

## Моделирование частотного преобразователя оптического излучения с активным индуктивным элементом

В.С. Осадчук, А.В. Осадчук

Винницкий государственный технический университет

### Введение

Полевые фототранзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) нашли широкое использование в системах приема и обработки оптической информации [1,2]. В настоящее время разработанная теория фотополевого эффекта в МДП транзисторах, которая достаточно точно описывает статические характеристики таких приборов [3,4]. Однако в динамическом режиме, когда на канал действует небольшой переменный сигнал и оптическое излучение, теоретические вопросы изменения параметров транзистора изучены недостаточно полно. С другой стороны, зависимость параметров полевых фототранзисторов от оптического излучения в динамическом режиме позволяет создавать микроэлектронные частотные преобразовательные устройства с оптической перестройкой [5], которые по своим характеристикам значительно лучше аналоговых устройств [6]. Использование полевых транзисторных структур с отрицательным сопротивлением позволяет реализовать автогенератор преобразователя, у которого как емкость, так и индуктивность на основе полевых транзисторов зависит от оптического излучения, что улучшает чувствительность и точность преобразователя. Использование частоты в качестве информативного параметра позволяет отказаться от дальнейшего использования аналого-цифровых преобразователей при обработке информации, что удешевляет системы контроля и управления. В данной работе уточнена сверхвысокочастотная эквивалентная схема полевого фототранзистора, которая включает зависимость параметров от оптического излучения с учетом фотопроводимости канала и фотovoltaических эффектов истокового и стокового р-п переходов. На её основе рассчитаны параметры оптического преобразователя.

### Математическая модель

Для получения основных аналитических соотношений воспользуемся обычной структурой МДП транзистора с индуцированным р-каналом [7]. При этом считается однородным и невырожденным полупроводниковый материал с постоянной подвижностью носителей заряда в канале, отсутствие оптически стимулированной перезарядки поверхностных состояний и фотоэмиссии в диэлектрик, однородность времени жизни неравновесных носителей заряда в объеме и на поверхности полупроводника. Считается, что энергия квантов оптического излучения превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, имеет место биполярная фотогенерация.

Для определения зависимости полного сопротивления канала от оптического излучения необходимо решить уравнение непрерывности с учетом оптической генерации. В условиях слабой инверсии основной компонентой тока является диффузионная [7], поэтому воспользуемся одномерным уравнением непрерывности для р-канала [7]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(D\nabla p) - (\mu_E j / \sigma \nabla p) - \frac{p - p_0}{\tau_p} + G, \quad (1)$$

где

$$D = \frac{D_n D_p}{D_p p + D_n n} = \frac{2}{b+1} D_p \quad (2)$$

- коэффициент биполярной диффузии,

$$\mu_E = \frac{\mu_n \mu_p (n - p)}{\mu_n n + \mu_p p} \quad (3)$$

- коэффициент биполярной подвижности носителей заряда,  $j$  - плотность общего тока,  $\sigma$  - проводимость канала,  $\tau_p$  - время жизни дырок,  $p, n$  - концентрация неравновесных носителей заряда,  $\mu_p, \mu_n$  - подвижность дырок и электронов,  $b = \mu_n / \mu_p$  - отношение подвижности электронов и дырок,  $D_n, D_p$  - коэффициенты диффузии электронов и дырок,  $G$  - скорость фотогенерации носителей заряда.

При стационарном режиме работы МДП-транзистора с учетом (2) и (3) уравнение (1) принимает вид

$$D \frac{d^2(p - p_0)}{dx^2} - \mu_E E \frac{d(p - p_0)}{dx} - \frac{p - p_0}{\tau} = -G(x). \quad (4)$$

Введем обозначения

$$\frac{\mu_E E}{D} = \frac{\mu_E E \tau}{D \tau} = \frac{l_E}{L_*^2}, \quad (5)$$

$$L_*^2 = D \tau, \quad (6)$$

тогда уравнение (4) с учетом (5) и (6) записывается в виде

$$\frac{d^2(p - p_0)}{dx^2} - \frac{l_E}{L_*^2} \frac{d(p - p_0)}{dx} - \frac{p - p_0}{L_*^2} = -\frac{G(x)}{D}. \quad (7)$$

