

# МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КАЧЕСТВЕ АДАПТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКИ

С.А. Матюнин

Самарский государственный аэрокосмический университет

## Аннотация

Рассматриваются вопросы математического моделирования процессов в многокомпонентных оптоэлектронных элементах и устройствах, основанных на методе спектрального взаимодействия.

### Введение

Воздействие информационных параметров в оптоэлектронных устройствах (ОЭУ) происходит, в основном, двумя способами: 1 - путем пространственно-временной модуляции светового потока некогерентного излучения (к этому же, в конечном счете, сводится и 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.

В тоже время, использование принципа спектрального взаимодействия оптических элементов позволяет получить достаточно эффективные и простые по конструктивному исполнению ОЭУ. В многокомпонентных оптоэлектронных структурах (МОС) спектрального взаимодействия (рис. 1) на поверхность оптоэлектронных элементов (ОЭЭ), т.е. на поверхность источника излучения (ИИ), элементов оптической системы (ОС) и приемника излучения (ПИ), наносится дополнительный ряд компонент (2, 3, 5, 6), выполняемых в виде многослойных тонкопленочных покрытий (МТП). Эти компоненты, выполняя спектроформирующую функцию, функцию 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 полей, изменением угла падения излучения и др.

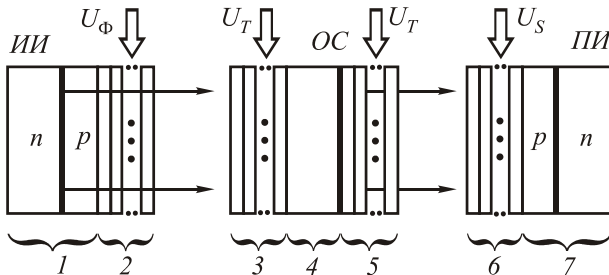


Рис. 1. структурная схема МОС

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 пространствен-

ной модуляции, коммутации, спектрального уплотнения и создать прецизионные ОЭЭ и ОЭУ систем управления, измерения и контроля [1].

*Многокомпонентные оптоэлектронные элементы спектрального взаимодействия* - это оптоэлектронные элементы, в оптическую цепь которых введены (на поверхность которых нанесены) компоненты, выполняющие спектроформирующую и спектровзаимодействующую функции, функции пространственной и временной фильтрации и модуляции.

*Многокомпонентные оптоэлектронные системы спектрального взаимодействия (МОС)* - это оптоэлектронные устройства, содержащие хотя бы один многокомпонентный оптоэлектронный элемент, воздействие информативных параметров в которых происходит в следствии взаимодействия спектральных характеристик.

### Математическая модель МОС

Если обозначить  $\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi)$ ,  $T^*(\lambda, t, \tau, U_T)$ ,  $S^*(\lambda, t, \tau, U_S)$  - абсолютные спектральные характеристики излучения ИИ, пропускания ОС и чувствительности ПИ,  $U_\phi, U_T, U_S$  - управляющие сигналы ИИ, ОС и ПИ, а  $\Phi_n^{*i}(\lambda, t, \tau)$ ,  $T_n^{*j}(\lambda, t, \tau)$ ,  $S_n^{*k}(\lambda, t, \tau)$  - абсолютные спектральные характеристики пропускания  $i, j, k$ -го МТП, нанесенных на поверхности ИИ, ОС и ПИ соответственно, то для последовательно соединенных МОЭ спектральный состав излучения  $I^*(\lambda, t, \tau)$ , падающего на фоточувствительную площадку ПИ, определится из выражения:

$$I^*(\lambda, t, \tau) = \{\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) \cdot \prod_{i \in I} \Phi_n^{*i}(\lambda, t, \tau)\} \cdot$$

$$\{T^*(\lambda, t, \tau, U_T) \cdot \prod_{j \in J} T_n^{*j}(\lambda, t, \tau)\} \cdot \{S^*(\lambda, t, \tau, U_S) \cdot$$

$$\prod_{k \in K} S_n^{*k}(\lambda, t, \tau)\}$$

где  $I, J, K$  – множество индексов компонент МТП, нанесенных на ИИ, элементы ОС и ПИ соответственно.

В большинстве случаев [1] с достаточной степенью точности и не зависимо от физической природы процессов, происходящих в оптоэлектронных элементах, их абсолютные спектральные характеристики можно аппроксимировать разностными функциями вида:

$$\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) = \Phi_m(t, \tau, U_\phi) \cdot \Phi[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)],$$

$$T^*(\lambda, t, \tau, U_T) = T_m(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)], \quad (1)$$

$$S^*(\lambda, t, \tau, U_S) = S_m(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_s(t)],$$

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 ОС 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 их абсолютных спектральных характеристик;  $\lambda_{\phi}(t, \tau)$ ,  $\lambda_T(t, \tau)$ ,  $\lambda_s(t, \tau)$  - температурно-временные зависимости длин волн максимумов соответствующих спектральных характеристик.

