

Reports, 1958, Vol. 13, N 1. P. 79-97. **5. Щелкин Ю.Ф., Холодовская А.А., Титюник Л.Н.** Анализ условий теплообмена кристалла с окружающей средой в процессе получения слитков из расплава методом Чохральского. Научные труды Гиредмета. Т. 103. С. 3-15. **6. Оксанич А.П., Вдовиченко Н.Д.** Новые принципы построения устройств контроля процессов выращивания структурно-совершенных слитков кремния большого диаметра // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 1. С. 42-45с. **7. Михальчук В.И.** Влияние промежуточной среды на измерения температуры расплава в процессе выращивания монокристаллов кремния // Нові технології. 2002. №1. С. 19-21. **8. Михальчук В.И., Сидоренко С.Д.** Применение многоволновых цветовых пирометров для определения температуры расплава в процессах выращивания монокристаллов кремния // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2002. № 9. С. 109-111. **9. Горбат А.М.** Оптические измерения. Киев: Техника, 1967. С. 172-194.

Поступила в редколлегию 02.10.2003

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Гордиенко Ю.Е.

**Оксанич Анатолий Петрович**, д-р техн. наук, профессор, проректор по НИР, зав. кафедрой КСА ИЭНТ, г. Кременчуг. Научные интересы: исследование физических процессов в полупроводниках, разработка измерительного оборудования. Увлечения и хобби: охота. Адрес: Украина, 39614, Кременчуг, ул. 50-лет СССР, 29, кв. 139, тел. (05366) 3-83-33. E-mail: oksanich@cat-ua.com.

**Михальчук Виктор Ильич**, доцент кафедры ИУС ИЭНТ, г.Кременчуг. Научные интересы: современные компьютерные технологии, компьютеризация процессов выращивания полупроводников. Увлечения и хобби: радиоконструирование, спорт. Адрес: Украина, 39614, Кременчуг, ул. Первомайская, 3, кв. 49, тел.(05366) 3-03-22. E-mail: mihalchuk@cat-ua.com.

УДК 621.382.3

## ОЦЕНКА ДИОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ТЕМНОВОМ РЕЖИМЕ

*СУПРУН Ж.М., ПИСЬМЕНЕЦКИЙ В.А.,  
СЛИПЧЕНКО Н.И.*

Приводятся методы расчета диодных параметров фотоэлектрических преобразователей по темновым ВАХ. Исследуется влияние фактора неидеальности и сопротивления базы на вольт-амперную характеристику и дифференциальное сопротивление реальных полупроводниковых структур. Предлагается компьютеризированный метод измерения ВАХ.

**Введение.** Как известно [1,2], фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) работают в темновом и освещенном режимах. Обработка экспериментально полученных темновых ВАХ ФЭП сводится к анализу традиционных диодных ВАХ в прямом и обратном включениях. Изучение прямых ветвей темновых ВАХ ФЭП является эффективным экспрессным методом их первичной аттестации как на стадии разработки, так и на стадии серийного выпуска. При этом [2] в прямом включении определяются коэффициент неидеальности  $n$ , ток насыщения  $I_0$ , и последовательное сопротивление  $R_n$ , которое фактически определяется сопротивлением  $R_6$  базовой области.

Темновая ВАХ ФЭП описывается выражением:

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{e(U - IR_6)}{nkT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $I$  – ток, протекающий через неосвещенный ФЭП;  $U$  – напряжение на ФЭП;  $R_6$  – сопротивление базы.

Это выражение легко преобразуется к виду [2]:

$$I = V_1 \{ \exp(V_2 U - V_3 I) - 1 \}, \quad (2)$$

здесь  $V_1 = I_0$ ,  $V_2 = e/(nkT)$ ,  $V_3 = eR_6/(nkT)$ .

Получение искомым параметров обычно достигается путем варьирования коэффициентов  $V_1 - V_3$ , которые обеспечивают наилучшую аппроксимацию темновой ВАХ.

