

И.П. Жарков, А.Н. Иващенко, В.В. Сафронов

Институт физики НАН Украины, Киев

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТУННЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ



Разработана современная недорогая информационно-измерительная система (ИИС) для обеспечения автоматизации экспериментов туннельной спектроскопии. Реализация только токовой развертки позволила существенно упростить аппаратную часть ИИС, обеспечить полную автоматизацию процедуры измерения ВАХ. Описаны аппаратные особенности разработанной ИИС, а также возможности созданного программного обеспечения.

Ключевые слова: туннельная спектроскопия, токовая развертка, динамическая проводимость.

Одним из мощных современных экспериментальных методов исследования в физике твердого тела является туннельная спектроскопия перехода металл–диэлектрик. Данный метод основан на исследовании вольт-амперной характеристики (ВАХ) специально подготовленных образцов и позволяет получить уникальные данные об электронном спектре проводника.

В туннельной спектроскопии рассматривается два принципа измерения ВАХ: модуляционный и метод развертки на постоянном токе. Модуляционный метод состоит в питании образца постоянным напряжением с добавлением переменной компоненты. Благодаря таким преимуществам, как помехозащищенность, высокое разрешение и динамический диапазон [1, 2] модуляционный способ измерения ВАХ при туннельной спектроскопии наиболее распространенный. Однако из-за сложной и дорогостоящей аппаратной реализации системы, которые основаны на модуляционном методе, не производятся серийно. Кроме того, как показано в работе [3], данный

подход имеет ограниченное применение в случае туннельных контактов с высоким сопротивлением.

С развитием элементной базы микроэлектроники для исследования туннельных переходов все более широко используются системы, осуществляющие развертку на постоянном токе. Современные универсальные приборы для исследования характеристик полупроводниковых приборов позволяют проводить развертку как по току, так и по напряжению [4, 5]. В то же время при значительном сопротивлении туннельных контактов развертка по напряжению требует применения специальных схемных решений [3], что усложняет автоматизацию эксперимента.

Целью настоящей работы является разработка современной системы для измерения ВАХ туннельного перехода. Ориентир на исключительно токовую развертку позволил существенно упростить аппаратную часть, а благодаря гибкой конструкции и специализированному программному обеспечению была реализована возможность проведения широкого спектра экспериментов при полной автоматизации измерений и

