07

# Синапс-резистор на основе перехода полупроводник-металл в диоксиде ванадия

© Д.А. Калмыков,[1] В.Ш. Алиев,[1,2] С.Г. Бортников[1]

[1]Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия
e-mail: aliev@isp.nsc.ru

*Поступило в Редакцию 26 декабря 2024 г.*
*В окончательной редакции 2 февраля 2025 г.*
*Принято к публикации 9 марта 2025 г.*

Разработан и исследован искусственный синапс (синапс-резистор) для нейроморфных схем, принцип работы которого основан на использовании фазового перехода полупроводник-металл в диоксиде ванадия. Тонкие поликристаллические пленки диоксида ванадия были синтезированы методом ионно-лучевого распыления-осаждения. Синапс-резистор был сформирован методом фотолитографии на $SiO_2$ мембране. Линейные размеры синапс-резистора $\approx 100\,\mu$m. Исследованы электрические характеристики и продемонстрирована возможность управления сопротивлением синапс-резистора электрическими импульсами. Быстродействие синапс-резистора при указанных размерах составляло около $20\,\mu$s. Предложена электрическая схема реализации искусственного нейрона МакКаллока-Питтса на основе синапс-резисторов. Конструкция синапс-резистора допускает масштабирование до размеров в несколько микрон, что позволит снизить энергопотребление и увеличит быстродействие более чем в 100 раз.

**Ключевые слова:** диоксид ванадия, фазовый переход полупроводник–металл, искусственный синапс, аналоговые нейронные сети.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60663.469-24

## Введение

Нейрокомпьютер — устройство переработки информации подобное нервной системе биологических организмов [1]. Подобие можно рассматривать как в русле парадигмы потоков информации, так и в русле аналоговых электрических схем. Тот и другой подход может быть смоделирован программными средствами на традиционном фон-неймановском компьютере. Однако достигаемое в этом случае быстродействие и энергоэффективность при решении таких важных практических задач, как распознание, управление и прогнозирование, существенно уступает нервной системе биологических организмов [2]. Неэффективность фон-неймановского компьютера послужило мотивацией для создания специализированных аппаратных средств. На уровне потоков информации таким аппаратным решением является создание многоядерных процессоров. В настоящее время это направление развития нейрокомпьютеров является наиболее развитым. Однако производительность таких систем возрастает как логарифм от количества ядер и упирается в проблему „эффективного параллелизма“ [3].

Создание нейрокомпьютеров в парадигме аналоговых электрических схем предполагает физическую реализацию устройств, выполняющих функции искусственного нейрона МакКаллока-Питтса [4], в котором ключевым элементом является синапс. Количество синапсов в нейронной сети на 2–3 порядка больше, чем самих нейронов. Поэтому физическая реализация именно синапсов является ключевой проблемой для создания нейрокомпьютеров в виде аналоговой электрической схемы. Синапс фактически являются элементом долговременной многоуровневой памяти, состояние которой может быть изменено внешним электрическим импульсом. В настоящее время искусственные синапсы были реализованы на основе КМОП структур с запоминающими электрическими конденсаторами [5] и на основе мемристоров со структурой металл-диэлектрик-металл [6–8], в которых запоминающей средой является специально приготовленный диэлектрический слой. Этот слой обладает свойством обратимого изменения своей проводимости под действием внешних электрических импульсов.

Альтернативным подходом в создании искусственного нейрона является использование тонких поликристаллических пленок диоксида ванадия ($VO_2$). Кристалл $VO_2$ является мотт-пайерлсовским полупроводником с температурой фазового перехода полупроводник-металл (ПМ) 341 K [9]. Эта температура близка к комнатной температуре, что является важной особенностью данного материала для его практического применения. Так же как в кристаллах в поликристаллических пленках $VO_2$ наблюдается фазовый переход ПМ, и при температуре фазового перехода скачок в величине проводимости составляет 2–3 порядка. Эти пленки были использованы для создания искусственной сомы [10], которая является активной частью нейрона. Было показано, что такая

искусственная сома может выполнять практически все функции биологической сомы, а именно сумматора, порогового устройства и генератора электрических импульсов. Однако создать искусственный синапс на основе пленок $VO_2$ до настоящего времени не удалось, хотя был предпринят ряд попыток [11–13]. Создание синапса открывает возможность, используя только один функциональный материал (поликристаллические пленки диоксида ванадия), сформировать полностью искусственный нейрон МакКаллока-Питтса в одном технологическом цикле. Ранее авторами была высказана идея устройства искусственного синапса [14]. Конструкция устройства была основана на использовании особенностей фазового перехода ПМ в $VO_2$ и пространственном совмещении синапс-резистора и нагревателя. Целью настоящей работы являлась физическая реализация искусственного синапса в виде электрического резистора (синапс-резистора) на основе тонкой пленки диоксида ванадия и исследование его электрических характеристик.

