

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 8, no. 1, pp. 72–93, 2025.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 72—93.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.21227/43ay-6s44

УДК 621.382.2/.3

Сверхбыстродействующая электроника с низким энергопотреблением

Обухов И. А.

Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, г. Москва, 115419, Российская Федерация

ia0001@mail.ru

Получено: 29 ноября 2024 г.

Отрецензировано: 2 декабря 2024 г.

Принято к публикации: 2 декабря 2024 г.

Аннотация: Рассмотрены современное состояние и перспективы развития компонентной базы сверхбыстродействующей электроники с низким энергопотреблением. Предложены подходы к проектированию и конструкции твердотельных электронных приборов на основе нанопроводов, которые могут быть использованы в будущей цифровой электронике. Представлены оценки ожидаемых характеристик этих приборов.

Ключевые слова: нанопровод, полевой транзистор, релаксационный квантовый транзистор, антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), цифровая электроника, терагерцовый диапазон.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А. Сверхбыстродействующая электроника с низким энергопотреблением // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 1. С. 72—93.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Сверхбыстродействующая электроника с низким энергопотреблением / И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 1. — С. 72—93.

1. Введение

Стагнация современной цифровой электроники уже давно стала «свершившимся фактом». Более десяти лет тактовые частоты процессоров практически не увеличиваются, застыв на уровне вблизи 5 ГГц. Медленное повышение их производительности достигается за счет роста уровня интеграции элементов в схемах при переходе ко все более малым нормам проектирования и увеличения количества ядер. Современные технологии позволяют контролируемо создавать полупроводниковые структуры с

размерами до 2 нм и обеспечивать уровень интеграции элементов в микросхемах в десятки миллиардов на квадратный сантиметр [1—4]. Частотные характеристики и энергопотребление используемых базовых элементов (полевых транзисторов разных видов) при этом практически не изменяются. Существенного снижения массы и габаритов вычислительных систем при сохранении производительности не происходит.

Основными причинами замедления развития цифровой электроники считаются [1—6]: достижение близкого к предельному быстродействию используемыми элементами, кремниевыми полевыми транзисторами, и повышение тепловыделения при увеличении уровня интеграции элементов в схемах.

При уменьшении размеров быстродействие полевых транзисторов в подпороговой области наталкивается на принципиальные ограничения, обусловленные уменьшением поперечного сечения проводящего канала и его периметра. Предельная частота полевого транзистора тем выше, чем выше его крутизна. Но при фиксированной плотности тока сила тока, а значит и крутизна транзистора, уменьшается с уменьшением сечения канала. Увеличение плотности тока ведет к повышению тепловыделения, что снижает подвижность носителей заряда и также уменьшает крутизну. Ограниченный периметр канала транзистора задает предельную ширину затвора, что опять же ограничивает крутизну.

Каналами современных полевых кремниевых или кремний-германиевых транзисторов, таких как *FinFET*, *GAAFET* и *MBCFET*, являются нанопровода или наноленты, а затворы окружают их с трех сторон или по всему периметру [1—4]. Возможности повышения быстродействия за счет изменения геометрии затворов, по-видимому, исчерпаны.

Также на быстродействие полевого транзистора существенно влияет подвижность носителей заряда, а в случае сильного продольного поля, которое почти всегда реализуется при коротком канале, — их скорость насыщения. В таблице 1 представлена грубая оценка частотных возможностей некоторых транзисторов с очень коротким каналом в 25 нм. Если воспользоваться еще одной грубой оценкой и считать частоту процессора приблизительно равной предельной частоте транзистора, деленной на тридцать [7], то видно, что кремниевые и кремний-германиевые процессоры вполне могли бы функционировать на частотах в 20 ГГц.

Однако разогрев цифровых микросхем существенно понижает их производительность. И в последние годы основные усилия исследователей в этой области направлены на уменьшение тепловыделения элементов и схем. Такие разработки стали одним из основных направлений программы *DARPA ERI (Electronics Resurgence Initiative)*, стартовавшей в 2018 г. В 2023 г. началась вторая фаза этой программы — *ERI 2.0*.

