

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 621.315.592.08

© В. В. Наумов, О. А. Гребенщиков

МЕТОДИКА ИМПУЛЬСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Описана методика автоматизированных измерений удельного и поверхностного сопротивлений полупроводниковых пластин произвольной формы толщиной 0.2–400 мкм по методу Ван-дер-Пау в импульсном режиме с использованием экспериментальной установки. Установка включает в себя компьютер IBM PC, цифровые вольтметры В7-21А, программно управляемый генератор импульсов, устройство выборки-хранения, программно управляемый коммутатор и адаптер-мультиплексор. Она обеспечивает автоматическое переключение зондовых контактов, программируемое задание импульсов напряжения и тока длительностью 10–40 мкс, измерение поверхностного сопротивления в диапазоне $0.05\text{--}22 \cdot 10^6$ Ом, удельного сопротивления в диапазоне $2 \cdot 10^{-3}\text{--}10^6$ Ом·см при толщине пластины 400 мкм с выводом результатов на монитор и принтер. Погрешность измерения сопротивлений не более 0.8 %.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду сложности технической реализации импульсные измерители удельного сопротивления полупроводниковых пластин не нашли широкого применения, причем погрешность таких измерителей, приведенных в [1, 2], составляет около 20 %. Серийные же цифровые измерители, например ЦИУС13 МП-0.5-001, работающие на постоянном токе, из-за большой величины и длительности протекающего через пластину тока имеют погрешность ≥ 5 %, которая обусловлена возникновением термо-ЭДС и инжекцией неосновных носителей заряда, особенно при измерении высокоомных пластин [3].

Наиболее быстродействующим и точным четырехзондовым методом для измерения удельного и поверхностного сопротивлений полупроводниковых пластин является метод Ван-дер-Пау [3, 4], который позволяет измерять сопротивления пластин различной формы: круглых, квадратных, овальных, трапециевидальных и др.

С целью автоматизации и повышения точности импульсных измерений авторами разработаны методика, алгоритмы, программное обеспечение и технические средства, входящие в экспериментальную установку. Установка содержит: программно управляемый генератор импульсов (ПУГИ), устройство выборки-хранения (УВХ), программно управляемый коммутатор (ПРУК), операционные усилители (ОУ), адаптер-мультиплексор (АДМ) — обеспечивающие автоматизированные измерения удельного и поверхностного сопротивлений полупроводниковых пластин различной формы по методу Ван-дер-Пау в импульсном режиме. Метод позволяет исключить

влияние инжекции неосновных носителей заряда, термо-ЭДС и перегрев образца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 приведена структурная схема экспериментальной установки, где 1 — компьютер IBM PC 486 DX2/4; 2 — АДМ; 3 — ПУГИ; 6 — ПРУК; 7, 8 — ОУ1, ОУ2; 9, 10 — УВХ1, УВХ2; 11, 12 — цифровые вольтметры В7-21А; 13 — измеряемая пластина трапециевидальной формы (осколок). ПУГИ содержит (4) — 12-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) на микросхеме (МС) К1108ПА1, выходное импульсное напряжение которого 0 ± 10 В подается на вход усилителя (5) с коэффициентом усиления $K_{УС} = 20$. С выхода ПУГИ импульсное напряжение амплитудой 0 ± 200 В длительностью 10–40 мкс поступает через ПРУК и зондовые контакты на пластину для задания импульсов тока в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ А, причем для измерения низкоомных пластин используется выход ЦАП, а для измерения высокоомных пластин — выход усилителя ПУГИ.

ПРУК содержит дешифратор команд, ключи и герконовые реле и предназначен для коммутации и подключения соответствующих зондовых контактов к выходам ЦАП, ПУГИ и входам ОУ1, ОУ2, которые выполнены на МС КР544УД2 и предназначены для усиления малых сигналов импульсов напряжения длительностью 10–40 мкс в диапазоне $2.5 \cdot 10^{-5}\text{--}0.5$ В и импульсов тока в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ А.

