

Применение техники годографа к диагностике диодных структур

© В.Б. Шмагин[¶], К.Е. Кудрявцев, А.В. Новиков, Д.В. Шенгуров, Д.В. Юрасов, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Приведены примеры использования техники годографа при диагностике кремниевых диодных структур. Использование техники годографа позволяет минимизировать погрешности определения емкости $p-n$ -перехода, обусловленные наличием маскирующих элементов, искажающих результаты прямого измерения емкости диодной структуры в параллельной и последовательной схемах замещения.

1. Введение

Проблемы вольт-фарадного профилирования диодных полупроводниковых структур отчасти связаны с тем, что емкость области пространственного заряда (ОПЗ), которая и является объектом исследования, часто маскируется импедансом контактов, межслоевых интерфейсов и т.п. Обработка данных эксперимента в таком случае ведется в предположении корректности некоторой эквивалентной схемы, устанавливающей связь измеряемых компонент комплексного импеданса (адмиттанса) диодной структуры с емкостью ОПЗ. Однако в рамках данного подхода сложно контролировать, насколько точно предполагаемая эквивалентная схема соответствует меняющимся условиям эксперимента.

В данной работе для диагностики диодных структур и коррекции результатов прямых измерений емкости предлагается использовать технику годографа. Под годографом понимают траекторию, которую описывает вектор полного импеданса Z (адмиттанса) диодной структуры в комплексной плоскости ($\text{Re } Z$, $\text{Im } Z$) при изменении частоты, на которой проводятся измерения.

Техника годографа получила развитие в конце прошлого столетия при исследовании кинетики и механизмов протекания электрохимических процессов [1–3]. В полупроводниковом материаловедении техника годографа как элемент спектроскопии полного импеданса используется при исследовании механизмов токопереноса в микрокристаллических средах [4,5], известны примеры использования техники годографа при разработке устройств резистивной памяти [6], при исследовании механизмов токопереноса в массивах углеродных нанотрубок [7].

В работе представлены примеры использования техники годографа при диагностике диодных эпитаксиальных структур на основе кремния. Показано, что использование техники годографа: позволяет идентифицировать как ОПЗ, так и межслоевые интерфейсы, маскирующие емкость ОПЗ; позволяет выделить искомую емкость ОПЗ и проанализировать ее изменения при изменении внешних факторов (обратного смещения, температуры).

2. Методика эксперимента

Исследовались кремниевые эпитаксиальные структуры типа $n^+ - n - p^+$, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках КДБ 0.1. Концентрация носителей в слое n -Si составляла $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина слоя 0.5–1 мкм. Концентрация носителей в слоях n^+ -Si, p^+ -Si составляла $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, толщина слоев 0.2–0.3 мкм.

Измерения частотных зависимостей адмиттанса диодных структур выполнены с использованием LCR-измерителя Agilent E4980A в диапазоне частот 20 Гц–2 МГц. Результаты измерений анализировались в комплексных плоскостях Z и $M = j\omega C_0 Z$, где Z — комплексный импеданс диодной структуры, M — комплексный электрический модуль (modulus function, electric modulus [3,4]), j — мнимая единица, ω — круговая частота, C_0 — калибровочный коэффициент (по порядку величины — емкость измерительной ячейки, в наших экспериментах $C_0 = 10 \text{ пФ}$). Выбор конкретного представления (M или Z) определялся особенностями поставленной задачи. В Z -представлении контрастность элементов годографа определяется соотношением сопротивлений, в M -представлении — соотношением емкостей.

3. Результаты и обсуждение

Пример простейшего годографа $p-n$ -перехода, смещенного в обратном направлении, представлен на рис. 1. Годограф представляет собой практически идеальную полуокружность в координатах $\text{Re } M$, $\text{Im } M$. Центр полуокружности расположен в точке с координатами $(C_0/2C, 0)$, радиус полуокружности есть $C_0/2C$, здесь C — искомая емкость ОПЗ. С ростом частоты конец вектора M описывает полуокружность по часовой стрелке. Такой вид годографа свидетельствует о том, что электрические свойства структуры определяются ОПЗ, вклад маскирующих элементов мал. На вставке к рис. 1 изображена эквивалентная схема диодной структуры, где C и R — емкость и сопротивление утечки ОПЗ