С учетом (1) спектральные характеристики элементов МОС определяются:

$$\begin{aligned} \Phi^*(\lambda, t, \tau, U_{\phi}, U_{n\phi}^i, U_{n\lambda\phi}^i) &= \Phi_m(t, \tau, U_{\phi}) \cdot \Phi[\lambda - \lambda_{\phi}(t, \tau)] \cdot \\ &\prod_{i \in I} \Phi_{mn}^i(t, \tau, U_{n\phi}^i) \cdot \Phi_n^i[\lambda - \lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda\phi}^i)]; \\ T^*(\lambda, t, \tau, U_T, U_{nT}^j, U_{n\lambda T}^j) &= T_m(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)] \cdot \\ &\prod_{j \in J} T_{mn}^j(t, \tau, U_{nT}^j) \cdot T_n^j[\lambda - \lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)]; \\ S^*(\lambda, t, \tau, U_S, U_{nS}^k, U_{n\lambda S}^k) &= S_m(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_s(t)] \cdot \\ &\prod_{k \in K} S_{mn}^k(t, \tau, U_{nS}^k) \cdot S_n^k[\lambda - \lambda_{sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)], \end{aligned}$$

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 сдвиг спектральных характеристик МТП.

Так как в общем случае для МОС наблюдается координатная зависимость их спектральных характеристик (по поверхности элементов), 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, учитывающие координатную зависимость соответствующих спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ соответственно, а  $U_{\phi}^{**}, U_T^{**}, U_S^{**}$  - множество управляющих воздействий МОЭ. Тогда с учетом выражения для освещенности [2] чувствительной площадки  $P_{II}$  ПИ от смещенного относительно него на величину  $x_0, y_0$  ИИ с излучающей площадкой  $P_{II}$ , получим обобщенное выражение для величины выходного сигнала ПИ в виде:

$$\begin{aligned} J(t, \tau, U_{\phi}, U_T, U_S, U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k, U_{n\lambda\phi}^i, U_{n\lambda T}^j, U_{n\lambda S}^k) &= \\ = \int_{\lambda_{II}}^{\lambda_B} \left\{ \iint_{P_{II}} \frac{1}{z_0^2} \iint_{P_{II}} \frac{\Phi^{**}(x_0, y_0, z_0, \lambda, t, \tau, U_{\phi}^{**}) \cdot T^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_T^{**})}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2]} \times \right. &(2) \\ \left. \times S^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_S^{**}) \cdot dx_0 dy_0 dx dy \right\} d\lambda. \end{aligned}$$

Выражение (2) позволяет учесть как влияние информационных и управляющих воздействий на

элементы МОС, так и влияние внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ).

В таб. 1 с позиций теории чувствительности приведены выражения для определения чувствительность МОС  $\alpha_I = \Delta J / J$  к изменению управляющих сигналов и ВДФ.

В таблице приняты следующие условные обозначения:

$$\alpha_{\phi m}^r = \frac{1}{\Phi_m(t, \tau, U_{\phi})} \frac{\partial \Phi_m(t, \tau, U_{\phi})}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{SM}^r = \frac{1}{S_m(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_m(t, \tau, U_S)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{Tm}^r = \frac{1}{T_m(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_m(t, \tau, U_T)}{\partial \tau} \quad \text{- инерционность ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\phi mn}^{jr} = \frac{1}{\Phi_{mn}^j(t, \tau, U_{\phi})} \frac{\partial \Phi_{mn}^j(t, \tau, U_{\phi})}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{Tmn}^{jr} = \frac{1}{T_{mn}^j(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_{mn}^j(t, \tau, U_T)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{SMn}^{kr} = \frac{1}{S_{mn}^k(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_{mn}^k(t, \tau, U_S)}{\partial \tau} \quad \text{- инерционность ИИ, ОС, ПИ по цепи управления МТП;}$$

$$\alpha_{\phi m}^d = \frac{1}{\Phi_m(t, \tau, U_{\phi})} \frac{\partial \Phi_m(t, \tau, U_{\phi})}{\partial \alpha},$$

$$\alpha_{Tm}^d = \frac{1}{T_m(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_m(t, \tau, U_T)}{\partial \alpha},$$

$$\frac{1}{S_m(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_m(t, \tau, U_S)}{\partial \alpha} \quad \text{- температурная чувствительность ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\phi mn}^d = \frac{1}{\Phi_{mn}^j(t, \tau, U_{\phi})} \frac{\partial \Phi_{mn}^j(t, \tau, U_{\phi})}{\partial \alpha},$$

$$\alpha_{Tmn}^d = \frac{1}{T_{mn}^j(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_{mn}^j(t, \tau, U_T)}{\partial \alpha},$$

$$\alpha_{SMn}^d = \frac{1}{S_{mn}^k(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_{mn}^k(t, \tau, U_S)}{\partial \alpha} \quad \text{- температурная чувствительность ИИ, ОС, ПИ по цепи МТП;}$$

$$\alpha_{\phi \tau}^r = \frac{1}{\lambda_{\phi}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{\phi}(t, \tau)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{T \tau}^r = \frac{1}{\lambda_T(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_T(t, \tau)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{S \tau}^r = \frac{1}{\lambda_s(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_s(t, \tau)}{\partial \tau} \quad \text{- инерционность изменения длин волн максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ;}$$

