

У роботі відображені результати досліджень, виконаних у Харківському національному університеті радіоелектроніки, пов'язаних з розробкою і застосуванням статистичних регресійних моделей стосовно до кремнієвих монокристалічних ФП зі структурою $n+p-p+$, а також до аморфних ФП

Ключові слова: аморфні, монокристалічний кремній, сонячний елемент, фотопретворення

В работе отражены результаты исследований, выполненных в Харьковском национальном университете радиоэлектроники, связанных с разработкой и применением статистических регрессионных моделей применительно к кремниевым монокристаллическим ФП со структурой $n+p-p+$, а также к аморфным ФП

Ключевые слова: аморфный, монокристаллический, кремниевый, солнечный элемент, фотопреобразование

In work results of the researches executed, at the Kharkov national university of radio electronics, connected with working out and application statistical regreshional models with reference to silicon single-crystal PVC with structure $n+p-p+$, and also to amorphous PVC

Keywords: amorphous, monocrystalline, silicon, solar element, phototransformation

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ПЛЕНОЧНЫХ АМОΡФНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Н.И. Слипченко

Доктор физико-математических наук, профессор,
проректор по научной работе*
Контактный тел. (0572) 702-10-20

В.А. Письменецкий

Кандидат технических наук, профессор*
Контактный тел. (0572) 702-13-43

А.В. Фролов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*
Контактный тел. (0572) 702-16-59

Н.В. Герасименко

Аспирант*
Контактный тел. (0572) 702-13-43

*Кафедра микрорелектронных приборов и устройств
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

На современном этапе производства монокристаллических кремниевых фотопреобразователей (ФП) их конструктивно-технологические решения постоянно усложняются и влияние структурно-технологических изменений на КПД сложно оценить с помощью существующих физических концепций и моделей. В этих условиях исследователи все чаще применяют статистические технологические модели, требующие экспериментальных данных, а при использовании выборок малого объема – регрессионные модели [1].

Цель работы

Сравнительная оценка базовых макропараметров и реально достижимых КПД кремниевых монокристаллических со структурой $n+p-p+$ и однопереходных аморфных пленочных фотопреобразователей (ФП), применительно к существующим технологиям их изготовления на основе статистических регрессионных моделей.

Задачи исследования

1. Анализ зависимости КПД от выходных фотоэлектрических параметров для кремниевых монокристаллических ФП со структурой $n+p-p+$ с приме-

нением статистических регрессионных моделей на основе экспериментальных данных.

2. Определение базовых макропараметров однопереходных аморфных ФП по экспериментальным световым нагрузочным ВАХ с последующим синтезом регрессионной зависимости КПД от фотоэлектрических параметров.

3. Сравнительный анализ базовых макропараметров кремниевых монокристаллических и аморфных ФП, реально достижимых КПД и перспектив их эффективного использования.

2. Основная часть

Для построения регрессионной зависимости при отсутствии априорной информации, как правило, применяют линейное уравнение регрессии вида:

$$\bar{C}_n = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m \quad (1)$$

При этом необходимо обеспечить такие $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ при которых отклонения y и y_x были бы минимальными. Условие минимума среднеквадратичного отклонения y_x от фактических значений признака y для всей совокупности (партии) из n единиц (образцов) сводится к равенству

$$S_n = \sum_n (a_0 + a_1x_{1n} + a_2x_{2n} + \dots + a_mx_{mn} - y_n)^2 = S_{nmin} \quad (2)$$

Для нахождения коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ решается система уравнений, одно из которых можно представить в общем виде

$$\frac{\partial S_n}{\partial a_i} = \sum_n 2S_n^1 \frac{\partial S_n^1}{\partial a_i} = 0, \quad (3)$$

где $S_n^1 = \sum_n (a_0 + a_1x_{1n} + a_2x_{2n} + \dots + a_mx_{mn} - y_n)$.

Поскольку отдельные параметры имеют, как правило, различную размерность (например, мВ, мА, мВт, Ом и т.д.), необходима их нормировка.

Для проведения исследований использовались экспериментальные образцы кремниевых монокристаллических ФП, изготовленные по базовой технологии на основе пластин марки КДБ10 со структурой n⁺-р-р⁺ толщиной 300 мкм в ГП НИТИП, г. Харьков. Базовый технологический маршрут изготовления кремниевых монокристаллических ФП приведен на рис. 1. Достоинством этого маршрута является высокая воспроизводимость и управляемость выходными параметрами благодаря:

- применению синхронной диффузии одновременно по фронтальной поверхности на основе жидкофазного дифузанта и по тыльной поверхности из твердого источника ВН;
- использованию эффекта тянущего поля за счет многостадийной диффузии по фронтальной поверхности.



