

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ МОНО- КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТО- ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА

Н.И. Слипченко

Доктор физико-математических наук, профессор,
проректор по научной работе**
Контактный тел. (057) 702-10-20

В.А. Письменецкий

Кандидат технических наук, профессор*
Контактный тел. (057) 702-13-43

А.В. Фролов

Кандидат технических наук*
*Кафедра микроэлектронных приборов и устройств**
Контактный тел. (057) 702-16-59

В.Л. Лукьяненко**

*Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

Методом статистичного регресійного аналізу та градієнтної оптимізації оптимальних фотоелектричних та базових (діодних) параметрів досліджуються кремнієві монокристалічні фотоперетворювачі зі структурою n+-p-p+

Ключові слова: кремнієвий фотоперетворювач, рівняння регресії, ККД, градієнтний спуск, оптимізація параметрів

Методом статистического регрессионного анализа и градиентной оптимизации оптимальных фотоэлектрических и базовых (диодных) параметров исследуются кремниевые монокристаллические фотопреобразователи со структурой n+-p-p+

Ключевые слова: кремниевый фотопреобразователь, уравнение регрессии, КПД, градиентный спуск, оптимизация параметров

Statistical regression analysis method and the gradient optimization best photoelectric and base (diode) parameters are investigated monocrystalline silicon photoconverters with the structure n+-p-p+

Key words: silicon photoconverters, the regression equation, efficiency, gradient descent, optimization of parameters

Введение

Задача оптимизации сводится к нахождению таких параметров x_i фотопреобразователя (ФП), при которых выходной параметр y достигает экстремума. Функцию, связывающую критерий оптимизации с входными параметрами, варьируемыми при исследовании, принято называть функцией отклика, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве — поверхностью отклика.

При поиске экстремальной точки осуществляется локальное исследование поверхности отклика по результатам экспериментов. Движение к экстремуму в многомерном пространстве независимых переменных осуществляется обычно не непрерывно, а шагами. Экстремальное значение отклика дости-

гается многократным последовательным исследованием его поверхности и продвижением в факторном пространстве.

Существует несколько экстремальных методов оптимизации, различающихся способом определения направления движения и организацией самого движения. Для их реализации необходимо иметь аналитическую зависимость, связывающую выходной параметр y с базовыми параметрами ФП.

В этом случае целесообразно [1] использовать регрессионные зависимости вида $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m$. Для регрессионной зависимости необходимо обеспечить такие $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ при которых отклонения y и y_x были бы минимальными. В теоретико-вероятностном аспекте y_x представляет условное математическое ожидание при данных x_1, x_2, \dots, x_m .

Цель исследования – поиск оптимальных фотоэлектрических и базовых (диодных) параметров кремниевых монокристаллических фотопреобразователей со структурой p+-p-r+ по критерию максимального КПД.

Объект исследования – кремниевые монокристаллические фотопреобразователи со структурой p+-p-r+.

Методы исследования – методы статистического регрессионного анализа и градиентной оптимизации параметров.

Применяемые регрессионные модели

С помощью разработанных статистических регрессионных моделей [2] исследуем зависимости КПД кремниевых монокристаллических ФП от базовых параметров, а именно, фактора неидеальности A , последовательного сопротивления R_p , плотности тока насыщения J_0 , а также фотоэлектрических (напряжения холостого хода U_{xx} , тока короткого замыкания $I_{кз}$) и технологических (толщина базового кристалла h , толщина легирующего слоя ЖРК $h_{жрк}$) параметров.

Для проведения исследований использовались экспериментальные образцы кремниевых монокристаллических ФП, изготовленные по базовой технологии на основе пластин марки КДБ10 со структурой p+-p-r+ [8] толщиной 300 мкм с последующим их утонением до 200 мкм и одновременным текстурированием фронтальной поверхности, а также с изменением толщины легирующего слоя жидкорастворной композиции (ЖРК) типа КФК от 0,1 до 0,3 мкм.

Определение КПД η осуществлялось по результатам измерений темновых и световых нагрузочных ВАХ образцов и последующего нахождения основных параметров: тока короткого замыкания $I_{кз}$, напряжения холостого хода U_{xx} , шунтирующего сопротивления R_p , оптимального тока $I_{опт}$ и оптимального напряжения $U_{опт}$, соответствующих максимальной выходной мощности [3,4].