ОУ1, ОУ2 имеют по 3 поддиапазона с $K_{УС} = 1000, 100, 10$ и автоматическим выбором пределов, причем коммутатор и ключи выполнены

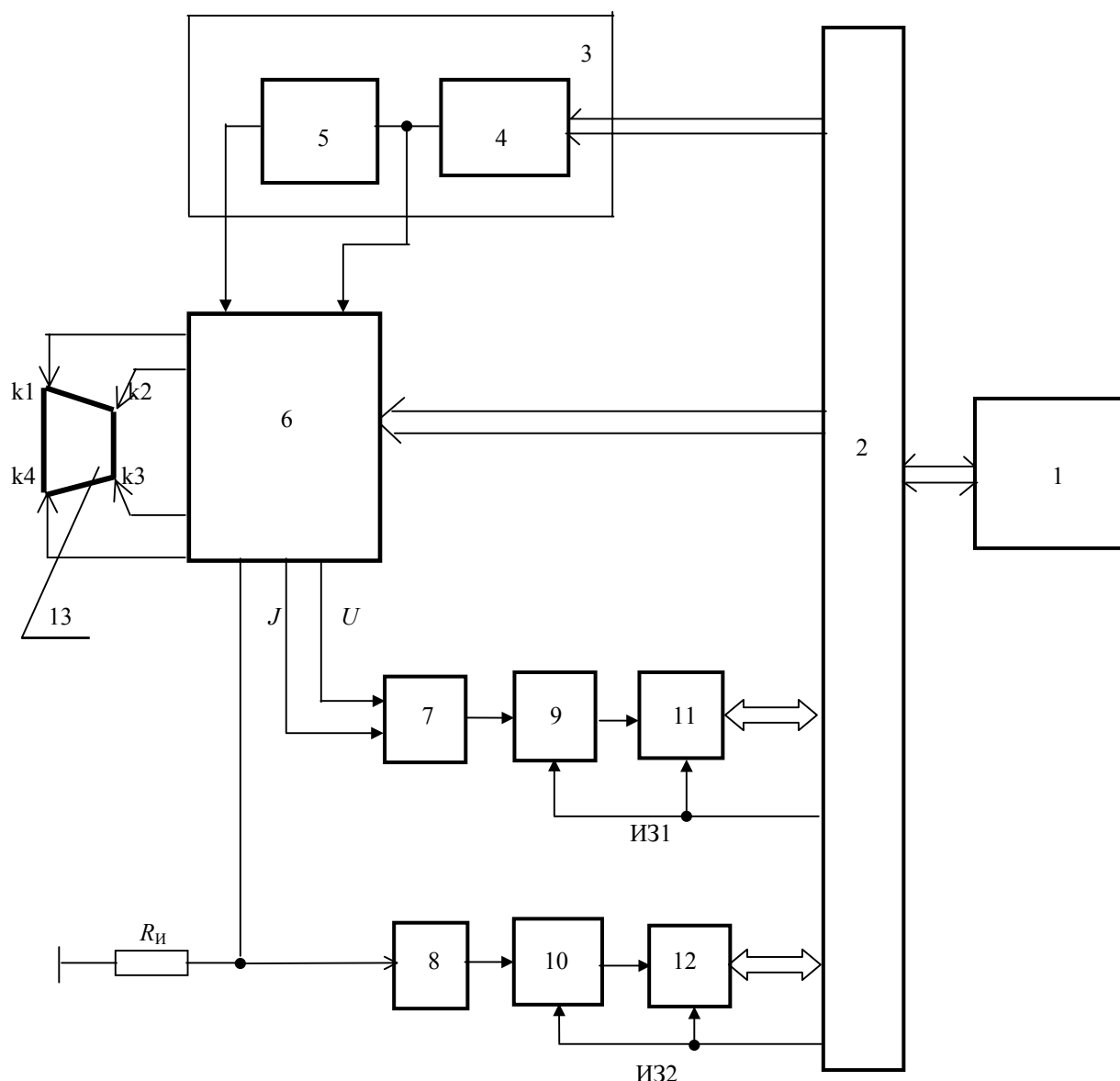


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для импульсных измерений удельного сопротивления полупроводниковых пластин. Описание в тексте

