

УДК 53.082.7+ 53.085.3+ 53.087.4+ 537.311.31+ 537.311.322+ 537.311.4

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

АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДЯЩИХ, СВЕРХПРОВОДЯЩИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

С целью эффективного выявления малых нелинейностей в микроконтактной и туннельной спектроскопиях, разработан и изготовлен недорогой серийный анализатор параметров проводящих, сверхпроводящих и полупроводниковых структур.

Кл. сл.: нелинейности, микроконтактная туннельная спектроскопия, сверхпроводящие структуры, анализатор параметров

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных методов получения новой информации о сверхпроводимости является туннельная спектроскопия (ТС) [1]. Метод основан на измерении вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного перехода между двумя проводниками, разделенными тонким непроводящим барьером. При этом основная задача эксперимента сводится к определению производных ВАХ (динамической проводимости $\sigma = \frac{dI}{dU}$ и

ее нелинейности $\sigma' = \frac{d^2I}{dU^2}$), которые позволяют

выяснить зависимость плотности состояний электронов от энергии, а также частоты фононов и молекулярных возбуждений, участвующих в процессе туннелирования. Измерение данных параметров модуляционным методом можно реализовать при развертке по напряжению. В случае исследования сверхпроводящих переходов (СП) данный эксперимент провести сложно из-за малых значений падения напряжения на объекте исследования, необходимости применения длинных линий и пропуска больших токов (1 А и более). Как правило, развертку ВАХ для СП проводят по току, а измеряемые параметры при этом — динамическое сопротивление $R_d = \frac{dU}{dI}$ и нелинейность ампер-

вольтной характеристики (АВХ) $R'_d = \frac{d^2U}{dI^2}$. При этом искомые величины рассчитываются из выражений [2]:

$$\frac{dI}{dU} = \left(\frac{dU}{dI} \right)^{-1}; \quad \frac{d^2I}{dU^2} = - \left(\frac{d^2U}{dI^2} \right) / \left(\frac{dU}{dI} \right)^3.$$

В этой же работе была представлена универсальная схема, позволяющая проводить измерения при развертке по току. Недостатком данной схемы является ограниченный диапазон по устанавливаемому току развертки. Прямое использование мощных усилительных каскадов в управляемом источнике тока (ИТ) приводит к нелинейности функции преобразования ИТ, что отражается на точности измерения производных.

Благодаря высокой чувствительности к измеряемым параметрам длительное время недорогая аппаратура туннельной спектроскопии формировалась на базе мостовых схем [3–7]. Недостатком этого подхода является необходимость применения переменных резисторов для балансировки, что снижает надежность измерительных установок и усложняет их автоматизацию.

С появлением современной элементной базы была разработана серийная аппаратура измерения параметров ВАХ известных западных фирм Agilent и Keithley [8, 9]. Однако из-за ее дороговизны она не получила широкого распространения.

ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Для расширения диапазона устанавливаемых токов применена схема каскадного усилителя мощности с использованием переключаемых опорных резисторов R_0 в цепи отрицательной обратной связи. При этом для увеличения линейности ИТ на второй гармонике сигнала в схеме применен LC-фильтр в цепи обратной связи. Структурная схема анализатора параметров (АП) представлена на рис. 1.

Основными элементами структурной схемы АП являются микропроцессор (МП), два канала источников тока (ИТ1 — развертки, ИТ2 — накачки), измерительный модуль. Команда на проведение цикла измерений подается оператором