Для построения регрессионной модели первоначально определялось семейство диодных параметров ФП: последовательное сопротивление R_p , фактор неидеальности A и ток насыщения I_0 .

Далее исследовались зависимости $\text{КПД}=f(I_{кз}, U_{xx})$ на основе уравнений регрессии 1-го, 2-го и 3-го порядка для фотоэлектрических параметров.

$$\text{Уравнение регрессии 1 порядка:} \\ \eta = -17,25 + 0,286I_{кз} + 0,03U_{xx} \quad (1)$$

$$\text{Уравнение регрессии 2 порядка:} \\ \eta = 235,28 - 0,613I_{кз} - 0,75U_{xx} + 0,044I_{кз}^2 + \\ + 7,795 \cdot 10^{-4} U_{xx}^2 - 4,166 \cdot 10^{-3} I_{кз} U_{xx} \quad (2)$$

$$\text{Уравнение регрессии 3 порядка:} \\ \eta = 39930 - 71,572I_{кз} - 191,004U_{xx} - 1,925I_{кз}^3 + \\ + 0,297U_{xx}^2 + 0,469I_{кз} U_{xx} + 0,01I_{кз}^3 - \\ - 1,519 \cdot 10^{-4} U_{xx}^3 + 1,284 \cdot 10^{-3} I_{кз}^2 U_{xx} - \\ - 4,647 \cdot 10^{-4} I_{кз} U_{xx}^2 \quad (3)$$

Далее после выполнения преобразований экспериментальных данных получены регрессионные уравнения для базовых параметров ФП (A , R_p , I_0)

$$\text{Уравнение регрессии 1 порядка} \\ \eta = 10,74 + 0,1035 A + 1,229R_p - 3,482 \cdot 10^{-4} I_0 \quad (4)$$

$$\text{Уравнение регрессии 2 порядка} \\ \eta = -14,43 + 88,87A - 39,48R_p - \\ - 0,036I_0 - 54,26A^2 + 5,2R_p^2 - 9,73 \cdot 10^{-6} I_0^2 + \\ + 25,95AR_p + 0,053AI_0 - 0,019R_p I_0 \quad (5)$$

С помощью уравнений регрессии (1-5) построены зависимости $\text{КПД}=f(I_{кз}, U_{xx})$ на рис. 1, 2 и 3, а также $\text{КПД}=f(A, J_0)$ при средних значениях параметра R_p , на рис. 8 и 9.

Построенные зависимости $\text{КПД}=f(I_{кз}, U_{xx})$ и $\text{КПД}=f(A, J_0)$ представляют собой плоскости, если уравнение 1-го порядка и поверхности для уравнений 2-го и 3-го порядков. Причем, на поверхностях $\text{КПД}=f(I_{кз}, U_{xx})$, представленных на рисунках 1-3 и $\text{КПД}=f(A, J_0)$ на рис. 8-9, четко просматриваются точки максимума КПД.

Применение метода градиентного спуска для поиска оптимальных параметров фотопреобразователей

Как известно, при использовании выборок малого объема (12 – 26 образцов кремниевых монокристаллических ФП) для построения методики оптимизации КПД в зависимости от параметров ФП, целесообразно использовать базовый метод градиентного спуска. Для поиска оптимальных значений U_{xx} и $I_{кз}$ применяем регрессионные уравнения 1-го, 2-го и 3-го порядка для этих параметров.

В качестве исходных данных используем массивы значений U_{xx} и $I_{кз}$ и уравнения регрессии (3 – 5). Кроме этого задаем области допустимых значений этих параметров.

Обобщенная методика двухпараметровой (параметры x и y) оптимизации методом градиентного спуска включает следующие этапы:

1. Ввод начальных значений: параметры (x_0, y_0) , их области определения $(x_{\min}, U_{\min}, x_{\max}, U_{\max})$, шаг изменения параметров (h_x, h_y) , точность расчетов ϵ .

2. Вычисление производных: $f'_{x_i}(x_i, y_i)$ $f'_{y_i}(x_i, y_i)$.