Таблица 1. Оценка предельных частот для различных полевых транзисторов
с длиной канала 25 нм.Table 1. Estimation of limit frequencies for different types of field effect transistors
with channel length 25 nm

Транзистор	Подвижность электронов в канале $T=300^{\circ}\text{K}$ ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Скорость насыщения электронов в канале (10^7 cm/s)	Предельная частота транзистора (ГГц)
Si FinFET	1 400	1,0	637
Si GAAFET	1 400	1,0	637
Si-Ge GAAFET	2 000	2,0	1 274
GaAs HEMT	7 500	2,1	1 338
GaN HEMT	2 000	2,3	1 465
InP HEMT	10 600	2,4	1 529
InAs QWFET	15 000	3,5	2 229
InSb QWFET	30 000	5,0	3 185

Рассматриваются две возможности снижения тепловыделения: использование новых материалов, уменьшающих энергопотребление транзисторов и построение 3D архитектур микросхем, позволяющих организовать более эффективный теплоотвод. Также исследуется комбинация этих подходов, когда сочетание в микросхеме различных материалов позволяет снизить энергопотребление и тепловыделение [5, 6].

Отметим, что одним из основных исполнителей программ *DARPA ERI* и *ERI 2.0* в части новых материалов и приборов является *Northrop Grumman Corporation*. Эта компания хорошо известна не только своими пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами, такими как разведчик *Global Hawk*, регулярно летающий над Черным морем, но и самыми быстрыми в мире *InP* транзисторами, разработанными в рамках программ *DARPA NEXT* и *Terahertz Electronics* в 2011—2015 гг. Она же вместе с *Naval Research Laboratory* и *Penn State University* проводила одни из первых в мире исследований по созданию транзисторов из антимонида индия [8], полупроводника с самой высокой из известных подвижностью электронов.

В феврале 2005 г. был опубликован пресс-релиз компаний *Intel* и *QinetiQ* о создании сверхбыстродействующего транзистора с рекордно низким энергопотреблением с каналом в виде квантовой ямы из антимонида индия (*QWFET*). Авторы разработки выражали надежду, что новый транзистор позволит «...продлить действие закона Мура, по крайней мере, еще на десятилетие» [9].

Вариантам конструкции этого транзистора, его характеристикам, их оптимизации, а также возможным применениям посвящено большое коли-

чество публикаций [10—16]. По сравнению с традиционными кремниевыми полевыми транзисторами, прибор с каналом n -типа (n -QWFET) демонстрировал десятикратное снижение энергопотребления при одинаковой производительности и трехкратное повышение производительности при одинаковом энергопотреблении; прибор с каналом p -типа (p -QWFET) также рассеивал в десять раз меньшую мощность при одинаковой скорости и давал двукратное увеличение скорости при одинаковой мощности [13].

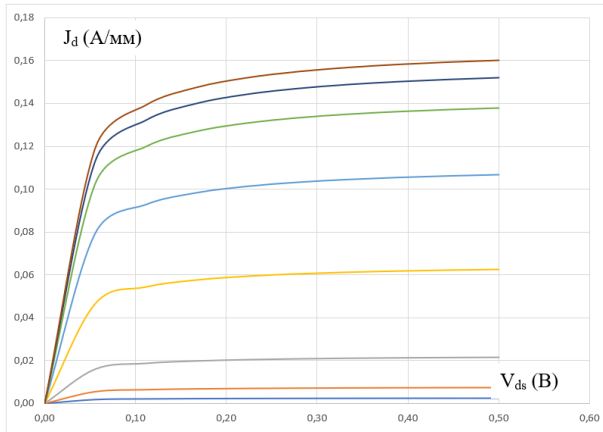


Рис. 1. Типичные выходные BAX n -QWFET. Напряжение затвор-исток V_{gs} изменяется от 0.05 В до 0.4 В с шагом 0.05 В (кривые снизу вверх).

