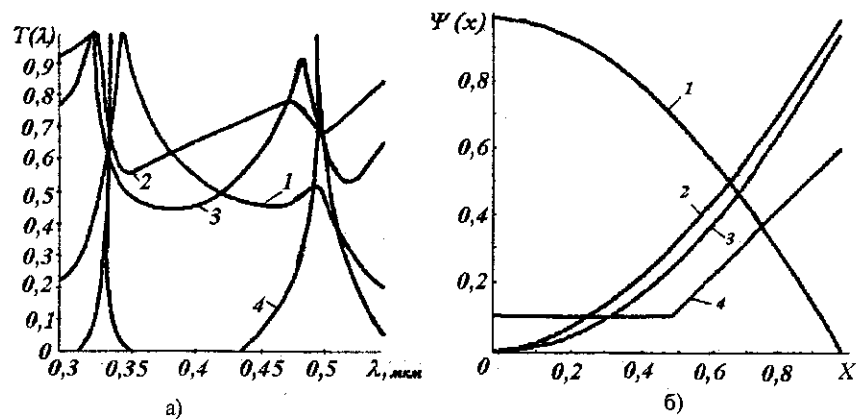


Рис. 11. Спектральные характеристики (а) и соответствующие им профили подложек (б) СФЭ

3. Формирование спектральной характеристики пропускания СФЭ изменением толщины интерференционных слоев по его поверхности.

Пусть в качестве базового фильтра используется интерференционный узкополосный СФЭ с диэлектрическими зеркальными составляющими, а толщина d_2 промежуточного полуволнового слоя фильтра изменяется по его поверхности (по координате X). Тогда при нормальном падении излучения на поверхность СФЭ имеем

$$T(\lambda) = \int_{V_H}^{V_B} T^{**}(V^*, \lambda) \psi^*(V^*) dV^*, \quad (13)$$

где $\psi^*(V^*) = C \frac{d}{dV^*} [B^{-1}(V^*)]$; $V^* = B(x)$; $B(x) = 4\pi n_2 \psi_1(x)$,

$x = B^{-1}(V^*)$ - функция, обратная функции $V^* = B(x)$;

$T^{**}(V^*, \lambda) = 1 / (A + D \cos V^* / \lambda)$; $V_H = B(0)$; $V_B = B(X_M)$.

Видно, что закон изменения толщины промежуточного полуволнового слоя по поверхности фильтра определяется из решения линейного интегрального уравнения Фредмгольма 1-го рода.

Решая интегральное уравнение (13) относительно неизвестной функции $\psi^*(V^*)$, получим

$$\begin{cases} x = B^{-1}(V^*) = \frac{1}{C} \int_{V_H}^{V_B} \psi^*(V^*) dV^*, \\ V^* = B(x), \\ \psi_1(x) = B(x) / 4\pi n_2. \end{cases}$$

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОС

Вопросам технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей посвящено большое количество работ. При разработке МОС особый интерес представляет вопрос изготовления спектроформирующих элементов.

Среди всего многообразия конструктивных вариантов спектроформирующих элементов наиболее перспективными являются интерференционные и, как их частный случай, просветляющие термокомпенсирующие покрытия. В ближней инфракрасной и видимой областях спектра спектроформирующие элементы изготавливаются из систем тонких пленок, получаемых осаждением испаряемых в вакууме материалов. Технология изготовления таких систем имеет ряд особенностей. К ним относятся: методы получения высокого вакуума, способы испарения материалов; методы контроля толщины пленок и их оптических постоянных во время осаждения и др.

Вакуумное осаждение диэлектрических материалов термическим испарением

На рис. 12 приведена схема установки вакуумного осаждения, содержащая поворотный столик 1, кварцевый резонатор 2 с подвижной заслонкой 3, регулятор движения свидетеля 4, прозрачный