Анализ состояния проблемы позволил сделать вывод о том, что данная методика не позволяет однозначно установить точные значения искомым параметров.

**Актуальность исследования** определяется прикладной направленностью научных результатов. Измерение и последующая аналитическая обработка темновых и нагрузочных световых ВАХ - наиболее информативные методы для определения электрических параметров кремниевых ФЭП на стадии оптимизации их конструктивно-технологических решений (КТР).

**Цель исследования.** Целью работы являются теоретические и экспериментальные исследования, в том числе анализ влияния указанных фотоэлектрических параметров  $R_6$  и  $n$  на огибающую ВАХ с учетом результатов анализа разработки алгоритма их вычисления.

**Объектами исследования** являются фотоструктуры, полученные с применением разработанных КТР. В процессе проведения работы использовались следующие методы: измерения электрофизических параметров и ВАХ. Обработка результатов, расчет и определение параметров структур проводились с применением средств вычислительной техники.

**Новизна исследования.** Научная новизна работы заключается в изучении влияния сопротивления базы  $R_6$  и коэффициента неидеальности  $n$  на реальную ВАХ и дифференциальное сопротивление с применением современных компьютерных программ, а также в разработке алгоритма определения этих параметров для реальных образцов диодов.

**Практические и научные результаты.** С учетом соотношения (1) и среды виртуального проектирования Electronics Workbench исследовано влияние сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ на примере реальных диодов КД243А и 1N4728А.

Влияние сопротивления базы на прямую ВАХ диода показано на рис. 1.

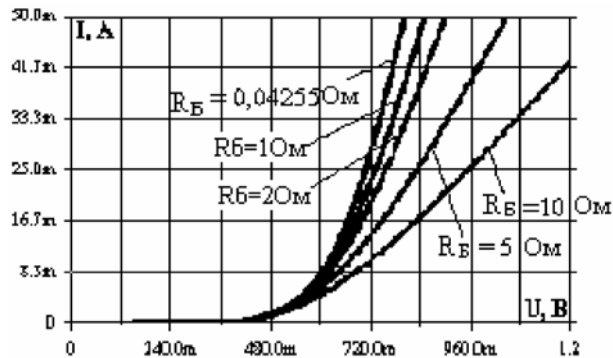


Рис. 1. Влияние  $R_6$  на прямую ВАХ диода КД243А

Влияние сопротивления базы на прямую ВАХ диода 1N4728А приведено на рис. 2.

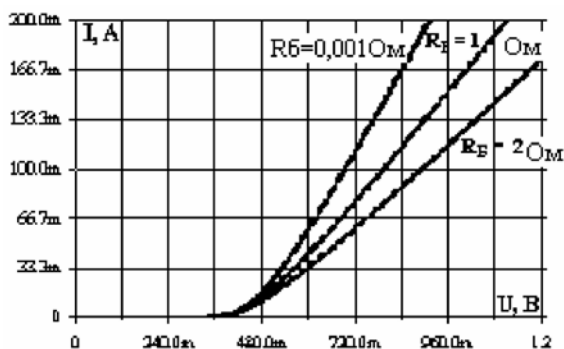


Рис. 2. Влияние  $R_6$  на прямую ВАХ диода 1N4728А

Из рис. 1, 2 можно сделать вывод, что влияние сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ реального p-n перехода проявляется в виде уменьшения крутизны прямой ветви. Поэтому чем больше  $R_6$ , тем более пологая прямая ветвь ВАХ реального p-n перехода.

Результаты исследований в среде Electronics Workbench зависимости обратной ветви ВАХ от  $R_6$  для диода КД243А и 1N4728 представлены на рис. 3, 4.