## 1. Методы исследования

### 1.1. Синтез пленок $VO_2$

Для синтеза пленок $VO_2$ был использован метод ионно-лучевого распыления-осаждения (IBSD — Ion Beam Sputtering Deposition). Данный метод подробно описан в работе [15]. Остаточное давление в вакуумной камере перед нанесением пленок составляло $7 \cdot 10^{-5}$ Pa. Для распыления использовалась металлическая мишень ванадия (марка МнВ-1, V > 99.5 %). Мишень распылялась ионами $Ar^+$ с энергией 1200 eV. Плотность ионного тока, направляемого на мишень, выдерживалась постоянной и составляла 1.0 mA/cm$^2$. Для получения оксидов в камеру подавался кислород особой чистоты ($O_2$ > 99.999 %). Парциальное давление кислорода в зоне роста составляло около $1.0 \cdot 10^{-2}$ Pa. В качестве подложек использовались двухсторонне полированные пластины Si(100) КЭФ-4.5, покрытые термическим $SiO_2$. Температура подложек в процессе роста не превышала 350 K. Скорость напыления и толщина пленок контролировалась кварцевыми микровесами (Maxtek, Inc.). Типичная толщина пленок составляла около 100 nm. Синтезированные пленки являлись аморфными по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Hitachi SU8220), и в них на зависимости удельного сопротивления от температуры фазовый переход ПМ не наблюдался. Фазовый переход ПМ появлялся после кристаллизации (по данным СЭМ) аморфных пленок путем отжига при температуре 873 K в атмосфере аргона особой чистоты (Ar > 99.999 %). Скорость разогрева/охлаждения при отжиге составляла около 10 K/min.

### 1.2. Синапс-резистор

Синапс-резистор — это пленочная планарная структура, у которой латеральные размеры значительно превышают толщину пленки. Для характеристики электрического сопротивления пленок такого рода структур используется понятие слоевого сопротивления [16]. Слоевое сопротивление ($R_s$) связано с удельным электрическим сопротивлением ($\rho$) материала пленки по формуле: $R_s = \rho/d$, где $d$ — толщина пленки.

Фазовый переход ПМ в выращенных нами поликристаллических пленках $VO_2$ проявлялся в виде скачка слоевого электрического сопротивления при температуре 325 K (рис. 1). Это свойство пленок $VO_2$ открыло возможность создания резисторов, у которых при одной и той же температуре, равной температуре фазового перехода ПМ, может быть различное сопротивление в диапазоне, определяемом шириной гистерезиса на зависимости $R_s(T)$. На основе таких пленок были изготовлены планарные пленочные резисторы. Как видно на рис. 1, ширина диапазона изменения величин сопротивления резистора может достигать 7 dB. Было установлено, что управление величиной электрического сопротивления синапс-резистора возможно путем разогрева и охлаждения пленки $VO_2$ вблизи температуры фазового перехода. Разогрев пленки $VO_2$ осуществлялся дополнительным резистором $R_h$, выполняющим функции нагревателя.

Предварительные эксперименты на кремниевых и стеклянных подложках показали, что теплоизоляция синапс-резистора и нагревателя от подложки является критически важной для работы устройства [17]. Поэтому для теплоизоляции от кремниевой подложки синапс-резистор и нагреватель были размещены на тонкой (300 nm) мембране термического $SiO_2$, сформированной на кремниевой подложке путем влажного окисления, и совмещены друг с другом (рис. 2, *a*).

Поликристаллическая пленка $VO_2$ была расположена между металлическими электродами (Au/Ni). Нагреватель находился над пленкой $VO_2$ синапс-резистора и

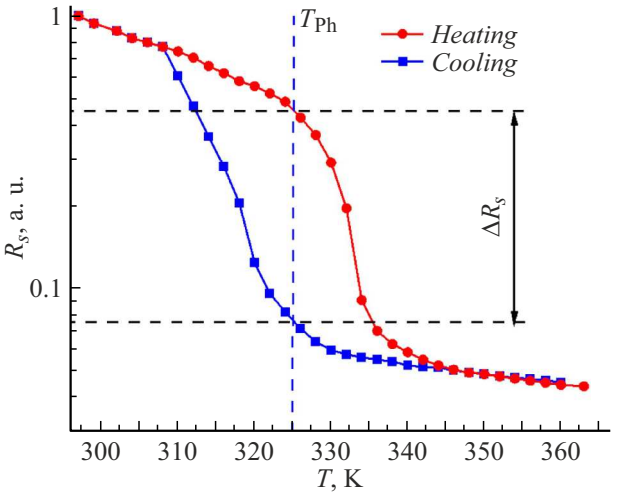



**Рис. 1.** Зависимость слоевого сопротивления пленки $VO_2$ на мембране от температуры $R_s(T)$. $T_{Ph}$ — температура фазового перехода ПМ. $\Delta R_S$ — диапазон возможных величин слоевого сопротивления при температуре ФП.

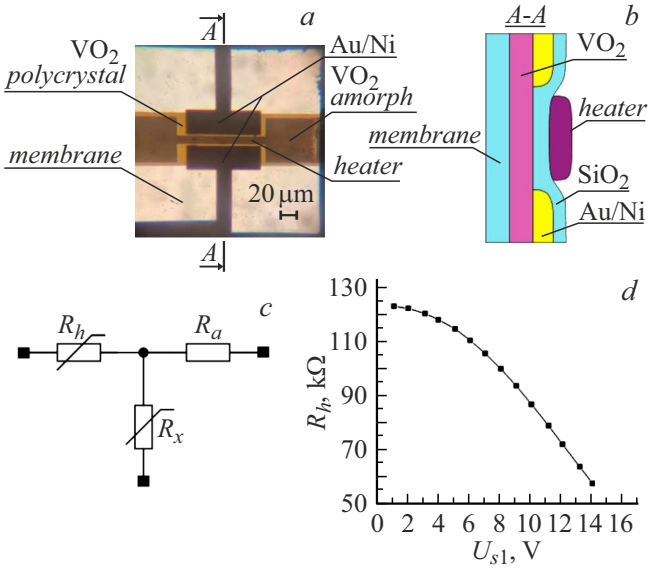



**Рис. 2.** Конструкция синапс-резистора: $a$ — фотография на просвет синапс-резистора и нагревателя на мембране в оптическом микроскопе; $b$ — схематический рисунок поперечного сечения синапс-резистора и нагревателя; $c$ — электрическая схема соединений: $R_h$ — нагреватель, $R_x$ — синапс-резистор, $R_a$ — дополнительный резистор (на фотографии отсутствует); $d$ — зависимость электрического сопротивления $R_h$ от напряжения $U_{s1}$.