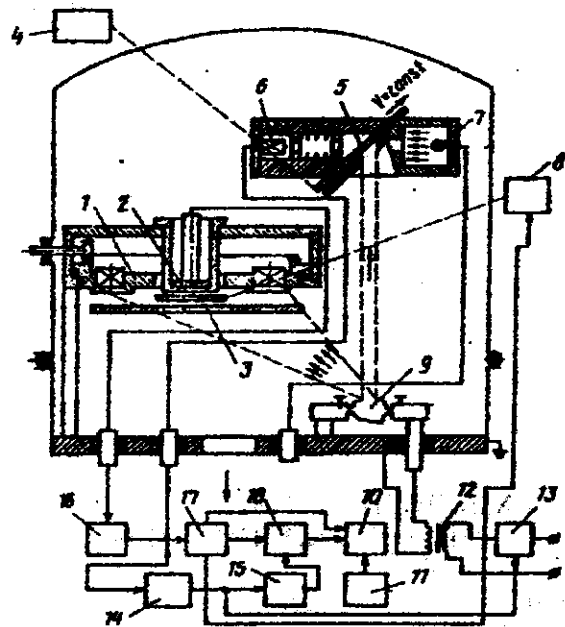


Рис. 12. Схема установки вакуумного осаждения оптических пленок

подвижный свидетель 5, фотоприемник 6, источник оптического излучения 7, реле заслонки кварцевого резонатора 8, испаритель 9, счетчик маркировочного сдвига частот 10, задатчик 11, блок питания испарителя 12, тиристор 13, усилитель фотоприемника 14, масштабный усилитель 15, измеритель частоты кварцевого резонатора 16, задатчик маркировочного сдвига частот 17 и реле времени 18 [11]. Поворотный столик 1 с кварцевым резонатором 2 закрыт подвижной заслонкой 3 и подвергается запылению потоком материала формируемой пленки. Часть этого потока оседает на прозрачный свидетель 5, оптическая плотность которого контролируется с помощью фотоприемника 6. Перед началом формирования пленок включают блок питания испарителя 12. Нагревающийся испаритель 9 разогревает помещенный в него материал до температуры кипения. Пары материала образуют поток частиц, нестабильный в начальной стадии процесса напыления. В это время измерительная часть устройства выключена, а подвижная заслонка 3 кварцевого резонатора 2 находится в закрытом положении. Затем включается источник

оптического излучения 7, фотоприемник 6 с усилителем 14 и с помощью регулятора движения свидетеля 4 задается равномерное перемещение свидетеля 5.

После стабилизации режима испарения, определяемой постоянством сигнала с усилителя фотоприемника 14, устанавливают оптимальную скорость движения свидетеля 5 с помощью регулятора движения свидетеля 4. Оптимальной для проведения процесса измерения скоростью является скорость, при которой сигнал, регистрируемый усилителем фотоприемника 14, является минимальным.

После этого включается измерительная часть устройства, открывается подвижная заслонка кварцевого резонатора 2 и начинается процесс измерения толщины пленки. В процессе осаждения пленки на кварцевом резонаторе 2 изменяется его масса, возникает сдвиг резонансной частоты, который регистрируется измерителем частоты 16. Величина сдвига резонансной частоты передается измерителем частоты 16 на задатчик маркировочного сдвига частот 17. При достижении оптимальной для измерения заранее заданной величины маркировочного сдвига частоты задатчик 17 посылает через реле заслонки 8 команду на привод заслонки 3, и заслонка 3 перекрывает кварцевый резонатор от дальнейшего запыления. Параллельно с этим задатчик 17 маркировочного сдвига частот посылает команду на реле времени 18, которое было включено одновременно с задатчиком маркировочного сдвига частот. При этом реле времени 16 фиксирует период, требуемый для получения маркировочного сдвига частот. Одновременно с этим реле времени 18, подключенное к масштабному усилителю 15, воспринимает сигнал от усилителя фотоприемника 14 через масштабный усилитель 15. При наличии нестабильности, которая может возникнуть от тепловой инерционности испарителя 9, реле времени 16 воспринимает сигнал, нестабильность которого обратно пропорциональна нестабильности сигнала усилителя 14. При этом изменяется период работы реле времени. В результате этого погрешности в измерении, вызванные нестабильностью сигнала усилителя фотоприемника 14, не возникают. Счетчик маркировочного сдвига частот 10, воспринимая команды от задатчика 17 и реле 16, считает число циклов, требуемых для получения маркированного сдвига частот и измеряет толщину пленки. Задатчик счетчика 11 снабжен устройством для установки толщины пленки. При получении заданной толщины задатчик 11, подключенный к счетчику 10, выдает команду на завершение процесса напыления.