При генерации светом носителей заряда скорость генерации описывается уравнением [8]

$$G(x) = G(0)e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  - коэффициент поглощения света. Если считать, что неравновесная концентрация дырок состоит из двух слагаемых

$$p = p_{01} + p_1 e^{j\omega t}, \quad (9)$$

где  $p_{01}$  - концентрация дырок, которая определяется постоянным напряжением, а  $p_1$  - переменным напряжением, то уравнение (7) принимает вид

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} - \frac{l_E}{L_*^2} \frac{dp_1}{dx} - \frac{p_1(1 + j\omega\tau)}{L_*^2} = -\frac{G(x)}{D}. \quad (10)$$

Граничные условия при решении уравнения (10) описываются выражениями

$$p_1(0, t) = p_0 \exp[\beta(\psi_S + \varepsilon_b)] + p_0 \exp[\beta(\psi_S + \varepsilon_b)] \beta U_{1b}(t), \quad (11)$$

$$p_1(L, t) = p_0 \exp[\beta(\psi_S + \varepsilon_c)] + p_0 \exp[\beta(\psi_S + \varepsilon_c)] \beta U_{1c}(t), \quad (12)$$

где  $\beta = kT/q$ ,  $\varepsilon_b, \varepsilon_c$  - величина фото ЕДС на р-п переходах истока и стока,  $U_D$  - постоянное напряжение на стоке,  $U_{1b}(t), U_{1c}(t)$  - переменное напряжения на электродах истока и стока,  $L$  - длина канала,  $\psi_S$  - поверхностный потенциал, который связан с напряжением на затворе  $U_G$  и эффективным уровнем фотогенерации  $\xi = \Delta n/n_i = \Delta p/n_i$  следующим соотношением [7]

$$U_G - U_{FB} = \psi_S + \frac{\varepsilon_S \varepsilon_0 \varphi_S}{\beta C_0 L_{Di}^* |\varphi_S|} F(\varphi_S, \varphi_F^*), \quad (13)$$

где

$$\varphi_S = \beta \psi_S, \quad L_{Di}^* = \frac{\varepsilon_S \varepsilon_0 kT}{2q^2 n_i^*},$$

$$\varphi_F^* = \left[ \ln(\xi + e^{\varphi_F}) - \ln(\xi + e^{-\varphi_F}) \right] / 2,$$

$$n_i^* = n_i \exp\left( \left[ \ln(\xi + e^{\varphi_F}) - \ln(\xi + e^{-\varphi_F}) \right] / 2 \right),$$

$U_{FB}$  - потенциал плоскостных зон,  $\varphi_F$  - потенциал Ферми,  $C_0$  - удельная емкость диэлектрика,  $n_i$  - концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике,  $\varepsilon_S, \varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная полупроводника и вакуума соответственно. В режиме слабой инверсии справедливо приближение [7]

$$F(\varphi_S, \varphi_F^*) \approx \sqrt{(\varphi_S - 1)e^{\varphi_F^*}}. \quad (14)$$

При подстановке (14) в (13), получаем

$$\varphi_S = U_G - U_{FB} - \sqrt{\frac{\varepsilon_S \varepsilon_0}{\beta^2 C_0 L_{Di}^*}} (\beta U_G - 1) e^{\varphi_F^*/2}. \quad (15)$$

Решение уравнения (10) состоит из общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения. Общее решение однородного уравнения имеет вид

$$P_1(x, t) = A_1 e^{K_1 x} + A_2 e^{K_2 x}, \quad (16)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  корни квадратного уравнения

$$K^2 - \frac{l_E}{L_*^2} K - \frac{1}{L_*^2} = 0. \quad (17)$$

Таким образом, имеем

$$K_{1,2} = \frac{l_E}{2L_*^2} \pm \sqrt{\left( \frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}}. \quad (18)$$

Если обозначить

$$\frac{1}{l_1} = \sqrt{\left( \frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}} + \frac{l_E}{2L_*^2}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{l_2} = -\left( \sqrt{\left( \frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}} - \frac{l_E}{2L_*^2} \right), \quad (20)$$