был отделен от нее тонким слоем диэлектрика (плазмохимический $SiO_2$) (рис. 2, $b$). В такой конструкции тепло от нагревателя эффективно передавалось $VO_2$ пленке синапс-резистора. Мембрана была приготовлена методом глубинного анизотропного травления кремниевой подложки Si(100) в 20 % водном растворе гидроксида тетраметиламмония. В качестве нагревателя использовался резистор на основе пленки аморфного оксида ванадия, которая не проходила операцию отжига, и поэтому в пленке не наблюдался фазовый переход ПМ. Однако известно, что такие пленки используются в качестве чувствительных слоев в микроболометрических матрицах и обладают высоким температурным коэффициентом сопротивления [18]. Поэтому электрическое сопротивление нагревателя существенно зависело от разогрева его внешним источником напряжения (рис. 2, $d$). Ячейка с синапс-резистором, изготовленная по микроэлектронной технологии, состояла из трех резисторов (рис. 2, $c$). Резисторы $R_x$ и $R_h$ располагались на мембране, а резистор $R_a$ — вне мембраны на подложке Si(100), покрытой термическим $SiO_2$. Резистор $R_a$ не разогревался в процессе работы синапс-резистора, и его сопротивление оставалось постоянным.

### 1.3. Электрическая схема

Исследуемый синапс-резистор $R_x$ был включен в электрическую схему (рис. 3), предполагающую возможность параллельного подключения $n$ аналогичных

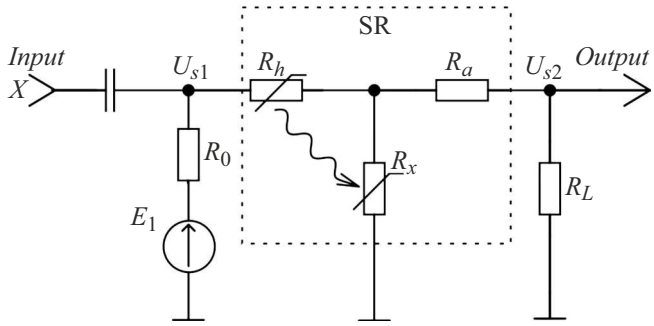



**Рис. 3.** Схема для измерений параметров синапс-резистора. SR — блок с синапс-резистором. $U_{s1}$ и $U_{s2}$ — напряжения на входе и выходе блока SR соответственно. Резисторы $R_h$ и $R_x$ связаны друг с другом посредством теплопередачи.

схем к нагрузочному сопротивлению $R_L$. Это позволило эмулировать и исследовать работу отдельного синапса в искусственном нейроне.

Соотношения величин сопротивлений в схеме, показанной на рис. 3, были следующие: $R_h \approx R_a$, $R_x \ll R_h$, $R_0 \ll R_h$ и $R_L \ll R_a$. На вход схемы подавалось постоянное напряжение $E_1$ такое, которое разогревало резисторы $R_h$ и $R_x$ до температуры фазового перехода ПМ. Общий электрический узел этих резисторов через дополнительный резистор $R_a$ соединялся с нагрузочным резистором $R_L$.

## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Синапс-резистор разогревался путем подачи постоянного напряжения $E_1$. $R_x \ll R_h$ и $R_a$, поэтому величина $R_x$ слабо влияла на тепловыделение в нагревателе $R_h$. Тепловая мощность нагревателя $P \approx U_{s1}^2/R_h$, так как напряжение $U_{s1}$ фактически полностью падало на нагревателе $R_h$. Величина сопротивления $R_x$ рассчитывалась по измеренным напряжениям $U_{s2}$ и $U_{s1}$ (рис. 3). Была измерена зависимость $R_x(P)$ (рис. 4, $a$).

Сначала синапс-резистор разогревался путем увеличения мощности до $P = 2.5$ mW, затем мощность нагревателя уменьшалась, синапс-резистор охлаждался, и наблюдалось возрастание величины $R_x$. Однако сопротивление $R_x$ не возвращалось к своему исходному значению при комнатной температуре. При последующих многократных разогревах и охлаждениях синапс-резистора кривые $R_x(P)$ уже совпадали друг с другом. Причина данного явления, по нашему мнению, состояла в релаксации механических напряжений в синапс-резисторе при первом разогреве структуры. Известно, что механические напряжения влияют на численное значение удельного электрического сопротивления пленок $VO_2$ [19,20]. Такая особенность наблюдалась для всех исследованных синапс-резисторов: кривая $R_x(P)$ для первого разогрева отличалась от таковой для последующих разогревов.