[¶] E-mail: shm@ipmras.ru

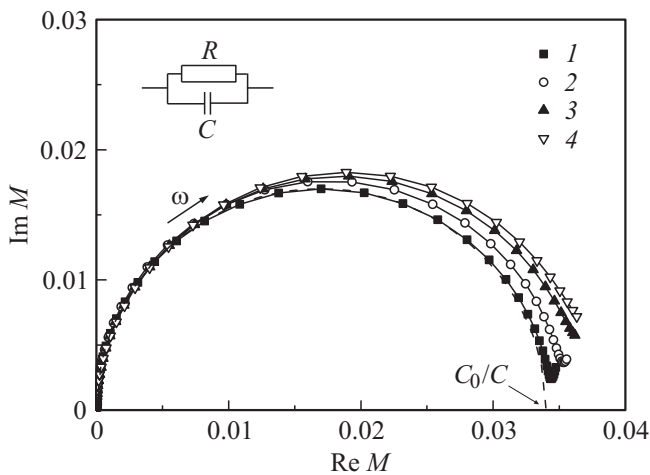


Рис. 1. *M*-годограф диодной структуры #1 при различных значениях обратного смещения U_{rev} , В: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.6, 4 — 1.0. Стрелка указывает на точку пересечения годографа ($U = 0$) с осью абсцисс. Температура измерения $T = 300$ К. На вставке — эквивалентная схема структуры.

соответственно. Штриховой линией показана обработка данных эксперимента при смещении $U = 0$ в рамках предполагаемой эквивалентной схемы ($R \approx 21$ кОм, $C \approx 290$ пФ). В данном случае использование техники годографа практически не добавляет новой информации. Измеряемая емкость (как в параллельной, так и в последовательной схемах замещения) близка к емкости ОПЗ. Видно, что с ростом обратного смещения емкость ОПЗ падает.

Пример более сложного *Z*-годографа диодной структуры #2, смещенной в прямом направлении, и соответствующий этому годографу спектр $\text{Im} Z(F)$ представлены на рис. 2. Годограф представляет собой две соприкасающиеся полуокружности, относящиеся к интерфейсам $n^+ - n$ и $n - p^+$. Центры обеих полуокружностей лежат на оси абсцисс, радиусы полуокружностей составляют $R1/2$ и $R2/2$ (см. эквивалентную схему на вставке к рис. 2, *a*). Каждый из интерфейсов на эквивалентной схеме структуры представлен параллельной *RC*-цепью. Как уже упоминалось, при нулевом и обратных смещениях в годографе преобладает интерфейс $n - p^+$. С ростом прямого смещения вклады интерфейсов $n^+ - n$ и $n - p^+$ выравниваются, затем начинает преобладать интерфейс $n^+ - n$. Аналогичное изменение высот спектральных линий $n^+ - n$ и $n - p^+$ в спектре $\text{Im} Z(F)$ при увеличении прямого смещения мы наблюдаем на рис. 2, *b*. Отметим, что с ростом частоты F конец вектора Z (в противоположность вектору M) описывает полуокружность против часовой стрелки.

Использование техники годографа позволяет определить параметры эквивалентной схемы непосредственно по спектрам. Далее приведен пример такого расчета при величине прямого смещения $U_{for} = 0.6$ В. Годограф каждого из интерфейсов представляет собой

практически идеальную полуокружность, поэтому расчет сопротивлений $R1$ и $R2$ не представляет затруднений: $R1 \approx 12.1$ кОм, $R2 \approx 9.4$ кОм. Далее обращаемся к рис. 2, *b*. В максимуме каждой из линий в спектре $\text{Im} Z(F)$ выполняется соотношение $\omega RC = 1$, где R и C есть параметры соответствующей *RC*-цепи. Отсюда $C1 \approx 76$ пФ, $C2 \approx 27$ нФ. Отметим, что годограф M в данном случае малоинформативен, поскольку $C2 \gg C1$ и интерфейс $n^+ - n$ в M -годографе выражен крайне слабо.