Рис. 1. Базовый технологический маршрут изготовления кремниевых монокристаллических ФП

Определение КПД осуществлялось по результатам измерений [2] темновых и световых нагрузочных ВАХ образцов и последующего нахождения основных параметров: тока короткого замыкания $I_{кз}$, напряжения холостого хода $U_{хх}$, последовательного сопротивления R_n , шунтирующего сопротивления $R_{ш}$, оптимального тока $I_{опт}$ и оптимального напряжения $U_{опт}$, соответствующих максимальной выходной мощности.

Для построения регрессионной модели формировалась матрица массива исходных данных (МИД), каждый столбец которой содержит значения КПД, тока $I_{кз}$, напряжения $U_{хх}$, последовательного сопротивления R_n , шунтирующего сопротивления $R_{ш}$.

$$МИД = \begin{bmatrix} 14 & 153 & 621 & 0,11 & 270 \\ 11,9 & 146,75 & 614 & 0,13 & 195 \\ 12,2 & 148 & 617 & 0,12 & 231 \\ 11,2 & 139,5 & 602 & 0,14 & 255 \\ 12 & 145 & 616 & 0,12 & 255 \\ 12 & 150,3 & 614 & 0,15 & 202 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Используя 1-й, 3-й и 4-й столбцы МИД и соотношения (1 – 3) после выполнения преобразований получим уравнение регрессии 1-го порядка

$$КПД = -26,05 + 0,017I_{кз} + 0,058U_{хх} \quad (5)$$

С помощью соотношения (5) построены зависимости КПД от напряжения холостого хода, представленные на рис. 2. Как видно из графика, хорошая отработка технологии Si-ФП обеспечивает высокую воспроизводимость параметров и управляемость технологическим процессом.

Из графика на рис. 2 можно сделать вывод, что уравнение регрессии 1-го порядка достаточно точно отражает экспериментальные данные, представленные массивом точек, и соответствует доверительному

интервалу в пределах 3%, что еще раз подтверждает высокое качество обработки технологического процесса. Кроме этого следует заметить, что напряжение U_{xx} слабо влияет на КПД.

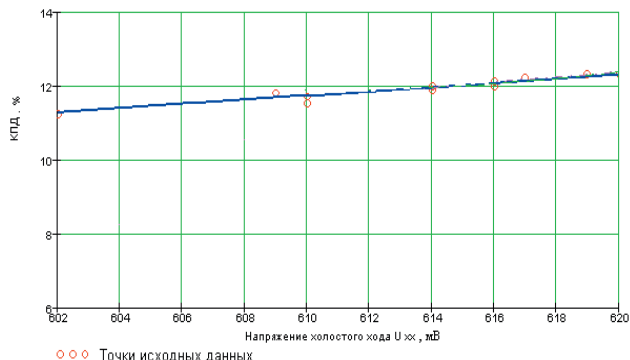


Рис. 2. Зависимость КПД=f(U_{0x}) для уравнения регрессии 1-го порядка

Вместе с тем кремниевые монокристаллические ФП имеют следующие недостатки:

- сложность технологического процесса изготовления;
- высокая стоимость полупроводникового сырья;
- невысокие массогабаритные параметры по сравнению с пленочными ФП.

В последнее время активно разрабатываются ФП на основе аморфных структур. Как известно, в настоящее время [4,5] для исследования механизмов токопереноса в аморфных структурах применяются модели на основе корреляционного анализа и стационарной фотопроводимости с учетом спектрального распределения коэффициента оптического поглоще-

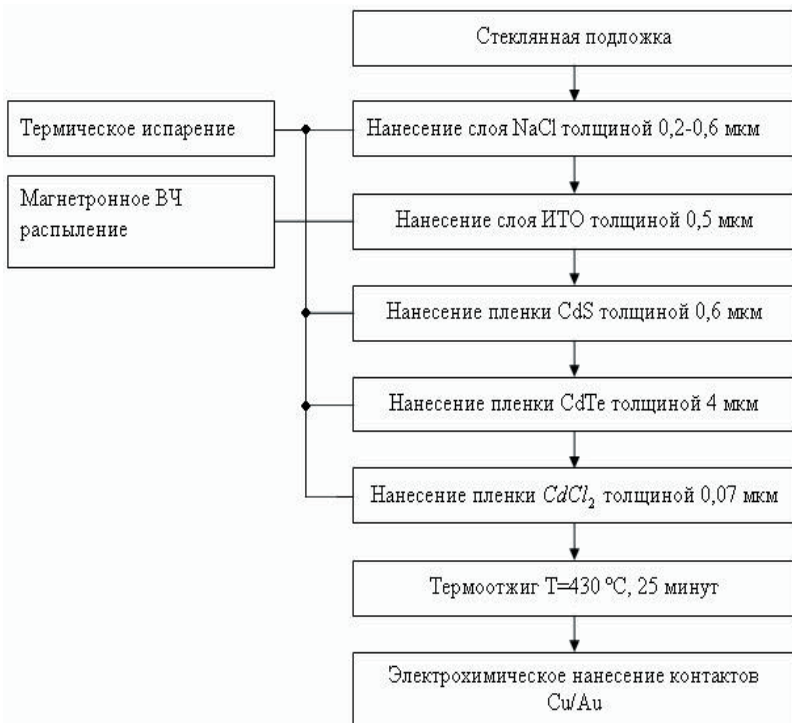


Рис. 3. Технологический маршрут изготовления пленочных аморфных ФП на основе CdS-CdTe

