

*АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВАМИ*

УДК 621.376

DOI: 10.17212/2782-2230-2023-3-9-22

**РАЗРАБОТКА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАНОСТРУКТУР***

С.М. СМАГИН¹, Е.С. КОПТЕВ², М.М. БАБИЧЕВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных. E-mail: kukishmen1972@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры защиты информации. E-mail: koptev@corp.nstu.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры защиты информации. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

Развитие электронной техники связано с необходимостью постоянного проведения всё более новых и сложных исследований. В наше время много внимания уделяется изучению свойств полупроводниковых наноструктур, получивших широкое распространение в нанoeлектронике, наномеханике, материаловедении и многих других областях. Схема измерения сопротивлений полупроводниковых наноструктур (представляет собой четырехпроводную схему на квазипостоянном токе), используемая на данный момент, имеет недостаток, не позволяющий измерять большие значения сопротивлений (килоомы и более). В видоизмененной схеме, в которой этот недостаток устранен, для работы необходимо использование дополнительного измерительного прибора. Главной целью работы была разработка синхронного детектора для измерения значений тока в четырехпроводной схеме измерения сопротивлений наноструктур. В тексте статьи раскрываются основные принципы построения синхронных детекторов, их особенности, функции и области применения. Также приведены схемы самого измерительного устройства и его составных частей. Основная цель статьи – раскрыть принцип работы предложенного синхронного детектора. В конце статьи представлены характеристики разработанного устройства и приведены графики, иллюстрирующие работу каждой его части.

Ключевые слова: полупроводниковые наноструктуры, измерение сопротивления, синхронный детектор, четырехпроводная схема, квазипостоянный ток, опорный сигнал, умножитель, фильтр нижних частот

* Статья получена 02 июня 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки электронных устройств, различных приборов и схем важно постоянно проводить новые и более сложные исследования. В настоящее время большое внимание уделяется изучению свойств полупроводниковых наноструктур. Наноструктуры широко используются в наномеханике, наноэлектронике, материаловедении и многих других областях. В настоящей статье рассмотрена установка, которая используется для измерения сопротивлений полупроводниковых наноструктур. Установка реализует четырехпроводную измерительную схему на квазипостоянном токе. Для повышения точности измерений и подавления шума в этой схеме используется синхронный детектор. Однако из-за некоторых ограничений с помощью этой схемы можно измерить только низкие значения сопротивлений (ориентировочно менее 1 кОм). В статье описывается метод расширения диапазона измеряемых сопротивлений (до сотен тысяч и миллионов ом), процесс разработки дополнительного синхронного детектора, необходимого для новой схемы.

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА

На рис. 1 изображена измерительная схема.

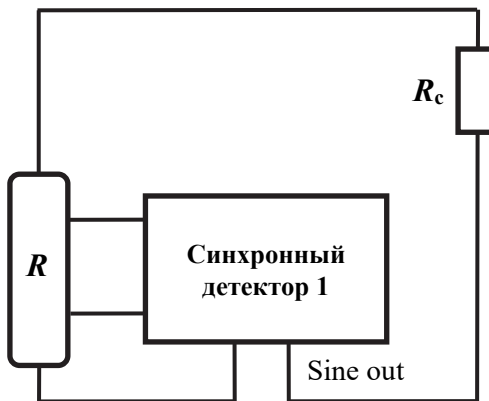


Рис. 1. Четырехпроводная схема измерения сопротивления

Fig. 1. Four-wire resistance measurement circuit

Это четырехпроводная схема измерения сопротивлений со стабилизацией тока. В ней напряжение смещения представляет собой синусоидальный сигнал, поступающий с выхода (sine out) синхронного детектора. Для стабилизации тока в цепи используется высокоомный резистор R_c (несколько мегаом). Синхронный детектор измеряет напряжение на проводнике. Однако основная особенность этой схемы заключается в том, что стабилизирующее сопротивление должно быть значительно выше измеряемого сопротивления ($R \ll R_c$). Для измерения более высоких сопротивлений наноструктур в схеме необходимо использовать более высокие значения R_c и напряжения смещения.

Для расширения диапазона измеряемых сопротивлений эту схему необходимо модифицировать. В результате была разработана схема со стабилизацией напряжения (рис. 2).