На рис. 3 изображены *M*-годограф и спектр $\text{Im} M(F)$ диодной структуры #3, в которую на одном из этапов изготовления структуры был встроен межслоевой потенциальный барьер в форме тонкого оксидного слоя. В *M*-годографе структуры при обратном смещении наблюдаются два элемента: полуокружность $R1C1$, которую мы связываем с ОПЗ $p - n$ -перехода, и дуга $R2C2$ (часть полуокружности, центр которой расположен ниже оси $\text{Re} M$), которую мы связываем с межслоевым потенциальным барьером. Видно, что указанные элементы (полуокружность и дуга) совершенно по-разному реаги-

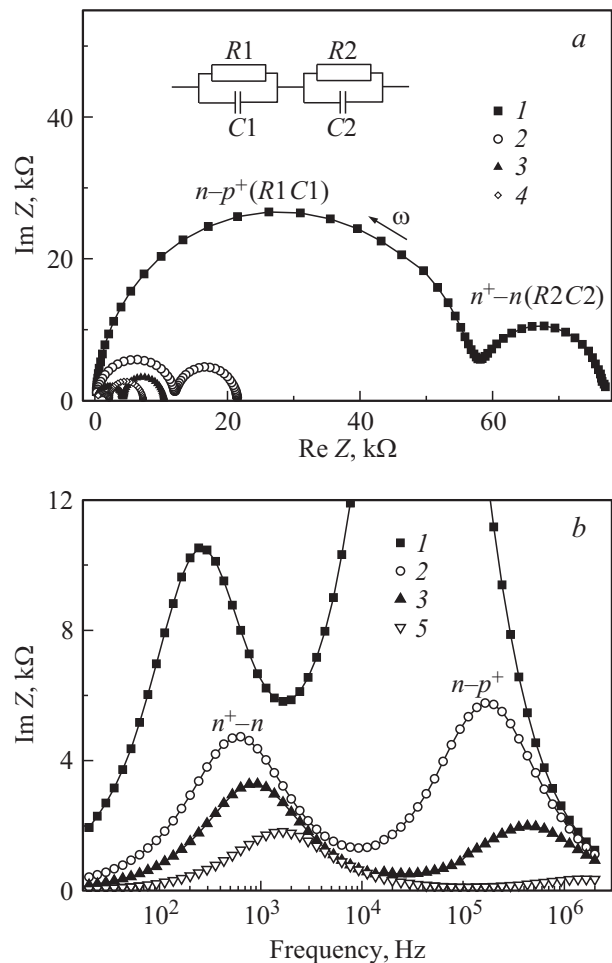


Рис. 2. *Z*-годограф (*a*) и спектр $\text{Im} Z(F)$ (*b*) диодной структуры #2 при различных значениях прямого смещения, В: 1 — 0.4, 2 — 0.6, 3 — 0.8, 4 — 1.0, 5 — 1.4. $T = 77$ К. На вставке — эквивалентная схема структуры.

руют на увеличение обратного смещения U_{rev} . С одной стороны, при увеличении U_{rev} мы наблюдаем уменьшение C_1 и R_1 (см. рис. 3, *a* и *b*), что соответствует реакции ОПЗ на увеличение U_{rev} (уменьшение емкости ОПЗ и рост тока утечки). С другой стороны, мы видим, что параметры R_2 и C_2 остаются постоянными при изменении U_{rev} . Об этом говорят неизменное положение линии R_2C_2 в спектре $Im M(F)$ и отсутствие изменений в соответствующем элементе годографа.

Неполная полуокружность (дуга) как элемент годографа указывает на то, что межслоевой барьер неоднороден в латеральной плоскости, и его релаксационные свойства следует описывать распределением времен релаксации, центрированным относительно наиболее вероятного времени релаксации τ^* [2,3]. В эквивалентной схеме (см. вставку к рис. 3, *a*) барьер с распределенным временем релаксации описывается соединенными параллельно сопротивлением R_2 и элементом постоянной фазы CPE, импеданс которого $Z_{CPE} = A^{-1}(j\omega)^{-n}$ [2]

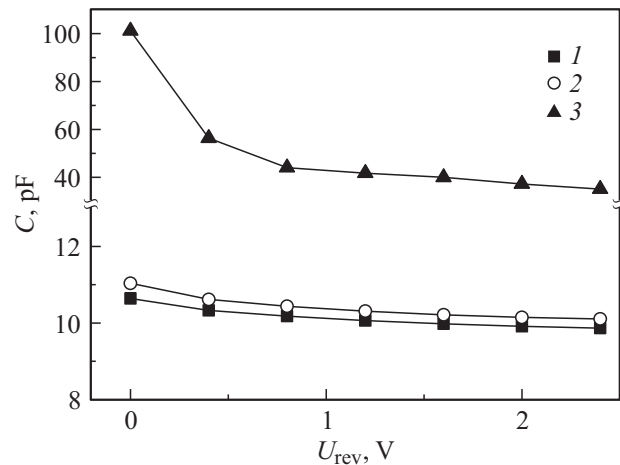


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики диодной структуры #3: 1, 2 — результаты прямых измерений емкости в параллельной и последовательной схемах замещения соответственно; 3 — расчет емкости ОПЗ по годографу. Температура измерений $T = 300$ К.