на сверхбыстродействующих МС типа AD8011 фирмы Analog Devices (США) с временем переключения ≤ 30 нс. Измерение импульсов тока через пластину осуществляется с помощью эталонного резистора $R_{И} = 250 \text{ Ом} \pm 0.01 \%$, падение напряжения на котором $U_{R_{И}}$ усиливается ОУ2, а значение тока определяется из выражения $J = U_{R_{И}} / R_{И}$. Общие шины ОУ1 и ОУ2 изолированы.

Для уменьшения погрешности измерений, вносимой УВХ1, УВХ2, выходные напряжения ОУ1 и ОУ2 нормируются таким образом, что на каждом

пределе имеют значения импульсов напряжения в диапазоне 0.25–5 В. Эти импульсы подаются на информационные входы УВХ1, УВХ2, выполненные на МС AD783, которые имеют скорость спада напряжения ≤ 0.02 мкВ/мкс, внутренний конденсатор хранения, диапазон входных напряжений 0...+5 В и предназначены для выборки и расширения импульсов напряжения до 80 мс, соответствующих циклу измерения цифровых вольтметров В7-21А.

Для жесткой синхронизации выборки и измерения импульсов напряжения с выходов УВХ1, УВХ2 в качестве стробирующих используются импульсы запуска (ИЗ1, ИЗ2) цифровых вольтметров

В7-21А длительностью 2 мкс, поступающие из ПК, которые одновременно подаются на запуск В7-21А. Разряд конденсаторов хранения в УВХ1, УВХ2 осуществляется импульсами опроса (ИО1, ИО2) с выходов В7-21А. Таким образом, на входы В7-21А поступают расширенные импульсы напряжения в диапазоне 0.25–5 В длительностью 80 мс, что обеспечивает нормальную работу цифровых вольтметров. АДМ содержит мультиплексор 2→1, регистры и шинные формирователи и предназначен для передачи двоичных кодов с ПК на входы ЦАП, ПРУК, дистанционного управления В7-21А и импульсов запуска ИЗ1, ИЗ2, а также кодовых значений измеряемых напряжений с выходов В7-21А на ПК.

Программное обеспечение написано на языке ТурбоПаскаль (версия 7.0) и обеспечивает: программируемое формирование импульсов напряжения и тока через пластину, автоматическое переключение зондовых контактов, установку режимов работы и пределов В7-21А, измерение, расчет и графическое представление значений удельного и поверхностного сопротивлений на мониторе и принтере.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений поверхностного $\rho_{\text{пов}}$ и удельного $\rho_{\text{уд}}$ сопротивлений выбран четырехзондовый метод Ван-дер-Пау, который является наиболее быстродействующим, так как не требует смены направления тока через зондовые контакты, установленные на полупроводниковую пластину [3, 4].

При измерениях по методу Ван-дер-Пау зондовые контакты k1–k4 располагаются по периметру пластины [3], причем вначале пропускают ток J_{14} через контакты k1 и k4, а напряжение U_{23} снимают с контактов k2 и k3. Затем, после коммутации, пропускают ток J_{12} через контакты k1 и k2, а напряжение U_{34} снимают с контактов k3 и k4.

Описание методики приводится при измерении $\rho_{\text{пов}}$ и $\rho_{\text{уд}}$ высокоомной пластины на основе карбида кремния SiC трапецидальной формы толщиной 20 мкм. Измерения проводятся в течение двух циклов. В первом цикле после установки пластины в зондовую головку по программе с ПК через АДМ на дешифратор ПРУК подаются коды, устанавливающие ключи ПРУК таким образом, что выход ПУГИ подключается к зондовому контакту k1, контакт k4 подсоединяется к входу ОУ2 и резистору $R_{\text{и}}$, а контакты k2 и k3 — к входу ОУ1.