Fig. 1. Typical output current–voltage characteristics of the n -QWFET. A gate–source voltage V_{gs} changes from 0.05 V to 0.4 V with step of 0.05 V (curves from bottom to top)

Подвижность электронов в n -QWFET составляет 25 000—30 000 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ [10, 11], предельная частота достигает 600 ГГц [15], а обратная подпороговая крутизна порядка 100 мВ/декаду. Подвижность дырок p -QWFET — 1 200 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, предельная частота — 140 ГГц, а обратная подпороговая крутизна порядка 90 мВ/декаду [13]. На рис. 1 показано семейство типичных выходных BAX n -QWFET [17]. Обращают на себя внимание низкие напряжения сток-исток (V_{ds}) и малый шаг по напряжению затвор-исток (V_{gs}), что обеспечивает низкое энергопотребление и высокую управляемость транзистора.

На основе QWFET могут быть созданы различные цифровые и СВЧ-устройства [12]: микропроцессоры (тактовые частоты до 15 ГГц), малошумящие усилители (частоты до 500 ГГц), монолитные интегральные схемы миллиметрового диапазона длин волн.

Однако узкая запрещенная зона между электронами и дырками в антимониде индия, составляющая в объемном материале при комнатной

температуре 0,17 эВ, делает этот материал очень чувствительным к нагреванию. Кроме того, для получения хороших характеристик *QWFET* должен иметь достаточно большие геометрические размеры (длина канала и ширина затвора порядка 500—1000 нм), что не позволяет создавать схемы с высоким уровнем интеграции элементов. Видимо, по этим причинам процессоры из антимонида индия до настоящего времени широкого распространения не получили.

Аналогичные транзисторы были созданы и с каналами из арсенида индия (*InAs*) [18, 19]. Они также продемонстрировали высокое быстродействие и низкое энергопотребление.

Следующий этап исследований в области перспективной элементной базы цифровой электроники связан с полевыми транзисторами на основе нанопроводов. Ранние работы в этой области относятся к 90-м годам, когда в качестве проводящего канала транзистора использовали углеродные нанотрубки [20]. Были получены важные результаты, касающиеся механизмов переноса заряда в нанопроводах и отрицательного влияния подложки, на которой располагалась нанотрубка, на электрические характеристики прибора. Подвижность носителей заряда и крутизна транзисторов оказались крайне низкими, совершенно недостаточными для построения быстродействующей логики на таких элементах.

В 2011 г. в рамках гранта, финансируемого *DARPA*, в *Purdue University* был создан полевой транзистор с каналом в виде нанопровода из антимонида индия *n*-типа (*n-NWFET*) [21]. Монокристаллический нанопровод диаметром 100 нм был выращен в поре анодного оксида алюминия и посредством микромеханики помещен на подложку, которая представляла собой p^+ -кремний, покрытый окислом толщиной 20 нм, и играла роль затвора. Длина канала составила 500 нм, контакты были изготовлены из никеля. При комнатной температуре транзистор продемонстрировал крутизну до 4.5 мкСм и ток стока в десятки мкА при напряжениях между источником и стоком до 1 В.

Подвижность электронов составила примерно $1200 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$, что в десятки раз меньше, чем в объемном материале. Аналогичные исследования приборов с каналами из *InSb* *p*-типа [22] констатировали подвижность дырок от $57 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ до $140 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$. Близкие результаты получены и для *InSb* нанотрубок, выращенных на поверхностях подложек *VLS*-методом [23, 24]. Столь низкие подвижности являются следствием влияния подложки на процессы рассеяния носителей заряда в нанопроводе.

К сожалению, приборы с такими параметрами никак не могут улучшить характеристики современных цифровых схем, использующих крем-

ниевые полевые транзисторы типа *FinFET*, *GAAFET* и *MBCFET*, в которых каналы представляют собой кремниевые нанопровода, сформированные внутри кристаллической структуры и имеющие вполне хорошие электрофизические свойства. Начиная примерно с 2015 г. основные поиски новых применений нанопроводов в электронике сместились в область квантовых эффектов при низких температурах [25—28].