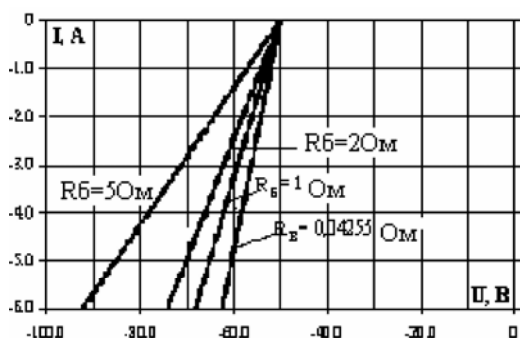


Рис. 3. Влияние  $R_6$  на обратную ВАХ диода КД243А

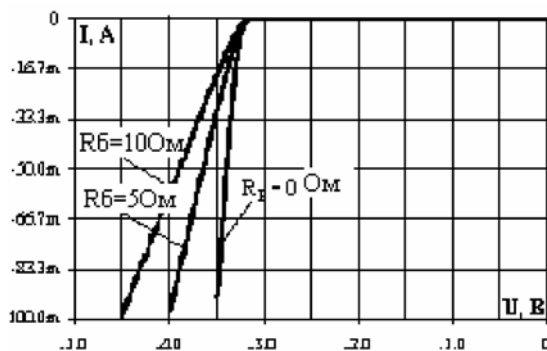


Рис. 4. Влияние  $R_6$  на обратную ВАХ диода 1N4728А

Анализ графиков на рис. 3, 4 подтверждает ранее сделанный вывод.

С помощью пакета Electronics Workbench исследовалось влияние фактора неидеальности на ВАХ (рис. 5, 6).

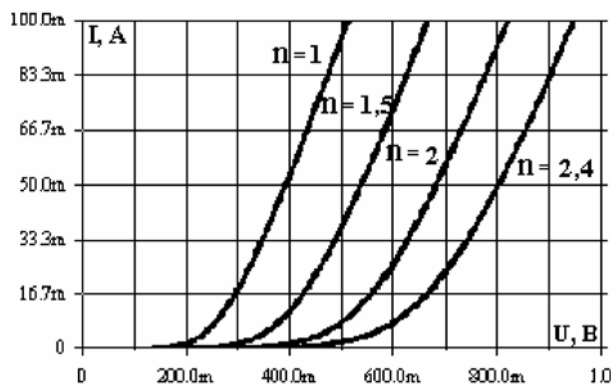


Рис. 5. Прямая ветвь ВАХ диода КД243А с учетом фактора неидеальности

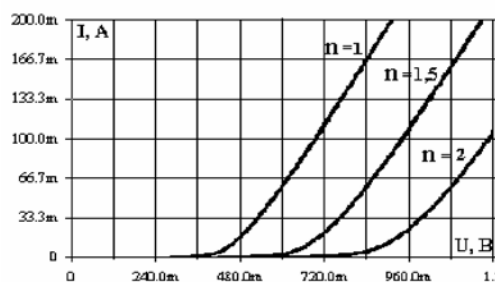


Рис. 6. Прямая ветвь диода 1N4728 с учетом фактора неидеальности

Из приведенных зависимостей (см. рис. 5, 6) следует, что с увеличением фактора неидеальности  $n$  происходит смещение прямой ветви ВАХ вправо без изменения крутизны. Изменение крутизны и положения ВАХ относительно начала координат можно более наглядно представить с помощью зависимости дифференциального сопротивления  $R_{диф}$  от тока или напряжения. Практически дифференциальное сопротивление определяется величиной токов утечки, возникающих вследствие загрязнения поверхности p-n перехода. Поэтому величина дифференциального сопротивления оказывается ниже расчетной, однако не меньше мегома.

Соответственно [2],  $R_{\text{диф}}$  в любой точке прямой ветви ВАХ с учетом  $R_{\text{б}}$  и  $n$  равно:

$$R_{\text{диф}} = \frac{du}{di} = \frac{n \cdot I}{\lambda(I+I_0)} + R_{\text{б}} = \frac{nkT}{e(I+I_0)} + R_{\text{б}}, \quad (3)$$

$$R_{\text{б}} = \frac{\rho_{\text{б}} \cdot W_{\text{б}}}{S}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{б}}$  – удельное электрическое сопротивление области базы;  $W_{\text{б}}$  – ширина базы;  $S$  – площадь сечения базы.