ния. Синтез уравнения световой ВАХ аморфных ФП с помощью указанных моделей пока не реализован и соответственно с помощью аналитических физических моделей невозможно исследовать влияние технологических и базовых параметров аморфных ФП на эффективность фотопреобразования. Поэтому для проведения исследований применим статистический регрессионный анализ.

Для решения этой задачи воспользуемся результатами экспериментальных исследований пленочных аморфных ФП на основе CdS-CdTe, достаточно подробно изложенных в работах Хрипунова Г.С. [3].

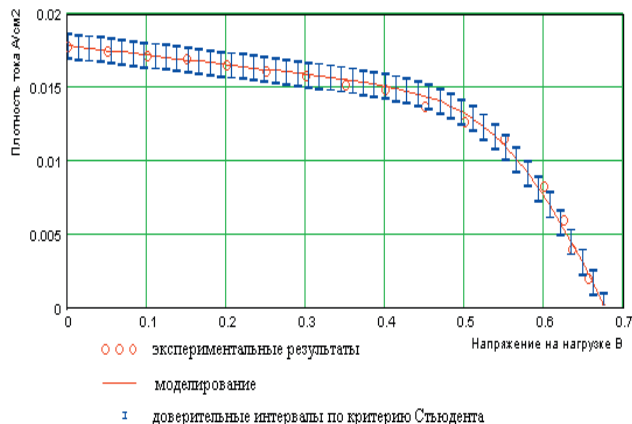


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика 2-го исследуемого образца ФП

Технологический маршрут их изготовления представлен на рис. 3. Следует отметить, что этот маршрут существенно проще. Он содержит 4 технологические операции термического испарения, которые

выполняются в одном вакуумном цикле без разгерметизации рабочей камеры, операцию нанесения проводящего слоя ИТО магнетронным ВЧ распылением. Последующие операции (термоотжиг и электрохимическое нанесение контактов) выполняются в открытых условиях.

Кроме этого в работе [3], приведены результаты измерений световых нагрузочных ВАХ для четырех экспериментальных образцов ФП на основе CdS/CdTe. На рис. 4 представлена одна из экспериментальных ВАХ в виде массива точек.

Как известно, основное уравнение световой нагрузочной ВАХ имеет вид:

$$j = j_{\phi} - j_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{U + I \cdot R_{ш}}{F \cdot \phi_{т}} \right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_{ш}}{R_{ш}}, \quad (6)$$

где A – фактор неидеальности, j_{ϕ} – плотность фототока; j_0 – плотность тока насыщения.

Для определения базовых параметров ФП (фототок j_{ϕ} , ток насыщения j_0 , последовательное сопротивление $R_{ш}$, шунтирующее сопротивление $R_{ш}$, фактор неидеальности - A) по экспериментальным ВАХ применяем их ап-

проксимацию с помощью указанного уравнения и методом наименьших квадратов вычисляем их значения. Результат аппроксимации экспериментальной ВАХ представлен в виде графика на рис. 4. Здесь же отрезками представлены доверительные интервалы по критерию Стьюдента при 5% уровне погрешности. Результаты обработки экспериментальных световых ВАХ для 4 образцов гетеропленочных CdS-CdTe ФП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования образцов гетеропленочных ФП на основе CdS-CdTe

| Номер образца | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|---|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Макро-параметры | Плотность тока J_0 , мА/см ² | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2,8 \cdot 10^{-9}$ | $1,3 \cdot 10^{-11}$ | $2,2 \cdot 10^{-11}$ |
| | Плотность фототока J_f , мА/см ² | 9,2 | 19 | 17 | 18 |
| | Последовательное сопротивление R_n , Ом | 11 | 5,9 | 10,2 | 7,7 |
| | Шунтирующие сопротивление $R_{ш}$, Ом | 242 | 150 | 45,8 | 244 |
| | Параметр А | 2,31 | 1,68 | 1,02 | 1,43 |
| Вых. параметры | Напряжение U_{xx} , мВ | 536 | 678 | 546 | 751 |
| | Плотность тока $J_{кз}$, мА/см ² | 8,8 | 17,8 | 16,8 | 17,7 |
| | Параметр FF | 0,465 | 0,526 | 0,384 | 0,589 |
| | КПД, % | 2,2 | 6,4 | 3,5 | 7,8 |