На рис. 2 приведены временные диаграммы при импульсных измерениях $\rho_{\text{пов}}$ и $\rho_{\text{уд}}$.

Формирование импульсов напряжения $U_{3\text{вых}}$ для задания тока J_{14} через пластину осуществляется программным путем с помощью ЦАП, причем длительность импульса 10–40 мкс задается подачей на ЦАП значащих и нулевых кодов через определенное число машинных циклов.

После начала формирования импульсов напряжения $U_{3\text{вых}}$ с задержкой 2 мкс в ПК формируются и подаются на запуск В7-21А ИЗ1 и ИЗ2, которые являются стробирующими для УВХ1 ($U_{9\text{вх}}$) и УВХ2 ($U_{10\text{вх}}$). При этом с выхода ПУГИ импульсы напряжения возрастающей амплитуды длительностью 10 мкс подаются на зондовый контакт 1 до появления на выходе цифрового вольтметра В7-21А (12) минимального значения тока, после чего увеличение кода, подаваемого на ЦАП прекращается. После усиления с помощью ОУ1 и ОУ2 импульсы напряжения $U_{R_{\text{и}}}$, соответствующие току J_{14} , и импульсы напряжения U_{23} поступают на входы УВХ1 и УВХ2. Расширенные до 80 мс импульсы напряжения с выходов УВХ1 ($U_{9\text{вых}}$) и УВХ2 ($U_{10\text{вых}}$) измеряются цифровыми вольтметрами В7-21А, кодовые значения которых через АДМ со сдвигом 2 мкс заносятся в ОЗУ ПК, где вычисляется значение сопротивления R_1 по выражению [3]:

$$R_1 = \frac{U_{23}/K_{\text{ОУ1}}}{U_{R_{\text{и}}}/R_{\text{и}} \cdot K_{\text{ОУ2}}}, \quad (1)$$

где $U_{23} = 4.9$ В, $U_{R_{\text{и}}} = 0.25$ В, $R_{\text{и}} = 250$ Ом, $K_{\text{ОУ1}} = 1$, $K_{\text{ОУ2}} = 1000$.

После подстановки значений: $R_1 = 4.9$ МОм.

Во втором цикле измерения с ПК на дешифратор ПРУК подаются двоичные коды, управляющие ключами таким образом, что выход ПУГИ подключается к контакту k1, контакт k2 соединяется с входом ОУ2 и резистором $R_{\text{и}}$, а контакты k3 и k4 — с входом ОУ1.

Аналогично первому циклу осуществляется формирование импульсов напряжения возрастающей амплитуды с помощью ПУГИ ($U_{3\text{вых}}$), подаваемых на зондовые контакты k1 и k2 для задания импульсов тока J_{12} . После подачи ИЗ1 и ИЗ2 на цифровые вольтметры В7-21А и УВХ1, УВХ2, усиленные и расширенные до 80 мс импульсы напряжений $U_{R_{\text{и}}} \sim J_{12}$ и U_{34} измеряются с помощью вольтметров В7-21А, кодовые значения которых записываются в ОЗУ ПК, где вычисляется значение сопротивления R_2 по выражению:

$$R_2 = \frac{U_{34}/K_{\text{ОУ1}}}{U_{R_{\text{и}}}/R_{\text{и}} \cdot K_{\text{ОУ2}}}, \quad (2)$$

где $U_{34} = 4.7$ В, $U_{R_{\text{и}}} = 0.3$ В, $R_{\text{и}} = 250$ Ом, $K_{\text{ОУ1}} = 1$, $K_{\text{ОУ2}} = 1000$.

После подстановки значений: $R_2 = 4.1$ МОм.

