

УДК 681.586.776:621.382

**В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; Е. Н. Ильченко****ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ  
ПОЛЕВЫХ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ С ДВУСТОРОННИМ  
ОСВЕЩЕНИЕМ КАНАЛА**

*Показана возможность преобразования оптической мощности на основе автогенераторного устройства, которое состоит из транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, и в котором фоточувствительным элементом является МДП-транзистор с двусторонним освещением канала. Получены аналитические зависимости вольт-амперной характеристики и функции преобразования, которые могут быть использованы для инженерного расчета параметров преобразователей оптической мощности.*

**Ключевые слова:** МДН-фототранзистор, оптическое излучение, полное сопротивление, транзисторные структуры с отрицательным сопротивлением, математическая модель.

**Введение**

Современное состояние развития отечественной информационно-измерительной техники определяется тенденцией к динамическому внедрению высокоэффективных миниатюрных первичных преобразователей физических величин в системы контроля и диагностики технических и нетехнических процессов в военной, аэрокосмической, автомобилестроительной и других отраслях современной экономики Украины.

Существующая ситуация обуславливает необходимость в проведении научных исследований в отрасли отечественного производства микроэлектронных преобразователей физических величин относительно улучшения их основных параметров: эффективных массогабаритных показателей, высоких надежности, чувствительности, стабильности характеристик, точности, воспроизводимости, низкой стоимости, широкой номенклатуры и интеграции с микропроцессорными устройствами обработки измеряемой информации [1 – 3].

Конструктивное объединение интегральных первичных измерительных преобразователей с цифровыми микропроцессорными устройствами позволяет осуществить их интеллектуализацию. Кроме снятия измеряемой информации происходит ее практически одновременная проработка, фильтрация, сжатие и коррекция. При этом преимущество использования частотного информативного сигнала первичного преобразователя над его аналоговой формой в виде напряжения или тока обусловлено простотой и точностью превращения частоты в цифровой код, его высокой помехоустойчивостью при передаче и эффективностью коммутации в многоканальных измерительных системах [3]. Перспективным направлением является использование реактивных свойств транзисторных структур с отрицательным сопротивлением для создания устройств генерации и функциональных микроэлектронных преобразователей с частотной кодировкой информации [4].

Для изучения свойств таких преобразователей используем математическую модель фотопреобразователя на основе использования микроэлектронных частотных преобразователей оптической мощности. Поэтому задача заключалась в разработке математической модели, на базе которой можно получить вольт-амперную характеристику, зависимость полного сопротивления структуры, вывести функцию преобразования.

**Математическая модель**

Проанализировав существующие преобразователи оптической мощности на основе

использования реактивных свойств полупроводниковых структур [5], предложено собственный метод в решении проблем в данной области сенсорной техники, а именно, использовать радиоизмерительные схемы на основе МДП-структуры с двусторонним освещением канала.

МДП-фототранзистор разработан для решения прикладных задач интегральной фотоэлектроники и фотосенсорики.

Известные МДП-фототранзисторы (МДПФТ) с полупрозрачным электродом, через который освещается подзатворная область. Известно также, что электрод затвора тонкопленочного МДПФТ можно выполнять непрозрачным, а освещение делать через подкладку. К недостаткам таких приборов относятся невысокая фоточувствительность и усложненная технология [6]. В известном фототранзисторе на основе МДП-структуры, который содержит полупроводниковую подкладку, одна из поверхностей которой является чувствительной к излучению, с областями стока, истока и канала, на которой сформировано слой диэлектрика и электрод затвора, поверхность подкладки, свободная от диэлектрика, является чувствительной к излучению и имеет над областью канала пазы [7].

С целью расширения функциональных возможностей, а именно, увеличение чувствительности фототранзистора к излучению, в предлагаемой конструкции МДПФТ, что содержит подкладку с  $p$ -Si, с прозрачным затворным электродом из Au, через который освещается подзатворная область, из обратной стороны подкладки под областью канала выполнены глубокие пазы, площадь сечения каждого из которых отвечает следующему соотношению:  $A < S/n$ , где  $S$  – площадь канала,  $n$  – число пазов. При этом глубина пазов должна быть такой, чтобы выполнялось условие  $ad \rightarrow 1$ , где  $a$  – коэффициент поглощения,  $d$  – толщина пластины между дном паза и диэлектрика затвора (рис. 1). Таким образом, освещение осуществляется и через подкладку, и через затвор.