Результаты вычислений базовых параметров по световым ВАХ для 4-х образцов ФП приведены в табл. 1. По результатам исследований четко видно, что пленочные структуры имеют больше последовательное сопротивление, чем на основе монокристаллического кремния. Если последние имеют параметр R_n в пределах (0,5...2) Ом, то пленочные фотоприборы – не менее 5,9 Ом. Таким образом даже для лучшего 4-го образца ($R_n=7,7$ Ом, $R_{ш}=244$ Ом) параметр FF составляет лишь 0,589. В то же время при использовании базовой технологии, разработанной в ДП НДТИП (г. Харьков), этот параметр составляет 0,72...0,76. По этой причине и существенно различаются КПД (7,8% для ФП на основе CdS-CdTe и 14% для c-Si ФП).

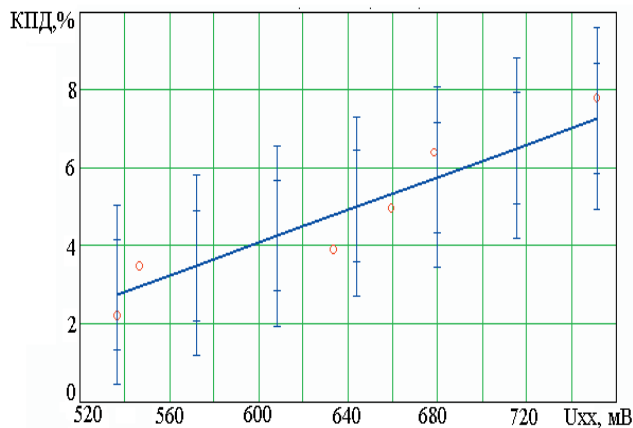


Рис. 5. Зависимость КПД ФП от напряжения холостого хода U_{xx}

С помощью выходных параметров образцов ФП, представленных в табл. 1, и после нахождения коэффициентов a_0, a_1, a_2 получим уравнение регрессии 1-го порядка

$$\text{КПД} = -10,1 + 2,11 \cdot 10^{-2} U_{xx} + 0,1 I_{кз} \quad (7)$$

Результаты вычислений зависимости $\text{КПД} = f(U_{xx})$ приведены на рис. 5. Как следует из графика, для аморфных пленочных ФП напряжение U_{xx} оказывает более существенное влияние на КПД чем в случае c-Si ФП. Из графика видно, что линейное уравнение регрессии не обеспечивает соответствие экспериментальным данным (массив точек), что приводит к большой ширине доверительных интервалов в виде отрезков прямых линий (максимальные отрезки – по критерию Стьюдента, минимальные внутренние – согласно нормального закона распределения). Это так же свидетельствует о недостаточной отработке технологического процесса с точки зрения воспроизводимости и повторяемости выходных параметров.

Результаты исследований

1. Монокристаллические ФП обладают более высокими КПД (12%-14%), но требуют более сложного технологического процесса изготовления. Аморфные ФП выгодно отличаются более простой технологией изготовления, лучшими массогабаритными параметрами, однако обладают более низким КПД (3,5%-7,8%)

2. Дальнейшее совершенствование ФП целесообразно осуществлять:

- на основе использования гетероструктур, содержащих монокристаллический кремний и пленочные аморфные полупроводники;
- формированием многопереходных аморфных структур.

Литература

1. Слипченко Н.И. Регрессионные технологические модели кремниевых монокристаллических фотопреобразователей. / Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В., Яновская Н.Н. // Известия вузов. Радиоэлектроника, НТУУ «КПИ», 2008, том 51, № 11. С. 41-49.
2. Патент на винахід № 86167 від 25.03.2009 р. Пристрій для контролю параметрів фотоелектричних перетворювачів. Слипченко М.І., Письменецкий В.О., Кирилюк А.А., Яновська Н.М., Фролов А.В. Бюл. № 1, 2009 р.
3. Бойко Б.Т. Дослідження пліткових сонячних елементів ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au. / Бойко Б.Т., Хрипунов Г.С., Меріуц А.В., Черних Е.П. // Фізика і хімія твердого тіла, Т. 6, № 2 (2005) с.295-298.
4. Биков М.А. Модель фотогенерации и переноса носителей в структуре α -Si:H/c-Si. / Биков М.А., Быков А.М., Зуев С.А., Мазин А.С., Слипченко Н.И., Унжаков Д.А. // Прикладная радиоэлектроника, 2008, Том 7, №1.
5. Голикова О.А. Особенности структуры пленок аморфного гидрированного кремния, осажденных методом разложения силана на постоянном токе в магнитном поле. / Голикова О.А., Кузнецов А.Н., Кудоярова В.Х., Казанин М.М. // Физика и техника полупроводников, 1997, Том 31, № 7, с. 816-819.