длин волн максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ;

$$A^* = \Phi[\lambda - \lambda_{\phi}(t, \tau)] \cdot \prod_{i \in I} \Phi_n^i[\lambda - \lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda\phi}^i)] \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)] \cdot$$

$$\prod_{j \in J} T_n^j[\lambda - \lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)] \cdot S[\lambda - \lambda_s(t)] \cdot \prod_{k \in K} S_n^k[\lambda - \lambda_{sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)] d\lambda$$

$$A = \int_{\lambda_{II}}^{\lambda_B} A_1 d\lambda; \alpha_{\phi mn}^{jr} = \frac{1}{\lambda_{\phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\phi}^j)} \frac{\partial \lambda_{\phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\phi}^j)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{\lambda_{in}}^{i\tau} = \frac{1}{\lambda_{in}^i(t, \tau, U_{n\lambda T}^i)} \frac{\partial \lambda_{in}^i(t, \tau, U_{n\lambda T}^i)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{\lambda_{Sn}}^{k\tau} = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^i)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^i)}{\partial \tau} - \text{инерционность}$$

изменения длин волн максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;

$$\alpha_{\lambda_{\phi}} = \frac{1}{\lambda_{\phi}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{\phi}(t, \tau)}{\partial \alpha}, \quad \alpha_{\lambda_{\tau}} = \frac{1}{\lambda_{\tau}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{\tau}(t, \tau)}{\partial \alpha}, \quad \alpha_{\lambda_{S}} = \frac{1}{\lambda_{S}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{S}(t, \tau)}{\partial \alpha} -$$

температурные коэффициенты изменения длин волн максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ;

$$\alpha_{\lambda_{\phi n}}^i = \frac{1}{\lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda \phi}^i)} \frac{\partial \lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda \phi}^i)}{\partial \alpha},$$

$$\alpha_{\lambda_{in}}^j = \frac{1}{\lambda_{in}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)} \frac{\partial \lambda_{in}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)}{\partial \alpha},$$

$$\alpha_{\lambda_{Sn}}^k = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)}{\partial \alpha} - \text{температурные}$$

коэффициенты изменения длин волн максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;

$$\beta_{\lambda_{\phi}} = \frac{\partial \Phi[\lambda - \lambda_{\phi}]}{\partial \lambda_{\phi}}, \quad \beta_{\lambda_{\tau}} = \frac{\partial \Gamma[\lambda - \lambda_{\tau}]}{\partial \lambda_{\tau}}, \quad \beta_{\lambda_{S}} = \frac{\partial S[\lambda - \lambda_{S}]}{\partial \lambda_{S}} - \text{крутизна}$$

на спектральной характеристики ИИ, ОС, ПИ;

$$\beta_{\lambda_{\phi n}}^i = \frac{\partial \Phi_n^i[\lambda - \lambda_{\phi n}^i]}{\partial \lambda_{\phi n}^i}, \quad \beta_{\lambda_{in}}^j = \frac{\partial \Gamma_n^j[\lambda - \lambda_{in}^j]}{\partial \lambda_{in}^j}, \quad \beta_{\lambda_{Sn}}^k = \frac{\partial S_n^k[\lambda - \lambda_{Sn}^k]}{\partial \lambda_{Sn}^k} -$$

крутизна спектральной характеристики МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;

$$\alpha_{\Phi_M}^{U\phi} = \frac{1}{\Phi_M(t, \tau, U_{\phi})} \frac{\partial \Phi_M(t, \tau, U_{\phi})}{\partial U_{\phi}},$$

$$\alpha_{T_M}^{UT} = \frac{1}{T_M(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_M(t, \tau, U_T)}{\partial U_T},$$

$$\alpha_{S_M}^{US} = \frac{1}{S_M(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_M(t, \tau, U_S)}{\partial U_S} - \text{чувствительность}$$

максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям;

$$\alpha_{\Phi_{Mn}}^{iU\phi} = \frac{1}{\Phi_{Mn}(t, \tau, U_{\phi n}^i)} \frac{\partial \Phi_{Mn}(t, \tau, U_{\phi n}^i)}{\partial U_{\phi n}^i},$$

$$\alpha_{T_{Mn}}^{jUT} = \frac{1}{T_{Mn}(t, \tau, U_{Tn}^j)} \frac{\partial T_{Mn}(t, \tau, U_{Tn}^j)}{\partial U_{Tn}^j},$$

$$\alpha_{S_{Mn}}^{kUS} = \frac{1}{S_{Mn}(t, \tau, U_{Sn}^k)} \frac{\partial S_{Mn}(t, \tau, U_{Sn}^k)}{\partial U_{Sn}^k} - \text{чувствительность}$$

максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям;

$$\alpha_{\lambda_{\phi n}}^{iU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda \phi}^i)} \frac{\partial \lambda_{\phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda \phi}^i)}{\partial U_{n\lambda \phi}^i},$$

$$\alpha_{\lambda_{in}}^{jU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{in}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)} \frac{\partial \lambda_{in}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)}{\partial U_{n\lambda T}^j},$$

$$\alpha_{\lambda_{Sn}}^{kU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)}{\partial U_{n\lambda S}^k} - \text{чувствительность}$$

изменения длин волн максимумов спектральных

характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям.

Как видно из (2) и таблицы 1 выходной сигнал ПИ определяется величиной излучаемого ИИ светового потока, спектральными характеристиками МОЭ и взаимодействием этих спектральных характеристик. Причем, этим взаимодействием можно управлять как путем изменения соответствующих управляющих воздействий, так и изменением крутизны и взаимного расположения спектральных характеристик элементов.

Таблица 1.  
Чувствительность МОС к управляющим воздействиям и ВДФ

Воздействие	Коэффициент чувствительности
время $\Delta \tau$	$\alpha_{\Phi M}^i + \alpha_{S M}^i + \alpha_{T M}^i + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{i\tau} + \sum_j \alpha_{T M n}^{j\tau} + \sum_k \alpha_{S M n}^{k\tau} +$ $\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A^* [\lambda_{\phi} \beta_{\lambda \phi} \alpha_{\lambda \phi}^i + \lambda_S \beta_{\lambda S} \alpha_{\lambda S}^i + \lambda_{\tau} \beta_{\lambda \tau} \alpha_{\lambda \tau}^i +$ $\sum_{i \in I} \lambda_{\phi n}^i \beta_{\lambda \phi n}^i \alpha_{\lambda \phi n}^{i\tau} + \sum_{j \in J} \lambda_{T n}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{j\tau} + \sum_{k \in K} \lambda_{S n}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{k\tau}] d\lambda$
температура $\Delta t$	$\alpha_{\Phi M}^i + \alpha_{S M}^i + \alpha_{T M}^i + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{i\tau} + \sum_j \alpha_{T M n}^{j\tau} + \sum_k \alpha_{S M n}^{k\tau} +$ $\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A^* [\lambda_{\phi} \beta_{\lambda \phi} \alpha_{\lambda \phi}^i + \lambda_S \beta_{\lambda S} \alpha_{\lambda S}^i + \lambda_{\tau} \beta_{\lambda \tau} \alpha_{\lambda \tau}^i +$ $\sum_{i \in I} \lambda_{\phi n}^i \beta_{\lambda \phi n}^i \alpha_{\lambda \phi n}^{i\tau} + \sum_{j \in J} \lambda_{T n}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{j\tau} + \sum_{k \in K} \lambda_{S n}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{k\tau}] d\lambda$
интенсивность излучения ИИ $\Delta U_{\phi}, \Delta U_{n\phi}^i$	$\alpha_{\Phi M}^{U\phi} \Delta U_{\phi} + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{iU\phi} \Delta U_{n\phi}^i$
пропускание ОС $\Delta U_T, \Delta U_{nT}^j$	$\alpha_{T M}^{UT} \Delta U_T + \sum_j \alpha_{T M n}^{jUT} \Delta U_{nT}^j$
чувствительность ПИ $\Delta U_S, \Delta U_S^k$	$\alpha_{S M}^{US} \Delta U_S + \sum_k \alpha_{S M n}^{kUS} \Delta U_S^k$
Сдвиг спектральной характеристики МТП ИИ $\Delta U_{n\lambda \phi}^i$	$\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{i \in I} \lambda_{\phi n}^i \beta_{\lambda \phi n}^i \alpha_{\lambda \phi n}^{iU\lambda} \Delta U_{n\lambda \phi}^i] d\lambda$
Сдвиг спектральной характеристики МТП ОС $\Delta U_{n\lambda T}^j$	$\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{j \in J} \lambda_{T n}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{jU\lambda} \Delta U_{n\lambda T}^j] d\lambda$
Сдвиг спектральной характеристики МТП $\Delta U_{n\lambda S}^k$	$\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{k \in K} \lambda_{S n}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{kU\lambda} \Delta U_{n\lambda S}^k] d\lambda$

### Многокомпонентные адаптивные элементы оптики

Оптика когерентного излучения и, особенно, компьютерная оптика, являясь частью современных вычислительных оптических систем, нашла широкое применение благодаря способности к адаптации, гибкости в перенастройке, высокой скорости обработки информации. Применение когерентной оптики предполагает

использование достаточно сложных и громоздких оптических систем. В тоже время, многие вычислительные задачи можно решить, используя элементы некогерентной оптики: модуляторы и демодуляторы, корректоры нелинейности, дефлекторы, коммутаторы оптического сигнала и др. На рис. 2 изображена конструкция простейшего адаптивного оптического фильтра.