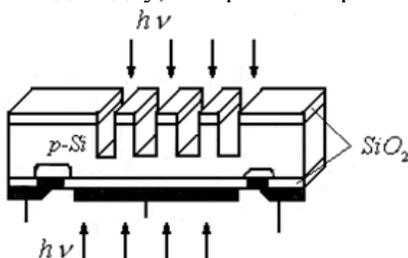


Рис. 1. Конструкция МДН-фототранзистора с двусторонним освещением канала

Схема частотного преобразователя на основе биполярного и МДП-транзистора показана на рис. 2. Фоточувствительным элементом выступает МДП-транзистор с двусторонним освещением канала.

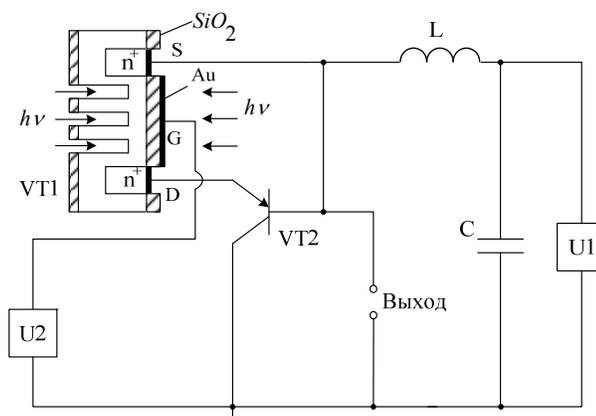


Рис. 2. Электрическая схема преобразователя на основе МДН и биполярного транзисторов

Для расчета вольт-амперной характеристики (ВАХ) преобразователя на основе его

эквивалентной схемы для постоянного тока (рис. 3) воспользуемся системой уравнений Кирхгофа (1). Для определения ВАХ наилучше выбрать метод контурных токов, что и было сделано. Преимуществом данного метода является то, что он наглядно дает возможность определить ВАХ, исходя из разработанной теории матричных расчетов.

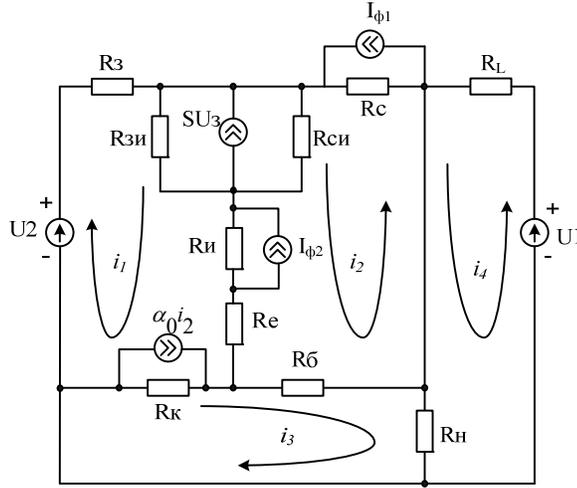


Рис. 3. Эквивалентная схема преобразователя для постоянного тока

$$\begin{cases} U_1 = (R_n + R_L)i_4 + R_n i_3, \\ 0 = (R_k + R_\sigma + R_n)i_3 - R_k \alpha_0 i_2 + R_\sigma i_2 + R_n i_4, \\ 0 = (R_\sigma + R_c + R_{cu} + R_u + R_e)i_2 + R_\sigma i_3 + \\ + R_u I_{\phi 2} + (R_u + R_e)i_1 - R_c I_{\phi 1} + R_{cu} S U_3, \\ U_2 = (R_3 + R_{zu} + R_u + R_e + R_k)i_1 + R_{zu} \cdot S U_3 + \\ + (R_u + R_e)i_2 + R_u I_{\phi 2} - R_k i_3 + R_k \alpha_0 i_2. \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (1) с помощью программного пакета MatLab 5.2, определим ВАХ частотного преобразователя (рис. 4). Как видно, чем больше мощность светового излучения, тем выше лежит максимум ВАХ.