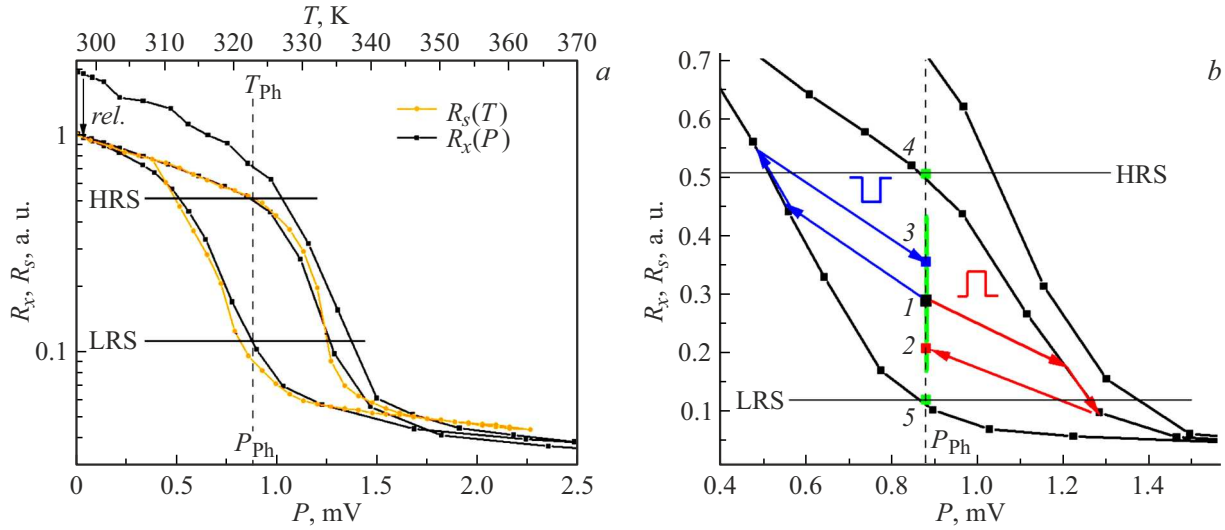



**Рис. 4.** Диапазон доступных величин сопротивления синапс-резистора: *a* — сравнение зависимостей $R_x(P)$ и $R_s(T)$, $P$ — тепловая мощность нагревателя, HRS — состояние с предельно высоким сопротивлением, LRS — состояние с предельно низким сопротивлением, rel — релаксация; *b* — область фазового перехода, показанная на рис. 4, *a*, в увеличенном масштабе.

Фазовый переход ПМ происходил при той мощности нагревателя $P_{ph}$, которая соответствовала напряжению $U_{s1} = 9.0\,\text{V}$. Данное значение напряжения обозначено как $U_{ph}$. При этом напряжении диапазон изменения сопротивлений синапс-резистора был близок к его максимальной величине. Состояния с предельно высоким HRS (high resistance state) и предельно низким LRS (low resistance state) сопротивлениями находились на главных ветвях петли гистерезиса (рис. 4, *b*, точки *4* и *5*).

Для сравнения на рис. 4, *a* показана зависимость слоевого сопротивления пленки $VO_2$ от температуры. Масштаб по температуре был подобран таким образом, чтобы максимально точно совместить зависимости $R_x(P)$ и $R_s(T)$. Тот факт, что две зависимости достаточно точно ($\pm 10\,\%$) совместились, указывает на то, что нагреватель и синапс-резистор имели хороший тепловой контакт и теплоизоляцию от подложки кремния.

Для управления электрическим сопротивлением синапс-резистора напряжение $E_1$ выставлялось таким, чтобы $U_{s1} = U_{ph}$ (рис. 4, *b*). Затем на вход схемы (рис. 3) подавались импульсы положительной или отрицательной полярности. При подаче положительного импульса численное значение амплитуды импульса суммировалось с численным значением напряжения $U_{ph}$, и пленка $VO_2$ разогревалась выше температуры фазового перехода (рис. 4, *b*). Затем после прохождения импульса пленка охлаждалась до начальной температуры, соответствующей $P_{ph}$, но с величиной сопротивления $R_x$ ниже исходного значения (точка *1* → точка *2*). При подаче отрицательного импульса численное значение его амплитуды вычиталось из численного значения напряжения $U_{ph}$, пленка $VO_2$ охлаждалась ниже температуры фазового перехода, и после прохождения импульса сопротивление $R_x$ возрастало (точка *1* →точка *3*). Таким образом, при $P = P_{ph}$, подача положительных импульсов приводила к уменьшению, а подача отрицательных импульсов — к увеличению электрического сопротивления синапс-резистора.

Траектория на зависимости $R_x(T)$ (рис. 4, *b*), по которой происходило перемещение из точки *1* в точку *2* или *3*, определялась формой главных и частных ветвей петли гистерезиса [21,22].

Если при разогреве или охлаждении траектория не выходила за границы внутренней области, образуемой главными ветвями петли гистерезиса, то электрическое сопротивление $R_x$ не изменялось, так как частные петли всегда замкнутые. Это свойство фазового перехода определяло минимальную амплитуду управляющего импульса и обеспечивало стабильность сопротивления $R_x$ при малых случайных колебаниях температуры вблизи точки фазового перехода. Допустимые случайные колебания температуры определялись шириной гистерезиса и составляли от $\pm 2\,\text{K}$ до $\pm 4\,\text{K}$ для различных значений величин сопротивления синапс-резистора.