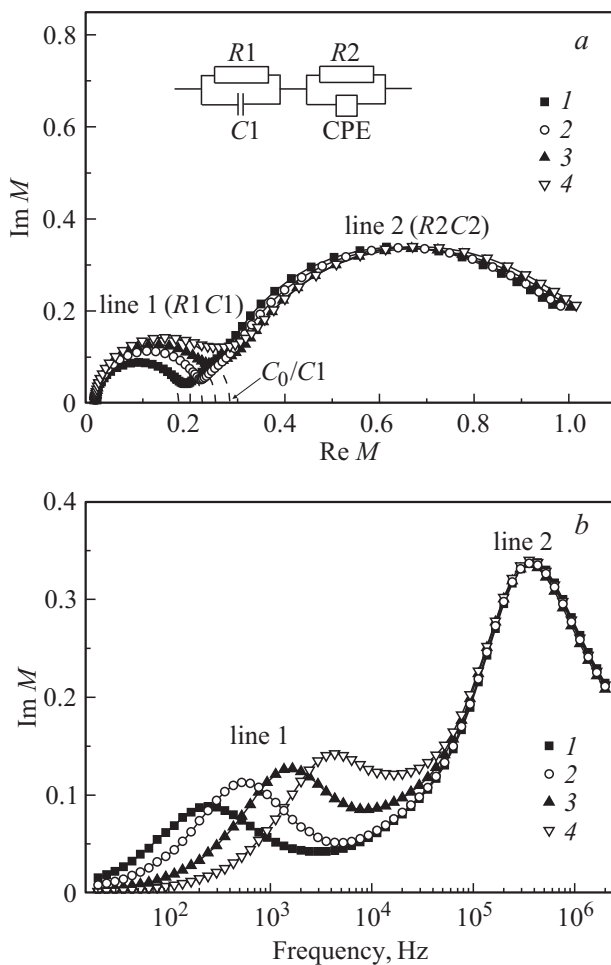


Рис. 3. M -годограф (*a*) и спектр $Im M(F)$ (*b*) диодной структуры #3 со встроенным оксидным слоем при различных значениях обратного смещения, В: 1 — 0.4, 2 — 0.8, 3 — 1.6, 4 — 2.4. Температура измерений $T = 300$ К. На вставке — эквивалентная схема структуры.

(здесь A — калибровочный множитель, n — экспоненциальный фактор). Отметим, что при $n = 1$ импеданс элемента CPE соответствует емкостному импедансу (в этом случае $A = C_2$). Значения параметров эквивалентной схемы структуры #3 при обратном смещении $U_{rev} = 0.8$ В составили: $R_1 \approx 6.7$ МОм, $C_1 \approx 43$ пФ, $R_2 \approx 40$ кОм, $n \approx 0.90$, $C_2 \approx 65$ пФ. Близость параметра n к единице говорит о том, что элемент CPE в данном случае обладает выраженными емкостными свойствами и неоднородность межслоевого барьера определяется, по-видимому, его емкостными свойствами. Под C_2 в данном случае следует понимать некую эффективную величину, отражающую емкостные свойства барьера.

Искажения, вносимые межслоевым потенциальным барьером в результаты прямых измерений емкости ОПЗ, в данном случае очень велики. На рис. 4 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) данной структуры, построенные по результатам расчета емкости ОПЗ по годографу (C_{fit}) и результатам прямых измерений емкости структуры в параллельной (C_p) и последовательной (C_s) схемах замещения на частоте 1 МГц. Видно, что прямое измерение емкости существенно занижает емкость ОПЗ, что является следствием последовательного соединения емкости ОПЗ и емкости оксидного слоя. Отметим, что совпадение C_p и C_s не гарантирует достоверность измерения емкости ОПЗ.