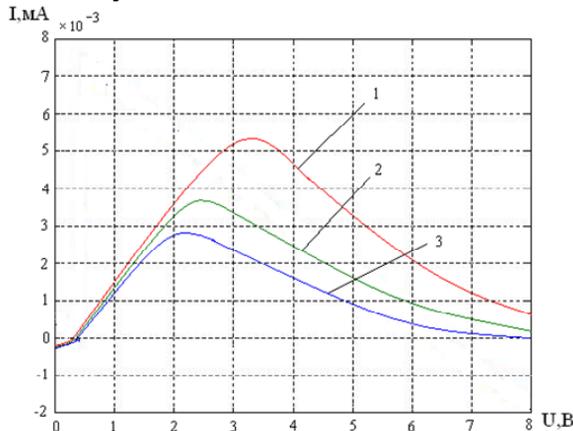


Рис. 4. Семейство ВАХ микроэлектронного частотного преобразователя оптической мощности:

$$1 - 120 \text{ мкВт} / \text{см}^2; 2 - 60 \text{ мкВт} / \text{см}^2; 3 - 0 \text{ мкВт} / \text{см}^2$$

Для определения функции преобразования необходимо найти зависимость частоты

генерации от мощности падающего излучения. Это можно сделать решив систему уравнений Кирхгофа, которая составлена для переменного тока на основе эквивалентной схемы (рис. 5).

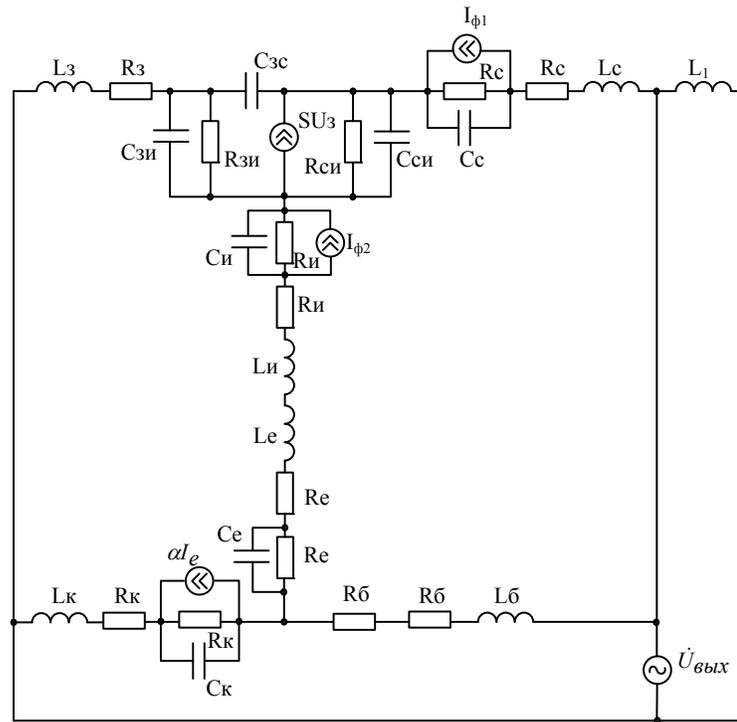


Рис. 5. Эквивалентная схема преобразователя на основе биполярного и МДП-транзисторов

Для удобства расчетов подана эквивалентная схема на рис. 6.

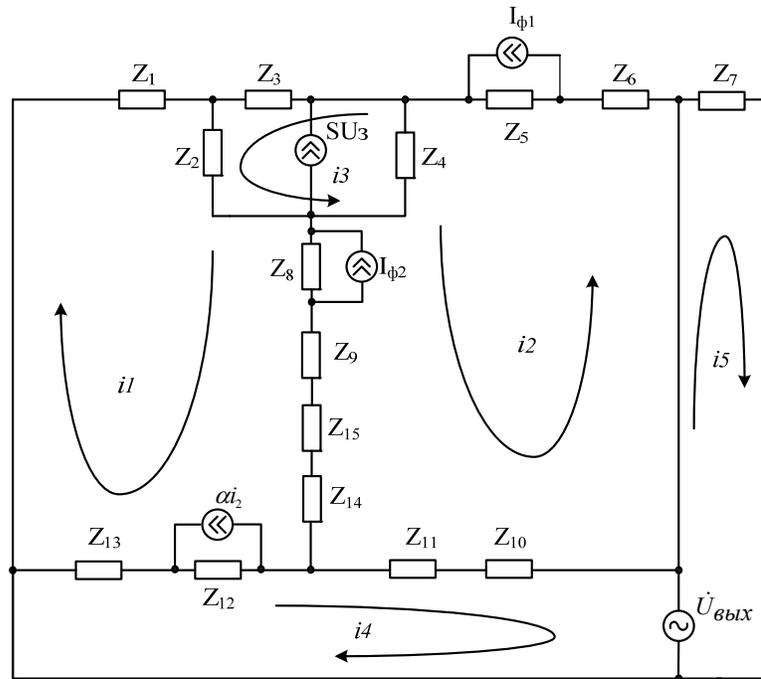


Рис. 6. Преобразованная эквивалентная схема преобразователя  
Система уравнений Кирхгофа для переменного тока имеет вид:

$$\begin{cases}
 \bullet \\
 U_{вух} = Z_7 i_5, \\
 \bullet \\
 U_{вух} = (Z_{13} + Z_{12} + Z_{11} + Z_{10}) i_4 + Z_{12} \alpha i_2 - (Z_{13} + Z_{12}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_2, \\
 0 = (Z_4 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{11} + Z_{10} + Z_6 + Z_5) i_2 + Z_8 I_{\phi 2} + \\
 + (Z_8 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_4 + Z_4 S U_3 - Z_4 i_3 - Z_5 I_{\phi 1}, \\
 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{12} + Z_{13}) i_1 + Z_2 i_3 + Z_2 S U_3 + Z_8 I_{\phi 2} + \\
 (Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14}) i_2 - Z_{12} \alpha i_2 - (Z_{12} + Z_{13}) i_4, \\
 0 = (Z_3 + Z_2 + Z_4) i_3 + Z_2 i_1 + (Z_3 + Z_2 - Z_4) S U_3 - Z_4 i_2,
 \end{cases} \quad (2)$$

где

$$Z_1 = R'_3 + j\omega L_3, \quad Z_2 = \frac{R_{3u}}{1 + \omega^2 R_{3u}^2 C_{3u}^2} - j \frac{\omega R_{3u}^2 C_{3u}}{1 + \omega^2 R_{3u}^2 C_{3u}^2}, \quad Z_3 = -j / (\omega C_{3c}), \quad Z_7 = j\omega L_1,$$

$$Z_6 = R'_c + j\omega L_c, \quad Z_4 = \frac{R_{cu}}{1 + \omega^2 R_{cu}^2 C_{cu}^2} - j \frac{\omega R_{cu}^2 C_{cu}}{1 + \omega^2 R_{cu}^2 C_{cu}^2}, \quad Z_9 = R'_u + j\omega L_u, \quad Z_{11} = R_{\sigma},$$

$$Z_{10} = R'_{\sigma} + j\omega L_{\sigma}, \quad Z_5 = \frac{R_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - j \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2}, \quad Z_{13} = R'_k + j\omega L_k, \quad \alpha = \alpha_1 - j\alpha_2,$$

$$Z_{15} = R'_e + j\omega L_e, \quad Z_8 = \frac{R_u}{1 + \omega^2 R_u^2 C_u^2} - j \frac{\omega R_u^2 C_u}{1 + \omega^2 R_u^2 C_u^2}, \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_{\alpha})^2}, \quad \alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_{\alpha}}{1 + (f/f_{\alpha})^2},$$

$$Z_{12} = \frac{R_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2} - j \frac{\omega R_k^2 C_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2}, \quad Z_{14} = \frac{R_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2},$$

где  $R'_{\sigma}, R'_k, R'_e$  – сопротивление выводов базы, коллектора и эмиттера соответственно;  $R_{\sigma}, R_k, R_e$  – объемное сопротивление базы, коллектора, эмиттера соответственно;  $C_k, C_e$  – емкость коллекторного и эмиттерного переходов;  $L_{\sigma}, L_k, L_e$  – индуктивность базового, коллекторного и эмиттерного электродов;  $R'_3, R'_c, R'_u$  – сопротивление выводов затвора, стока и истока соответственно;  $L_3, L_c, L_u$  – индуктивность выводов затвора, стока и истока соответственно;  $L_1$  – внешняя индуктивность;  $R_c, R_u$  – объемное сопротивление стока, истока;  $I_{\phi}$  – значение фототока  $p$ - $n$  переходов стока и истока;  $C_c, C_u$  – емкость  $p$ - $n$  перехода стока, истока;  $R_{3u}, R_{cu}$  – сопротивление затвор-исток, сток-исток;  $C_{3u}, C_{3c}, C_{cu}$  – емкость затвор-исток, затвор-сток, сток-исток;  $f$  – рабочая частота;  $f_{\alpha}$  – критическая частота биполярного транзистора в схеме с общей базой. Числовые значения данных параметров взяты с [8].

Решив систему уравнений (2) с помощью программного пакета MatLab 5.2, можно получить величину полного сопротивления на электродах коллектор-сток преобразователя. Активная составляющая полного сопротивления принимает отрицательное значение, а

реактивная - емкостный характер. Подключение внешней индуктивности к клеммам коллектор-затвор структуры при отрицательных значениях активной составляющей, когда компенсируются потери энергии в колебательном контуре позволяет создать генератор электрических колебаний. При действии света на канал МДП-транзистора осуществляется изменение активной и реактивной составляющей сопротивления, а это в свою очередь, изменяет частоту генерации.

