

УДК 621.382.2/.3:004.333

## Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов

Обухов И. А., Обухов И. И.

*Научно-производственное предприятие «Радиотехника»  
г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация  
iao001@mail.ru*

Получено: 03 января 2023 г.

Отрецензировано: 01 февраля 2023 г.

Принято к публикации: 10 февраля 2023 г.

**Аннотация:** *Представлены конструкция и расчеты основных характеристик ячейки памяти на основе пересекающихся нанопроводов различного поперечного сечения. Функционирование устройства возможно, если поперечные размеры нанопроводов обеспечивают размерное квантование энергии электронов в рабочей области температур. В этом случае области пересечения нанопроводов различного поперечного сечения представляют собой квантовые ямы для электронов. Управляемое приложенным напряжением туннелирование электронов между квантовыми ямами обеспечивает запись информации. Скорость записи может достигать 1 Пбайт/с ( $10^{15}$  байт/с).*

**Ключевые слова:** *память, нанопровод, размерное квантование, полупроводник, квантовый прибор.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Обухов И. А., Обухов И. И. Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 44–52.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Обухов, И. А. Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов / И. А. Обухов, И. И. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 44–52.

### 1. Введение

Более двадцати пяти лет назад в частной беседе автора с П. Н. Лускиновичем<sup>1</sup> о перспективах применения нанопроводов в электронике Петр Николаевич заметил, что области пересечения нанопроводов могут быть

---

<sup>1</sup> Петр Николаевич Лускинович — разработчик первых в России сканирующих туннельных микроскопов, лауреат премии ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

важными функциональными элементами квантовых приборов. Первым предложением по реализации этой идеи можно считать квантовый транзистор с инжекционным затвором [1, 2].

В этом приборе область пересечения нанопровода меньшего поперечного сечения, канала транзистора, с нанопроводом большего поперечного сечения, затвором транзистора, представляет для электронов в канале квантовую яму. При изменении напряжения затвора изменяется уровень инжекции электронов из квантовой ямы в канал. Расчетная крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) такого транзистора на три порядка превышает крутизну ВАХ полевого транзистора на основе нанопровода.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования квантовых ям, образующихся на пересечении нанопроводов, в качестве систем с переменным зарядом, зависящим от приложенного напряжения. Конструкция из трех пересекающихся нанопроводов (рис. 1) позволяет реализовать две такие квантовых ямы (рис. 2). Туннелирование электронов между ними в одном направлении изменяет разность потенциалов в перпендикулярном направлении. Этот простой эффект обеспечивает возможность записи информации.

## 2. Конструкция и принцип функционирования

На рис. 1 показана конструкция предлагаемой ячейки памяти. Она представляет собой нанопровод, который мы будем называть тонким, и два пересекающих его перпендикулярно одинаковых нанопровода большего поперечного сечения, которые будем называть толстыми. Нанопровода отделены друг от друга и от металлических контактов изолирующим материалом.

В качестве материала нанопроводов на рис. 1 указан арсенид галлия, в качестве разделяющего их материала — алюминий арсенид, а в качестве контактов — золото. Это те материалы, для которых проводились расчеты. Аналогичная ячейка памяти может быть реализована и на других полупроводниковых материалах с соответствующими металлическими контактами.

Для того чтобы конструкция была функционально пригодной, необходимо чтобы размеры тонкого нанопровода обеспечивали размерное квантование энергии электронов в диапазоне рабочих температур устройства. В расчетах мы полагали, что нанопровода имеют квадратное поперечное сечение со сторонами квадрата  $L_{cx} = 5$  нм для тонкого и  $L_{cy} = 20$  нм для толстого проводов. Длина тонкого нанопровода  $L_x = 72$  нм, длины толстых проводов одинаковы и равны  $L_y = 72$  нм. Температура равнялась  $300^\circ\text{K}$ . Для арсенида галлия размерное квантование энергии

электронов при такой температуре наблюдается при размерах, меньших чем  $L_{dq}(300^\circ K) = 25$  нм.