3. Вычисление модуля градиента:

$$r = \sqrt{[f'_{x_i}(x_i, y_i)]^2 + [f'_{y_i}(x_i, y_i)]^2}$$

4. Определение направляющих синуса и косинуса градиента:

$$\cos \alpha = \frac{f'_{x_i}(x_i, y_i)}{r} \quad \sin \alpha = \frac{f'_{y_i}(x_i, y_i)}{r}$$

5. Определение координат следующей точки поиска: $x_{i+1} = x_i + h_x \cos \alpha$, $y_{i+1} = y_i + h_y \sin \alpha$.

6. Проверка условия достижения оптимальной точки по параметру ϵ .

7. Проверка параметров-координат по области допустимых значений.

8. Вывод оптимальных параметров-координат.

Процедуру поиска начинаем со средних значений параметров в двух вариантах. В первом варианте предварительно методом попарного сравнения значений КПД определяем его максимальное значение и соответствующие оптимальные параметры координаты для трехмерных зависимостей. Эта процедура необхо-

дима для первоначального ориентировочного нахождения максимума, и она выполняется для уравнений регрессии 1-го порядка, когда трехмерная зависимость представляет собой плоскость, в пределах которой градиент выходного параметра (КПД) сохраняется постоянным и применение метода градиентного спуска не имеет смысла. Результаты описанного поиска иллюстрируются на рис. 1, где представлена зависимость КПД от параметров $I_{кз}$ и U_{xx} в виде плоскости. Точки на плоскости отображают траекторию поиска максимума КПД и черным квадратом показан результат поиска, определяющий оптимальные U_{xx} и $I_{кз}$. Далее выполняем поиск, начиная с точки $(U_{xx}^{опт}, I_{кз}^{опт})$ для получения более точных оптимальных значений U_{xx} и $I_{кз}$.

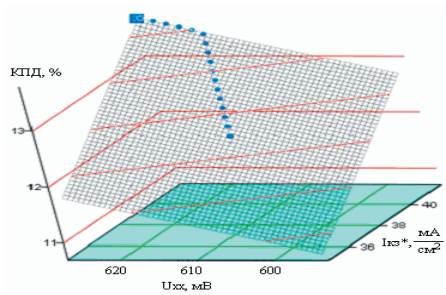


Рис. 1. Зависимость КПД = $f(I_{кз}, U_{xx})$. Уравнение регрессии 1-го порядка

Во втором варианте для поиска максимума использовались уравнения (4-5) регрессии 2-го и 3-го порядков $КПД=f(I_{кз}, U_{xx})$ и метод градиентного спуска.

Поиск начинался от средних значений указанных параметров. Соответствующие траектории поиска оптимальной точки (черный квадрат) представлены на рис. 2 и рис. 3.

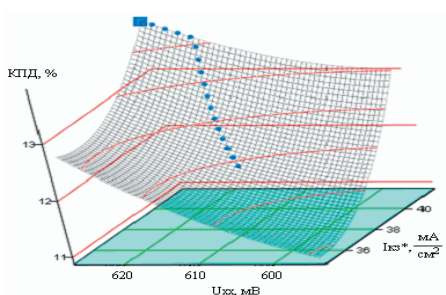


Рис. 2. Зависимость КПД = $f(I_{кз}, U_{xx})$. Уравнение регрессии 2-го порядка

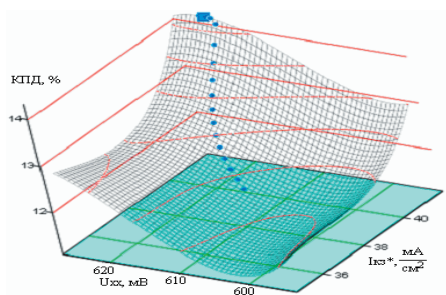


Рис. 3. Зависимость КПД = $f(I_{кз}, U_{xx})$. Уравнение регрессии 3-го порядка

Аналогично методом попарного сравнения была получена траектория поиска оптимальной точки по линейному уравнению регрессии вида $КПД=f(J_0, A)$ при постоянном значении параметра R_p (рис. 4).