тогда решение однородного уравнения принимает вид

$$P_1(x, t) = A_1 e^{x/l_1} + A_2 e^{-x/l_2}. \quad (21)$$

Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  определяются из граничных условий (11) и (12), следовательно

$$A_1 = \frac{P_1(L, t) - P_1(0, t) e^{-\frac{LC_0^*}{l_2}}}{e^{\frac{LC_0^*}{l_1}} - e^{-\frac{LC_0^*}{l_2}}}, \quad (22)$$

$$A_2 = \frac{P_1(0, t) e^{\frac{LC_0^*}{l_1}} - P_1(L, t)}{e^{\frac{LC_0^*}{l_1}} - e^{-\frac{LC_0^*}{l_2}}}, \quad (23)$$

где  $C_0^* = \sqrt{1 + j\omega\tau}$ ,  $\omega$  - круговая частота.

Частное решение неоднородного уравнения (10) ищется в виде  $\bar{P}(x) = R_K e^{\alpha x}$ , где  $R_K$  многочлен степени  $K$ , если правая часть уравнения имеет вид  $f(x) = Q_K e^{\alpha x}$  [9]. Таким образом, частное решение уравнения (10) имеет вид

$$\bar{P}(x) = \frac{G(0)e^{-\alpha x}}{D \left[ \alpha^2 - \alpha \frac{l_E}{L_*^2} - \frac{1}{L_*^2} \right]}. \quad (24)$$

Общее решение уравнения (10) записывается в виде

$$P_1(x,t) = A_1 e^{\frac{x C_{\delta}^*}{l_1}} + A_2 e^{-\frac{x C_{\delta}^*}{l_2}} - \frac{G(0)e^{-\alpha x}}{D \left[ \alpha^2 - \alpha \frac{l_E}{L_*^2} - \frac{1}{L_*^2} \right]} \quad (25)$$

Полное сопротивление канала полевого транзистора определяется

$$Z_K = \frac{U_1}{S j_1}, \quad (26)$$

где  $U_1$  - переменное напряжение на канале,  $S$  - площадь поперечного сечения канала. Использование выражения (25) позволяет определить

$$Z_K = - \frac{1}{q \mu_p S (b+1)} \cdot \frac{\int_0^L \frac{A_1 \frac{C_{\delta}^*}{l_1} - A_2 \frac{C_{\delta}^*}{l_2}}{A_3} dx}{A_1 \frac{C_{\delta}^*}{l_1} - A_2 \frac{C_{\delta}^*}{l_2}} - \frac{kT}{q^2 (b+1) S D_p} \cdot \frac{\int_0^L \frac{A_1 \frac{C_{\delta}^*}{l_1} e^{\frac{x C_{\delta}^*}{l_1}} - A_2 \frac{C_{\delta}^*}{l_2} e^{-\frac{x C_{\delta}^*}{l_2}}}{A_3} dx}{A_1 \frac{C_{\delta}^*}{l_1} - A_2 \frac{C_{\delta}^*}{l_2}} \quad (27)$$

где

$$A_3 = A_1 \frac{C_{\delta}^*}{l_1} e^{\frac{x C_{\delta}^*}{l_1}} + A_2 \frac{C_{\delta}^*}{l_2} e^{-\frac{x C_{\delta}^*}{l_2}} - \frac{G(0)e^{-\alpha x}}{D \left[ \alpha^2 - \alpha l_E / L_*^2 - 1 / L_*^2 \right]}$$

Решение интегралов уравнения (27) сделано численным методом на персональном компьютере "Pentium". При разделении на действительную и мнимую части выражения (27) получим активную и реактивную компоненты полного сопротивления канала. При расчетах полного сопротивления были использованы значения параметров транзистора КП301Б. В полной модели фотореактивного МДП-транзистора необходимо учесть влияние малосигнальных параметров активной зоны кристалла, фотодиодных структур истока и стока, а также паразитных параметров корпуса.