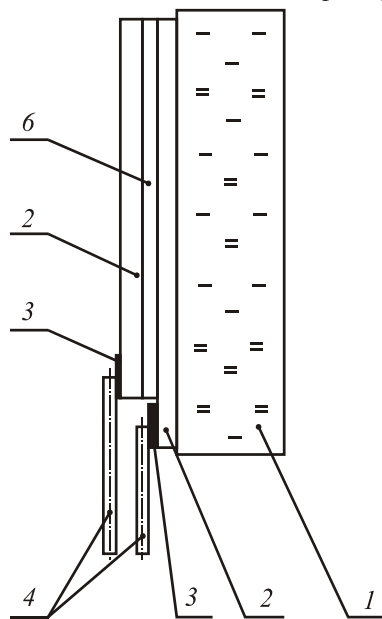


Рис. 2. Адаптивный фильтр оптического излучения

Он состоит из стеклянной подложки 1, на которую между двумя прозрачными омическими электродами 2 нанесены тонкопленочные слои интерференционного фильтра 6. К омическим электродам 2 подводится управляющее напряжение с помощью выводов 4. Резонансный слой такого спектроформирующего элемента (СФЭ) выполняется из материала, обладающего электрооптическим, электрострикционным или обратным пьезоэффектом. При изменении управляющего напряжения изменяется показатель преломления резонансного слоя фильтра или его толщина и, в соответствии с выражениями таб. 1, изменяется длина волны максимума пропускания (рис. 3). Зависимость величины показателя преломления и толщины резонансного слоя СФЭ от управляющего напряжения для некоторых материалов линейная, для других - близка к квадратичной, зависимость же длины волны максимума пропускания адаптивного СФЭ от управляющего напряжения близка к косинусоидальной.

Ясно, что из-за небольших величин электро- и пьезооптических постоянных материалов СФЭ диапазон изменения максимума пропускания СФЭ небольшой. Однако, используя метод спектрального взаимодействия элементов, можно существенно улучшить характеристики.

Так, если на обратную сторону стеклянной подложки адаптивного фильтра (см. рис. 2) нанести такую же многослойную спектроформирующую систему, то возможна реализация функции модулятора оптического излучения, управляемого с помощью одного или двух напряжений. Если величины управляющих на-

пряжений выбрать так, чтобы спектральные характеристики при их изменении не перекрывались между собой или перекрывались частично (рис. 3), то такой оптический элемент реализует функцию электрооптического затвора с функцией «И» по управляющим напряжениям или функцию регулируемого ослабителя оптического излучения соответственно.

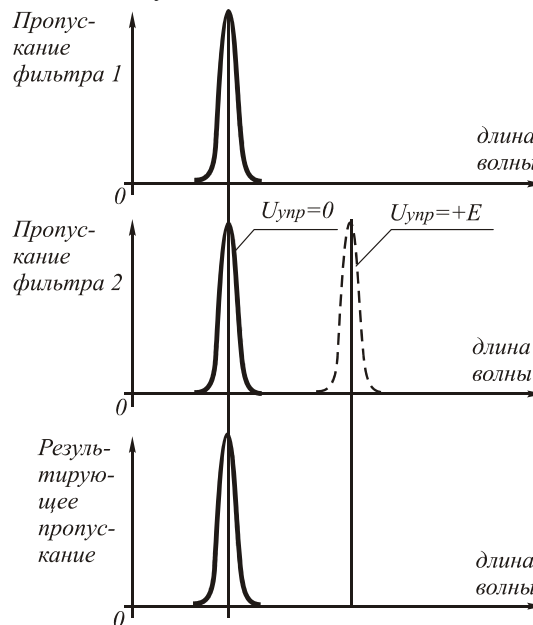


Рис. 3. Спектральные характеристики пропускания адаптивного фильтра при различных управляющих напряжениях

Выходной сигнал ПИ такого элемента определится из выражения:

$$J(U_{n\lambda T}^1, U_{n\lambda T}^2) = a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot T_n^1[\lambda, U_{n\lambda T}^1, U_{d\lambda T}^1] \cdot T_n^2[\lambda, U_{n\lambda T}^2, U_{d\lambda T}^2] \cdot d\lambda,$$

$$T_n^i[\lambda, U_{n\lambda T}^i, U_{d\lambda T}^i] = \frac{1}{H + D \cos\left[\frac{\pi n_2 d_2 (1 + \alpha_n^U U_{n\lambda T}^i)(1 + \alpha_d^U U_{d\lambda T}^i)}{\lambda}\right]},$$

где  $i=1, 2$ ,  $\alpha_n^U, \alpha_d^U$  - электрооптический коэффициент и коэффициент линейного расширения материала СФЭ вследствие электрострикционного или обратного пьезоэффекта соответственно.