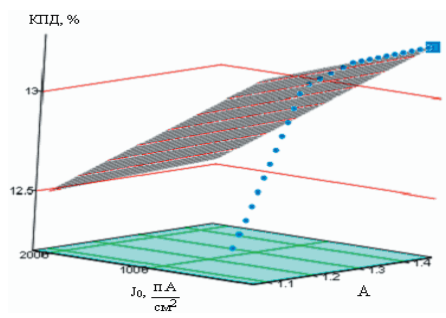


Рис. 4. Зависимость КПД = $f(A, J_0)$ по линейному уравнению регрессии

Начальная точка, как и прежде, соответствовала средним значениям параметров J_0 и A . Как видим, в этом случае трасса поиска оптимальной точки совпадает с плоскостью $КПД=f(J_0, A)$ лишь на последнем этапе.

По уравнению регрессии 2-го порядка $КПД=f(J_0, A)$ методом градиентного спуска была определена траектория поиска оптимальной точки, представленная на рис. 5.

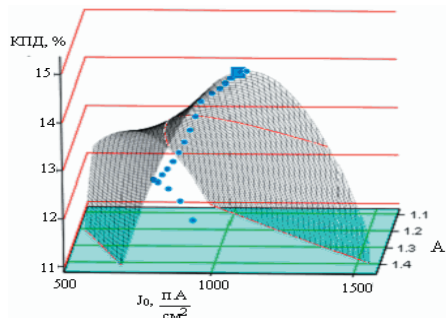


Рис. 5. Зависимость КПД = $f(A, J_0)$ по уравнению регрессии 2-го порядка

В этом случае также начальные участки трассы не совпадают с поверхностью $КПД=f(J_0, A)$.

Обсуждение полученных результатов

Характерной особенностью поиска оптимальной точки с помощью всех уравнений регрессии является то, что соответствующая траектория располагается либо на плоскости, либо на поверхности.

Проекции траекторий поиска оптимальной точки на координатную плоскость $U_{xx} - I_{кз}$ для уравнений регрессии 1-го, 2-го и 3-го порядков показаны на рис. 6.

Из приведенных графиков видно, что для трех режимов поиска оптимальное значение $I_{кз}$ одинаково и составляет $41,7 \text{ mA/cm}^2$. В тоже время оптимальные значения параметра U_{xx} одинаковы только для уравнений регрессии 1-го и 2-го порядков (626 мВ). Для регрессии 3-го порядка оптимальное значение U_{xx} оказалось меньшим и равным 622 мВ.

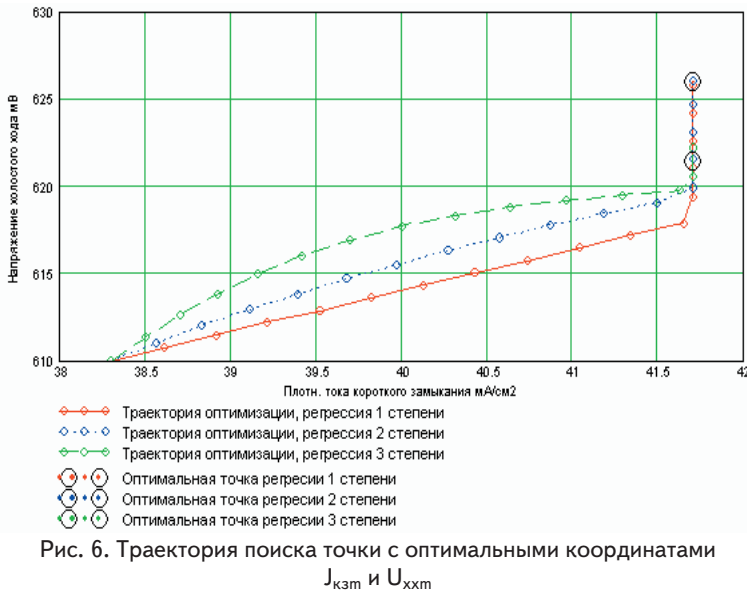


Рис. 6. Траектория поиска точки с оптимальными координатами $J_{кз}$ и $U_{хх}$

Динамика поиска максимума или зависимость значения параметров от числа шагов (итераций) представлена соответственно: для КПД - на рис. 5, $J_{кз}$ - на рис. 6, для $U_{хх}$ - на рис. 7 для уравнений регрессии 1-го, 2-го и 3-го порядков. Характерно, что для нахождения максимального КПД необходимое число шагов оказывается максимальным для регрессии 1-й степени и минимальным для регрессии 3-й степени. Из графиков также следует, что поиск максимального КПД по уравнению регрессии 3-й степени обеспечивает наилучший результат.