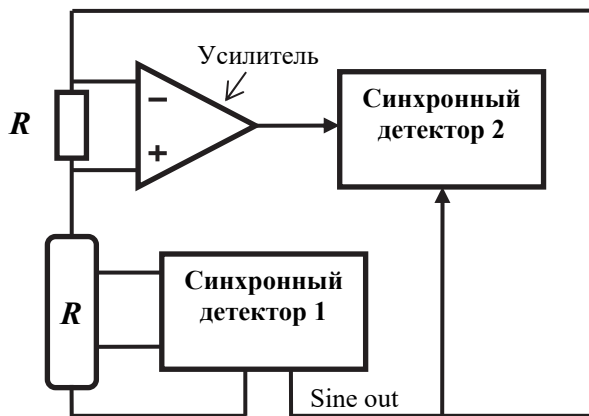


Рис. 2. Схема четырехпроводного измерения сопротивления со стабилизацией по напряжению

Fig. 2. Four-wire resistance measurement circuit with voltage stabilisation

В этой схеме для измерения напряжения на наноструктуре используется один синхронный детектор [1]. Для измерения тока в цепи стоит шунтирующий резистор (R на рис. 2) с очень низким сопротивлением и предусилитель. Выход предусилителя подключен ко второму синхронному детектору. Первый синхронный детектор устанавливает ток в цепи и генерирует опор-

ный сигнал для второго. Целью работы была разработка, создание и изучение характеристик дополнительного синхронного детектора. Этот синхронный детектор используется для измерения напряжения на шунте. С помощью новой схемы можно измерять сопротивления со значениями в несколько мегаом.

2. ПРИНЦИП СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Синхронный детектор – это устройство, используемое для обнаружения и измерения очень малых сигналов переменного тока (до нескольких нановольт) [2]. С помощью синхронного детектора можно проводить точные измерения даже при наличии шума, в несколько тысяч раз превышающего сам сигнал. Основной принцип работы синхронного детектора основан на использовании метода, известного как фазовое обнаружение. Этот метод позволяет выделить часть измеряемого сигнала на определенной опорной частоте и фазе. В то же время шумовые сигналы с частотами, отличающимися от опорной частоты, подавляются и не влияют на измерения [3]. На рис. 3 показана схема простейшего синхронного детектора.

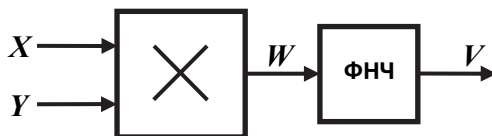


Рис. 3. Схема простейшего синхронного детектора

Fig. 3. The scheme of the simplest lock-in

Для работы синхронные детекторы используют опорный сигнал. В обычном случае сигнал, который необходимо измерить, имеет фиксированную частоту (на генераторе сигналов), и на этой опорной частоте детектор будет определять результаты измерений. Измеряемый сигнал синусоидальной формы будет выглядеть как $V_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)$, где V_s – амплитуда измеряемого сигнала; ω_s – частота измеряемого сигнала; t – время; φ_s – фаза измеряемого сигнала. Опорный сигнал имеет вид $V_r \sin(\omega_r t + \varphi_r)$, где V_r – амплитуда опорного сигнала; ω_r – частота опорного сигнала; φ_r – фаза опорного сигнала. Пусть измеряемый сигнал будет X , а опорный Y . В синхронном детекторе

эти сигналы усиливаются и перемножаются. В результате на выходе умножителя будут две синусоидальных волны (1):

$$\begin{aligned} W = V_s V_r \sin(\omega_s t + \omega_s) \sin(\omega_r t + \omega_r) = \frac{1}{2} V_s V_r \cos([\omega_s - \omega_r]t + \omega_s - \omega_r) - \\ - \frac{1}{2} V_s V_r \cos([\omega_s + \omega_r]t + \omega_s + \omega_r). \end{aligned} \quad (1)$$

Один из сигналов, полученных после умножения, представляет собой сумму частот $(\omega_s - \omega_r)$, другой – разность частот $(\omega_s + \omega_r)$. Далее полученный сигнал пропускается через фильтр нижних частот, где подавляются высокочастотные составляющие. В общем случае сигнал на выходе будет равен нулю, однако при равенстве ω_c и ω_0 сигнал в виде разности частот станет постоянным и в результате на выходе фильтра будет

$$V = \frac{1}{2} V_s V_r \cos(\varphi_s - \varphi_r). \quad (2)$$

Постоянный сигнал, полученный на выходе фильтра (2), будет пропорционален амплитуде измеряемого сигнала.