На рис. 4 изображена зависимость пропускания такого модулятора оптического излучения от величины управляющего напряжения (параметр  $D$  определяет полосу пропускания СФЭ), а на рис. 5 - зависимость величины управляющего напряжения от полосы пропускания СФЭ.

Диапазон изменения управляющих напряжений  $\Delta U$  (измеренный по уровню 0,2) определяется соотношением величин электрооптического (электрострикционного, пьезо-) коэффициента и полосой пропускания СФЭ:

$$\Delta U = \frac{1}{\alpha_n^U} \left| \frac{2\pi N - \arccos(8/D - 1)}{2\pi N + \arccos(8/D - 1)} - 1 \right|$$

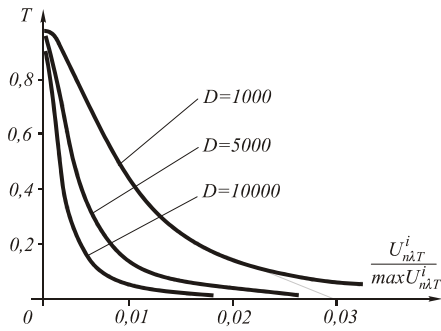


Рис. 4. Характеристика пропускания модулятора оптического излучения

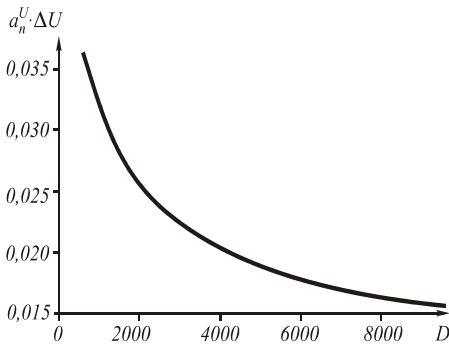


Рис. 5. Связь диапазона управляющих напряжений и электрооптических свойств материалов

На рис. 6 изображена конструкция оптического дефлектора, реализованного на методе спектрально-го взаимодействия.

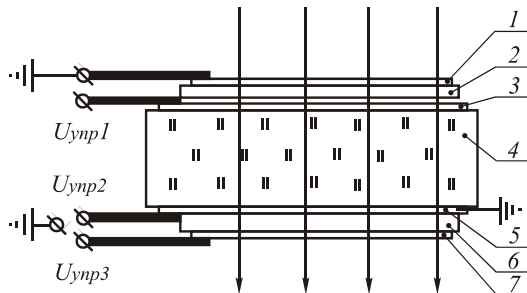


Рис. 6. Аналоговый тонкопленочный дефлектор некогерентного оптического излучения.

Он состоит из двух идентичных узкополосных тонкопленочных интерференционных фильтров, выполненных из нанесенных на подложку 4 оптически прозрачных электродов 1, 3, 5, 7 (окись олова), резонансных полуволновых и зеркальных слоев 2, 6 из материалов, обладающих электрооптическим, электрострикционным или обратным пьезоэффектом (сернистый цинк, криолит и др.). К электроду 5 фильтра 6 с двух сторон с помощью низкоомных электродов подключен источник развертывающего напряжения  $U_{ynp2}$ , создающий линейное падение напряжения в электроде 5. Ко второму электроду 7 фильтра 6 подключен источник управляющего напряжения  $U_{ynp3}$ . В результате между электродами 5, 6 фильтра 6 создается линейно изменяющаяся разность потенциалов  $U_2(X)$ :

$$U_2(X) = U_{ynp2} X / X_m - U_{ynp3},$$

где  $X_m$  – размер дефлектора в направлении координаты  $X$ .

К электродам 1, 3 фильтра 2 подключен источник управляющего напряжения  $U_{ynp1}$ . Учитывая координатные зависимости оптических толщин  $n_i d_i$  резонансных слоев СФЭ 2 и 6:

$$n_2 d_2(x) = n_{20} d_{20} (1 + \alpha_n^U U_{ynp1}),$$

$$n_6^6(x) = n_{60} d_{60} \left\{ 1 + \alpha_n^U \left( U_{ynp2} \frac{x}{X_m} - U_{ynp3} \right) \right\},$$