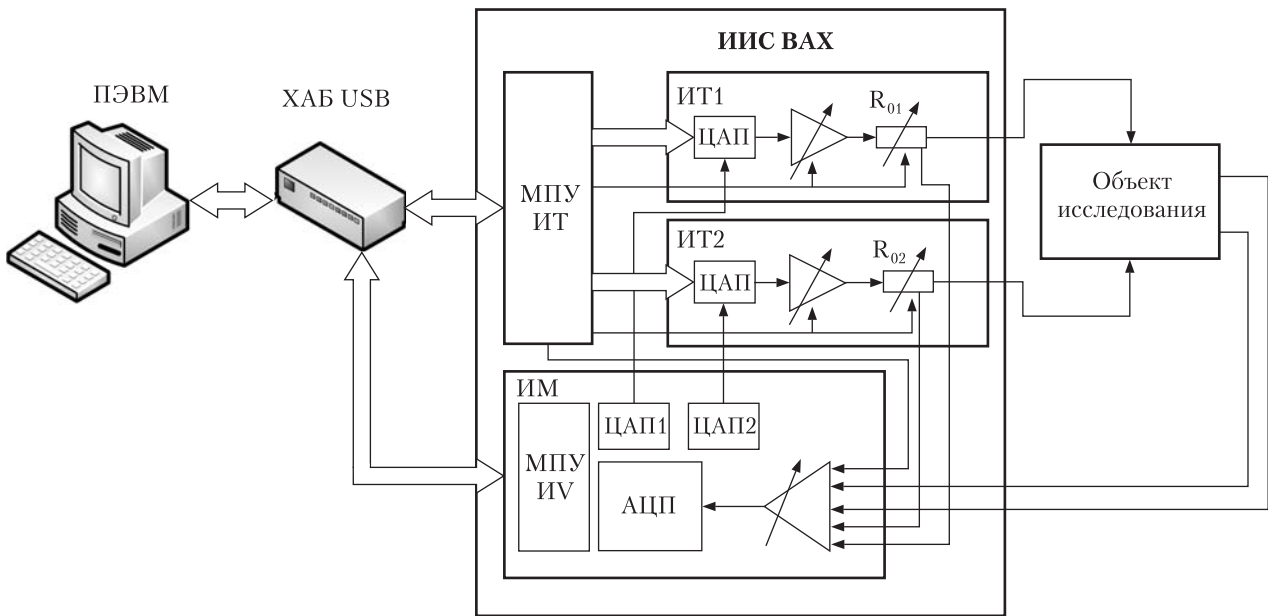


Рис. 1. Упрощенная структурная схема информационно-измерительной системы измерения ВАХ: ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина; МПУ – микропроцессорное устройство; ИТ – источник тока; ИМ – измерительный модуль; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; R_0 – набор опорных сопротивлений, задающих предел тока

минимальных механических коммутациях объекта исследования.

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

С целью достижения поставленной цели разработана информационно-измерительная система (ИИС) для исследования ВАХ, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Основными структурными блоками ИИС являются микропроцессорное устройство (МПУ) источников тока, два унифицированных источника тока (ИТ1 и ИТ2), измерительный модуль (ИМ), представляющий собой законченное микропроцессорное устройство серийного производства ADA1406 [6]. Источники тока выполнены по схеме с заземленной нагрузкой, что позволяет использовать один из них в качестве «ИТ-накачки» во время выполнения развертки по-другому при исследовании транзисторных структур. Весь диапазон установки тока разбит на четыре поддиапазона ($\pm 1,5$ мА; ± 15 мА; ± 150 мА; ± 1500 мА), ко-

торые устанавливаются путем релейной коммутации опорных сопротивлений ИТ (R_0).

Измерение падения напряжения на объекте исследования, а также сигналов об установленном значении тока производится с помощью ИМ. Входное устройство ИМ позволяет производить поочередное подключение к АЦП до 12-ти дифференциальных каналов. В состав ИМ входит также два 12-ти разрядных ЦАП, выходы которых используются для формирования опорных напряжений для ЦАП источников тока. Такой подход позволяет достичь абсолютного значения дискретности установочного тока не хуже 0,1 нА.

Автономное управление разверткой ИТ и процедурой измерения ИМ с помощью соответствующих МПУ, а также применение быстродействующих микросхем ЦАП источников тока (AD7835) и АЦП (частота дискретизации 350 кГц) позволяет проводить скоростные измерения и исследовать тепловые релаксации объекта исследования. Разрядность использо-

ванного АЦП (14 бит) ограничивает точность измерения напряжения. Однако применение каскадного усилителя с программируемым коэффициентом от 1 до 800 позволило расширить динамический диапазон измерения в сторону малых значений напряжений и достичь приемлемой разрешающей способности измерения на уровне $\pm 5 \text{ мкВ}$. Измерительные данные от ИМ по интерфейсу USB передаются в ПЭВМ для дальнейшей обработки и сохранения.

Задающими ток средствами в ИТ являются ЦАП источника тока и опорное сопротивление R_0 . Суммарная погрешность измерения тока в диапазоне абсолютных значений $1 \text{ мкА} \div 1,5 \text{ А}$, а также напряжения в диапазоне $0,01 \div 10 \text{ В}$ не превышает $\pm 0,1 \%$.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Благодаря разработанной структуре ИИС осуществлены широкие возможности программной реализации разнообразных измерительных процедур. Основными базовыми задачами, которые решаются программным обеспечением (ПО), являются:

- ✦ проведение процедуры измерения ВАХ, которая состоит в развертке тока и измерении напряжения;
- ✦ обеспечение как можно более широких возможностей управления процессом измерения;
- ✦ обеспечение сохранения и обработки полученных экспериментальных данных.

Структура разработанного ПО представлена на рис. 2. В соответствии с фактическим местом выполнения программных алгоритмов пакет ПО разделен на нижний и верхний уровни.