Как уже упоминалось ранее, синхронный детектор может подавлять шумовые сигналы. Обычно входной сигнал содержит шумовую составляющую. Поскольку фильтр нижних частот пропускает только сигналы с частотами, очень близкими к опорной частоте, шумовые сигналы с частотами, сильно отличающимися от опорной частоты, будут подавляться на выходе фильтра. В результате шумовые сигналы с частотами, отличающимися от опорной частоты, будут давать на выходе очень малые значения.

Параметр подавления шума в значительной степени зависит от крутизны характеристики фильтра, а также от его полосы пропускания. Фильтр с более крутой характеристикой будет подавлять шумовые сигналы с частотами, близкими к опорной частоте, а более узкая полоса пропускания уменьшит возможность передачи ненужных сигналов. Поскольку ширина полосы пропускания фильтра определяет ширину обнаружения сигнала, необходимый результат на выходе фильтра даст (не будет зависеть от фильтра) только сигнал с частотой, согласованной с опорной.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ФАЗЫ

Как было описано ранее, для измерения синхронному детектору необходим опорный сигнал, соответствующий частоте измеряемого сигнала ($\omega_s = \omega_r$). Кроме того, фазы также должны быть одинаковыми и не меняться с течением времени. Так как в противном случае в (2) $\cos(\varphi_s - \varphi_r)$ будет меняться, и из-за этого выходной сигнал не будет постоянным. Однако есть способ полностью устранить эту фазовую зависимость.

На выходе синхронного детектора будет сигнал, пропорциональный $V = V_s \cos(\varphi_s - \varphi_r)$, где $\varphi = (\varphi_s - \varphi_r)$, φ – это разность фаз между опорным сигналом и измеряемым сигналом. Если изменять φ_r , эту разность можно сделать равной нулю. В результате этого можно измерить V_s (так как $\cos(0) = 1$). И наоборот, если $\varphi = 90^\circ$, на выходе будет нуль. Синхронные детекторы, в устройстве которых один умножитель, называются однофазными и на выходе имеют $V_s \cos(\varphi)$.

Если в устройство добавить второй умножитель, эту фазовую зависимость можно убрать. При этом опорный сигнал, подаваемый на второй умножитель, необходимо повернуть на 90° (т. е. $V_r \sin(\omega_r t + \varphi_r + 90^\circ)$). На выходе фильтра будет

$$V = \frac{1}{2} V_s V_r \cos(\varphi_s - \varphi_r), \quad (3)$$

$$V_2 \sim V_s \sin(\varphi),$$

где V_2 – сигнал, полученный со второго умножителя.

В результате на выходе получается два сигнала, один из которых пропорционален $\cos(\varphi)$, а другой – $\sin(\varphi)$. Первый из них можно назвать A , а второй – B :

$$\begin{aligned} A &= V_s \cos(\varphi), \\ B &= V_s \sin(\varphi). \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (4) представляют измеряемый сигнал как вектор, относящийся к опорному сигналу; A – это синфазная составляющая, а B – квадратурная составляющая, так как при $\varphi = 0$ A будет определять сигнал, а B будет равен нулю.

При вычислении модуля R вектора сигнала фазовой зависимости нет:

$$R = \sqrt{A^2 + B^2} = V_s, \quad (5)$$

R определяет амплитуду сигнала и не будет зависеть от разности фаз опорного и входного сигналов.

Как итог, двухфазный синхронный детектор состоит из двух умножителей. На его вход подаются два опорных сигнала, друг от друга отличающихся по фазе на 90° . С помощью такого вида детекторов можно непосредственно измерять A и B . Кроме этого, появляется возможность определения разности фаз измеряемого и опорного сигналов:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{A}{B}\right). \quad (6)$$

Далее будут подробно рассмотрены основные части синхронного детектора, разобраны различные варианты их создания и описаны принципы работы.

4. РАЗРАБОТКА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА

На рис. 4 показана схема разработанного синхронного детектора. Также на ней изображена последовательность операций, выполняемых в каждом блоке.