Из соотношения (3) следует, что при малых токах дифференциальное сопротивление зависит главным образом от сопротивления р-п перехода. При больших токах дифференциальное сопротивление перехода мало и общее сопротивление определяется сопротивлением базы. Сказанное подтверждается зависимостями  $R_{\text{диф}}$  реального р-п перехода в прямом направлении для трех значений  $R_{\text{б}}$ , которые представлены на рис. 7.

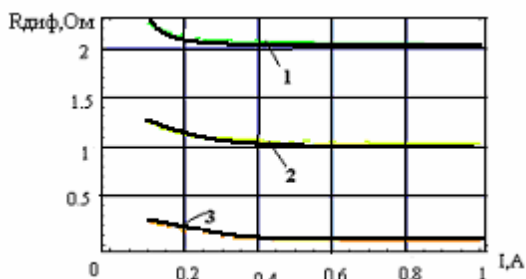


Рис. 7. Зависимость  $R_{\text{диф}}$  при значениях  $R_{\text{б}}$ : 1 –  $R_{\text{б}}=2$  Ома; 2 –  $R_{\text{б}}=1$  Ом; 3 –  $R_{\text{б}}=0,1$  Ом

Из рис. 7 видно, что с увеличением тока дифференциальное сопротивление асимптотически приближается к  $R_{\text{б}}$ . Следовательно, значение  $R_{\text{диф}}$  при больших значениях прямых напряжений  $U_{\text{пр}}$  (0,7–0,8)В практически равно  $R_{\text{б}}$ . Если вычесть из графика  $R_{\text{диф}}$  его асимптотическое значение, получим аналогичную зависимость для идеального диода без  $R_{\text{б}}$ . При этом сохраняется зависимость только от параметра  $n$ .

Влияние параметра  $n$  на дифференциальное сопротивление показано на рис. 8, где представлены зависимости  $R_{\text{диф}} = f(U)$ .

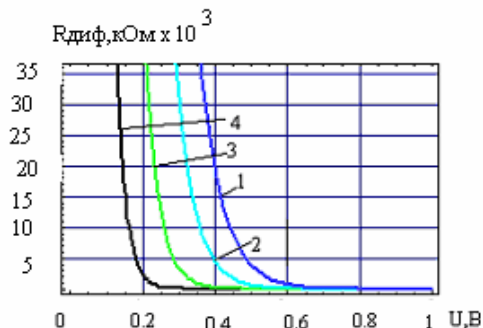


Рис. 8.  $R_{\text{диф}}$  при значениях коэффициента неидеальности: 1 –  $n = 1$ ; 2 –  $n=1,5$ ; 3 –  $n=2$ ; 4 –  $n=2,4$

Из рис. 8 видно, что с увеличением параметра  $n$  проявляется смещение зависимости  $R_{\text{диф}}$  влево без существенного изменения крутизны.

С учетом результатов исследований влияния  $R_{\text{б}}$  на огибающую ВАХ можно предложить алгоритм вычисления параметров  $R_{\text{б}}$ ,  $n$  и  $I_0$ , представленный на рис. 9.