Удельное сопротивление полупроводниковой пластины трапецидальной формы вычисляется в ПК по формуле [3]:

$$\rho_{\text{уд}} = \omega \cdot 4.532 (R_1 + R_2) / 2 \cdot f(R_1/R_2), \quad (3)$$

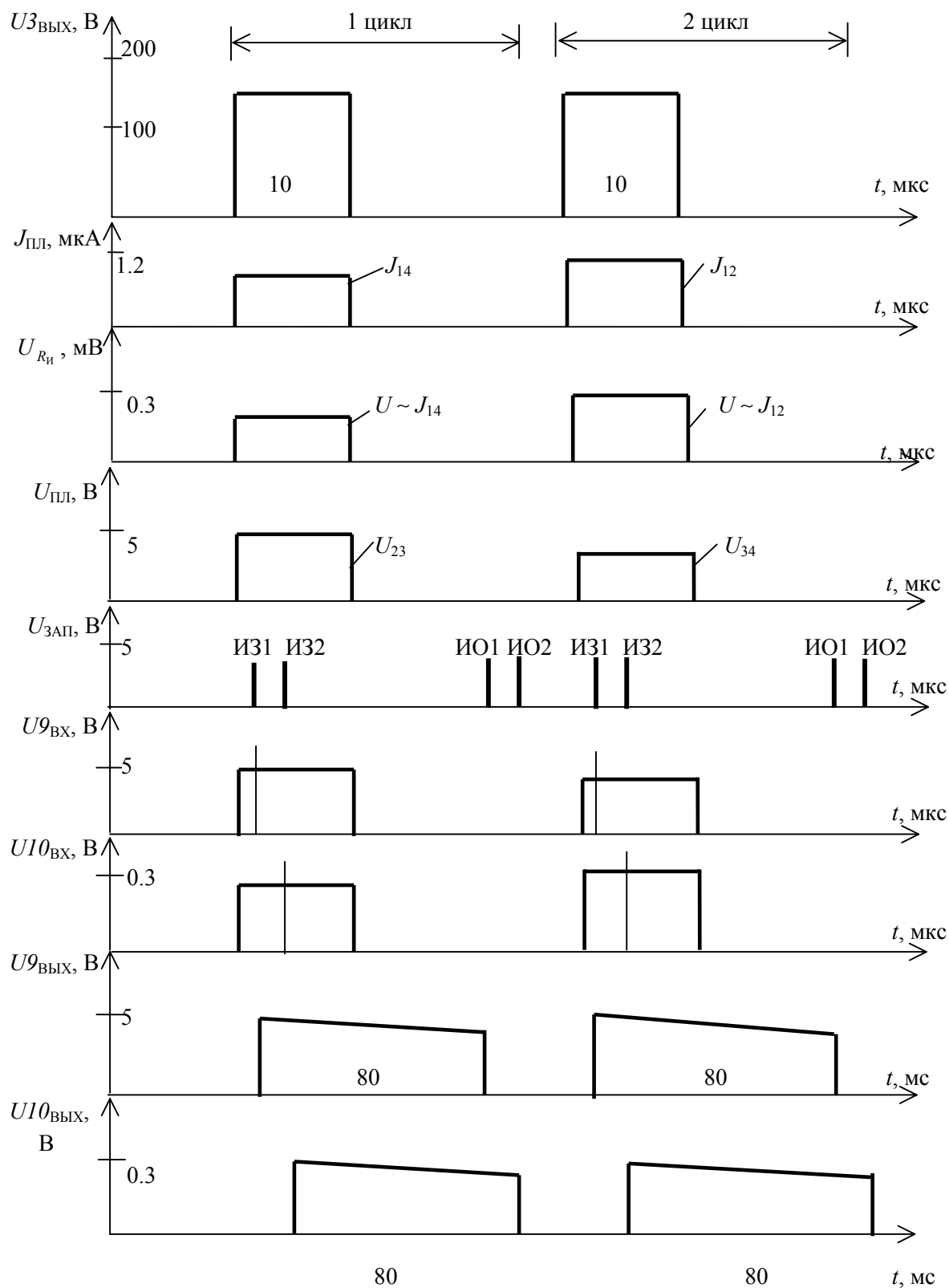


Рис. 2. Временные диаграммы при импульсных измерениях удельного сопротивления полупроводниковой пластины на основе карбида кремния SiC

