

Литература

1. Соловов В.Я. Фазовые измерения. - М.: Энергия, 1973. - С. 56-98.
2. Дмитриев Ю.С. Формирователь импульсов: Авт. свид. СССР № 470912, опубли. в БИ № 8, 1975.
3. Дмитриев Ю.С., Зеленский А.В. Формирователь импульсов: Авт. свид. СССР № 365821, опубли. в БИ № 6, 1973.
4. Дмитриев Ю.С., Беляков В.И. Уменьшение влияния дрейфа нуля в усилителях-ограничителях. - Известия вузов СССР. Сер. Приборостроение, 1975, № 12, с. 74-77.

УДК 681.325.088

С.А.Матюнин, А.А.Плют

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СИНТЕЗА МИКРОПЛЕНОЧНЫХ АЦП

Большое внимание, уделяемое в последнее время фотоэлектрическим преобразователям перемещения в код [1], объясняется высокими метрологическими характеристиками таких преобразователей. Особо следует выделить фотоэлектрический микроплёночный преобразователь перемещения [2]. Однако такому преобразователю присущи существенные недостатки: сложность технологии изготовления фотоприемника, низкая помехозащищенность, невозможность съема информации при медленно перемещающемся световом зонде. Причем, если малая помехозащищенность обусловлена, в основном, использованием полубесконечного светового зонда, то точность и разрешающая способность преобразователя ограничиваются технологическими возможностями изготовления фотоприемника (минимальный размер кристаллов фоточувствительной CdS , $CdSe$ пленки 1-10 мкм), что ограничивает размер светочувствительных ячеек фотоприемника на уровне 100-300 мкм [3].

Более высокими метрологическими характеристиками обладает преобразователь (рис. 1). Преобразователь параллельного считывания [1] состоит из проецирующего узкий световой зонд объектива, кодирующего фотоприемника (ФП) и измерительного блока, включающего компараторы напряжения, преобразователь напряжение-код (ПНК) и суммирующее устройство. ФП выполнен в виде пар по числу разрядов $n+1$ светочувствительных дорожек, заключенных между профилированными в виде зубцов прямоугольной формы и сдвинутых относительно друг

друга электродов и общим токсьемным электродом (ТСЭ). В ФП введена дополнительная пара светочувствительных дорожек, идентичная паре светочувствительных дорожек младшего разряда ФП, сдвинутая относительно ее на величину половины ширины одного зубца ΔN электрода младшего разряда ФП. К ТСЭ каждого разряда ФП подключены компараторы напряжения, а к ТСЭ младшего разряда подключены также ПНК, выходной код которого суммируется с постоянной величиной, равной Δ_N , если выходной сигнал компаратора напряжения дополнительной пары светочувствительных дорожек соответствует логической 1. Это устраняет неоднозначность определения положения светового зонда при положении зонда x

$$2 \Delta_N (i+1) > x > \Delta_N (1+2i), \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