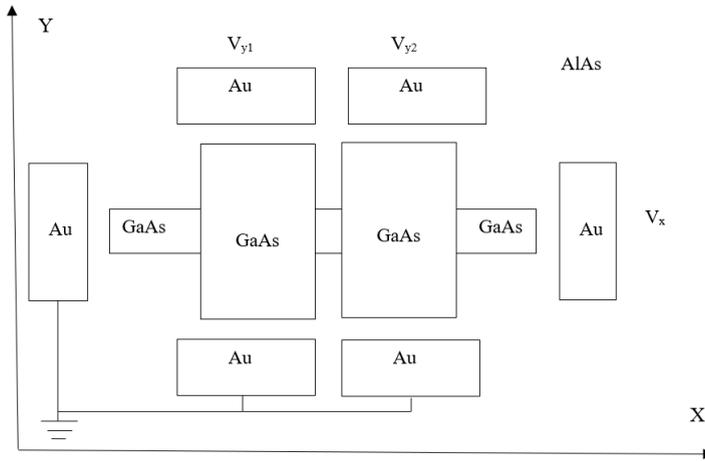


Рис. 1. Конструкция ячейки памяти на пересекающихся нанопроводах.

Fig. 1. Design of a memory cell on intersecting nanowires

Расстояние между толстыми нанопроводами выбрано  $L = 5$  нм. Зазор между контактами и нанопроводами  $L_d$  в расчетах составил также 5 нм. При высоте потенциального барьера в 1,9 эВ зазор оказывается туннельно-непрозрачным для электронов, коэффициент прохождения составляет величину порядка  $10^{-9}$ .

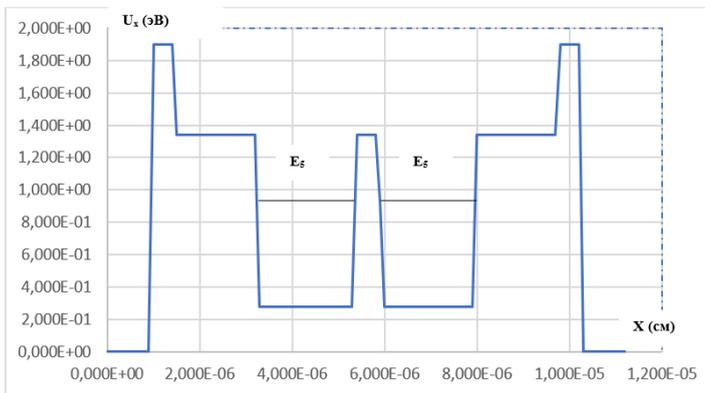


Рис. 2. Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе при нулевой разности потенциалов.

Fig. 2. Potential relief for electrons in a thin nanowire at zero potential difference

Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе  $U_x(x)$  при нулевой разности потенциалов ( $V_x = 0$ ) между контактами показан на рис. 2. Представлен вариант, когда тонкий провод не легирован, а толстый содержит полностью ионизованную донорную примесь с концентрацией  $N_y = 7,75 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Уровень легирования толстого нанопровода является параметром, определяющим выходные характеристики прибора, и может быть выбран в зависимости от предъявляемых к нему требований. Отметим, что при указанной концентрации  $N_y$  арсенид галлия при комнатной температуре является невырожденным.

Потенциальные ямы, создаваемые толстыми нанопроводами при пересечении тонкого нанопровода, имеют глубину  $U = 1,06 \text{ эВ}$ . В них помещается девять квазистационарных энергетических уровней размерного квантования. На рис. 2 показано положение пятого уровня  $E_5 = 0,935 \text{ эВ}$ . При нулевой разности потенциалов между контактами нанопровода энергии всех уровней в обеих ямах совпадают и их заполнения электронами одинаковы. Следовательно, одинаковы и электрические заряды, локализованные в потенциальных ямах.

На рис. 3 показан потенциальный рельеф для электронов в толстом нанопроводе. Тонкий нанопровод образует для электронов потенциальный барьер шириной 5 нм и высотой 0,41 эВ.