Отклик величины $R_x$ на прохождение управляющих импульсов различной амплитуды был измерен при длительности импульсов $\Delta t = 400\,\mu\text{s}$ (рис. 5, *a*). Очевидно, величина амплитуды импульса не должна была превышать величину $U_{ph}$, и варьировалась от $-9\,\text{V}$ до $+9\,\text{V}$. Состояние HRS было выбрано в качестве исходного. Затем подавались импульсы положительной полярности все возрастающей амплитуды. Наблюдалось сопровождающее рост амплитуды уменьшение величины $R_x$ (рис. 5, *a*, кривая (*1*(+)). При достижении амплитуды импульсов значения $+9\,\text{V}$ величина сопротивления синапс-резистора выходила в насыщение на уровне, немного более высоком, чем уровень LRS. После достижения состояния, близкого к LRS, подавались отрицательные

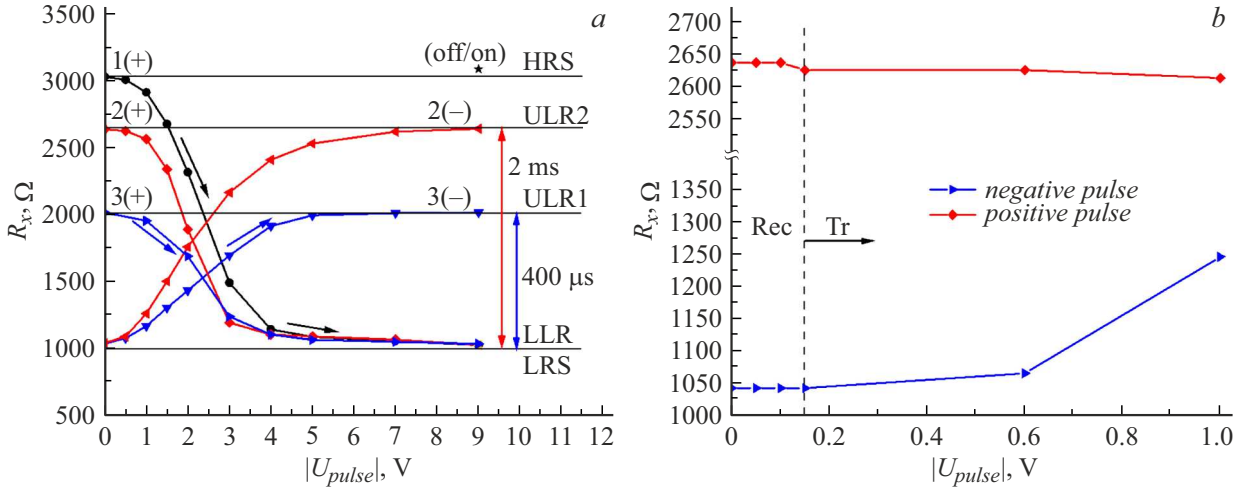



**Рис. 5.** Зависимость сопротивления синапс-резистора $R_x$ от амплитуды импульсов: *a* — управляющие импульсы с амплитудой от $-9$ до $+9$ V, ULR1 — верхняя граница диапазона сопротивлений синапс-резистора для импульсов длительностью 400 μs, ULR2 длительностью 2 ms, LLR — нижняя граница диапазона сопротивлений; *b* — малые амплитуды импульсов, Rec — режим „распознание“, Tr — режим „обучение“.

импульсы, амплитуда которых изменялась от нулевого значения до $-9$ V (кривая $3(-)$). Рис. 5, *a* показывает, что подача импульсов отрицательной полярности не привела к возврату величины $R_x$ к исходному значению (3040 Ω). Наблюдалось насыщение величины $R_x$ на уровне около 2000 Ω. Если с этого уровня снова подавались положительные импульсы, то кривая изменения сопротивления возвращалась на уровень, близкий к LRS (кривая $3(+)$). Подача последовательно импульсов то положительной полярности, то отрицательной, позволяла двигаться то по кривой $3(-)$, то по кривой $3(+)$, но исходное состояние HRS оставалось недоступным. Таким образом, допустимый диапазон сопротивлений $R_x$ ограничивался двумя уровнями, показанными на рис. 5, *a*, ULR1 (upper limit of range 1) и LLR (lower limit of range). Допустимый диапазон изменения сопротивлений $R_x$ значительно расширился при увеличении длительности импульсов до 2 ms (кривые $2(+)$ и $2(-)$). Однако вернуться в состояние HRS удалось только после ($\sim 200$ ms) выключения и включения источника питания $E_1$ (фронт импульса паузы $< 10$ ms). Состояние HRS в отличие от LRS являлось фактически недостижимым при управлении величиной сопротивления $R_x$ путем подачи импульсов.

Стабильность величины сопротивления синапс-резистора, очевидно, будет зависеть от присутствия в электрических цепях шума и случайных выбросов напряжения. Поэтому было измерено влияние малых амплитуд импульса на величину $R_x$ (рис. 5, *b*). Видно, что импульсы с величиной амплитуды $< 0.15$ V практически не изменяли величину $R_x$. Как это было отмечено выше, это является следствием особенности фазового перехода в пленках $VO_2$. Пока выделяющейся в импульсе тепловой энергии недостаточно для разогрева синапс-резистора до температуры перехода с частной на главную ветвь петли гистерезиса, величина сопротивления $R_x$ не изменяется. С другой стороны, импульсы, меньшие 0.15 V, могут быть использованы в нейронной сети для режима „распознание“, а импульсы больше 0.15 V — для режима „обучение“. Области режимов „распознание“ и „обучение“ разделены на рис. 5, *b* штриховой линией.

В зависимости от схемных решений в режиме „обучение“ могут быть использованы не импульсы различной амплитуды, а варьируемое количество импульсов заданной амплитуды и длительности. Для изменения величины электрического сопротивления синапс-резистора определяющей величиной является не амплитуда импульса, а энергия теплового импульса, которая пропорциональна $P^*\Delta t$, где $\Delta t$ — длительность импульса.