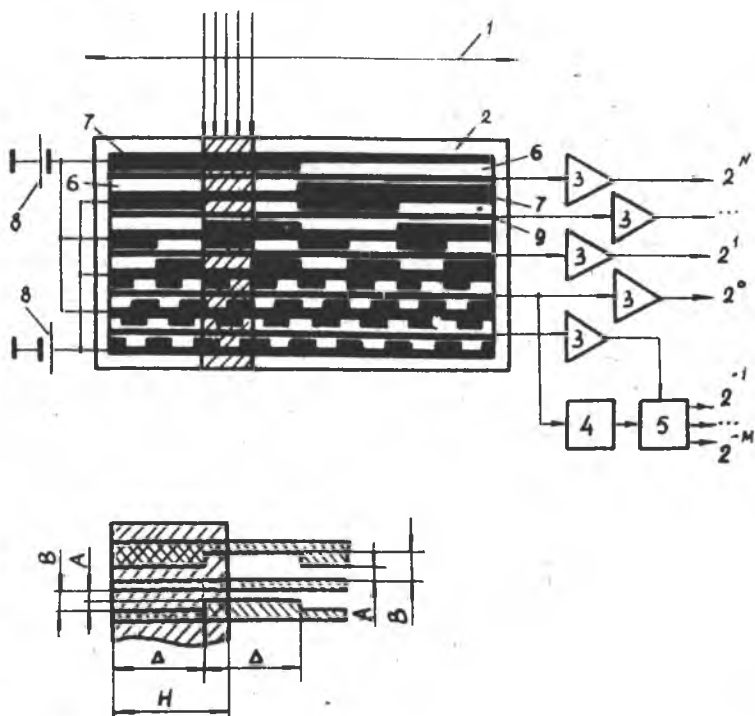


Рис. 1. Структурная схема преобразователя перемещения в код: 1 - объектив, 2 - фотоприемник, 3 - компаратор напряжения; 4 - преобразователь напряжения-код; 5 - суммирующее устройство; 6 - светочувствительная дорожка; 7 - электрод; 8 - источник питания; 9 - токсьемный электрод

Рассмотрим влияние конструктивных параметров ФП, светочувствительной пленки и ширины светового зонда на основные характеристики преобразователя. Пусть на ФП падает световой поток шириной

H . Проводимость освещенного участка светочувствительной дорожки δ_B , заключенного между верхним профилированным и ТСЭ, можно представить в виде суммы трех составляющих

$$\delta_B = \delta_0 + \delta_T + \Delta\delta(x), \quad (1)$$

где $\delta_0 = \sigma_c \Delta_i L_1 \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right)$;

$L_1 = \text{entier} \left(\frac{H}{2\Delta_i} \right)$ — целая часть $\frac{H}{2\Delta_i}$;

Δ_i — ширина зубца профилированного электрода i -го разряда;

A, B — расстояние от ТСЭ до зубца и дна впадины профилированного электрода соответственно (см. рис. 1);

$$\delta_T = \frac{\sigma_T x_m}{2} \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right);$$

σ_c, σ_T — удельные световая и темновая проводимости фоточувствительной пленки;

x_m — максимально измеряемое перемещение светового зонда.

При перемещении светового зонда $\Delta\delta$ изменяется в пределах:

$$\frac{\sigma}{B} (H - 2\Delta_i L_1) \leq \Delta\delta \leq \frac{\sigma_c}{A} (H - 2\Delta_i L_1), \quad L_2 = 0;$$

$$\sigma_c \left(\frac{\Delta_i}{B} + (H - 2\Delta_i L_1 - \Delta_i) \frac{1}{A} \right) \leq \Delta\delta \leq \sigma_c \left(\frac{\Delta_i}{A} + (H - 2\Delta_i L_1 - \Delta_i) \frac{1}{B} \right), \quad (2)$$

где $L_2 = 1$, $L_2 = \text{entier} \left(\frac{H}{\Delta_i} \right) - 2L_1$.

Так как изменение проводимости освещенного участка δ_n , заключенного между нижним и ТСЭ, происходит по тому же закону (1), но со сдвигом положения светового зонда на величину Δ_i , то сигнал U_k , снимаемый с ТСЭ i -го разряда,

$$U_k = E \cdot \frac{R_n (\delta_B - \delta_n)}{1 + R_n (\delta_B - \delta_n)} = U_{km} \left(\frac{x}{\Delta_i} - 1 \right), \quad (3)$$

$$\text{где } U_{\text{км}} = E \frac{(B-A)[1-2L_2 + \beta(L_2 + 2L_1L_2 - L_1)]}{\frac{AB}{H\sigma_c R_n} + (A+B)(1 + \rho \frac{x_m}{H})} ; \quad (4)$$

R_n - сопротивление нагрузки ФП;

$$\beta = \frac{2\Delta i}{H} ; \quad \rho = \frac{\sigma_T}{\sigma_c} ;$$

x - координата положения центра светового зонда

$$0 \leq x \leq 2\Delta i .$$

При этом для разрядов ФП, для которых $H \neq \Delta i$, напряжение U_k при перемещении светового зонда изменяется по трапецеидальному закону и по линейно-пилообразному закону, если $H = \Delta i (2i + 1)$. Из (4) видно, что величина сигнала U_k зависит как от соотношения размеров профилированных электродов A, B , так и от соотношения величины сопротивления нагрузки R_n , удельной световой проводимости σ_c , ширины светового зонда H и кратности изменения проводимости светочувствительной пленки ρ . При этом для уменьшения влияния R_n и ρ на величину сигнала U_k величины R_n и ρ следует выбирать из соотношений