Ионное распыление

Технология термического испарения не применяется для получения волноводных оптических структур, так как полученная пленка обладает относительно высокими диэлектрическими потерями в видимом диапазоне (порядка 10 дБ/см). Это объясняется включением атомов примесей, действующих в качестве центров рассеивания и поглощения оптического излучения. Для исключения возникновения этого эффекта используется распыление молекул вещества, находящегося в твердом состоянии, при котором атомы или молекулы вещества испаряются с поверхности путем бомбардировки мишени из испаряемого вещества ионами с энергией от 30 эВ до 2 кэВ [11, 27]. Материал, испаренный с поверхности мишени, при осаждении на поверхность подложки образует слой. Частицы достигают поверхности подложки со значительной кинетической энергией, которая обеспечивает для частицы, прилипшей к поверхности, некоторую степень подвижности. Запас энергии позволяет частице при передвижении по поверхности осаждения найти пропуски в осажденном монослое. При этом обеспечивается равномерность осаждения пленки и высокая степень однородности осажденного слоя. Напыление выполняется при температурах значительно ниже температур термического испарения, что обеспечивает крайне низкую вероятность внедрения инородных примесей в осаждаемую пленку. Чистота пленки определяется степенью очистки осаждаемого материала мишени. При использовании этой технологии возможно получение высококачественных оптических пленок с потерями порядка 1 дБ/см.

Плазменное испарение

Испарение производится в вакуумной камере, наполненной газом под давлением $(2-20) \cdot 10^{-3}$ торр [11, 27]. Между анодом и катодом прикладывается высокое напряжение смещения, обеспечивающее зажигание плазменного разряда.

Разряд создает в газовой атмосфере ионы, ускоряемые высоким напряжением в сторону мишени. При ударе ионов о мишень образуется облако атомов материала мишени, которое далее осаждается на подложке. Для обеспечения хорошей адгезии материала к подложке перед началом напыления производится обязательная очистка подложки.

Для данной технологии наиболее оптимальным является метод ионной очистки. Для обеспечения направленного оседания облака испаренного вещества на подложку к ней прикладывается напряжение смещения, но при этом следует учитывать нагрев подложки падающими на нее атомами материала. Для увеличения однородности напыляемого слоя расстояние между подложкой и мишенью должно быть больше размеров подложки. При увеличении этого расстояния уменьшается скорость осаждения пленки, что приводит к увеличению времени напыления. Затвор используется для экранирования подложки в начале технологического процесса напыления до установления режима плазменного разряда, так как в это время с поверхности мишени испаряется слой адсорбированных местных атомов. При выполнении напыления камеру наполняют инертным газом (аргоном, криптоном или неоном). Для напыления оксидных или нитридных соединений используется реактивное напыление, при этом инертный газ заменяют газом-реагентом. Материал мишени при испарении взаимодействует с бомбардирующими ионами газа-реагента. Например, для напыления нитрида кремния используется кремниевая мишень и аммиачная рабочая атмосфера. При использовании переменного высокочастотного напряжения смещения с постоянной составляющей исчезают трудности при напылении материалов с низкой проводимостью и накоплением на них заряда.

Получение пленок переменной толщины

Остановимся на особенностях нанесения интерференционных покрытий с переменной по поверхности фильтра толщиной слоев.

Интерференционные покрытия с переменной по поверхности фильтра толщиной слоев могут быть изготовлены вакуумным испарением материалов в установке с подвижным профилированным экраном. Схема такой установки изображена на рис.13, а. Под колпаком 1 испаряемый материал 2, помещенный в испаритель 3, наносится на подложку СФЭ 4. Подложка СФЭ нагревается нагревателем подложки 5, а между подложкой и испарителем вращается заслонка с профилированным экраном 6, периодически перекрывающая поток частиц испаряемого материала.

Известно, что распределение в пространстве потока частиц испаряемого материала происходит с некоторыми допущениями по закону Кнусена-Ламберта. Согласно закону Кнусена-Ламберта

количество частиц, попадающих на подложку при испарении из точечного источника, прямо пропорционально косинусу угла отклонения потока частиц от нормали и обратно пропорционально квадрату расстояния от испарителя до подложки (реальные испарители отличаются от точечных источников, и каждый из них характеризуется своей диаграммой направленности) (рис. 13, б).