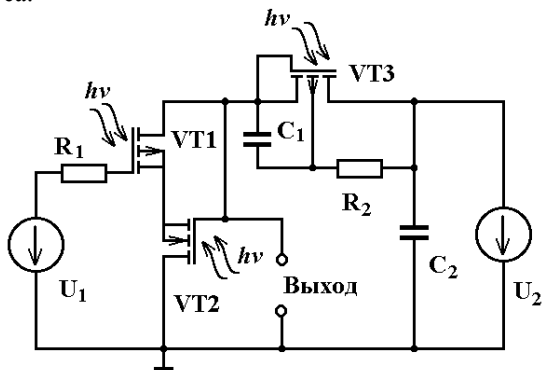


Рис. 1. Схема фоточувствительного преобразователя

На рис.1 представлена схема фоточувствительного преобразователя, в котором емкость колебательного контура автогенератора реализуется емкостной составляющей полного сопротивления на электродах стока-сток полных фоточувствительных транзисторов VT1 и VT2, а индуктивность реализуется индуктивной составляющей полного сопротивления на электродах исток-сток фоточувствительного транзистора VT3. Расчеты функции преобразователя, которая представляет собой зависимость частоты генерации от мощности оптического излучения, можно получить на основе решения системы уравнений согласно преобразованной эквивалентной схеме (рис.2).