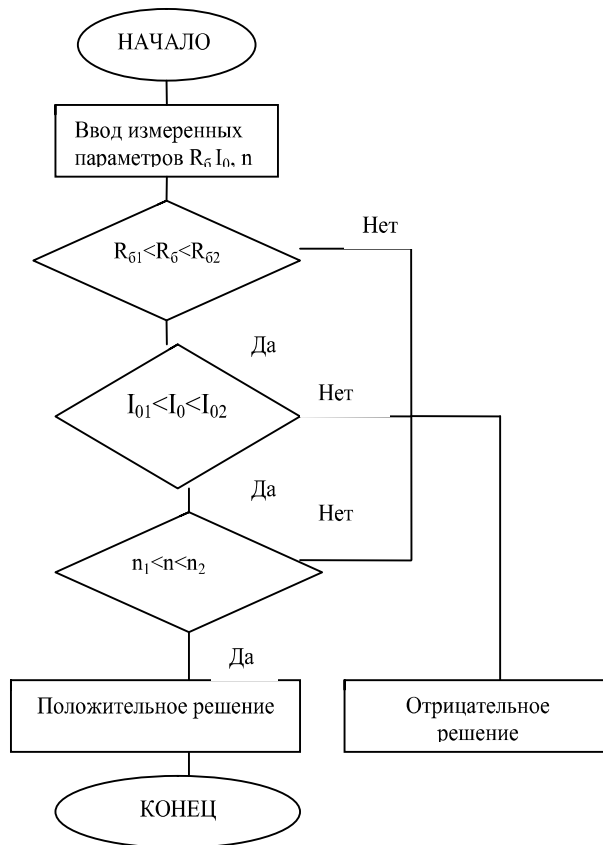
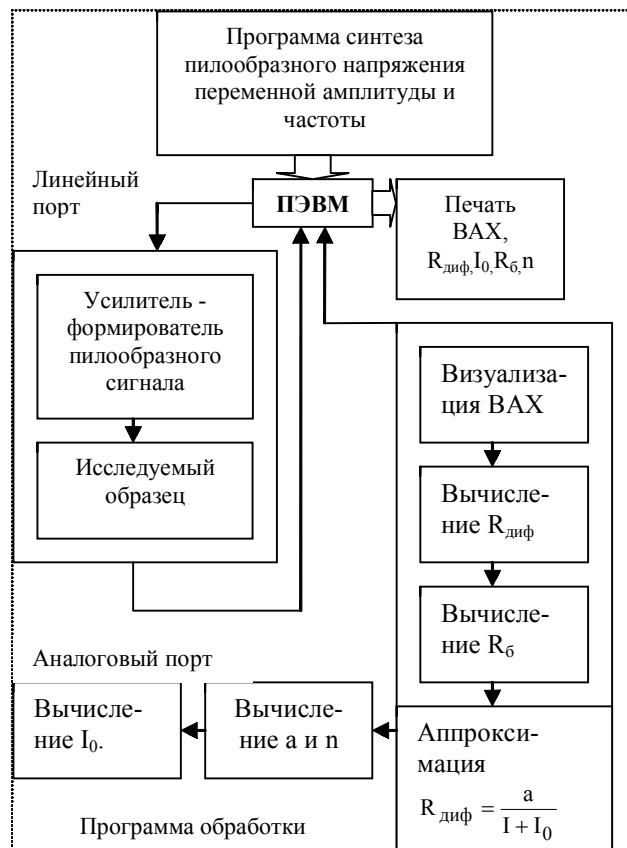


Рис. 9. Аппаратно-программный модуль измерения параметров диодных структур

Для определения диодных параметров  $I_0$ ,  $n$  и  $R_6$  реальных образцов ФП необходимо оперативно измерять их темновые ВАХ.

Несмотря на возможность оперативно проводить измерения с помощью осциллографа и программных средств, можно сравнительно просто получать ВАХ и статические параметры при использовании ПЭВМ. В этом случае вместо генератора [3] необходимо использовать программно-управляемые источники тока (YIT) и напряжения (YIN) с широким диапазоном дискретно-изменяемых номинальных значений.

Управление работой YIN и YIT осуществляется от ПК согласно разработанной программе исследований. Для связи YIN (YIT) с ПК и съема информации  $I = f(U)$  применяется приборный интерфейс канала общего пользования (КОП). Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму и обратно выполняется с помощью интерфейсов сопряжения (IS). С учетом изложенного структура программно-управляемого устройства измерений ВАХ имеет вид, представленный на рис. 10.