Другой пример латеральной неоднородности связан со слабым растеканием тока по верхнему подконтактному n^+ -слою в случае, когда металлом покрыта только часть поверхности мезы. Плохое растекание может быть диагностировано по измерениям удельной емкости мезадиодов, полученных в одном технологическом цикле и различающихся долей поверхности мезы, покрытой металлом. На рис. 5 приведена зависимость удельной

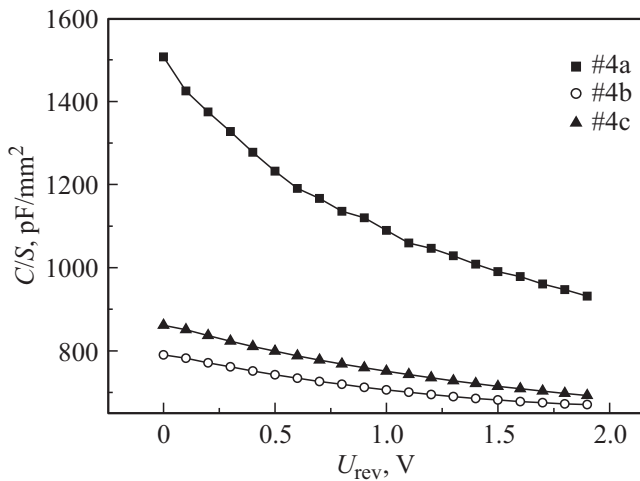


Рис. 5. Зависимость удельной емкости мезадиодов от обратного смещения. Площадь мезы 4а закрыта металлом полностью, площадь мез 4b и 4с на 30%.

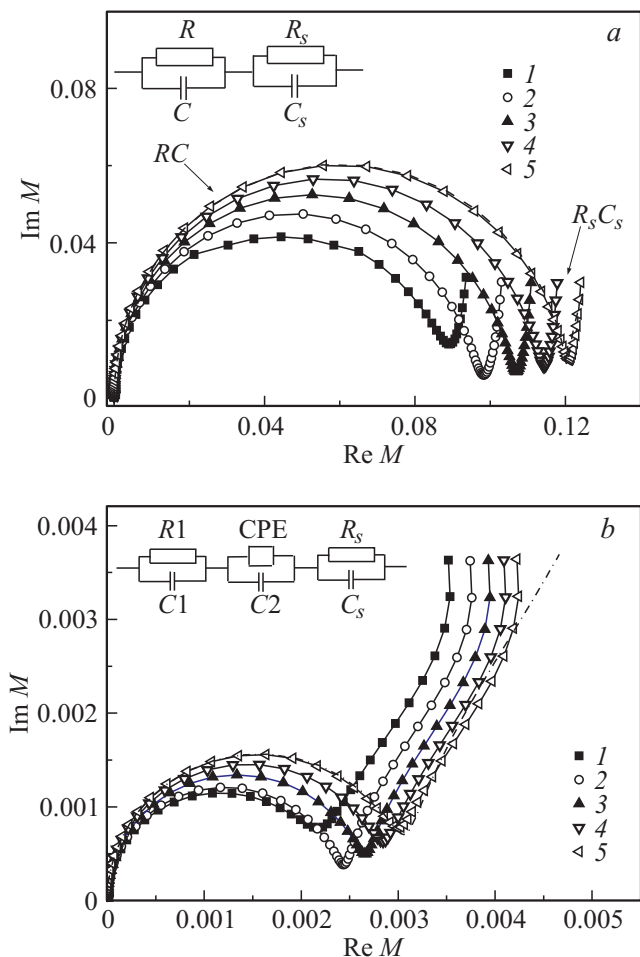


Рис. 6. Годографы мезадиодов #4а (а) и #4b (b) при различных значениях обратного смещения U_{rev} , В: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.8. Температура измерений $T = 300$ К. На вставках — эквивалентные схемы структур. b: штрихпунктирная линия — обработка данных эксперимента при $U_{rev} = 0.8$ В в рамках предполагаемой эквивалентной схемы.

емкости (нормировка на площадь мезы S) от приложенного обратного смещения для трех мез. Поверхность мезы #4а (диаметр мезы $D \approx 300$ мкм) полностью закрыта металлом, поверхность мез #4b ($D \approx 1800$ мкм) и #4с (1200×1800 мкм) закрыта металлом на 30%. Заниженные значения удельной емкости мезадиодов 4b и 4с, у которых металлом закрыта лишь небольшая часть площади мезы, указывают на завышенное значение площади обкладок конденсатора ОПЗ для этих мезадиодов и, следовательно, на слабое растекание тока в n^+ -слое.