Основными функциями ПО микропроцессорного устройства ИТ являются конфигурация ИТ для работы в режимах накачки/развертки и осуществление развертки тока с заданной скоростью. Для расширения возможностей эксперимента источники тока имеют возможность развертки тока по одной из двух траекторий (рис. 3) или любой их части. Полная развертка тока I по каждой из траекторий

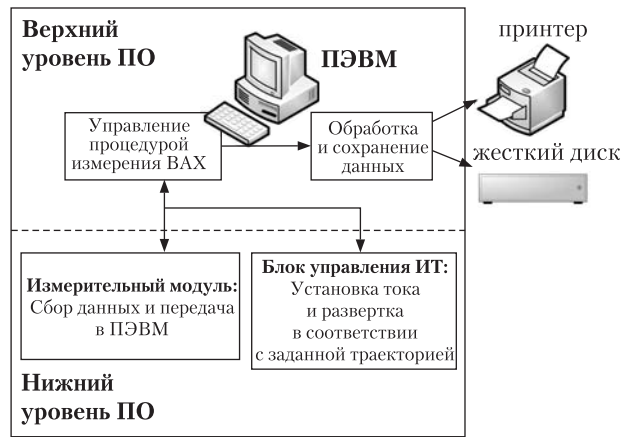


Рис. 2. Структура программного обеспечения

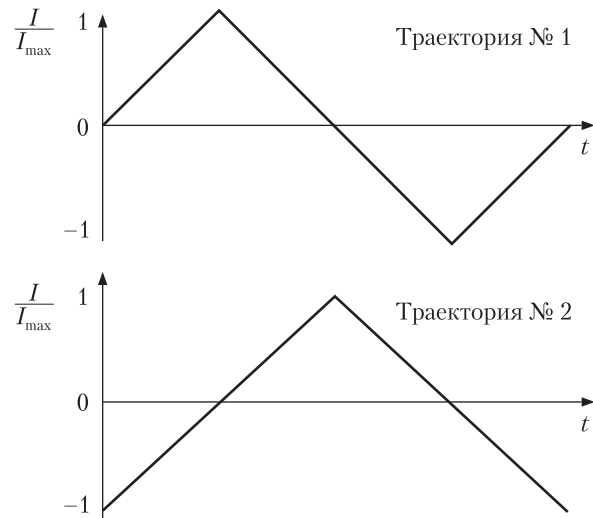


Рис. 3. Возможные траектории развертки тока

может проводиться за время t от 2 с до 1 мин в диапазоне максимального значения тока развертки $\pm I_{\text{max}}$.

Программа микропроцессорного устройства ИМ осуществляет требуемую конфигурацию измерительных каналов, синхронные измерения напряжения и тока по каналу развертки, а также скоростную передачу данных в компьютер.