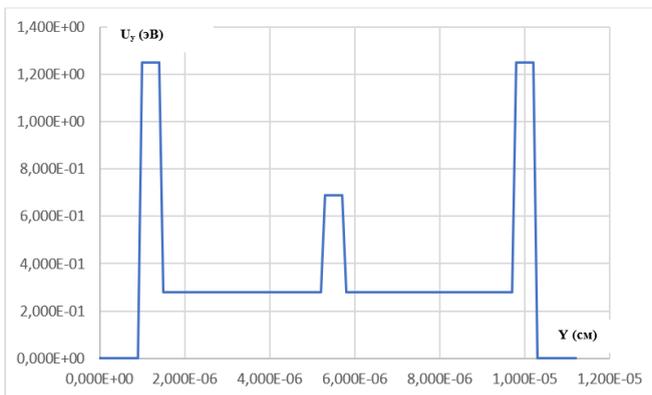


Рис. 3. Потенциальный рельеф для электронов в толстом нанопроводе при нулевой разности потенциалов.

Fig. 3. Potential relief for electrons in a thick nanowire at zero potential difference

Потенциальный барьер между ямами на рис. 2 туннельно-прозрачен. При нулевом смещении, как мы уже отметили, заряды электронов в потенциальных ямах одинаковы. Если же между контактами тонкого нано-

провода создать разность потенциалов (см. рис. 4), то потенциальный рельеф деформируется. Заполнение электронных уровней в потенциальных ямах, требуемое статистикой, уже не будет одинаковым. Электроны из потенциальной ямы с большей энергией будут туннелировать в потенциальную яму с меньшей энергией. В результате, левый и правый толстые нанопровода окажутся заряжены по-разному, и между их контактами возникает разность потенциалов  $V_y = V_{y1} - V_{y2}$  (см. рис. 5).

Таким образом, разность потенциалов между контактами тонкого нанопровода  $V_x$  индуцирует разности потенциалов между контактами толстых нанопроводов  $V_{y1}$  и  $V_{y2}$ . В случае, представленном на рис. 4 и 5, напряжение  $V_x = 0,5$  В индуцирует напряжения  $V_{y1} = -0,118$  В и  $V_{y2} = 0,118$  В. В результате, между верхними контактами толстых нанопроводов (см. рис. 1) возникнет разность потенциалов  $V_y = -0,236$  В.

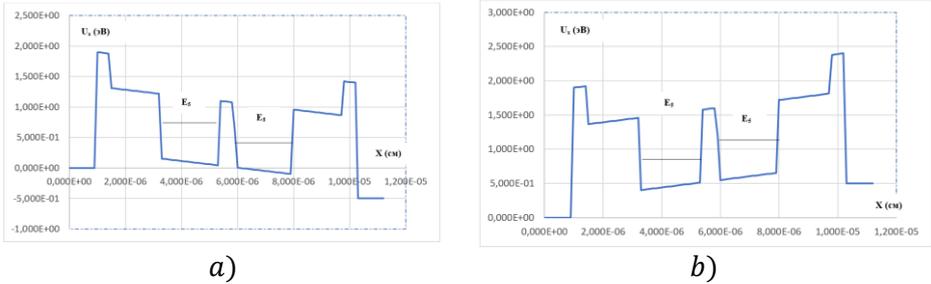


Рис. 4. Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе при разности потенциалов: а)  $V_x = 0,5$  В, б)  $V_x = -0,5$  В.