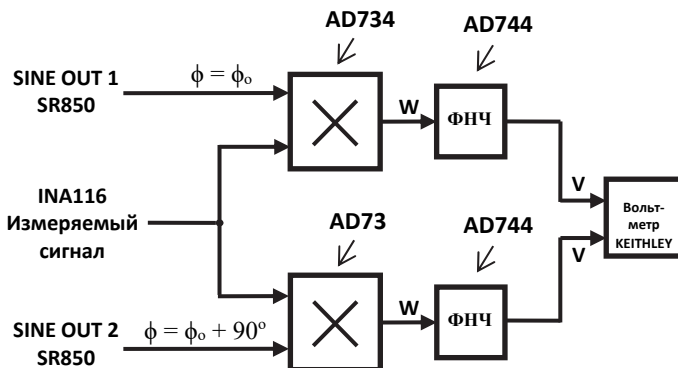


Рис. 4. Схема разработанного синхронного детектора

Fig. 4. The scheme of the developed lock-in

В синхронном детекторе были сделаны два канала. На один из них подается опорный сигнал. Опорный сигнал, подаваемый на второй, повернут на 90° . Также на вход каждого умножителя [4] подается измеряемый сигнал. Затем каждый из выходных сигналов умножителей, показанных на рис. 5, подается на фильтр нижних частот. Высокочастотная составляющая сигналов подавляется фильтрами. После этого выходные сигналы поступают на программируемый вольтметр. Вольтметр выполняет расчеты, необходимые для получения конечного значения, и вносит корректировки для повышения точности измерений.

Умножитель был основан на микросхеме AD734 [5]. Базовая схема умножения, рекомендованная производителем AD734, показана на рис. 5. В данном случае использовались следующие входы: X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , VP , VN , W . Умножаемые сигналы (опорный и измеряемый) подаются на входы X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 ; W (выход умножителя) был подключен к фильтру нижних частот; VP был подключен к источнику $+15$ В, а VN к источнику -15 В. Входы U_0 , U_1 , U_2 и Z_2 были подключены к земле. Кроме того, оба входа питания были подключены к земле через конденсатор. Конденсаторы были взяты на основе предложенной схемы и равны $0,1$ мкФ.

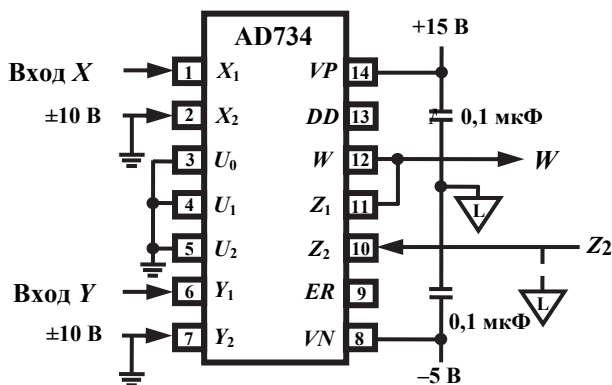


Рис. 5. Базовая схема умножения

Fig. 5. The basic multiplication circuit

На вход подавались два сигнала с частотой 10 Гц. Напряжение этих сигналов изменялось от нуля до 9 В. На рис. 6 показаны графики, основанные на измеренных значениях, и графики, основанные на теоретических

расчетах. Коэффициенты умножения, рассчитанные в ходе изучения умножителей, равны 0,0266 и 0,0273. Для моделирования схемы было использовано программное обеспечение EasyEDA [6].

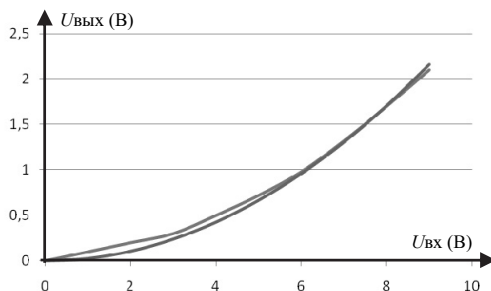


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения от входного

Fig. 6. The dependence of the output voltage on the input

Следующей разработанной частью синхронного детектора является ФНЧ [7]. Поскольку ФНЧ будет использоваться в синхронном детекторе, его передаточная характеристика должна иметь резкий спад и узкую полосу пропускания. Эти параметры важны для того, чтобы фильтр мог пропускать только самые близкие частоты сигналов (опорного и измеряемого) и подавлять остальные [8].

В качестве ФНЧ была взята схема фильтра Чебышева третьего порядка со спадом 24 дБ на октаву. Этот тип фильтров обладает наиболее резкой передаточной характеристикой по сравнению с другими фильтрами того же порядка. Схема этого фильтра на основе микросхемы AD744 [9] показана на рис. 7. Частота среза 2 Гц. Предполагаемые частоты, на которых будет работать этот фильтр, составляют 10...15 Гц.