Для измерения влияния количества управляющих импульсов на величину $R_x$ была выбрана амплитуда импульсов $U_{\text{pulse}} = 9$ V, причем длительность импульсов варьировалась в диапазоне (20–2000 μs), а их количество — в диапазоне (1–9). В качестве исходного состояния (до подачи импульсов) для импульсов положительной полярности было выбрано состояние HRS. Затем подавались импульсы, причем исходным состоянием для очередного импульса являлось состояние, достигнутое после окончания предыдущего. Измерялась зависимость величины $R_x$ от номера импульса ($N$). Зависимости $R_x(N)$ были измерены для различных длительностей импульсов (рис. 6, *a*). Для импульсов отрицательной полярности в качестве исходного состояния (до подачи импульсов) было выбрано состояние LRS и измерены аналогичные зависимости (рис. 6, *b*). Видно, что длительность импульса ($\Delta t$), при которой еще наблюдалось изменение величины $R_x$, равна 20 μs. Эта величина,

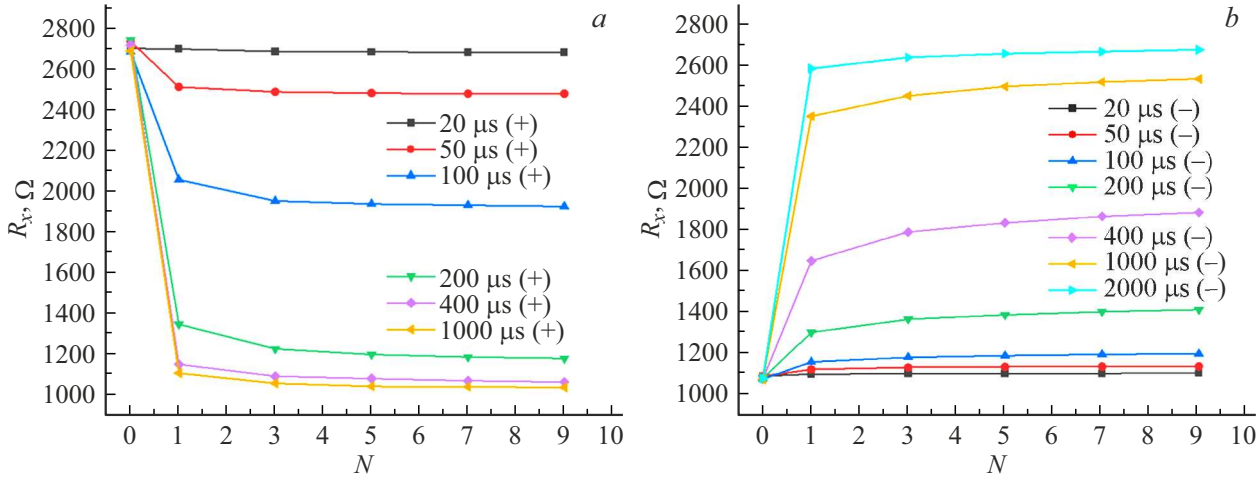



**Рис. 6.** Зависимость сопротивления синапс-резистора от количества ($N$) поданных импульсов различной длительности: *a* — исходное состояние ULR, *b* — LLR (+) — положительные, (−) — отрицательные импульсы.

очевидно, определяется тепловой массой резисторов $R_x$ и $R_h$ и степенью их теплоизоляции от окружающей среды.

С другой стороны, импульсы с длительностью меньше $20\,\mu$s и амплитудой в диапазоне от $-9$ V до $+9$ V могут быть использованы в режиме „распознание“. Переход от режима „распознание“ в режим „обучение“ может быть осуществлен путем изменения длительности импульсов без изменения их амплитуды.

Величины $\Delta t$ и энергопотребление в режиме „обучение“ могут быть существенно уменьшены при уменьшении геометрических размеров синапс-резисторов. Тепловая масса при уменьшении размеров устройства уменьшается как $r^3$ ($r$ — характерный размер синапс-резистора), а площадь устройства и соответственно тепловые потери из-за теплопроводности, как $r^2$. В результате при уменьшении размеров синапс-резистора в 100 раз можно ожидать уменьшение длительности импульсов подстройки до $0.2\,\mu$s. По этой же причине энергопотребление в режиме обучения при масштабировании синапс-резистора со $100\,\mu$m до размеров $\sim 1\,\mu$m должно уменьшиться также в 100 раз, т. е. с 0.88 mW/synapse до $8.8\,\mu$W/synapse.

Энергопотребление синапс-резистора максимальное при обучении нейронной сети и связано с необходимостью разогрева резисторов $R_x$ и $R_h$ источником $E_1$ до температуры фазового перехода ПМ. Однако в режиме „распознание“, когда обучение не требуется, энергопотребление может быть в десятки раз снижено за счет разогрева всей подложки Si до температуры фазового перехода с одновременным уменьшением напряжения $E_1$. Как было отмечено выше, при температуре фазового перехода ПМ значения величин $R_x$ синапс-резисторов могут храниться неограниченно долго, и требуются затраты энергии только для поддержания температуры фазового перехода с точностью $\pm 2$ K (рис. 1). Необходимо отметить, что температура фазового перехода