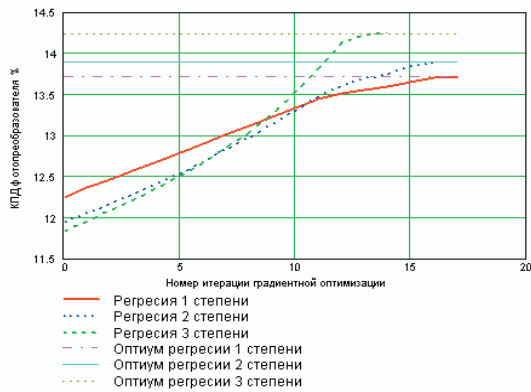


Рис. 7. Динамика поиска максимума КПД

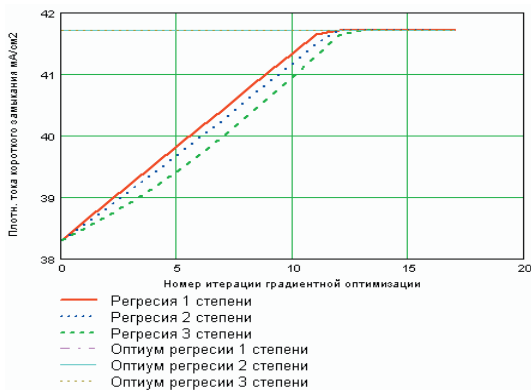


Рис. 8. Динамика поиска оптимального значения $J_{кз}$

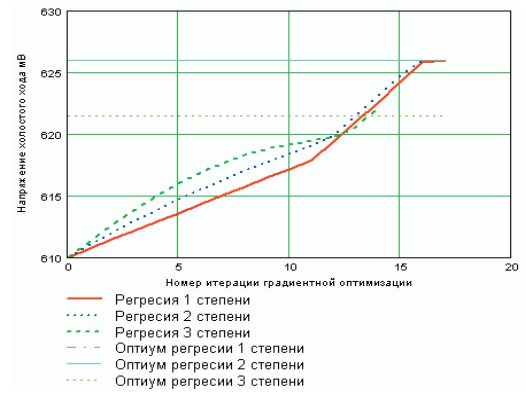


Рис. 9. Динамика поиска оптимального значения $U_{хх}$

Из графиков на рис. 8 видно, что все три уравнения регрессии обеспечивают одно оптимальное значение плотности тока короткого замыкания, а число шагов до оптимальной точки $J_{кз}$ практически не отличается.

На рис. 9 отражена динамика нахождения оптимального значения параметра $U_{хх}$. Из графиков следует, что для уравнений регрессии 1-го и 2-го порядков одинаково как число шагов (итераций), так и оптимальное значение $U_{хх}$. Для уравнения регрессии 3-го порядка оптимальное значение $U_{хх}$ меньше и его нахождение выполняется за меньшее число шагов.

Результаты поиска $U_{хх}^{опт}$ и $I_{кз}^{опт}$ для трех уравнений регрессии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения $U_{хх}^{опт}$ и $I_{кз}^{опт}$ для трех уравнений регрессии

Тип уравнения регрессии	КПД, %	$I_{кз}^{опт}$, mA	$U_{хх}^{опт}$, mV
1-го порядка	13,7	41,7	626
2-го порядка	13,9	41,7	626
3-го порядка	14,25	41,7	622

Проекция траекторий поиска оптимальных точек на плоскость $J_0 - A$ для уравнений регрессии 1-го и 2-го порядка показана на рис. 10.

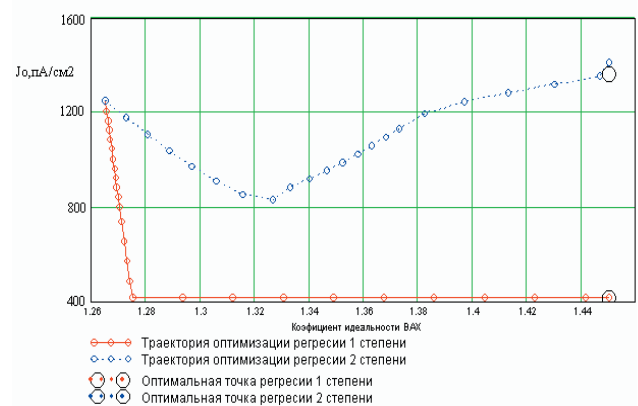


Рис. 10. Траектории поиска оптимальной точки (A_m, J_{0m})

Из приведенных графиков следует, что оптимальные значения параметра A совпадают для обеих траекторий поиска. При этом для регрессии 1-го по-

рядка оптимальное значение тока насыщения стремится к нулю, а для регрессии 2-го порядка – составляет 1220 пА/см².