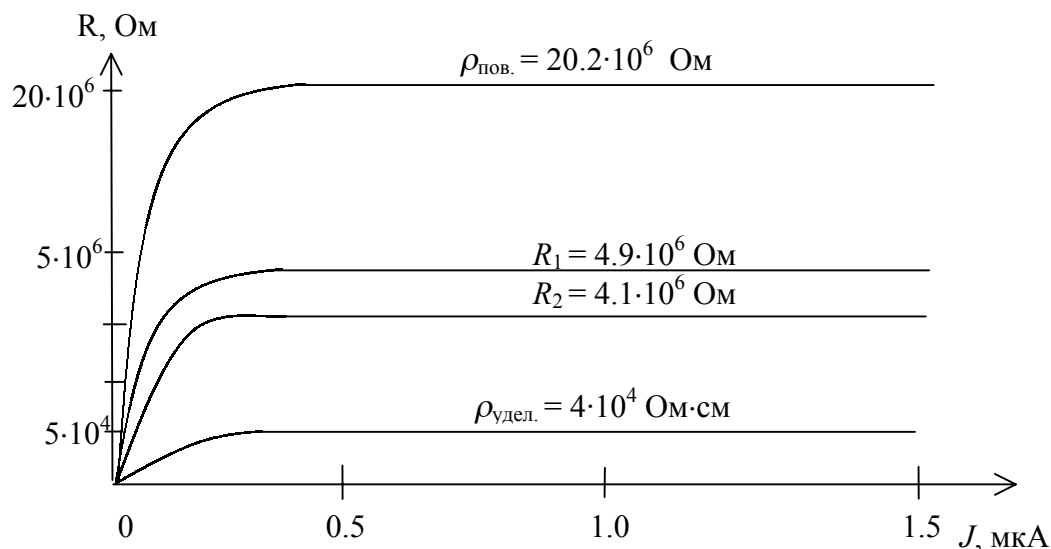


Рис. 3. Экспериментальные графики удельного и поверхностного сопротивлений полупроводниковой пластины трапецидальной формы на основе карбида кремния SiC по методу Ван-дер-Пау в импульсном режиме

где ω — толщина пластины, равная 0.002 см, $R_1 = 4.9$ Мом, $R_2 = 4.1$ Мом, $f(R_1/R_2) = 0.99$ — поправочная функция, график которой приведен в [3].

График поправочной функции $f(R_1/R_2)$ в виде таблицы записывался на жесткий диск ПК и использовался при вычислении $\rho_{уд}$ и $\rho_{пов}$ по выражению (3).

После подстановки измеренных значений в выражение (3)

$$\rho_{уд} = 40 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Поверхностное сопротивление пластины произвольной формы вычислялось по выражению [3]:

$$\rho_{пов} = \rho_{уд} / \omega = 20.2 \cdot 10^6 \text{ Ом}. \quad (4)$$

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости сопротивлений R_1 , R_2 , $\rho_{уд}$, $\rho_{пов}$ от импульсного тока, вычисленных в ПК по выражениям (1)–(4).

Экспериментальное проведение импульсных измерений $\rho_{уд}$ и $\rho_{пов}$ высокоомной пластины на основе карбида кремния SiC толщиной 20 мкм трапецидальной формы показало, что импульсное протекание тока в течение 10 мкс исключает инжекцию неосновных носителей заряда, перегрев образца, возникновение термо-ЭДС, причем основную долю погрешности вносит УВХ.