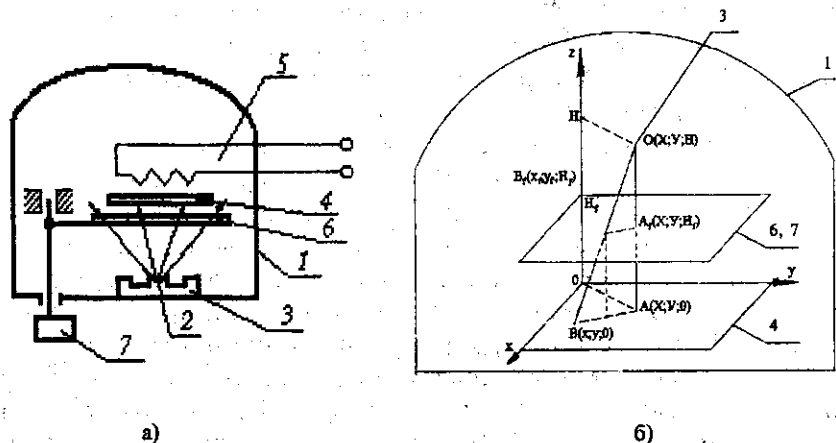


Рис.13. Схема установки с подвижным профилированным экраном заслонки

В установке использованы две профилированные близко расположенные друг к другу заслонки 6, 7, совершающие поочередно равномерное движение вдоль осей X, Y . Время, в течение которого путь от испарителя до подложки открыт, можно определить через скважность - отношение времени $t_{откр}$, в течение которого заслонка не перекрывает поток, к периоду T движения заслонки:

$$Q(x) = 1 - f(x) / VT, \quad Q(y) = 1 - f(y) / VT,$$

где V - линейная скорость движения заслонки, $f(x), f(y)$ - профили заслонок вдоль осей X, Y .

Тогда толщина пленки, получаемая при движении заслонок $h(x, y)$, выражается через толщину пленки, получаемой в отсутствие заслонок $h_0(x, y)$, следующим образом:

$$h(x, y) = h_0(x, y)(Q(x) + Q(y)).$$

С учетом независимости движения заслонок несложно определить необходимую форму профиля заслонок для заданного закона изменения толщины пленки:

$$f(x) = VT(1 - h(x) / 2 h_0(x)), \quad f(y) = VT(1 - h(y) / 2 h_0(y)) \quad (14)$$

Точечный испаритель

Согласно [11, 12] толщина пленки вещества, получаемого от точечного испарителя, определяется выражением

$$h(x, y) = I_0 H^2 t / \rho ((x-X)^2 + (y-Y)^2 + H^2)^2, \quad (15)$$

где I_0 - интенсивность потока вещества, H - расстояние между испарителем и подложкой, t - время, ρ - плотность вещества, X, Y - пространственные смещения центров испарителя и подложки. График функции (15) представлен на рис. 14.

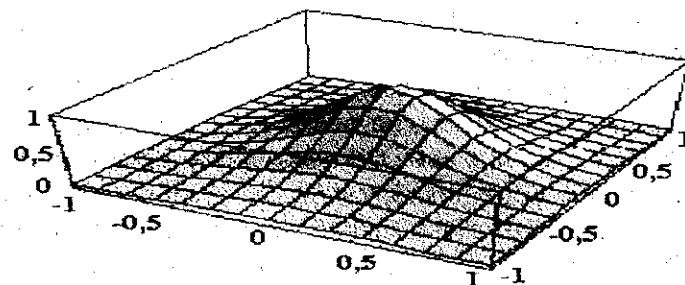


Рис.14. Профиль пленки, получаемой от точечного испарителя

Из рисунка видно, что диаграмма направленности точечного испарителя резко неравномерная. Требуется применение специальных мер для ее выравнивания.