После сборки ФНЧ была проверена их работа. На фильтр подавался синусоидальный сигнал амплитудой 5 В. Характеристики фильтров показаны на рис. 8. Рассчитанные отклонения в полосе пропускания составили 11,9 для первого фильтра и 11,2 для второго фильтра.

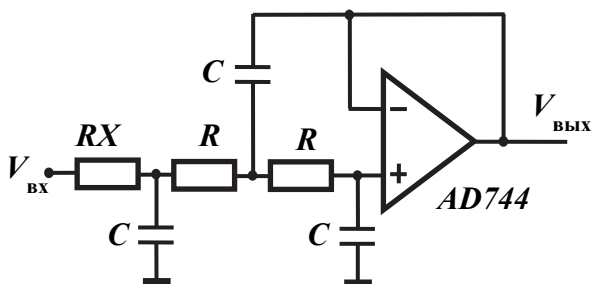


Рис. 7. Схема ФНЧ

Fig. 7. LPF circuit

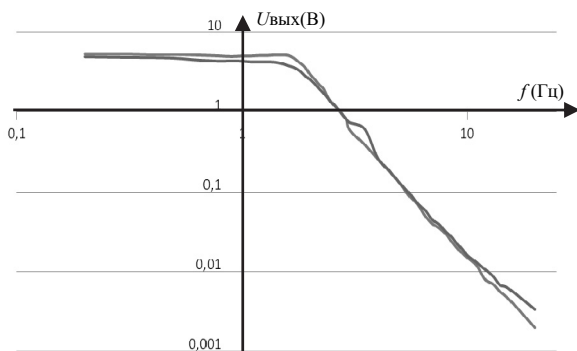


Рис. 8. Характеристики ФНЧ

Fig. 8. LPF characteristics

После сборки и изучения работы синхронного детектора были получены следующие характеристики (таблица). Микросхема INA116 [10] использовалась для схемы предварительного усилителя.

Параметры синхронного детектора
Lock-in characteristics

Характеристики	Параметры	
	Название параметра	Значение
1	Входы напряжения	Дифференциальный/синфазный
2	Макс. входное напряжение	12.5 В
3	Порог чувствительности	Ниже 100 мкВ
4	Входное сопротивление	2.5 МОм
5	Входная емкость	5 пФ
6	Предел погрешности	$\pm 0.8 \%$
7	Динамический диапазон	Более 45 дБ
8	Частотный диапазон	От 2 Гц до 8.5 МГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемой работе показана модификация четырехпроводной схемы измерения для высоких сопротивлений полупроводниковых наноструктур (порядка 10^6 Ом). Одной из основных частей этой схемы является синхронный детектор для измерения тока. Исследование направлено на его разработку и изучение.

Полученный детектор имеет характеристики, соответствующие поставленным целям. Материал статьи может быть использован для создания высокоточных схем, способных измерять не только сопротивление, но и другие электрические характеристики, такие как фазовый сдвиг. Это может быть полезно для дальнейших исследований полупроводниковых наноструктур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stanford Research Systems. MODEL SR850. DSP Lock-In Amplifier Manual. – URL: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR850m.pdf> (accessed: 31.08.2023).

2. Степанов А.В. Синхронный детектор: практикум / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра физики колебаний. – М., 1997. – 16 с.
3. Синхронный детектор // Физическая энциклопедия: сайт. – URL: http://femto.com.ua/articles/part_2/3657.html (дата обращения: 31.08.2023).
4. Аналоговые перемножители сигналов. – URL: <https://mydocx.ru/1-31102.html> (дата обращения: 31.08.2023).
5. Analog Devices AD734 – Datasheet. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/826/DOC031826798.pdf> (accessed: 07.09.2023).
6. EasyEDA. Online PCB design & circuit simulator. – URL: <https://easyeda.com/> (accessed: 31.08.2023).
7. Фильтр низкой частоты – что это такое? – URL: https://www.lcard.ru/lexicon/low_pass_filter (дата обращения: 31.08.2023).
8. Сафронова Ю.Ф., Павлейно М.А. Активные фильтры на основе операционного усилителя / Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра радиофизики. – СПб., 2019. – 29 с.
9. Analog Devices AD744 Datasheet. – URL: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/analogdevices/AD744-877391.pdf> (accessed: 07.09.2023).
10. Texas Instruments INA116 Datasheet. – URL: <https://datasheet.dip8.ru/10d63ea819387dd64c94ba1e0258fda6.pdf> (accessed: 07.09.2023).