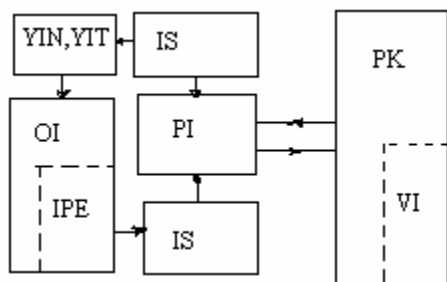


Рис. 10. Структура программно-управляемого устройства измерения ВАХ, где ОI – объект исследований; IPE – измерительно-преобразовательный элемент (прецизионный нагрузочный резистор R); PI – приборный интерфейс (КОП - интерфейс); VI – виртуальный измеритель

Необходимая точность определения параметров может быть достигнута при соблюдении определенных условий измерения. Выясним, каковы эти условия при измерении прямой характеристики диода.

Если сопротивление базы мало, точность измерения напряжения будет выше, чем тока, при одинаковых относительных погрешностях измерения этих величин. Поэтому при оценке параметров прямой ветви ВАХ целесообразно задавать постоянный прямой ток и измерять прямое падение напряжения. Требование “задавать ток через диод” означает, что внутреннее сопротивление источника питания должно быть существенно больше сопротивление диода, чтобы изменение напряжения на диоде не вызывало изменений тока, выходящих за пределы заданной погрешности измерений, т.е. источник должен быть генератором тока по отношению к диоду. Это условие распространяется на измерение напряжения во всех участках характеристики, где дифференциальное сопротивление мало. Так, при измерении параметров диода в области пробоя следует задаваться величиной обратного тока и определять обратное напряжение.

Условие, которому должно удовлетворять внутреннее сопротивление генератора постоянного тока, определяется соотношением:

$$R_i \geq \frac{\Delta R_D}{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{пр}}} + R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} + R_D, \quad (5)$$

где  $\Delta R_D$  – возможное отклонение дифференциального сопротивления диода;  $\Delta U$  – максимально возможное отклонение прямого падения напряжения на диоде при заданной величине тока  $I_{\text{пр}}$ ;  $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{пр}}$

– допустимая относительная погрешность измерения постоянного прямого тока, протекающего через диод.

**Выводы.** Проведенные исследования влияния  $R_6$  и параметра  $n$  на огибающую прямой ветви ВАХ диодных структур четко подтверждают возможность использования этих параметров как информативных для диагностики качества полупроводниковых диодов разных типов, а также для их идентификации. При этом для определения параметра  $R_6$  целесообразно использовать зависимость  $R_{\text{диф}} = f(I)$ . Для нахождения параметров  $n$  и  $I_0$  следует применять аппроксимацию функцией

$$\text{вида } R_{\text{диф}} = \frac{a}{I + I_0}, \text{ что позволит найти искомые}$$

значения  $n$  и  $I_0$ .

**Литература:** 1. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 248 с. 2. Босенко Т.П. Атестація монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії за їх вольт-амперними характеристиками: Звіт про випускню роботу бакалавра / Керівник В.Р.Копач, кафедра ФМЕГ. Харків: ХДПУ, 2000. 83с. 3. Супрун Ж.М., Слипченко Н.И., Письменецкий В.А. Исследования ВАХ диодных р-п структур варикапов // Радиоэлектроника и информатика. 2003. №2(23). С. 37-40.

Поступила в редколлегию 25.12.2003

**Рецензент:** д-р. физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

**Супрун Жанна Михайловна**, аспирантка ХНУРЭ. Научные интересы: анализ диодных структур и их характеристики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-13.

**Письменецкий Виктор Александрович**, канд. техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: разработка устройств обработки сигналов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-43.

**Слипченко Николай Иванович**, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 702-10-20.