Заслонка, выравнивающая профиль пленки

Положив в (14) $h(x) = \text{const}, h(y) = \text{const}$, получим выражение для профиля заслонки, выравнивающей неравномерность точечного источника:

$$f(x) = VT(1 - h_0 \rho ((x-X)^2 + Y^2 + H^2)^2 / 2 I_0 H^2),$$

$$f(y) = VT(1 - h_0 \rho (X^2 + (y-Y)^2 + H^2)^2 / 2 I_0 H^2).$$

На рис.15, а изображен профиль заслонки, выравнивающей диаграмму направленности точечного испарителя.

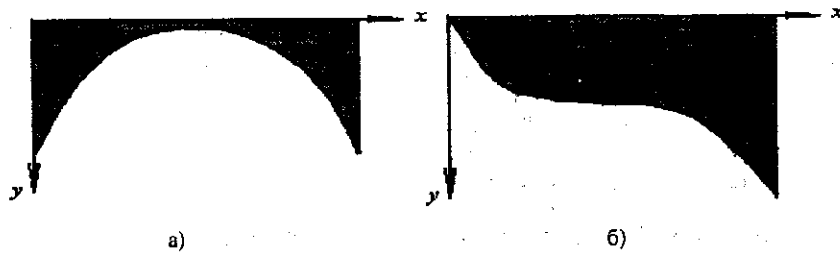


Рис.15. Профиль заслонки, выравнивающей характеристику испарителя (а) и реализующей линейный профиль пленки (б)

Заслонка, реализующая линейный профиль пленки

Положив в (14) $h(x) = h_0 + h_1 x$, $h(y) = h_0 + h_1 y$, получим выражение для профиля заслонки, выравнивающей неравномерность точечного источника и реализующей линейную зависимость толщины напыляемой пленки:

$$f(x) = VT(1 - (h_0 + h_1 x) \rho((x-X)^2 + Y^2 + H^2)^{1/2} / I_0 H^2),$$

$$f(y) = VT(1 - (h_0 + h_1 y) \rho(X^2 + (y-Y)^2 + H^2)^{1/2} / I_0 H^2).$$

На рис. 15, б изображен вид профиля заслонки, выравнивающей диаграмму направленности точечного испарителя и одновременно реализующий линейную зависимость толщины напыляемой пленки.

Для реальных испарителей диаграмма направленности может существенно отличаться от диаграммы точечного испарителя. Однако вышерассмотренным методом неравномерность диаграммы можно легко исправить.

Формирование профиля подложки СФЭ ионно-лучевой обработкой поверхности

Подложка СФЭ располагается в камере, заполненной инертным газом и подвергается воздействию ионного луча высокой энергии [14]. Вследствие такого воздействия часть материала подложки испаряется. Параметры и эффективность испарения определяются энергетическими и геометрическими характеристиками пучка ионов, свойствами материала подложки, давлением и составом среды.

Энергия пучка ионов должна быть больше пороговой

$$E_n = E_{\text{торм}} + E_{\text{смещ}} + E_{\text{расп}}$$

где E_n , $E_{\text{торм}}$, $E_{\text{смещ}}$, $E_{\text{расп}}$ - пороговая энергия, энергия тормозной способности ионов материала, энергия смещения атомов материала из равновесного состояния и энергия отрыва частиц материала от поверхности. Так для стекла К-8 $E_n = 4,52 \cdot 10^{-16}$ Дж. Тогда рекоменду-

емое ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = E_n / e = 2,82 \text{ кВ}$,

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона.

Плотность ионного тока j выражается законом "трех вторых":

$$j = K \cdot U_{\text{уск}}^{3/2} / d^2, \quad \text{где } K = 4/9 \cdot \epsilon_0 \sqrt{e/m}, \quad d = t_1 + d_1 + r,$$

m - масса ионов вещества рабочего газа, ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость, t_1 - толщина эмиссионного электрода, d_1 - расстояние между эмиссионным и ускоряющим электродом, r - радиус отверстия в электроде.

Распределение плотности ионов по сечению пучка является Гауссовым. Давление газа в камере устанавливается в пределах 10^{-4} - 10^{-5} мм рт.ст. В качестве рабочего газа используется аргон.

Схема установки ионно-лучевой обработки подложек СФЭ изображена на рис.16.

В результате воздействия пучка ионов на поверхность подложки СФЭ в зоне пучка ионов происходит испарение материала подложки. В табл. 1 приведены результаты ионно-лучевой обработки различных оптических материалов.