Смагин Семен Михайлович, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение пространственного разрешения в голографии и микроскопии. E-mail: kukishmen1972@mail.ru

Коптев Евгений Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – информационно-измерительные технологии и метрология. E-mail: koptev@corp.nstu.ru

Бабичев Михаил Михайлович, старший преподаватель кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – метрология и измерительные устройства. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2230-2023-3-9-22

Development of a lock-in for measuring the resistances of nanostructures*

S.M. Smagin¹, E.S. Koptev², M.M. Babichev³

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant the Department of Data Acquisition and Processing Systems. E-mail: kukishmen1972@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of physical and mathematical sciences, Department of Information Security. E-mail: koptev@corp.nstu.ru

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer of the Department of Information Security. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

This paper presents a circuit which is used to measure the resistances of nanostructures and describes the principle of its operation. Next, stated a problem in the operation of this circuit and presented a method for solving this problem. The main goal of the work was to develop a lock-in for measuring current values in a four-wire circuit for measuring the resistance of nanostructures. The text reveals the basic principles of construction of lock-in amplifiers, its nuances and functions and where they can be used. The schemes of the device itself, its components are also given. The main purpose of this paper is to convey information on how lock-in amplifiers are work how they can be made and what they require for proper functioning. At the end of the article, the characteristics of the developed lock-in are presented and graphs illustrating the operation of each part of it are given.

Keywords: semiconductor nanostructures, lock-in, four-wire circuit, reference signal, multiplier, low-pass filter

REFERENCES

1. Stanford Research Systems. *MODEL SR850. DSP Lock-In Amplifier Manual*. Available at: https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/_manuals/SR850m.pdf (accessed 31.08.2023).
2. Stepanov A.V. *Sinkhronnyi detektor: praktikum* [Lock-in amplifier. Practicum]. Lomonosov Moscow State University, Department of Oscillation Physics. Moscow, 1997. 16 p.
3. Sinkhronnyi detektor [Lock-in amplifier]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [A physical encyclopedia]. Website. Available at: http://femto.com.ua/articles/part_2/3657.html (accessed 31.08.2023).
4. *Analogovye peremnozhiteli signalov* [Analog signal multipliers]. Available at: <https://mydocx.ru/1-31102.html> (accessed 31.08.2023).

* Received 02 June 2023.

5. *Analog Devices AD734 – Datasheet*. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/826/DOC031826798.pdf> (accessed 07.09.2023).
6. EasyEDA. *Online PCB design & circuit simulator*. Available at: <https://easyeda.com/> (accessed 31.08.2023).
7. *Fil'tr nizkoi chastoty – chto eto takoe?* [Low-pass filter – what is it?]. Lcard.ru https://www.lcard.ru/lexicon/low_pass_filter (accessed 31.08.2023).
8. Safronova Yu.F., Pavleino M.A. *Aktivnye fil'try na osnove operatsionnogo usilitelya* [Active filters based on an operational amplifier]. St. Petersburg State University, Department of Radiophysics. St. Petersburg, 2019. 29 p.
9. *Analog Devices AD744 Datasheet*. Available at: <https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/analogdevices/AD744-877391.pdf> (accessed 07.09.2023).
10. *Texas Instruments INA116 Datasheet*. Available at: <https://datasheet.dip8.ru/10d63ea819387dd64c94ba1e0258fda6.pdf> (accessed 07.09.2023).

Для цитирования:

Смагин С.М., Контев Е.С., Бабичев М.М. Разработка синхронного детектора для измерения сопротивлений наноструктур // Безопасность цифровых технологий. – 2023. – № 3 (110). – С. 9–22. – DOI: 10.17212/2782-2230-2023-3-9-22.

For citation:

Smagin S.M., Koptev E.S., Babichev M.M. Razrabotka sinkhronnogo detektora dlya izmereniya soprotivlenii nanostruktur [Development of a lock-in for measuring the resistances of nanostructures]. *Bezopasnost' tsifrovyykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2023, no. 3 (110), pp. 9–22. DOI: 10.17212/2782-2230-2023-3-9-22.