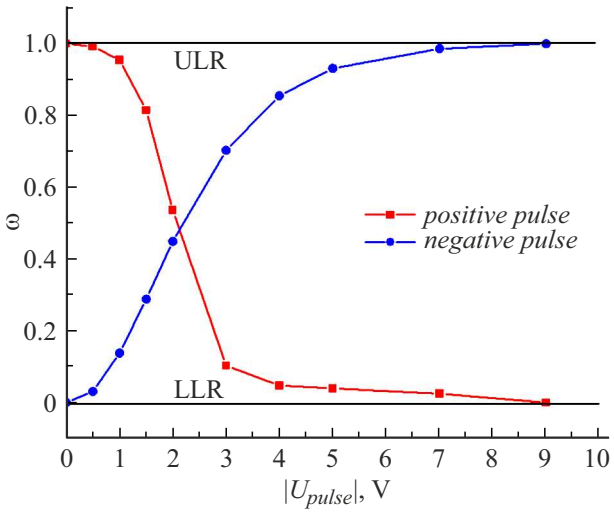



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента связи синапс-резистора $\omega$ от амплитуды управляющих импульсов $U_{\text{pulse}}$.

ПМ в пленках $VO_2$ близка к типичной температуре микропроцессоров в условиях их стационарной работы. Поэтому путем использования тепловыделения в сопутствующих микроэлектронных компонентах, можно значительно снизить энергопотребление для функционирования нейронной сети в режиме „распознание“.

Для синапс-резистора можно ввести коэффициент синаптической связи ($\omega$):

$$\omega \approx (R_x - R_{\text{LLR}})/(R_{\text{ULR}} - R_{\text{LLR}}),$$

где $R_{\text{ULR}}$, $R_{\text{LLR}}$ — верхняя и нижняя соответственно границы доступного диапазона $R_x$.

При управлении коэффициентом связи путем подачи импульсов различной амплитуды и полярности, коэффициент $\omega$ принимает значения на интервале (0, 1) (рис. 7).

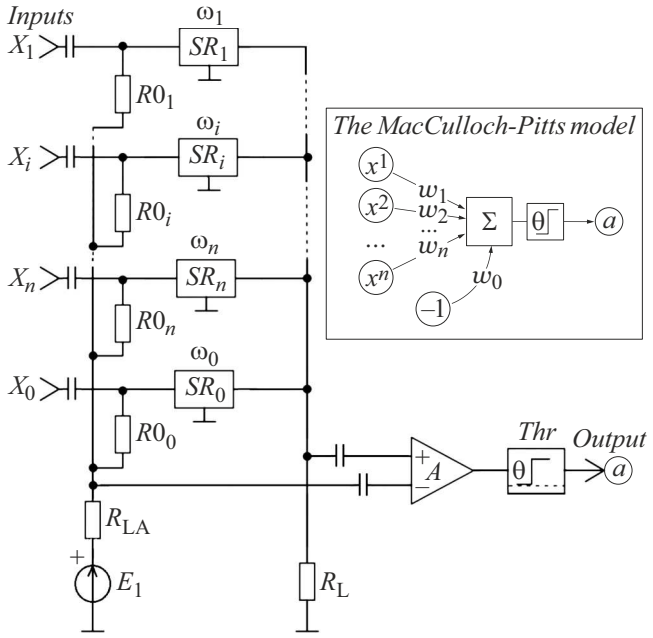



**Рис. 8.** Искусственный нейрон на основе блоков: $SR_1, \ldots SR_i, \ldots SR_n$, $SR_0$ с синапс-резисторами. $R_{LA}$ — входной нагрузочный резистор, $R_L$ — выходной нагрузочный резистор, $A$ — дифференциальный усилитель, $Thr$ — пороговое устройство. $X_1, \ldots X_i, \ldots X_n$ — входные сигналы. $X_0$ — тормозящий сигнал, $a$ — выходной сигнал. Вставка: искусственный нейрон по модели МакКаллока-Питтса [4].

Синапс-резисторы могут быть использованы для создания аналоговой схемы выполняющей функции искусственного нейрона МакКаллока-Питтса (рис. 8). При подаче рабочих импульсов ($X_0$, $X_1 - X_n$) в режиме „распознание“ (амплитуды импульсов $< 0.15\,\mathrm{V}$), входные импульсы будут суммироваться на резисторе $R_{LA}$ и подаваться на инверсный вход дифференциального усилителя А. Величина сопротивления $R_{LA}$ должна быть подобрана такой, чтобы суммарный импульс по величине амплитуды соответствовал величине амплитуды импульса на резисторе $R_L$ при величинах сопротивлении всех синапс-резисторов $R_x = R_{LLR}$. На положительный вход дифференциального усилителя необходимо подать суммарный выходной сигнал с резистора $R_L$. В результате из суммарного импульса на резисторе $R_L$ будут вычитаться компоненты, связанные с $R_{LLR}$, и усиливаться разностный сигнал, пропорциональный $\sum_{i=0}^{n} \omega_i \cdot X_i$. Данная схема с синапс-резисторами может быть применена как для искусственных нейронных сетей импульсного, так и для сетей потенциального типа.

## Заключение

Тонкие поликристаллические пленки $VO_2$ с фазовым переходом ПМ позволили изготовить электрический резистор (синапс-резистор), способный выполнять функции искусственного синапса в модели искусственного нейрона МакКаллока-Питтса. Коэффициент синаптической связи $\omega$ может принимать непрерывный ряд значений в интервале $(0, +1)$. Управление величиной коэффициента связи было достигнуто путем подачи на вход устройства с синапс-резистором импульсов напряжения различной амплитуды от $-9\,\mathrm{V}$ до $+9\,\mathrm{V}$ или же импульсов с амплитудой $(+9\,\mathrm{V}, -9\,\mathrm{V})$ различной длительности в интервале от 2 ms до $20\,\mu$s. Полученные параметры режима управления сопротивлением были достигнуты экспериментально на синапс-резисторе с линейным размером около $100\,\mu$m. Поскольку синапс-резистор изготовлен по микроэлектронной технологии, то он допускает масштабирование до размеров $1\,\mu$m, что по оценкам может в 100 раз увеличить быстродействие и во столько же раз снизить энергопотребление.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику ИФП СО РАН М.М. Качановой за помощь в изготовлении образцов.