Fig. 4. Potential relief for electrons in a thin nanowire at a potential difference: а)  $V_x = 0,5$  V, б)  $V_x = -0,5$  V

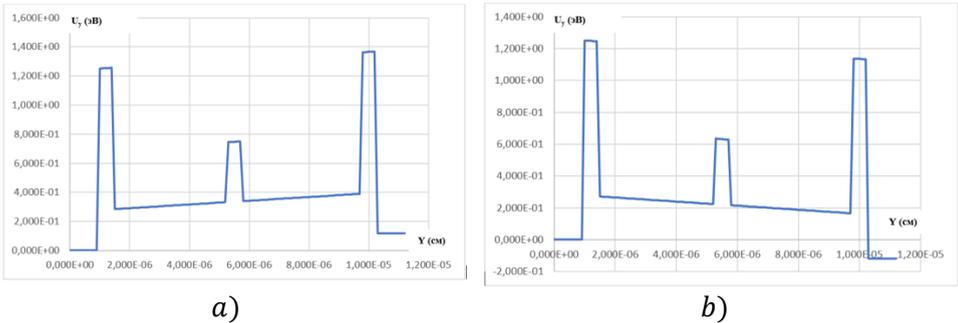


Рис. 5. Потенциальный рельеф для электронов в левом а) и правом б) толстых нанопроводах при разности потенциалов в тонком нанопроводе  $V_x = 0,5$  В.

Fig. 5. Potential relief for electrons in the left а) and right б) thick nanowires at a potential difference in a thin nanowire  $V_x = 0,5$  V

Если использовать тонкий нанопровод для записи информации, осуществляемой подачей на него кратковременной разности потенциалов, то с контактов толстых нанопроводов эту информацию можно считать. Запись и считывание информации с высокой скоростью представляет собой самостоятельную проблему, которую мы здесь обсуждать не будем. Также дополнительного исследования требуют вопросы длительности хранения информации в предлагаемой ячейке памяти и стойкости ее к перепадам температур и другим внешним воздействиям.

### 3. Простые оценки

Корректные расчеты характеристик исследуемого прибора требуют самосогласованного решения как минимум двумерных уравнений Шредингера и Пуассона [3]. Приведенные выше результаты были получены в рамках одномерной модели. Их можно рассматривать, как первое приближение.

Из физических соображений можно получить простые формулы, позволяющие оценивать характеристики предложенной ячейки памяти. Для емкости толстого нанопровода справедливо приближенное выражение

$$C_y = \varepsilon L_{cy}^2 / (L_y + 2L_d), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала, в нашем случае равная 1,14 пФ/см.

Максимальный заряд, который может перетечь из одной квантовой ямы в другую, можно оценить как

$$Q_{y\max} = e(n_i + N_y)L_{cy}^2 L_{cx}. \quad (2)$$

Здесь:  $e$  — элементарный заряд;  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике ( $1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  для *GaAs* при комнатной температуре);  $N_y$  — концентрация ионизованной донорной примеси.

Для максимальной разности потенциалов, которую можно индуцировать на толстом нанопроводе при помощи описанного выше механизма, получим

$$V_{y\max} = Q_{y\max} / C_y = e(n_i + N_y)(L_y + 2L_d)L_{cx} / \varepsilon. \quad (3)$$

Заметим, что эта величина не зависит от поперечного размера толстого нанопровода.

Из формулы (3) следует, что  $V_{y\max}$  тем больше, чем больше  $L_{cx}$ . Однако увеличение  $L_{cx}$  ведет к уменьшению глубины квантовых ям и, в ко-

нечном счете, к их исчезновению. То есть к исчезновению эффекта, лежащего в основе функционирования рассматриваемой ячейки памяти.

Отсюда следует, что для увеличения  $V_{y_{max}}$  можно использовать только уровень легирования толстых нанопроводов  $N_y$ . Легко вычислить, что для нелегированных нанопроводов ( $N_y = 0$ ) напряжение  $V_{y_{max}} \sim 10^{-12}$  В — величина, с трудом поддающаяся измерению. При  $N_y \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> максимально достижимое напряжение составляет уже десятые доли вольт.

Важной характеристикой памяти является время записи. В нашем случае оно зависит от скорости изменения заряда квантовых ям при подаче напряжения на тонкий нанопровод. То есть от времени туннелирования. Его можно оценить по формуле Хартмана [4]

$$\tau(E) \approx \hbar / (E(U - E))^{1/2}, \quad (4)$$

где:  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка;  $E$  — уровень энергии, с которого происходит туннелирование;  $U$  — высота потенциального барьера, через который происходит туннелирование. В нашем случае получим  $\tau(E) \sim 10^{-15}$  с для всех уровней энергии в потенциальных ямах.