Динамика определения максимального КПД при изменении параметров А и J₀ и, соответственно, количества шагов иллюстрируется на рис. 11.

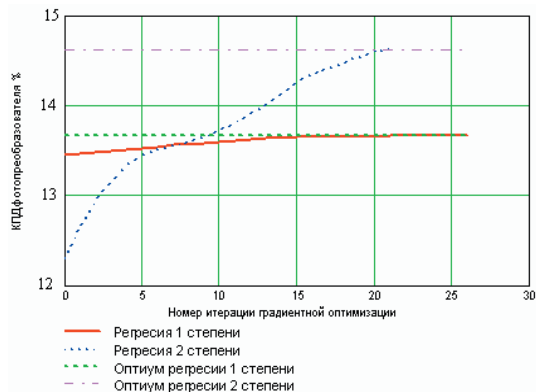


Рис. 11. Динамика поиска максимума КПД

Нетрудно видеть, что необходимое количество шагов для уравнений регрессии 1-го и 2-го порядка практически одинаково, однако для регрессии 2-го порядка достигается большее значение КПД.

Результаты поиска А^{опт} и J₀^{опт} для уравнений регрессии 1-го и второго порядка представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты поиска А^{опт} и J₀^{опт} для уравнений регрессии 1-го и 2-го порядков

Тип уравнения регрессии	КПД, %	J ₀ ^{опт} , пА/см ²	А ^{опт}
1-го порядка	13,7	400	1,45
2-го порядка	14,6	1380	1,45

Выводы

1. Предложенные регрессионные модели позволяют в производственных условиях оперативно решать задачи оптимизации как выходных характеристик фотоприборов, так и базовых параметров в условиях малой партии экспериментальных образцов.

2. При двухпараметровой (J_{кзм} и U_{ххм}) оптимизации траектория поиска оптимальной точки располагается

на поверхности КПД = f(I_{кз}, U_{хх}), а при трехпараметровой (А, J₀, R_n) оптимизации в пределах трехкоординатной системы КПД=f(А, J₀) и заданном R_n эта траектория проходит в пределах объема, ограниченного плоскостью А-J₀ и поверхностью КПД=f(А, J₀).

3. С учетом результатов оптимизации при увеличении порядка регрессионного уравнения возрастает достижимое значение КПД ФП.

4. Сравнительный анализ результатов оптимизации по максимуму КПД со значениями этого параметра для экспериментальных образцов, приведенных в табл. 3 позволяет сделать вывод, что поиск оптимальных параметров обеспечивает повышение КПД кремниевых монокристаллических ФП на 1,7 – 2,1 %.

Таблица 3

Источник информации	Исследуемые образцы	Оптимизация параметров		
		Регрессия 1-го порядка	Регрессия 2-го порядка	Регрессия 3-го порядка
ККД, %	12,2	13,7	13,9	14,3

Литература

1. Я.Е. Львович, В.Н. Фролов. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА-М.: «Радио и связь» 1986г.-194с.
2. Слипченко Н.И. Регрессионные технологические модели кремниевых монокристаллических фото преобразователей / Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, А.В. Фролов, Н.Н. Яновская // Известия вузов. Радиоэлектроника, НТУУ «КПИ». – 2008. – Т. 51, № 11. – С. 41–49.
3. Н.И. Слипченко. Определение диодных параметров кремниевых фотопреобразователей по световой нагрузочной ВАХ / Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, Н.Н. Яновская, А.В. Фролов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №6(24). – С. 41–48.
4. Слипченко Н.И. Оперативный контроль параметров фото преобразователей / Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, Н.Н. Яновская, А.А. Кирилук, А.В. Фролов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №4/3(28). – С. 39–42.