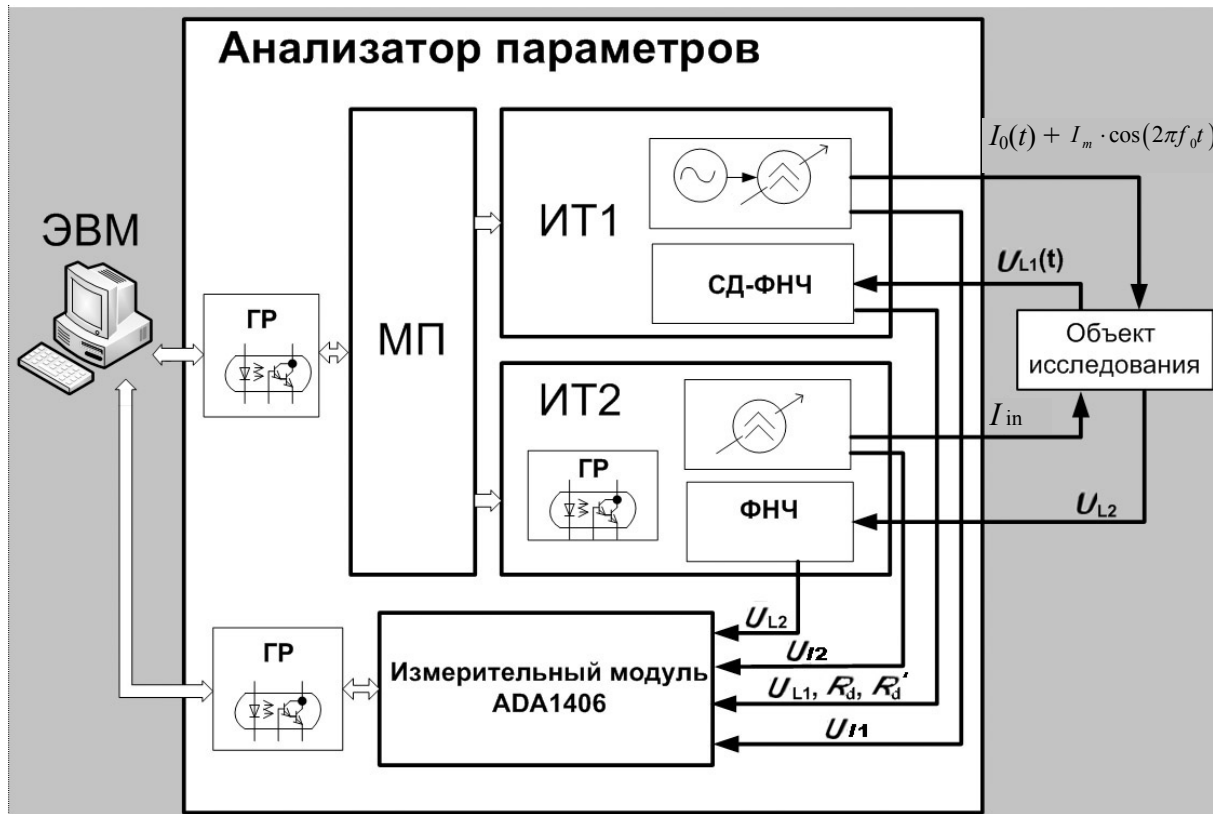


Рис. 1. Упрощенная структурная схема анализатора параметров. ЭВМ — электронно-вычислительная машина; МП — микропроцессор; ИТ1 — измерительный канал источника тока развертки с модуляцией; ИТ2 — измерительный канал источника тока инъекции I_{in} ; СД-ФНЧ — схема синхронного детектирования и фильтрации; ФНЧ — фильтр нижних частот; ГР — гальваническая развязка.

с помощью ЭВМ. Микропроцессор анализатора осуществляет управление разверткой тока с помощью ИТ1 и подает команду на установку необходимого тока накачки с помощью ИТ2. На выходе ИТ1 формируется сигнал тока, который представляет собой сумму ступенчатого тока смещения $I_0(t)$ и гармонического тока модуляции $I_m \cdot \cos(2\pi f_0 t)$, где f_0 — частота модуляции. Падение напряжения $U_{L1}(t)$ на объекте исследования при прохождении данного тока, которое содержит нелинейную составляющую, подается на схему синхронного детектирования и фильтрации. На выходе данной схемы получаем постоянную составляющую U_{L1} , динамическое сопротивление R_d и его производную R'_d . Данные сигналы, а также сигнал напряжения, соответствующего току накачки U_{L2} , сигналы об установленных значениях тока U_{I1} , U_{I2} подаются на вход измерительно-

го модуля. Измерительный модуль ADA1406 обеспечивает оцифровку данных с разрядностью АЦП 14 бит и передачу информации в компьютер.

Новыми и важными элементами структурной схемы являются схемы гальванической развязки (ГР), которые исключили возможность возникновения петель заземления в случае измерения четырехполюсных структур образцов.

На рис. 2 представлена функциональная схема канала источника тока развертки с модуляцией. Удвоенная частота модуляции формируется процессором в виде меандра. Данный сигнал после делителя частоты на 2 подается на схему "аттенюатор—полосовой фильтр" (Ат-ПФ). Новизной решения является то, что данная схема обеспечивает на выходе гармонический сигнал с частотой модуляции f_0 и управляемой амплитудой, что позволяет увеличить чувствительность при измерении малых значений производных.

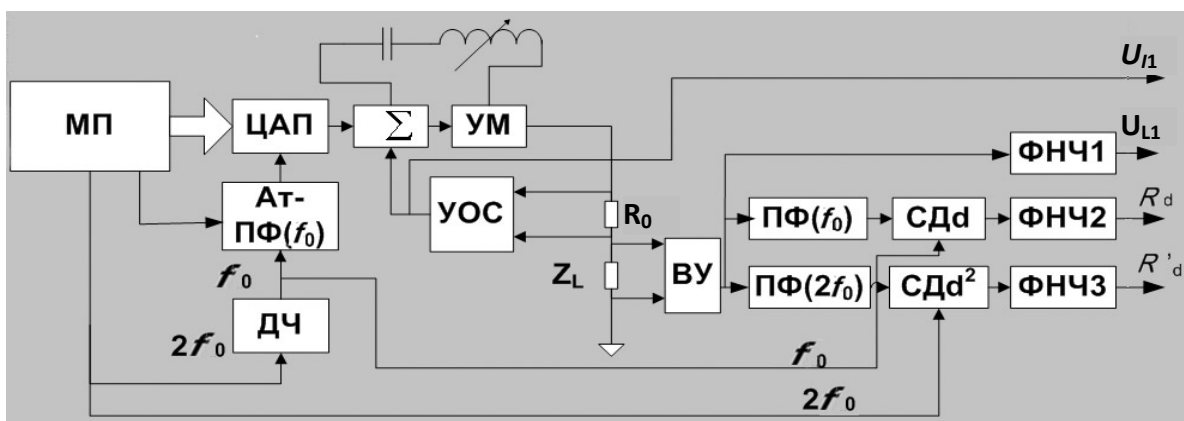


Рис. 2. Функциональная схема канала источника тока развертки с модуляцией.