#### 4. Заключение

В этой работе предложена конструкция ячейки памяти на основе пересекающихся нанопроводов. Принцип функционирования устройства основан на туннелировании электронов между квантовыми ямами, образующимися в областях пересечения нанопроводов. Предварительные оценки показывают, что в таком элементе может быть достигнута скорость записи информации порядка Пбайт/с.

Расчеты производились для нанопроводов из арсенида галлия при комнатной температуре. Для них характерный размер ячейки составляет 100 нм, а характерные значения напряжений записи и чтения информации — десятые доли вольт. Если использовать нанопровода из антимонида индия, то характерные размеры могут быть увеличены вдвое, а напряжения уменьшены до сотых долей вольт.

Для определения практической применимости рассматриваемой ячейки памяти следует провести более тщательное моделирование ее характеристик и исследовать влияние на них внешних факторов, таких как изменения температуры окружающей среды, внешнее электромагнитное излучение и т. д.

### Список литературы

1. Статические характеристики пересекающихся квантовых проводов / И. А. Обухов и др. В сб. : 14-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2004 (Севастополь, 13—17 сент. 2004 г.). 2004. С. 507—511.
2. Obukhov I. A. Planar One-Dimensional Quantum Devices // Nanoscience and Nanotechnology. 2013. Vol. 3, no 5. P. 115—122.
3. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : «Вебер», 2005. 226 с.
4. Hartman T. E. Tunneling of a Wave Packet. // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, no. 12. P. 3427—3433.

### Информация об авторах

**Обухов Илья Андреевич**, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

**Обухов Илья Ильич**, стажер АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

# Memory Cell Based on Crossed Nanowires

I. A. Obukhov and I. I. Obukhov

*Scientific-Industrial Company "Radiotekhnika"*

15, build. 11, 5<sup>th</sup> Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation  
iao001@mail.ru

Received: January 03, 2023

Peer-reviewed: February 01, 2023

Accepted: February 10, 2023

**Abstract:** *The design and calculations of basic characteristics of memory cell based on crossed nanowires with different cross-sections are presented. The device operation is possible if the transverse dimensions of the nanowires provide dimensional quantization of the electron energy in the working temperature values. In this case, the intersecting regions of nanowires with different cross-sections are the quantum wells for electrons. Tunneling of electrons between quantum wells controlled by applied voltage provides information recording. The write rate of cell can reach  $Pbytes/s = 10^{15}$  bytes/s.*

**Keywords:** *memory, nanowire, dimensional quantization, semiconductor, quantum device.*

**For citation (IEEE):** I. A. Obukhov and I. I. Obukhov, "Memory Cell Based on Crossed Nanowires," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 44–52, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.04. (In Russ.).

## References

- [1] I. A. Obukhov, I. I. Kvyatkevich, A. A. Lavrenchuk, S. V. Rumyantsev, "Static Characteristics of Crossed Quantum Wires. In : 2004 14<sup>th</sup> International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2004), September 13–17, 2004. Sevastopol : Weber Publ. Co., 2004, pp. 507–511. (In Russ.).
- [2] I. A. Obukhov, "Planar One-Dimensional Quantum Devices," *Nanoscience and Nanotechnology*, v. 3, no 5, pp. 115–122, 2013, doi: 10.5923/j.nn.20130305.02.
- [3] I. A. Obukhov, *Modeling of Charge Transfer in Mesoscopic Structures*, Moscow–Kyiv Minsk–Sevastopol, Weber Publ.Co., 2005. (In Russ.).
- [4] T. E. Hartman, "Tunneling of a Wave Packet," *J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 12, pp. 3427–3433, 1962, doi: 10.1063/1.1702424.

## Information about the authors

**Ilya A. Obukhov**, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.

**Ilya I. Obukhov**, improver at JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.