Установка позволяет добиться точности формирования формы поверхности до $\lambda/100 = 5,5 \dots 6,3 \text{ мкм}$.

Формирование профиля подложки СФЭ ступенчатым травлением поверхности и оплавкой

Процесс изготовления профилированной подложки разбивается на два этапа [27]. На первом этапе изготовления СФЭ на поверхности его подложки методами фотолитографии формируется ступенчатый профиль (рис.17). Количество и величина ступеней определяются требуемой точностью формирования профиля. После чего подложка помещается в вакуумную камеру, где нагревается до температуры размягчения ее материала. Затем поверхность подложки СФЭ подвергается воздействию электронного луча, который перемещается по ее поверхности.

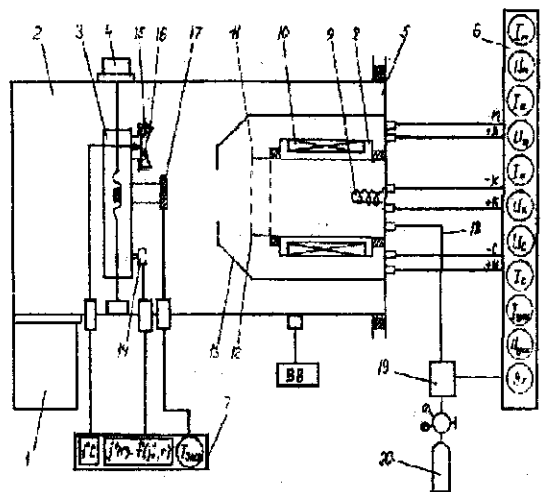


Рис. 16. Схема установки ионно-лучевого формирования профиля подложки СФЭ: 1- система откачки; 2- камера; 3, 4 - подвижная каретка с механизмом привода; 5 - источник ионов; 6, 7 - пульты управления и контроля; 8- анод; 9- катод; 10- магнит; 11,12,13 - эмиссионный, ускоряющий и выходной электроды; 14- датчик ионов; 15- держатель; 16- подложка СФЭ; 17- заслонка; 18- ввод газа; 19- натекатель; 20- баллон с газом

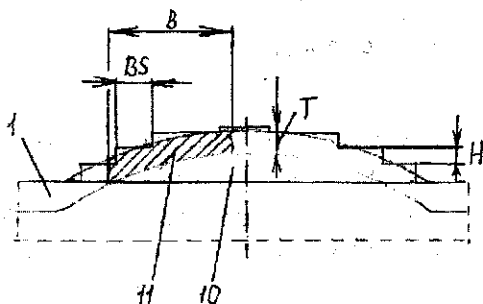


Рис.17. Ступенчатый профиль подложки СФЭ

Марка стекла	Величина испаренного слоя, мкм при различном времени экспозиции			Напряжение укоряющего электрода, кВ
	5 мин	10 мин	20 мин	
ЛК 5	0,251	0,469	0,686	5
ТФ 105	0,171	-	-	5
К 8	-	-	1,341	5
ЛК 5	0,19	0,329	0,504	5
ТФ 103	0,103	0,168	0,26	5
ОФ 4	-	0,176	0,265	5
К 8	0,107	0,171	0,327	3,5
ОФ 4	0,071	0,132	0,24	3,5

Зона плавления имеет глубину, соответствующую высоте ступеней подложки (1...5 высот).