2. Нереализованные возможности

Низкая подвижность электронов в нанопроводах, выращенных или размещенных на поверхности подложки, не является сюрпризом. От губительного воздействия подложки можно избавиться, если формировать нанопровода внутри гетероструктуры с двумерным электронным газом [29, 30]. Общая схема такого метода показана на рис. 2.

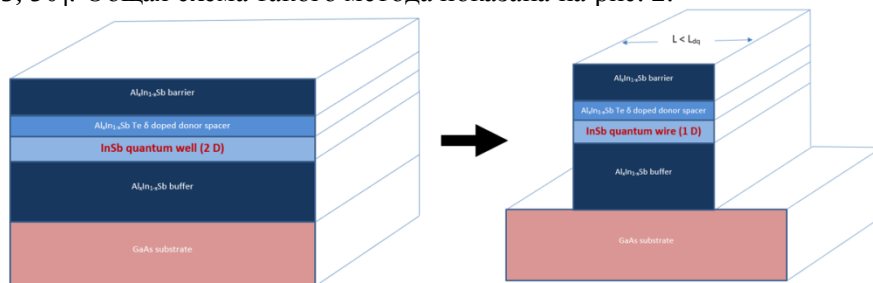


Рис. 2. Схема формирования нанопровода внутри гетероструктуры на примере QWFET.
 Fig. 2. Diagram of a nanowire formation inside of heterostructure into the example of QWFET

Согласно данным, представленным в работах [14, 15, 19], подвижность электронов в двумерном газе примерно в два раза меньше, чем в объемном материале. Измерения, проведенные для нанопроводов из антимонида индия внутри матрицы из анодного оксида алюминия [31], показывают снижение подвижности еще примерно в полтора раза до величины порядка $20000 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ при комнатной температуре. Но это в десятки раз больше чем значения, полученные для нанопроводов на поверхности подложки. Также эта величина почти вдвое больше рекордной подвижности при комнатной температуре в $10657 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$, полученной для электронов в канале *InP HEMT*, самого быстродействующего современного твердотельного электронного прибора [32—34].

Таким образом, использование нанопроводов из антимонида и арсенида индия, сформированных внутри гетероструктур, представляется перспективным направлением для создания компонентной базы сверхбыстродействующей цифровой электроники с низким энергопотреблением.

Важной особенностью этих двух материалов является малая эффективная масса электронов, составляющая $0,013 m_e$ и $0,026 m_e$ для *InSb* и *InAs* соответственно. Следствием этого оказывается сильная зависимость эффективной ширины запрещенной зоны в *InSb* и *InAs* нанопроводах от их поперечных размеров (рис. 3).

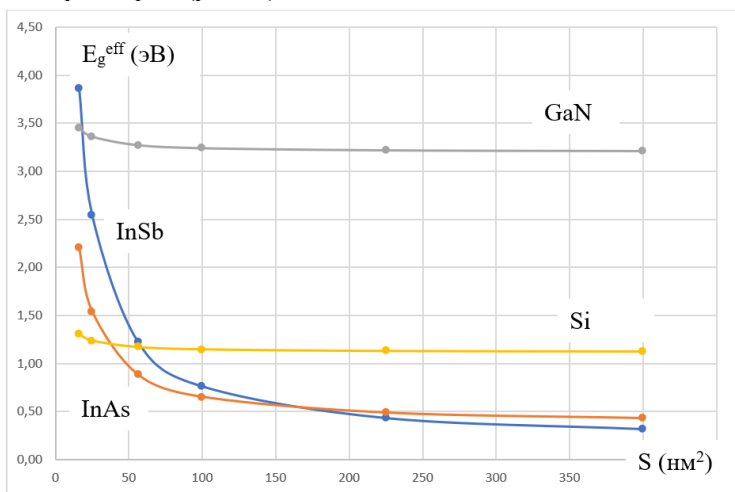


Рис. 3. Зависимость эффективной ширины запрещенной зоны (E_g^{eff}) полупроводниковых нанопроводов от площади их поперечного сечения (S).