где  $n_{20}, n_{60}, d_{20}, d_{60}$  – показатели преломления и толщины резонансных слоев СФЭ 2 и 6 при отсутствии управляющих напряжений, определим координату  $X$  наибольшего пропускания дефлектора:

$$X = \frac{U_{ynp1} + U_{ynp3}}{U_{ynp2}} X_m = \gamma \cdot X_m.$$

Как видно, координатная зависимость максимума пропускания дефлектора линейная, определяется только величинами управляющих напряжений и не зависит от свойств и стабильности материалов СФЭ. Ширину области прозрачности дефлектора  $\Delta X$  (по уровню 0,5) можно определить из соотношения электрооптического коэффициента материала СФЭ, управляющих напряжений и полос пропускания спектроформирующих элементов (рис. 7):

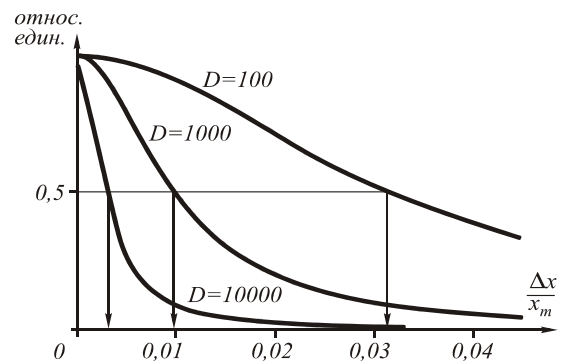


Рис. 7. Зависимость ширины области прозрачности дефлектора от полосы пропускания СФЭ

$$\int_{\lambda_{H1}}^{\lambda_{H2}} \frac{1}{(H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U U_{ynp1}) / \lambda])} \frac{\Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{(H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U (U_{ynp2} \frac{\Delta X}{X_m} + U_{ynp3}) / \lambda])} =$$

$$= 0,5 \int_{\lambda_{H1}}^{\lambda_{H2}} \frac{\Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{(H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U U_{ynp1}) / \lambda])^2}.$$

Как видно из рис. 7 для узкополосных СФЭ ширина области прозрачности дефлектора составляет величину порядка 3% от размера рабочей зоны дефлектора  $X_m$ . На рис. 3 изображены спектральные характеристики СФЭ дефлектора, а на рис. 8 – координатные зависимости пропускания дефлектора при различных управляющих напряжениях.

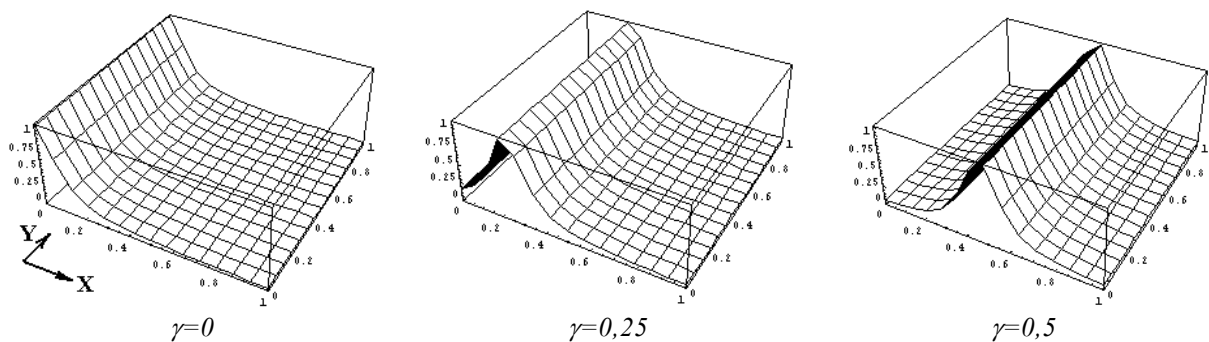


Рис. 8. Пропускание дефлектора при различных управляющих напряжениях

$$\gamma_m = (U_{\text{упр1}} + U_{\text{упр3}}) / U_{\text{упр2}}$$

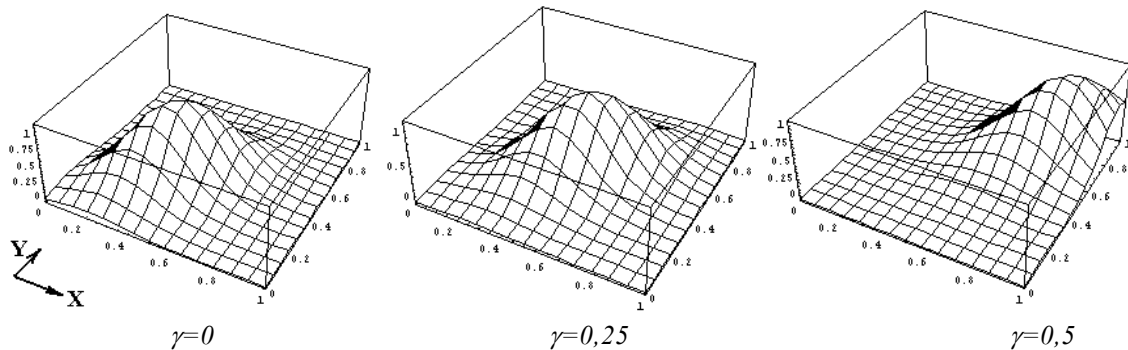


Рис. 9. Пропускание двухкоординатного дефлектора при различных управляющих напряжениях

$$\gamma_m = (U_{\text{упр1}} + U_{\text{упр3}})^2 / U_{\text{упр2}} U_{\text{упр4}}$$