$$\rho \ll \frac{H}{x_m} ,$$

$$R_n \gg \frac{AB}{(A+B)H\sigma_c} . \quad (5)$$

С другой стороны, геометрические размеры электродов ограничиваются габаритными размерами ФП и величинами допустимой рассеиваемой мощности P_g и напряженности электрического поля в светочувствительной пленке E_g

$$(E + U_{\text{км}})^2 (\sigma_c + \sigma_T) / A^2 \leq P_g ,$$

$$|E + U_{\text{км}}| / A \leq E_g . \quad (6)$$

При выполнении (5), (6) из (3), (4) имеем

$$U_{\text{км}} = E K_n K_B , \quad (7)$$

где $K_n = 1 - 2L_2 + \beta(L_2 + 2L_1L_2 - L_1)$ - коэффициент ослабления сигнала, обусловленный конечной шириной светового зонда;

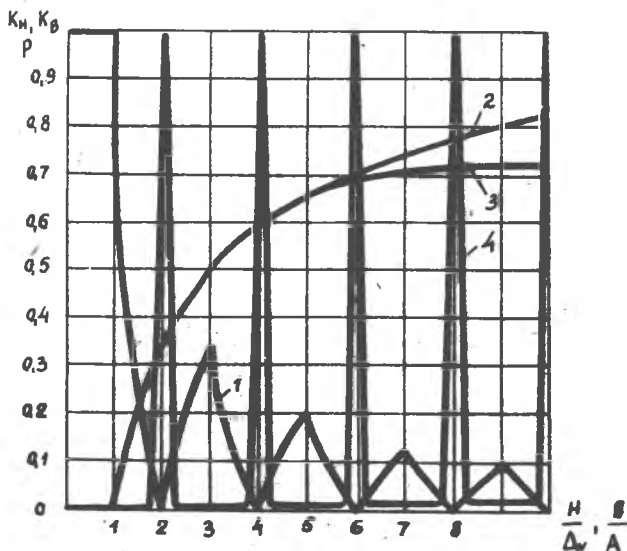
$K_B = \frac{B-A}{B+A}$ - коэффициент ослабления сигнала, обусловленный конечной величиной $\frac{B}{A}$.

На рис. 2 (кривая 1) изображен график функции K_M , из которого видно, что величина сигнала U_{KM} максимальна при $\frac{H}{\Delta z}$, кратном нечетному числу, равна нулю при $\frac{H}{\Delta z}$, кратном четному числу, и снижается в 10 раз при $\frac{H}{\Delta z} = 9$. Кривая 2 (см. рис. 2) изображает график функции K_B . Однако расчет K_B по формуле $K_B = \frac{B-A}{B+A}$ при $B \gg A$ приводит к значительной ошибке определения величины K_B , обусловленной шунтирующим действием зубцов профилированных электродов ФП. Кривая 3 (см. рис. 2) изображает график функции $K_B (\frac{B}{A})$, полученной на основе расчета поля освещенного участка ФП по уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

где x, y - система координат;

U - напряжение в точке x, y относительно ТСЭ.



Р и с. 2. Зависимость глубины модуляции сигнала фотоприемника от ширины светового зонда

Из сравнения графиков видно, что при $\frac{B}{A} < 5$ вполне можно пользоваться приближенной формулой $K_B = \frac{B-A}{B+A}$. На величину напряжения U_{KM} большое влияние оказывает координатная зависимость фотоэлектрической чувствительности светочувствительной пленки [7]. Учет эту зависимость с помощью коэффициента относительного изменения чувствительности ϵ

$$\begin{aligned} \delta_B &= (\delta_B + \Delta \delta_B)(1 + \epsilon_B) + \delta_T, \\ \delta_H &= (\delta_H + \Delta \delta_H)(1 + \epsilon_H) + \delta_T, \end{aligned} \quad (9)$$

где ϵ_B, ϵ_H — коэффициенты изменения чувствительности верхней и нижней светочувствительных дорожек.