Контролируя величину энергии электронного луча и температуру подложки СФЭ, можно с достаточной точностью контролировать глубину плавления. Это позволяет осуществить выравнивание ступенчатого профиля. Оптический контроль во время обработки поверхности электронным лучом позволяет вычислять отклонения поверхности от расчетной и обеспечить соответствующую коррекцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аблеков В.К., Зубков П.И. Фролов А.В. Оптическая и оптоэлектронная обработка информации. - М.: Машиностроение, 1976. -256 с.
2. А.с. 1329494 SU H 03 M 1/24. Устройство для осаждения термокомпенсирующих покрытий светодиодов / С.А. Матюнин, Н.Е. Конохов, А.А. Плют, Н.Д. Мишанин №3925391 //Открытия. Изобретения. 1987. Б.И. № 3.
3. А.с. 201922 СССР. Способ изготовления многоцветных растровых светофильтров и сложных сеток /Ф. Л. Бурмистров, Л.В.Черкасова. И.Ф.Шуваева //Открытия. Изобретения. 1967. Б.И. № 18.
4. А.с. 384090 СССР. Интерференционный светофильтр / Г.П. Конохов. Е.А.Несмелов //Открытия. Изобретения. 1973. Б.И. № 24.
5. А.с. 389483 СССР. Светофильтр /Н.Е.Корнеев, А.Г.Мозговой, С.М.Чернышев и др. //Открытия. Изобретения. 1973. Б.И. № 29.
6. Амброзьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. -М.: Советское радио, 1970. -392с.
7. Берг А., Дин П. Светодиоды. -М.: Мир, 1979. - 686 с.
8. Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А. Инфракрасные фильтры. -Минск: Наука и техника, 1971. - 228 с.
9. Верещагин В. Г., Замковец А.Д. Отрезающие фильтры для далекой ИК области спектра //Оптический журнал. -1998. №4. -С. 79-81.
10. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. -М.: Наука, 1965. -336с.
11. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования технологии РЭА и ЭВА. -М., 1979.
12. Короленко П. В. Оптика когерентного излучения. -М.: Просвещение, 1997. -С.608.
13. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. -Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
14. Мартынов М.И. и др. Технология и метрология микроразмерной ионно-лучевой обработки оптических деталей // Оптический журнал. 1997. Т.64. №8. С.66-73.
15. Майссел Л, Глэнг Р. Технология тонких плёнок. Справочник. -М., 1977.
16. Матюнин С.А. Интерференционный светофильтр с профилированной подложкой //Известия вузов. Приборостроение. -1982. №11. С. 66-70 .
17. Матюнин С.А. Принципы построения многокомпонентных оптронных систем спектрального взаимодействия //Датчики и системы. -М., -2001. -С. 112-117.
18. Матюнин С.А., Иноземцев М.Ю. Контроль параметров многокомпонентных оптронных структур в процессе их производства / Надежность и качество 2001: Междунар. симпоз. -Пенза, -2001. -С. 68-69.
19. Матюнин С.А., Леонович Г.И. Способ изготовления термокомпенсированных светодиодов //Матер. 1-й Поволжской НТК, ГПСО "Импульс". Ч.2. -Самара, -1995. С.43-45.
20. Матюнин С.А., Плют А.А. Синтез фотоэлектрических преобразователей перемещения в код // Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем: Тез. докл. ВНТК. -М., -1985. -С. 66-67.
21. Матюнин С.А., Новиков А.О. Конструктивно-режимные особенности кодирующего фотоприёмника преобразователя углокод //Теория и практика автоматического управления и их элементы: Межвуз. сб. -Уфа, -1985. С. 166-170.
22. Матюнин С.А., Плют А.А. Способ температурной стабилизации световых характеристик оптоэлектронных устройств //Радиотехника. -1981. Т. 36. №2. С. 78-82.
23. Матюнин С.А., Плют А.А. Стабилизация характеристик оптоэлектронных устройств в широком диапазоне температур // Радиотехника. -1982. Т. 37. №5. С. 77-81.
24. Плют А.А., Матюнин С.А. Температурная стабилизация световых характеристик оптоэлектронных устройств в широком диапазоне температур //Радиотехника. -1982. №5. С.77-81.
25. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптоэлектронных системах. -Л.: Машиностроение, 1989. -387с.
26. Тихонов Л.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. -М.: Наука, 1979. -286с.
27. Фурман Ш.А. Тонкопленочные оптические покрытия. -Л.: Машиностроение, 1977. -263с.
28. Яковлев П.П. Проектирование и изготовление оптических покрытий. -М.: Машиностроение, -1987. С. 185.

Учебное издание

**СИНТЕЗ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания

Составитель *Матюнин Сергей Александрович*

Редактор Л. Я. Чегодаева
Корректор Л. Я. Чегодаева

Компьютерная верстка О. А. Ананьев

Подписано в печать 04.06.2003 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 2,55. Усл.кр.- отт. 2,67. Уч. — изд.л. 2,75.

Тираж 100 экз. Заказ 53. Арт.С-46/2003.

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королева.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного аэрокосмического
университета. 443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 151.