ПО высокого уровня осуществляет передачу команд конфигурации ИТ и ИМ, воспри-

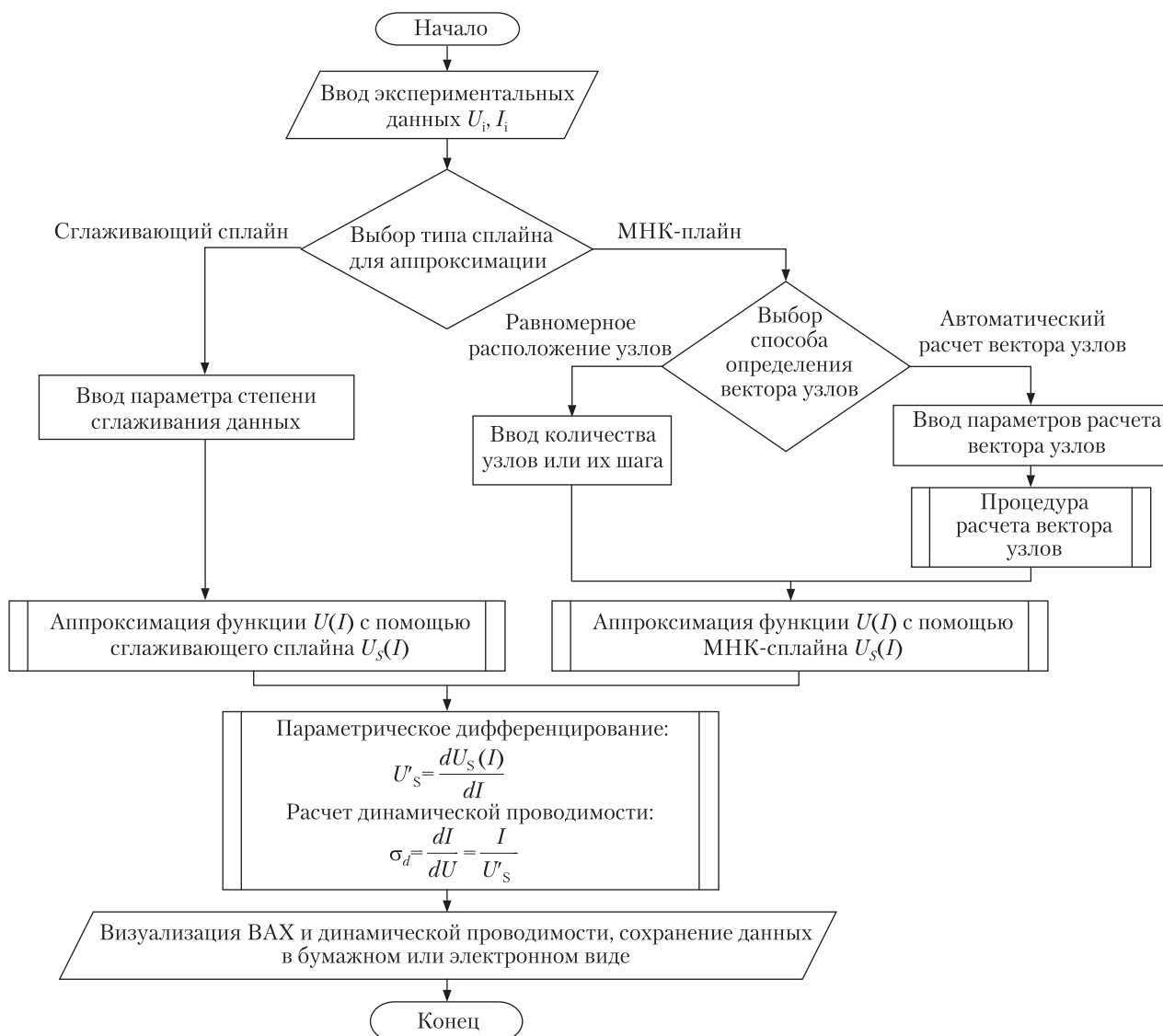


Рис. 4. Упрощенный алгоритм математической обработки полученных экспериментальных данных

нимает экспериментальные данные, проводит их обработку и сохранение.

Важной операцией туннельной спектроскопии является дифференцирование ВАХ с целью расчета динамической проводимости туннельного перехода. Дифференцирование полученных экспериментальных данных осуществляется с помощью пакета программ обработки данных, разработанного в среде Matlab. Для уменьшения влияния шумов в экспери-

ментальных данных дифференцирование необходимо проводить после сглаживающей аппроксимации. В свою очередь, сложность аппроксимации данных туннельной спектроскопии связана с резкой нелинейностью ВАХ, немонотонностью изменения напряжения, наличием разрывов самой характеристики и ее производных. В работе [3] для аппроксимации предложено использование сглаживающего кубического сплайна, который соответствует

линии наименьшей кривизны. Данный метод аппроксимации не позволяет учесть возможные разрывы ВАХ. Аппроксимацию разрывных характеристик нами предложено проводить с использованием базисных В-сплайнов, построенных по методу наименьших квадратов (МНК-сплайны) [7]. Кроме того, для учета немонотонности напряжения U производится аппроксимация функции обратной к ВАХ $U(I)$. Упрощенный алгоритм процедуры математической обработки данных представлен на рис. 4.

Исходные данные для обработки представляют собой набор значений напряжения U_i и тока I_i , где i — номер измерения. Поскольку развертка производится по току, то на траекториях (рис. 3) можно выбрать участки монотонного изменения I , что позволяет аппроксимировать функцию $U(I)$. При аппроксимации предусмотрена возможность использования сглаживающего кубического сплайна (команда «*spraps*» в MATLAB) и МНК-сплайна (команда «*srap2*» в MATLAB). Выбор метода обработки производится оператором в зависимости от свойств полученных экспериментальных данных: в случае гладкой ВАХ применяется сглаживающий сплайн; в случае резких особенностей и наличия разрывов применяется МНК-сплайн. При использовании сглаживающего сплайна предусмотрена возможность ввода параметра, характеризующего степень сглаживания данных. В случае же базисного МНК-сплайна необходимо определить вектор узлов. Данная процедура выполняется с использованием рекомендаций [8]. В результате аппроксимации получим аппроксимирующий сплайн $\sigma_d(U_s)$.