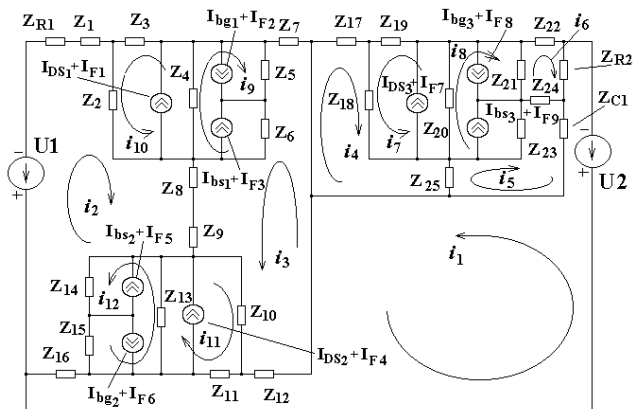


Рис.2. Эквивалентная схема

Система уравнений Кирхгофа имеет вид

$$\begin{aligned} U_2 &= (Z_{R2} + Z_{C1} + Z_{12} + Z_{11} + Z_{16})i_1 + Z_{R2}i_6 + Z_{C1}i_5 - Z_{12}i_3 + \\ &+ Z_{11}i_{11} + Z_1(I_{DS2} + I_{F4}) + Z_{16}i_2, \\ U_1 &= (Z_{R1} + Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15} + Z_{16})i_2 + Z_2(i_{10} + \\ &+ I_{DS1} + I_{F1}) + Z_8i_3 + Z_9i_3 + Z_{14}i_{12} + Z_{14}(I_{bs2} + I_{F5} + I_{DS2} + \\ &+ I_{F4}) - Z_{14}(I_{bg2} + I_{F6}) + Z_{15}(i_{12} + I_{bs2} + I_{F5} - I_{bg2} - I_{F6} + \\ &+ I_{DS2} + I_{F4}) + Z_{16}i_1, \\ 0 &= (Z_7 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12})i_3 + Z_5i_9 - Z_5(I_{bg1} + \\ &+ I_{F2}) + Z_5(I_{bs1} + I_{F3} + I_{DS1} + I_{F1}) + Z_6(I_{bs1} + I_{F3} - I_{bg1} - \\ &- I_{F2} + I_{DS1} + I_{F1}) + Z_8i_2 + Z_9i_2 + Z_{10}(i_{11} + I_{DS2} + I_{F4} + I_{bs2} + \\ &+ I_{F5} - I_{bg2} - I_{F6}) - Z_{12}i_1, \\ 0 &= (Z_{17} + Z_{18} + Z_{25})i_4 + Z_{18}i_7 + Z_{18}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{18}(I_{bs3} + \\ &+ I_{F9}) - Z_{18}(I_{bg3} + I_{F8}) - Z_{25}i_5, \\ 0 &= (Z_{24} + Z_{C1} + Z_{25} + Z_{23})i_5 - Z_{24}i_6 + Z_{C1}i_1 - Z_{25}i_4 + Z_{23} * \\ &* (-I_{DS3} - I_{F7} - I_{bs3} - I_{F9} + I_{bg3} + I_{F8} - i_8), \\ 0 &= (Z_{22} + Z_{R2} + Z_{24} + Z_{21})i_6 + Z_{R2}i_1 - Z_{24}i_5 - Z_{21}i_8 + Z_{21} * \\ &* (I_{bg3} + I_{F8} - I_{bs3} - I_{F9} - I_{DS3} - I_{F7}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= (Z_{18} + Z_{20} + Z_{19})i_7 + Z_{18}i_4 + Z_{18}(I_{DS3} + I_{F7} - I_{bg3} - I_{F8} + \\
 &+ I_{bs3} + I_{F9}) + Z_{20}i_8 - Z_{20}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{20}(I_{bg3} + I_{F7}) - \\
 &- Z_{20}(I_{bs3} + I_{F9}) + Z_{19}(I_{DS3} + I_{F7}) - Z_{19}(I_{bg3} + I_{F8}) + \\
 &+ Z_{19}(I_{bs3} + I_{F9}), \\
 0 &= (Z_{21} + Z_{23} + Z_{20})i_8 - Z_{21}i_6 - Z_{21}(I_{bg3} + I_{F8}) + Z_{21}(I_{bs3} + \\
 &+ I_{F9}) + Z_{21}(I_{DS3} + I_{F7}) - Z_{23}i_5 + Z_{23}(I_{bs3} + I_{F9}) - Z_{23}(I_{bg3} + \\
 &+ I_{F8}) + Z_{23}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{20}i_7 - Z_{20}(I_{DS3} + I_{F7}) - \\
 &- Z_{20}(I_{bs3} + I_{F9}) + Z_{20}(I_{bg3} + I_{F8}), \\
 0 &= (Z_4 + Z_5 + Z_6)i_9 - Z_4(I_{DS1} + I_{F1}) - Z_4(I_{bs1} + I_{F3}) + \\
 &+ Z_4(I_{bg1} + I_{F1}) + Z_4i_{10} + Z_5i_3 - Z_5(I_{bg1} + I_{F2}) + \\
 &+ Z_5(I_{bs1} + I_{F3}) + Z_5(I_{DS1} + I_{F1}) + Z_6i_3 + Z_6(I_{DS1} + I_{F1}) + \\
 &+ Z_6(I_{bs1} + I_{F3}) - Z_6(I_{bg1} - I_{F2}), \\
 0 &= (Z_2 + Z_4 + Z_3)i_{10} + Z_2i_2 + Z_2(I_{bs1} + I_{F3}) - \\
 &- Z_2(I_{bg1} + I_{F2}) + Z_2(I_{DS1} + I_{F1}) + Z_4i_9 - Z_4(I_{DS1} + I_{F1}) - \\
 &- Z_4(I_{bs1} + I_{F3}) + Z_4(I_{bg1} + I_{F2}) + Z_3(I_{DS1} + I_{F1}) + \\
 &+ Z_3(I_{bs1} + I_{F3}) - Z_3(I_{bg1} + I_{F2}), \\
 0 &= (Z_{10} + Z_{11} + Z_{13})i_{11} + Z_{10}(i_3 + I_{DS2} + I_{F4} + I_{bs2} + I_{F5} - \\
 &- I_{bg2} - I_{F6}) + Z_{11}i_1 + Z_{13}i_{12} + Z_{11}(I_{DS2} + I_{F4} + I_{bs2} + I_{F5} - \\
 &- I_{bg2} - I_{F6}) + Z_{13}(-I_{bs2} - I_{F5} + I_{bg2} + I_{F6} - I_{DS2} - I_{F4}), \\
 0 &= (Z_{13} + Z_{14} + Z_{15})i_{12} + Z_{13}(i_{11} - I_{DS2} - I_{F4} - I_{bs2} - I_{F5} + \\
 &+ I_{bg2} + I_{F6}) + Z_{14}(i_2 + I_{bs2} + I_{F5} - I_{bg2} - I_{F6} + I_{DS2} + I_{F4}) + \\
 &+ Z_{15}(i_2 + I_{bs2} + I_{F5} - I_{bg2} - I_{F6} + I_{DS2} + I_{F4}).
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