Fig. 3. Dependence of effective band gap (E_g^{eff}) of semiconductor's nanowires from them cross-sectional area (S)

В отличие от нанопроводов из более широкозонных материалов с более тяжелыми электронами потенциальный рельеф в нанопроводах из антимонида и арсенида индия можно формировать путем изменения их геометрических размеров, начиная со значений в 20 нм. На рис. 4 представлен пример структуры, сформированной из нелегированных *InSb* нанопроводов различного поперечного сечения и двумерного *InSb*, а на рис. 5 — потенциальный рельеф для электронов в такой структуре. В расчетах предполагалось, что температура $T = 300^\circ K$, нанопровода имеют прямоугольное сечение, глубина квантовой ямы в направлении, перпендикулярном рисунку, $L_z = 20$ нм и $L_{y1} = L_{y3} = 20$ нм, $L_{y2} = 10$ нм, $L_{x1} = L_{x3} = 100$ нм, $L_{x2} = 150$ нм.

Указанные размеры вполне реализуемы на имеющихся в нашей стране электронных литографах. Перепады потенциала, получающиеся при изменении поперечного латерального размера нанопроводов в технологически достижимых пределах, могут изменяться от десятых долей до

единиц электрон-вольт, что позволяет использовать подобные структуры для создания электронных приборов, функционирующих при комнатной температуре [29, 35—39].

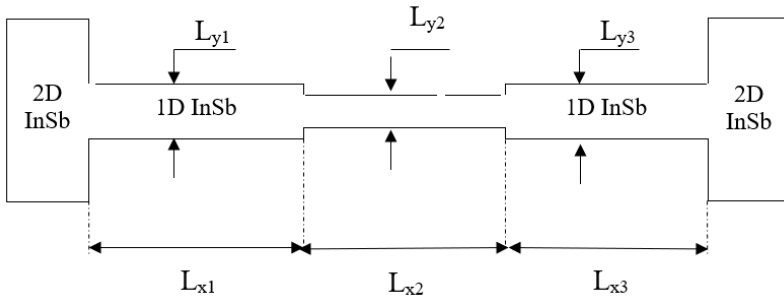


Рис. 4. Пример структуры из *InSb* нанопроводов, вид сверху.

Fig. 4. Example of the structure consists of *InSb* nanowires, top view

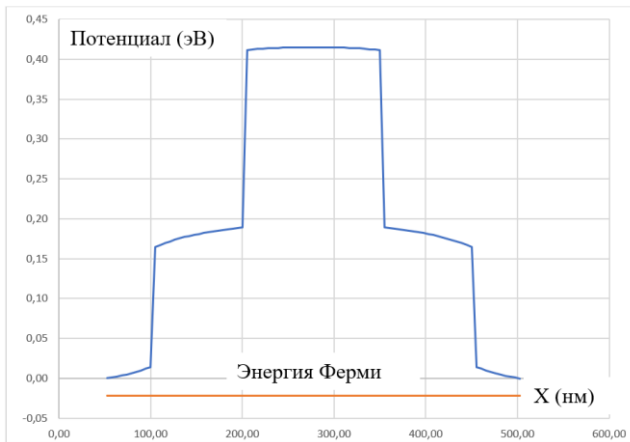


Рис. 5. Потенциальный рельеф для электронов в структуре, показанной на рис. 4, при: $L_z = 20$ нм, $L_{y1} = L_{y3} = 20$ нм, $L_{y2} = 10$ нм, $L_{x1} = L_{x3} = 100$ нм, $L_{x2} = 150$ нм.

Fig. 5. Potential relief for electrons in the structure from fig. 4 under conditions: $L_z = 20$ nm, $L_{y1} = L_{y3} = 20$ nm, $L_{y2} = 10$ nm, $L_{x1} = L_{x3} = 100$ nm, $L_{x2} = 150$ nm.

С подвижностью носителей заряда в полупроводнике тесно связана важная величина

$$L_{rel(e,p)} = \sqrt{\hbar \mu_{e,p} / e}$$

— длина релаксации неравновесных носителей заряда к состоянию равновесия [29, 30, 37—39]. Здесь $\hbar$ — приведенная постоянная Планка, $\mu_{e,p}$ — подвижность электронов или дырок, e — элементарный электрический заряд.