При введении в конструкцию дефлектора третьего фильтра (см. рис. 6), идентичного фильтру 6, но пространственно развернутого на  $90^\circ$  вдоль оси Z, и подаче на его электроды соответствующего управляющего напряжения  $U_{\text{упр4}}$ , устройство реализует функцию двухкоординатного сканирования (рис. 9).

Ширину области прозрачности дефлектора  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  (по уровню 0,5) можно определить из соотношения электрооптического коэффициента материала СФЭ, управляющих напряжений и полос пропускания спектроформирующих элементов:

$$\int_{\lambda_{\text{и}}}^{\lambda_{\text{д}}} \frac{T_n^*(\lambda, U_{\text{упр1}}) \cdot \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{и}}}^{\lambda_{\text{д}}} (H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U \{U_{\text{упр2}} \frac{\Delta X}{X_m} + U_{\text{упр1}}\}) / \lambda]) (H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U \{U_{\text{упр4}} \frac{\Delta Y}{Y_m} + U_{\text{упр1}}\}) / \lambda])} = 0,5$$

$$= 0,5 \int_{\lambda_{\text{и}}}^{\lambda_{\text{д}}} T_n^*(\lambda, U_{\text{упр1}})^3 \cdot \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda;$$

$$T_n^*(\lambda, U_{\text{упр1}}) = \frac{1}{H + D \cos[B(1 + \alpha_n^U U_{\text{упр1}}) / \lambda]}$$

где  $Y_m$  - размер дефлектора в направлении координаты Y.

Вариант реализации дискретного дефлектора, который так же может выполнять функцию многоканального коммутатора некогерентного излучения, изображен на рис. 10. Здесь омические электроды спектроформирующих элементов выполнены в виде системы ортогональных полос, подключенных к независимым источникам управляющего напряжения. Область прозрачности такого дефлектора (коммутатора) находится под перекрестием электродов с одинаковыми управляющими напряжениями. В этой конструкции дефлектора ширина пространственного

пропускания дефлектора ограничивается как соотношением полосы пропускания СФЭ и величины электрооптического коэффициента, так и шириной электродов (полос), а, поэтому, может быть уже, чем в варианте рис. 6.

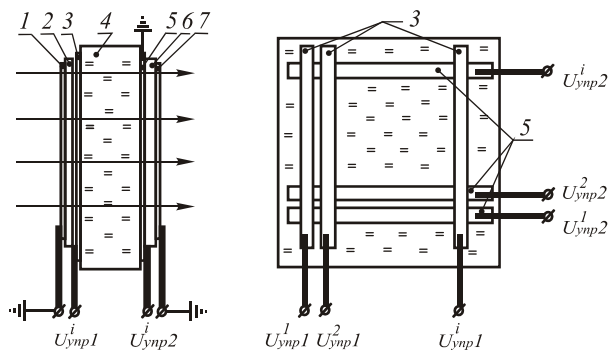


Рис. 10. Дискретный тонкопленочный дефлектор (коммутатор) некогерентного оптического излучения

### Литература

1. Матюнин С.А. Принципы построения многокомпонентных оптронных систем спектрального взаимодействия // Сб. докладов МНТК «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик 2001», Су-дак, 24-31.05. 2001.
2. Леонович Г.И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации // Самара:-СГАУ. -1998. -265 с.

# **Multicomponent optoelectronic structures of spectral interaction used as adaptive optical elements**

*S.A. Matyunin<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Samara State Aerospace University*

## ***Abstract***

The work considers the mathematical simulation of processes in multicomponent optoelectronic elements and devices based on the method of spectral interaction.

*Keywords:* optoelectronic structure, adaptive optical element, mathematical simulation, optoelectronic element, spectral interaction.

*Citation:* Matyunin SA. Multicomponent optoelectronic structures of spectral interaction used as adaptive optical elements. *Computer Optics* 2001; 22: 80-85.

## ***References***

- [1] Matyunin SA. Design concepts of multicomponent optronic systems of spectral interaction [In Russian]. Proc MNTK Sensors and information converters of measurement, control and management systems "Sensor 2001" 2001.
- [2] Leonovich GI. Optoelectronic digital displacement sensors for severe operating conditions [In Russian]. Samara: Samara State Aerospace University Publisher; 1998.