МП — микропроцессор; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; Ат-ПФ (f_0) — аттенуатор — полосовой фильтр; ДЧ — делитель частоты на 2; УМ — усилитель мощности; УОС — усилитель обратной связи; R_0 — опорный резистор; Z_L — объект исследования; ВУ — входной усилитель; ПФ ($2f_0$), ПФ (f_0) — полосовые фильтры; СДd — синхронный детектор первой производной; СДd² — синхронный детектор второй производной; ФНЧ1, 2, 3 — фильтры нижних частот

Полученный сигнал подается в схему цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), где суммируется с сигналом развертки ступенчатой формы. Непосредственно схема источника тока стабилизирует ток через нагрузку Z_L по сигналу с образцового сопротивления R_0 . Важным элементом ДС является полосовой LC-фильтр в цепи обратной связи, настроенный на удвоенную частоту модуляции $2f_0$. Дело в том, что нелинейность усилителя мощности ИТ, которая на постоянной составляющей и первой гармонике незаметна, на сигнале второй производной вносила существенные систематические погрешности. С помощью данного фильтра удалось повысить линейность схемы.

Падение напряжения на Z_L подается на входной усилитель, полосовые фильтры и синхронные детекторы, которые выделяют сигналы первой и второй производных. Фильтры нижних частот ФНЧ1, 2, 3 — обеспечивают необходимое соотношение сигнал/шум выходных сигналов схемы.

Благодаря управляемому изменению амплитуды модуляции, а также применению многокаскадного усиления измерительных сигналов достигаемая чувствительность измерения производных составляет $2 \cdot 10^{-6}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Количество гальванически развязанных между собой и ЭВМ каналов измерений ВАХ	2
Диапазон задаваемых токов по каждому каналу, А	-1.5 ÷ +1.5

Дискретность установки токов, % от граничного значения диапазона	0.03
Время установки заданного тока на образце, мкс	20
Разрядность АЦП	14
Частота дискретизации АЦП, кГц	50
Диапазон измерения напряжения, В	-10 ÷ +10
Погрешность измерения напряжения не выше, %	± 0.05
Частота модуляции по 1-му каналу, кГц	4
Уровень модуляции, ед. мл. разр.	1, 2, 5, 10
Питание, В	~ 220 ± 10
Потребляемая мощность, Вт	60

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный анализатор параметров с возможностью полной автоматизации развертки тока, измерений и визуализации не уступает современным аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adler J.G., Chen T.T., Straus J. High Resolution Tunneling spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. 1971. V. 42, N 3. P. 362–368.
2. Blackford B.L. Low impedance supply for tunnel junctions // Rev. Sci. Instrum. 1971. V. 42, N 8. P. 1198–1202.
3. Данюк Д.Л., Пилько Г.В. Генератор импульсов напряжения треугольной формы // ПТЭ. 1990. № 1.

- С. 115–116.
4. Данюк Д.Л., Пилько Г.В. Источник развертывающего тока // Научное приборостроение. 1991. № 3. С. 132–136.
5. Житницкий Е.А., Захаров А.А. Универсальная схема для измерения малых нелинейностей вольт-амперных характеристик // ПТЭ. 1992. № 4. С. 197–200.
6. Дижур Е.М., Федоров А.В. Туннельная спектроскопия на постоянном токе и цифровой метод анализа экспериментальных данных // ПТЭ. 2005. № 4. С. 38–42.
7. Вьюхин В.Н., Попов Ю.А. Спектрометр туннельных токов // ПТЭ. 2009. № 4. С. 98–101.
8. URL: (<http://www.testequity.com/products>).
9. URL: (<http://www.keithley.com/products/semiconductor/parametricanalyzer>).

Институт физики НАН Украины, Киев

Контакты: Жарков Иван Павлович,
zharkov@iop.kiev.ua

Материал поступил в редакцию 22.05.2012

ANALYZER OF PARAMETERS FOR CONDUCTING, SUPERCONDUCTING AND SEMICONDUCTOR STRUCTURES

I. P. Zharkov, A. N. Ivaschenko, V. V. Safronov, A. I. Solonetsky

Institute of Physics of NAS of Ukraine, Kiev

For the purpose of efficient finding out of small nonlinearities in micro-contact and tunnel spectroscopy it is designed and manufactured the inexpensive serial analyzer of parameters of conducting, superconducting and semiconductor structures.

Keywords: nonlinearities, microcontact tunnel spectroscopy, superconducting structures, analyzer of parameters