Рассмотрим два возможных случая: $\epsilon_B = \epsilon_H = \epsilon$, $\epsilon_B = \epsilon = (-\epsilon_H)$. Подставляя (9) в (4), имеем

$$U_{KM}(\epsilon) = \begin{cases} \frac{E(B-A)(K_H + \epsilon(A+B))}{\frac{AB}{R_H H \sigma_c} + (B+A)(1 + \rho \frac{x_m}{H}) + \epsilon(B-A)K_H}, & \epsilon_H = -\epsilon; \\ \frac{E(B-A)(1 + \epsilon)K_H}{\frac{AB}{R_H H \sigma_c} + (B+A)(1 + \epsilon + \rho \frac{x_m}{H})}, & \epsilon_H = \epsilon. \end{cases} \quad (10)$$

При этом, относительное изменение сигнала U_K при перемещении светового зонда ΔU_K не превысит величины

$$\Delta U_K = \frac{U_{KM}(\epsilon) - U_{KM}}{U_{KM}} = \begin{cases} \epsilon, & \epsilon_H = \epsilon; \\ \epsilon \frac{B+A}{B-A}, & \epsilon_H = -\epsilon. \end{cases} \quad (11)$$

Из (11) видно, что при $\epsilon \geq \frac{B-A}{B+A}$ изменение напряжения U_K (при перемещении светового зонда происходит вследствие изменения чувствительности светочувствительной пленки) практически не зависит от профилирования электродов ФП. Поэтому при выборе величин A и B профилированных электродов к системе неравенств (5), (6) необходимо добавить условие

$$\frac{B-A}{B+A} \gg \epsilon. \quad (12)$$

Полную приведенную погрешность преобразователя P можно определить

$$P = \sqrt{P_{\Delta}^2 + P_M^2 + P_K^2 + P_F^2 + P_{KB}^2}, \quad (13)$$

где $P_{\Delta} = \frac{\delta \Delta_N}{X_M}$ - погрешность изготовления зубцов электродов ФП;

$P_M = \frac{\delta X_0}{X_M}$ - неточность начальной установки светового зонда;

$P_K = \frac{\Delta_N}{X_M} P_n$, P_n - погрешность ПНК;

$P_F = \frac{c}{X_M} \operatorname{tg} \alpha$ - погрешность, обусловленная перекосом светового зонда;

α - угол перекоса;

$C = (N+1)(2d+2B)$; d - ширина ТСЭ;

$$P_{KB} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_N U_p}{X_M U_{KM}}\right)^2 + \left(\frac{U_p \delta \Delta_N}{U_{KM} X_M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_N \delta U_p}{X_M U_{KM}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_N U_p}{X_M U_{KM}} \frac{\delta U_{KM}}{U_{KM}}\right)^2};$$

$$\delta U_{KM} = \sqrt{\delta U_E^2 + \delta U_B^2 + \delta U_{\Delta}^2 + \delta U_A^2 + \delta U_{\epsilon}^2 + \delta U_n^2 + \delta U_{\epsilon_c}^2 + \delta U_{\epsilon_T}^2 + \delta U_F^2 + \delta U_P^2};$$

где $U_p = \sqrt{U_{p_0}^2 + U_w^2}$ - приведенный порог срабатывания компараторов напряжения;

U_{p_0} - порог срабатывания компараторов напряжения;

U_w - суммарное напряжение шумов ФП и компараторов;

$\delta \Delta_N$, δA , δB - неточность изготовления электродов ФП;

δU_p - нестабильность порога срабатывания компараторов напряжения;

δU_{ϵ} , δU_{ϵ_c} , δU_{ϵ_T} , δU_A , δU_B - составляющие суммарной нестабильности δU_{KM} напряжения U_{KM} , обусловленные неоднородностью чувствительности ϵ пленки, нестабильностью напряжения питания ФП, неточностью изготовления электродов ФП и формирования ширины светового зонда, а также нестабильностью темновых и световых проводимостей светочувствительной пленки.