Для определения динамической проводимости определяем производную функции, обратной к ВАХ $U'_s(I) = \frac{d U_s(I)}{d I}$. Динамическая проводимость, определяется из выражения

$$\sigma_d(I) = \frac{d I}{d U} = \frac{1}{U'_s(I)}$$

Поскольку значениям тока I однозначно соответствуют значения напряжения U_s , то для расчетной зависимости динамической проводимости от напряжения $\sigma_d(U_s)$ можем записать $\sigma_d(U_s) = \sigma_d(I)$. После расчета производится визуализация функций $\sigma_d(U_s)$, оператору предоставляется возможность распечатать и/или сохранить результаты обработки на жестком диске.

ВЫВОДЫ

С целью упрощения аппаратной части экспериментов туннельной спектроскопии разработана недорогая современная ИИС исследования ВАХ, реализующая развертку тока в диапазоне $-1,5 \dots +1,5$ А с дискретностью установки тока до 0,1 нА, разрешающей способностью измерения напряжения до ± 5 мкВ и суммарной погрешностью не более $\pm 0,1$ %.

Унификация структурных блоков ИИС, применение автономных микропроцессорных устройств для выполнения операций установки тока и измерения позволили программно реализовать и автоматизировать широкие возможности проведения экспериментов туннельной спектроскопии.

Разработанный программный пакет обработки экспериментальных данных позволяет проводить аппроксимацию и дифференцирование экспериментальных ВАХ с учетом немонотонности и наличия разрывов, а также представлять данные в графическом и цифровом виде.

Работа выполнена в рамках Программы научного приборостроения НАН Украины, грант П2/09-40.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adler J.G., Jackson J.E. System for Observing Small Nonlinearities in Tunnel Junctions // The Review of Scientific Instruments. — 1966. — V. 37, N 8. — P. 1050–1054.
2. Adler J.G., Chen T.T., Straus J. High Resolution Electron Tunneling Spectroscopy // The Review of Scientific Instruments. — 1971. — V. 42, N 3. — P. 362–368.
3. Дижур Е.М., Федоров А.В. Туннельная спектроскопия на постоянном токе и цифровой метод анализа экспе-

- риментальных данных // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 4. — С. 38–42.
4. *Keithley*. Приборы для измерения и тестирования. Каталог продукции 2008. — 60 с. URL: <http://www.keithley.nnz-ipc.ru>.
 5. *HP 4155B/4156B Semiconductor Parameter Analyzer*. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-6681E.pdf>
 6. *ADA-1406* Модуль ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов. Руководство пользователя. ООО «ХОЛИТ Дэйта Системс». Киев. — 17 с.
 7. URL: <http://www.holit.ua>
 8. *Де Бор К.* Практическое руководство по сплайнам. Пер.с англ. — М.: Радио и связь, 1985. — 304 с.
 9. *He X., Shen L., Shen Z.* A data-adaptive knot selection scheme for fitting splines // Signal Processing Letters, IEEE. — 2001 — V. 8, N 5. — P. 137–139.

І.П. Жарков, О.М. Іващенко, В.В. Сафронов

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ТУНЕЛЬНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

Розроблено сучасну недорогу інформаційно-вимірвальну систему (ІВС) для забезпечення автоматизації експериментів тунельної спектроскопії. Реалізація лише

струмової розгортки дала можливість суттєво спростити апаратну частину ІВС, забезпечити повну автоматизацію процедури вимірювання ВАХ. Описані апаратні особливості розробленої ІВС, а також можливості створеного програмного забезпечення.

Ключові слова: тунельна спектроскопія, струмова розгортка, динамічна провідність.

I.P. Zharkov, O.M. Ivashchenko, V.V. Safronov

INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR TUNNEL SPECTROSCOPY

For automation tunnel spectroscopy experiment provision the not expensive modern information-measuring system is designed. Due to the realization just current scanning it became possible to simplify the hardware component of system and to achieve full automation of voltage-ampere characteristic measurement as well. The features of hardware and possibilities of the software of system are described. The work is carried out within the framework of the Program of scientific instrument making of NAS of Ukraine, grant П2/09-40.

Key words: tunnel spectroscopy, current scanning, dynamic conductance.

Надійшла до редакції 19.03.10