Суммарная погрешность измерений δ_Σ включает в себя погрешности: УВХ $\delta_{УВХ}$, измерения напряжения δ_U , измерения тока δ_{J-U} и машинного расчета $\delta_{расч}$:

$$\delta_\Sigma = \delta_{УВХ} + \delta_U + \delta_{J-U} + \delta_{расч}.$$

Для УВХ на МС типа AD783, имеющей скорость спада напряжения на конденсаторе хранения 0.02 В/с, при времени хранения 80 мс напряжение спада составляет 1.6 мВ.

На пределе 1 В при значении выходного напряжения УВХ $U_{ВЫХ \text{ УВХ}} = 250$ мВ (наихудший вариант)

$$\delta_{УВХ} = 1.6 \text{ мВ} / 250 \text{ мВ} = 0.63 \text{ \%}.$$

Погрешность измерения напряжения с помощью В7-21А на пределе 10 В при $U_{ВЫХ \text{ УВХ}} = 5$ В:

$$\begin{aligned} \delta_U &= [0.04 + 0.02 (|U_K / U_X| - 1)] = \\ &= 0.04 + 0.02 (|10 \text{ В} / 5 \text{ В}| - 1) = 0.06 \text{ \%}. \end{aligned}$$

Погрешность измерения тока на пределе 1 В при $U_{ВЫХ \text{ УВХ}} = 0.25$ В составляет:

$$\delta_{J-U} = 0.04 + 0.02 (|1 \text{ В} / 0.25 \text{ В}| - 1) = 0.1 \text{ \%}.$$

Погрешность машинного расчета $\delta_{расч} = 0.01 \text{ \%}$ [3].

Таким образом, суммарная погрешность импульсных измерений и расчета $\rho_{уд}$ и $\rho_{пов}$

$$\delta_\Sigma = 0.8 \text{ \%}.$$

ВЫВОДЫ

Несмотря на усложнение технических средств, предлагаемая методика автоматизированных импульсных измерений $\rho_{уд}$ и $\rho_{пов}$ по методу Ван-дер-Пау может найти применение в лабораторных и заводских условиях при разработке новых полупроводниковых материалов и разбравке пластин различной формы: круглых, прямоугольных, квадратных, овальных, трапецеидальных и др.

Для работы экспериментальной установки использовались: IBM PC 486 DX 2/4 с параллельным портом "Centronics", sVGA видеоадаптером и ОЗУ ≥ 8 Мбайт; операционная система WINDOWS 95/98 (свободное место на жестком диске ≥ 20 Мбайт); струйный принтер HP Deskjet-540; цифровые вольтметры В7-21А, вместо которых могут использоваться приборы В7-54/3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hellinger O., Nibler F.Z. // Angew. Phys. 1984. Bd18, N 1. P. 23–28.
2. Евтихьев Н.Н. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 349 с.
3. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. шк., 1987. 239 с.
4. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970. 432 с.

Институт электроники НАН Беларуси, Минск

Материал поступил в редакцию 8.08.2001.

A PROCEDURE FOR PULSE MEASUREMENTS OF SPECIFIC AND SURFACE RESISTANCE OF SEMICONDUCTOR FILMS AND WAFERS

V. V. Naumov, O. A. Grebenshchykov

The Institute of Electronics, National Academy of Science of Belarus. Minsk

The paper describes a technique for automated measurements of specific and surface resistances of semiconductor films and wafers 0.2 to 400 μm thick of any configuration by the Van-der-Pau method in a pulse mode using an IBM PC personal computer, digital voltmeters В7-21А, program controlled pulse generator, sample-and-hold device, programmed switch and adapter-multiplexer. It provides automatic switching of probe contacts, programmed setting of voltage and current pulses from 10 to 40 μs , measurement of surface resistance in the range of 0.05 to $22 \cdot 10^6 \Omega$ and specific resistance in the range of $2 \cdot 10^{-3}$ to $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ at a thickness of 400 μm with data output onto a monitor and printer. The error of resistance measurement is $\leq 0.8 \%$.