Приведенная погрешность ПНК обуславливается, в основном, погрешностями: квантования P_{KBH} , нестабильности порога срабатывания компараторов ПНК P_{URP} , нестабильности напряжения U_{KM} - P_{UKP} , нелинейности зависимости $U_K(x)$ - P_{HP}

$$P_{ПНК} = \sqrt{P_{KBH}^2 + P_{URP}^2 + P_{UKP}^2 + P_{HP}^2} \quad (I4)$$

Очевидно, что выбирать величину порога срабатывания компараторов напряжения меньше величины нестабильности напряжения не имеет смысла. Положив

$$U_p = \delta U_\varepsilon = \varepsilon U_{км} \cdot \frac{B+A}{B-A} \quad (15)$$

и продифференцировав (4) по соответствующим параметрам, получим

$$\begin{aligned} \delta U_\varepsilon &= U_{км} \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}; \quad \delta U_\Delta = \frac{U_{км}}{K_H} \frac{\partial K_H}{\partial \Delta_N} \delta \Delta_N; \\ \delta U_A &= -U_{км} \left(\frac{1}{B-A} + \frac{1}{Q_H} \left(\frac{B}{H \sigma_c R_H} + \rho \frac{X_M}{H} + 1 \right) \right) \delta A; \\ \delta U_B &= U_{км} \left(\frac{1}{B-A} - \frac{1}{Q_H} \left(\frac{A}{H \sigma_c R_H} + \rho \frac{X_M}{H} + 1 \right) \right) \delta B; \\ \delta U_H &= U_{км} \left(\frac{1}{K_H} \frac{\partial K_H}{\partial H} + \frac{1}{H Q_H} \left(\frac{AB}{H \sigma_c R_H} + (A+B) \rho \frac{X_M}{H} \right) \right) \delta H; \\ \delta U_{\sigma_c} &= U_{км} \frac{Q_H - (A+B)}{Q_H} \frac{\delta \sigma_c}{\sigma_c}; \quad \delta U_{\sigma_T} = -U_{км} \frac{A+B}{Q_H} \rho \frac{X_M}{H} \frac{\delta \sigma_T}{\sigma_T}; \\ \delta U_F &= \frac{U_{км}}{2} \alpha^2 \left(\frac{H}{K_H} \frac{\partial K_H}{\partial H} + \frac{A+B}{Q_H} \rho \frac{X_M}{H} \right); \\ \delta U_R &= \frac{U_{км} AB}{Q_H H \sigma_c R_H} \frac{\delta R_H}{R_H}; \quad Q_H = \frac{AB}{H \sigma_c R_H} + (A+B) \left(1 + \rho \frac{X_M}{H} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Составляющие суммарной погрешности ПНК можно определить

$$P_{квп} = \frac{U_p}{U_{км}}; \quad P_{урп} = \frac{\delta U_p}{U_{км}}; \quad P_{укп} = \frac{U_p \delta U_{км}}{U_{км}^2}; \quad (17)$$

$$P_{нп} = \max \left| \frac{U_{к}(x) \Delta_N}{U_{км} x} - 1 \right|$$

Разрешающая способность преобразователя R определяется, в основном, погрешностью квантования ПНК

$$R = \Delta_N P_{квп} \quad (18)$$

В случае, если преобразователь не имеет ПНК, подключенного к младшему разряду ФП, то суммарную погрешность преобразователя P_0 можно определить из (16), положив $P_{пнк} = 1$. В этом случае разрешающая способность преобразователя определяется величиной $R_0 = \Delta_N$. Анализ выражений (16) показывает, что при B/A , равном четному числу, суммарная погрешность преобразователя $P = P_0$. График функции $P(H/\Delta_N)$ изображен на рис. 2 (кривая 4). Для примера определим суммарную погрешность, разрешающую способность, порог срабатывания компараторов напряжения и максимальное входное напряжение ПНК для преобразователя перемещения светового зонда в

код, ФП которого имеет следующие характеристики: $E = 1$; $X^- = 10$, 24 мкм; $H = 50$ мкм; $\Delta_N = 10$ мкм; $N = 10$. В качестве светочувствительной пленки используется осажденная из водного раствора $CdS_x CdSe_{1-x}$ пленка, имеющая следующие характеристики: $\rho = 0,02$ Вт/мм²; $E = 200$ В/мм; $\epsilon = 0,05$; $\sigma_c = 10^{-5}$ I/Ом [3].