где

$$\begin{aligned}
 Z_{R1} &= R1, \quad Z_1 = R_{G1}, \quad Z_3 = -j/(\omega C_{GD1}), \quad Z_4 = Z_K, \\
 Z_5 &= -j/(\omega C_{BD1}), \quad Z_7 = R_{D1}, \quad Z_8 = R_{S1} + j\omega L_{S1}, \\
 Z_2 &= \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2}, \\
 Z_6 &= \frac{R_{B1}}{1 + \omega^2 R_{B1}^2 C_{BS1}^2} - j \frac{R_{B1}^2 \omega C_{BS1}}{1 + \omega^2 R_{B1}^2 C_{BS1}^2}, \\
 Z_{12} &= R_{G2}, \quad Z_{11} = -j/(\omega C_{GD2}), \quad Z_{13} = Z_K, \\
 Z_{15} &= -j/(\omega C_{BD2}), \quad Z_{16} = R_{D2}, \quad Z_9 = R_{S2} + j\omega L_{S2}, \\
 Z_{10} &= \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2}, \\
 Z_{14} &= \frac{R_{B2}}{1 + \omega^2 R_{B2}^2 C_{BS2}^2} - j \frac{R_{B2}^2 \omega C_{BS2}}{1 + \omega^2 R_{B2}^2 C_{BS2}^2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{17} &= R_{G3}, \quad Z_{19} = -j/(\omega C_{GD3}), \quad Z_{20} = Z_K, \\
 Z_{21} &= -j/(\omega C_{BD3}), \quad Z_{22} = R_{D3}, \\
 Z_{25} &= R_{S3} + j\omega L_{S3}, \\
 Z_{18} &= \frac{R_{GS3}}{1 + \omega^2 R_{GS3}^2 C_{GS3}^2} - j \frac{R_{GS3}^2 \omega C_{GS3}}{1 + \omega^2 R_{GS3}^2 C_{GS3}^2}, \\
 Z_{23} &= \frac{R_{B3}}{1 + \omega^2 R_{B3}^2 C_{BS3}^2} - j \frac{R_{B3}^2 \omega C_{BS3}}{1 + \omega^2 R_{B3}^2 C_{BS3}^2}, \\
 Z_{R2} &= R2, \quad Z_{C1} = -j/(\omega C_{C1}).
 \end{aligned}$$

Решение системы уравнений (28) получено численным методом на персональном компьютере в вычислительной среде "Matlab 5.2". В общем виде функция преобразования описывается уравнением

$$\omega_0 = [L_{eq}(P)C_{eq}(P)]^{1/2}, \tag{29}$$

где  $\omega_0$  - круговая частота генерации,  $L_{eq}(P)$  - эквивалентная индуктивность колебательного контура,  $C_{eq}(P)$  - эквивалентная емкость колебательного контура автогенератора, которая определяется на основе решения системы уравнений (28). Чувствительность частотного преобразователя оптического излучения определяется на основе (29)

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_0}{dP} &= -\frac{1}{2} [L_{eq}(P)C_{eq}(P)]^{-3/2} * \\
 &* \left[ C_{eq}(P) \frac{dL_{eq}(P)}{dP} + L_{eq}(P) \frac{dC_{eq}(P)}{dP} \right].
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Чувствительность преобразователя составляет кГц/МВт/см<sup>2</sup>.

### Экспериментальные исследования

Для проверки теоретических расчетов полного сопротивления МДН – транзистора от мощности оптического излучения проведен их сравнения с экспериментальными данными, которые проводилось в диапазоне 1-1250 МГц с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-37. При проведении экспериментальных исследований использовались транзисторы типа КП301Б и КП305А. Источником оптического излучения служил светодиод АЛ107А с максимумом спектрального распределения на длине волны  $\lambda = 0,95$  мкм. Мощность излучения контролировалась с помощью прибора ИМО-2Н.

На рис.3 представлены расчетные и экспериментальные зависимости полного сопротивления для транзистора КП301Б. При увеличении частоты переменного сигнала происходит переход точки инверсии характера реактивности в область более низких уровней мощности оптического излучения, что также имеет место в биполярных транзисторах [10,11]. Уменьшение активной составляющей полного сопротивления повышает добротность фотореактивного элемента, кото-

рая в области индуктивного характера превышает единицу.

На рис.4 представлены расчетные и экспериментальные зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения. Частота измерялась при помощи частотомера типа ЧЗ-35. Уменьшение частоты генерации связано с возрастанием эквивалентной емкости и индуктивности колебательного контура автогенератора, что обусловлено фотогенерацией неравновесных носителей заряда в областях канала, истокового и стокового р-п переходов МДП-транзисторов.