При разделе полного сопротивления на действительную и мнимую составляющие, нетрудно определить эквивалентную емкость колебательного контура, которая зависит от мощности оптического излучения. Эквивалентная емкость преобразователя определяет зависимость частоты генерации от мощности действующего света. Функция преобразования в этом случае имеет вид

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_{\text{экв}}(P)C_{\text{экв}}(P)} \sqrt{\frac{R_{\text{экв}}^2(P)C_{\text{экв}}(P)}{L} - 1}.$$

На рис. 7 представлена зависимость частоты генерации от мощности оптического излучения.

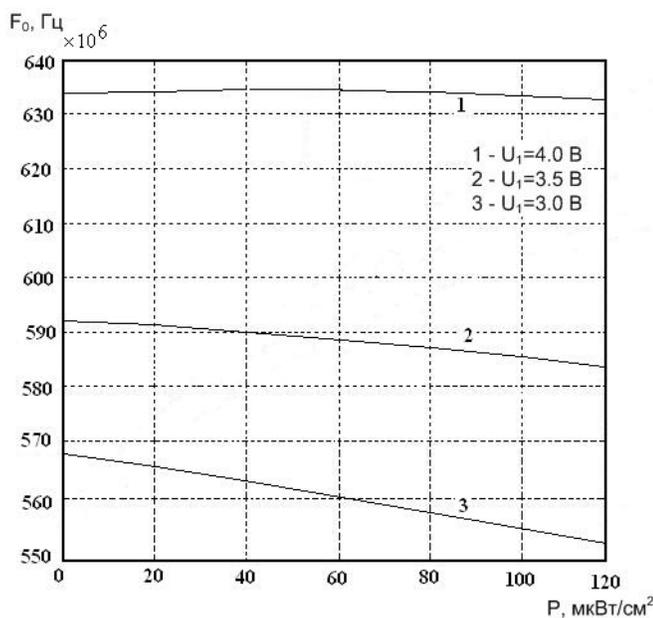


Рис. 7. Зависимость резонансной частоты от мощности оптического излучения

Изменяя режим питания фоточувствительного преобразователя, можно получить линейную зависимость частоты генерации от мощности падающего света.

Фотопреобразователи с частотным выходом на основе транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением используются для реализации новых технических решений при решении задач повышения эффективности эмиссионно-спектрального контроля [9]

Возможные и другие схемы измерения, построенные за структурой МДП и использованием автогенератора. Авторами статьи получен ряд патентов на изобретения и полезные модели.

### Вывод

Разработанная математическая модель микроэлектронного преобразователя оптической мощности, который состоит из биполярного транзистора и МДП-структуры с двусторонним освещением канала. На основе математической модели получено вольт-амперную характеристику и функцию преобразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Білінський Й. Й. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптико-електронних методів і засобів на їх основі / Й. Й. Білінський // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 9 – 15.
2. Terry Guy. Interline CCDs Serve Machine Vision Applications / Terry Guy // Photonics spectra. – 2004. – Т. 38. – № 4. – Р. 72 – 73.
3. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – №11. – С. 24 – 27.
4. Осадчук О. В. Дослідження НВЧ генератора електричних коливань на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 149 – 154.
5. Осадчук В. С. Аналіз сучасного стану реалізації фоточутливих перетворювачів / Осадчук О. В., Ільченко О. М., Барабан С. В. / Матеріали 4-ї міжнародної науково-практичної конференції «Научно просторство на Европа – 2008» / Том 27 / Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника. – Софія (Болгарія): «Бял ГРАД-БГ» ООД. – С. 3 – 10.
6. Костенко В. Л. Комбинированные твердотельные структуры и микрорелектронные сенсоры / Костенко В. Л. – Запорожье: ЗГИА, 1997. – 109 с.
7. А.с. N 862753, СССР. МКИ Н 01 L 31/10. Фототранзистор / Костенко В. Л., Клименко В. А. – Зарег. 05.07.81.
8. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 / Разевиг В. Д. – М.: Солон-Р, 2000. – 698 с.
9. Пат. 4229, Україна, МПК Н 01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О. – 2005, Бюл. № 1. – 4 с.

**Осадчук Владимир Степанович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедры электроники, тел.: (0432)-598013.

**Ильченко Елена Николаевна** – аспирант кафедры электроники, тел.: (0432)-688911.  
Винницкий национальный технический университет.