Из рис. 6 следует, что слабое растекание тока по n^+ -слою существенно изменяет вид годографа диодной структуры. При отсутствии эффекта растекания годограф и эквивалентная схема выглядят достаточно просто и включают ОПЗ ($R1C1$) и соединенную последовательно с ОПЗ цепь R_sC_s , отвечающую за импеданс контактов и подложки (рис. 6, а). Параметры эквивалентной схемы при $U_{rev} = 0.8$ В: $R1 \approx 190$ кОм, $C1 \approx 83$ пФ, $R_s \approx 230$ Ом, $C_s \approx 60$ пФ.

В годографе мезадиода #4b эффект растекания проявляется весьма отчетливо как элемент дуги большого радиуса (рис. 6, b). В эквивалентной схеме эффект растекания учитывается введением элемента постоянной фазы CPE с экспоненциальным фактором $n \approx 0.1$. Близость параметра n к нулю говорит о том, что в данной эквивалентной схеме (в отличие от рис. 3, а) элемент CPE обладает выраженными резистивными свойствами. Отметим, что при $n = 0$ импеданс элемента CPE соответствует резистивному импедансу [2], причем $A = (R2)^{-1}$. Значения параметров эквивалентной схемы составили: $R1 \approx 3.9$ кОм, $C1 \approx 3.3$ нФ, $R2 \approx 180$ Ом, $n \approx 0.10$, $C2 \approx 3.2$ нФ, $R_s \approx 19$ Ом, $C_s \approx 82$ пФ при обратном смещении $U_{rev} = 0.8$ В. В низкоимпедансных структурах (мезадиод #4b) наблюдается расхождение между экспериментальными данными и их описанием в области частот > 1.5 МГц (рис. 6, b). Характер расхождения говорит о влиянии на результаты измерений паразитных индуктивных связей, что вызвано, по-видимому, недостаточным экранированием измерительных цепей.

4. Заключение

Основной вклад в годограф рассмотренных выше диодных структур вносит $p-n$ -переход. Другие интерфейсы (слои) удается наблюдать при условии, что они вносят в импеданс диодной структуры вклад, сопоставимый с импедансом $p-n$ -перехода (хотя бы по одной из компонент импеданса). Так, уход в область прямых смещений позволяет наблюдать интерфейс n^+-n . Неоднородности в латеральной плоскости описываются введением в эквивалентную схему структуры элемента постоянной фазы.

Использование техники годографа позволяет минимизировать погрешности определения емкости ОПЗ диодной структуры, обусловленные наличием маскирующих

интерфейсов, искажающих результаты прямого измерения емкости как в параллельной (C_p), так и последовательной (C_s) схемах замещения. Совпадение C_p и C_s не гарантирует достоверность измерения емкости ОПЗ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 13-02-00397, 13-02-12108_офи_м) и программ РАН. В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“. Авторы выражают признательность В.П. Кузнецову за предоставленные структуры и А.В. Мурелю за помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] Б.М. Графов, Е.А. Укше. *Электрохимические цепи переменного тока* (М., Наука, 1973).
- [2] З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Савова-Стойнова, В.В. Елкин. *Электрохимический импеданс* (М., Наука, 1991).
- [3] E. Barsoukov, J.R. Macdonald. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications*, 2nd edn. (Wiley–Interscience, New Jersey, 2005).
- [4] D.C. Sinclair, A.R. West. *J. Appl. Phys.*, **66**, 3850 (1989).
- [5] M. Younas, M. Nadeem, M. Atif, R. Grossinger. *J. Appl. Phys.*, **109**, 093 704 (2011).
- [6] Yil-Hwan You, Byung-Soo So, Jin-Ha Hwang, Wontae Cho, Sun Sook Lee, Taek-Mo Chung, Chang Gyoung Kim, Ki-Seok An. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 222 105 (2006).
- [7] M.P. Garrett, I.N. Ivanov, R.A. Gerhardt, A.A. Poretzky, D.B. Geohegan. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 163 105 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

The use of the hodograph technique in testing diode structures

V.B. Shmagin, K.E. Kudryavtsev, A.V. Novikov,
D.V. Shengurov, D.V. Yurasov, Z.F. Krasilnik

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Examples of the use of the hodograph technique in testing silicon diode structures are shown. Using the hodograph technique allows to minimize errors in determining p – n -junction capacitance due to the presence of masking elements that distort the results of direct measurements in parallel or serial equivalent circuits.