### Финансирование работы

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда, проект № 18-71-10026, а также бюджетным проектом FWGW-2025-0024.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] А.Н. Горбань, В.Л. Дунин-Барковский, А.Н. Кирдин, Е.М. Миркес, А.Ю. Новоходько, Д.А. Россиев, С.А. Терехов, М.Ю. Сенашова, В.Г. Царегородцев. *Нейроинформатика* (Наука, Новосибирск, 1998), ISBN 5-02-031410-2
[2] А.Н. Горбань. Мир ПК, **10**, 126 (1994).
[3] A.N. Gorban. Neuroinformatics: What are us, where are we going, how to measure our way? The lecture was given at the USA-NIS Neurocomputing opportunities workshop, Washington DC, July 1999. http://arxiv.org/abs/cond-mat/0307346
[4] Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов. *Нейрокомпьютеры* (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2004), ISBN 5-7038-2554-7
[5] T. Shibata, T. Ohmi. IEEE Transactions on Electron Devices, **40** (3), 570 (1993). DOI: 10.1109/16.199362
[6] Yang Zhang, Zhongrui Wang, Jiadi Zhu, Yuchao Yang, Mingyi Rao, Wenhao Song, Ye Zhuo, Xumeng Zhang, Menglin Cui, Linlin Shen, Ru Huang, J. Joshua Yang. Appl. Phys. Rev., **7**, 011308 (2020). DOI: 10.1063/1.5124027
[7] A. Sebastian, M. Le Gallo, G.W. Burr, S. Kim, M. BrightSky, E. Eleftheriou. J. Appl. Phys., **124** (11), (2018). DOI: 10.1063/1.5042413
[8] M. Rao, H. Tang, J. Wu, W. Song, M. Zhang, W. Yin, Y. Zhuo, F. Kiani, B. Chen, X. Jiang, H. Liu, H.-Yu Chen, R. Midya, F. Ye, H. Jiang, Zh. Wang, M. Wu, M. Hu, H. Wang, Q. Xia, N. Ge, J. Li, J.J. Yang. Nature, **615**, 823 (2023). DOI: 10.1038/s41586-023-05759-5

[9] F.J. Morin. Phys. Rev. Lett., **3** (1), 34 (1959).
[10] W. Yi, K.K. Tsang, S.K. Lam, X. Bai, J.A. Crowell, E.A. Flores. Nat. Commun., **9** (1), 4661 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-07052-w
[11] T. Driscoll, H.-T. Kim, B.-G. Chae, M. Di Ventra, D. N. Basov. Appl. Phys. Lett., **95**, 043503 (2009). DOI: 10.1063/1.3187531
[12] S.H. Bae, S. Lee, H. Koo, L. Lin, B.H. Jo, C. Park, Z.L. Wang. Adv. Mater., **25** (36), 5098 (2013). DOI: 10.1002/adma.201302511
[13] Y. Zhou, Z. Yang, S. Ramanathan. IEEE Electron Dev. Lett., **33** (1), 101 (2012). DOI: 10.1109/LED.2011.2173790
[14] В.Ш. Алиев, С.Г. Бортников. *Синаптический резистор* (Пат. РФ № 2701705, Дата гос. рег.: 30.09.2019)
[15] V.A. Shvets, V.Sh. Aliev, D.V. Gritsenko, S.S. Shaimeev, E.V. Fedosenko, S.V. Rykhlitski, V.V. Atuchin, V.A. Gritsenko, V.M. Tapilin, H. Wong. J. Non-Crystall. Solids, **354**, 3025 (2008). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.12.013
[16] Н.А. Торхов. ФТП, **53** (1), 32 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.01.46983.8886 [N. A. Torkhov. Semiconductors, **53** (1), 28 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619010226]
[17] D.A. Kalmykov, S.G. Bortnikov, V.S. Aliev. *In Proceedings of 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, p. 50–53 (2023). DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225019
[18] В.Ш. Алиев, М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, И.В. Марчишин, В.Н. Овсюк, Б.И. Фомин. УПФ, **1** (4), 471 (2013).
[19] M.K. Sohn, H. Singh, E.M. Kim, G.S. Heo, S.W Choi, D.G. Phyun, D.J. Kang. Appl. Phys. Lett., **120**, 173503 (2022). DOI: 10.1063/5.0088979
[20] Р.А. Алиев, В.Н. Андреев, В.А. Климов, В.М. Лебедев, С.Е. Никитин, Е.И. Теруков, Е.Б. Шадрин. ЖТФ, **75** (6), 81 (2005).
[21] L.A.L. de Almeida, G.S. Deep, A.N. Lima, H.F. Neff, R.C.S. Freire. IEEE Transactions on Instrument. Measurement, **50** (4), 1030 (2001). DOI: 10.1109/19.948321
[22] M. Gurvitch, A. Luryi, Polyakov, A. Shabalov. J. Appl. Phys., **106**, 104504 (2009). DOI: 10.1063/1.3243286