Так как введение различных активирующих примесей в процессе изготовления светочувствительной пленки позволяет в широких пределах изменять ρ [3], то из (5) имеем $\sigma_T = 5 \cdot 10^{-9}$ I/Ом; $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$. Из графика K_N получим $K_N = 0,2$. Решая систему неравенств (5), (6), имеем $A = 25$ мкм; $B = 100$ мкм; $R_N = 500$ Ом. При этом из графика K_B получим $K_B = 0,6$. В этом случае напряжение $U_{км}$, снимаемое с ТСЭ младшего разряда ФП (7), $U_{км} = 0,12$ В; а напряжения, снимаемое с ТСЭ старших разрядов ФП, изменяются в пределах 0,12 - 0,6 В в зависимости от номера разряда ФП. Положив $U_p = 0,01$ В (15) и $\delta\Delta_N = \delta A = \delta B = 0,1$ мкм [5]; $\delta H = 5$ мкм [1]; $\delta R_N/R_N = 0,01$; $\delta\sigma_c/\sigma_c = \delta\sigma_T/\sigma_T = 0,1$ [3] и $\delta U_p/U_p = 0,1$; $\delta E/E = 0,001$, и, пренебрегая шумами ФП и компараторов напряжения (напряжение шумов меньше $U_p = 0,01$ В [3]), получим: $\delta U_{км} = 0,005$; $\rho_{пнк} = 0,08$; $\rho_0 = 0,00097$; $R_0 = 10$ мкм; $\rho = 8 \cdot 10^{-5}$; $R = 0,5$ мкм.

Как видно, применение ПНК даже с большой погрешностью преобразования ($\rho_{пнк} = 8\%$) позволяет повысить точность преобразователя в $\rho_0/\rho = 12$ раз и разрешающую способность в $R_0/R = 20$ раз. Причем, дальнейшее повышение точности преобразователя ограничивается, в основном, точностью изготовления электродов ФП $\delta\Delta_N$, неоднородностью чувствительности ϵ пленки и температурной нестабильностью параметров светочувствительной пленки.

Литература

1. Преснухин Л.И. и др. Фотоэлектрические преобразователи информации. - М.: Машиностроение, 1974. - 375 с.
2. Богданович В.Б. и др. Преобразователь перемещения в код. Авт. свид. СССР № 643947, БИ № 3, 1972.
3. Кирьяшина З.И. и др. Фотопроводящие пленки (типа CdS) - Изд-во Саратовского ун-та, 1979.-192 с.
4. Коныхов Н.Е. и др. Оптоэлектронные преобразователи. - М.: Энергия, 1977. - 160 с.
5. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. - М.: Машиностроение, 1976. - 328 с.

6. Бахтиаров Г.Д., Дикий С.Л. Аналого-цифровые преобразователи. - Зарубежная радиоэлектроника, 1975, № 1, с. -52.

7. Рахлин М.Я., Смова А.К. Исследование стабильности функциональных фоторезисторов с компенсирующей нагрузкой. - Полупроводниковая техника и микроэлектроника. 1979, № 29, с. 58-64.

УДК 681.7.068:681.335.2

П.И.М а р к о в

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Развитие методов и средств технической дефектации и диагностики неразрывно связано с проблемой проникновения человека в недоступные и невидимые зоны технических устройств. В условиях ограниченной информации о них оценка состояния труднодоступных объектов представляет сложную техническую задачу. Исследование свойств объектов по множеству точек, составляющих его пространственную структуру, обеспечивает объективное отражение физических процессов и их пространственно-временную взаимосвязь. В условиях сложных объектов по пространственной информации более эффективно оценивается их изменчивость. При этом большей информативностью отличаются системы визуализации полей различной физической природы.

Волоконная оптика создает предпосылки для качественно неразрушающего контроля изделий, процессов и систем. На основе методов и средств волоконной оптики создается принципиальная возможность повышения достоверности и производительности дефектации за счет более эффективного преобразования, доставки и отражения первичной информации. Малые габариты, высокая разрешающая способность и гибкость обеспечивают проникновение волоконно-оптических средств дефектации в ограниченные зоны и области и транспортировку первичной информации по защищенным оптическим каналам с любой траекторией [1, 2]. Волоконно-оптическая интроскопия использует различные физические явления, позволяющие получить и представить первичную информацию в удобном виде. В интроскопии, как процессе накопления первичной информации, осуществляется визуализация пространственного распределения различных проникающих излучений и физических полей. По реакции объекта на стимулирующие воздействия в виде излучений оцениваются его состояние и свойства. В зависи-