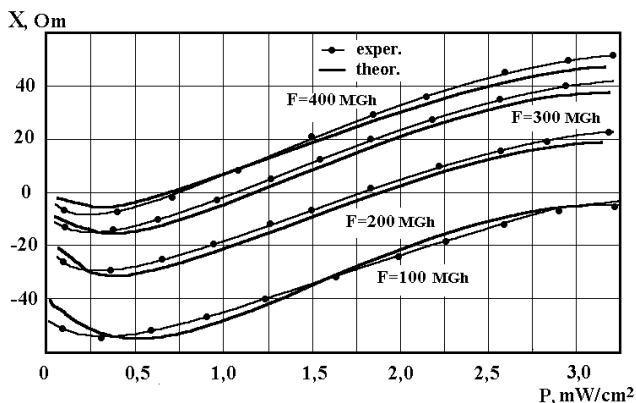
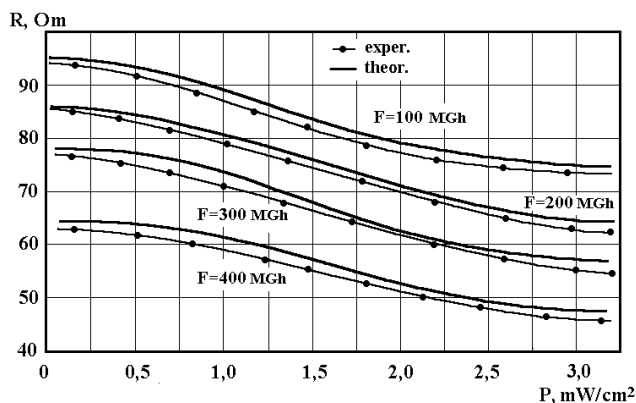


Рис.3. Расчетные и экспериментальные зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления МДН - транзистора от мощности оптического излучения и частоты сигнала

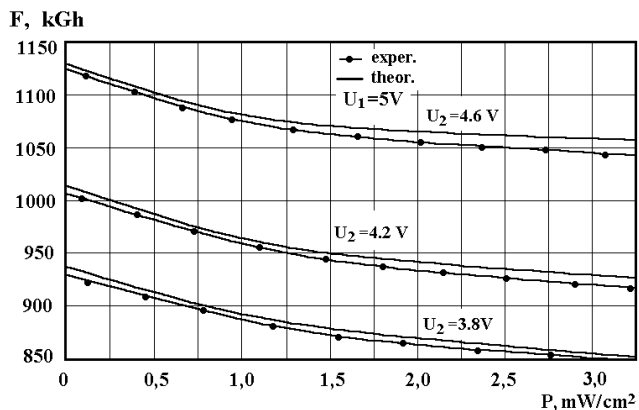


Рис.4. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения

## Выводы

Разработана математическая модель частотного преобразователя оптического излучения, которая учитывает влияние оптического излучения на канал, истоковые и стоковые р-п переходы МДП-транзисторов. Фоточувствительные полевые транзисторы реализуют емкость и индуктивность колебательного контура преобразователя, которые изменяются под действием оптического излучения, что позволило повысить чувствительность оптического преобразователя.

## Литература

1. Бисулин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 255 с.
2. Суэмацу Я., Катаока С., Кисино К. и др. Основы оптоэлектроники. – Москва: Мир, 1988. – 288 с.
3. Зуев В.А., Попов В.Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. – М.: Радио и связь, 1983. – 160 с.
4. Овсяк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. – Новосибирск: Наука, 1984. – 254 с.
5. Одобецкий С.И., Осадчук В.С. Фотореактивный эффект в транзисторах со структурой метал-диэлектрик-полупроводник // Радиотехника и электроника, т.34, №11, 1989. – С.2387-2393.
6. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. – Ленинград: Энергия, 1970. – 423 с.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.2. – Москва: Мир, 1984. – 455 с.
8. Киреев П.С. Физика полупроводников. – Москва: Высшая школа, 1975. – 580 с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – Москва: Наука, 1981. – 718 с.
10. Осадчук В.С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах. – Киев: Высшая школа, 1987. – 155 с.
11. Jain F.C. Observation of an active photoinductive component in high intensity solar cells // J. Appl. Phys., v.5, N5, 1980. – P.2685-2692.