Таблица 2. Оценка длины релаксации неравновесных электронов при комнатной температуре в различных полупроводниках с различной квантовой размерностью.

Table 2. Estimation of relaxation length of nonequilibrium electrons under condition of room temperature in different semiconductors with different quantum dimensional

Материал	$L_{rel(e)}$ 3 D (нм)	$L_{rel(e)}$ 2 D (нм)	$L_{rel(e)}$ 1 D (нм)
Si	9,6	6,8	4,8
GaN	11,5	8,1	5,8
GaAs	22,2	15,8	11,2
InGaAs	36,3	25,7	18,2
InAs	44,4	31,5	22,3
InSb	71,6	50,8	36,0

Оценки этой длины для электронов при комнатной температуре в различных полупроводниках при различной квантовой размерности представлены в таблице 2. Как и следовало ожидать, наибольшей $L_{rel(e)}$ оказывается в антимониде индия. Причем следует особо подчеркнуть, что численные значения этой длины при любой квантовой размерности оказываются в пределах, достижимых для современных экспериментальных российских технологий.

3. Не созданные приборы

Формируя различные потенциальные рельефы и используя свойства неравновесных электронов, можно на основе нанопроводов создавать новые квантовые приборы, работающие при комнатной температуре [35—43], ожидаемое быстродействие которых существенно выше имеющихся в настоящее время функциональных аналогов, а энергопотребление многократно ниже.

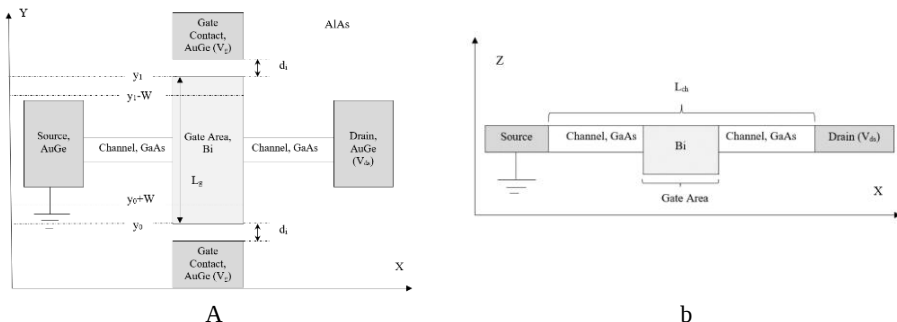


Рис. 6. ПТНПМЗ: а — вид сверху, б — сечение плоскостью ZX.

Fig. 6. Field effect transistor with nanowire channel and metal gate:
a — top view; b — cross section ZX

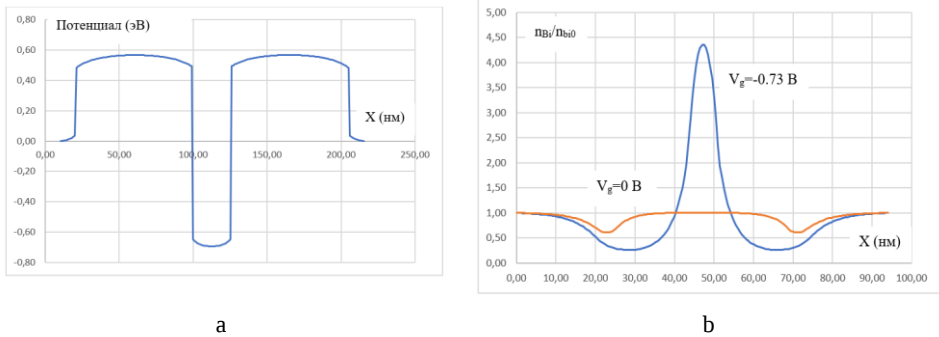


Рис. 7. Потенциальный рельеф вдоль канала ПТНПМЗ (а) и распределение нормированной концентрации электронов вдоль затвора при $V_g = 0$ В и $V_g = -0.73$ В (б).

Fig. 7. Potential relief along channel of a field effect transistor with nanowire channel and metal gate (a) and normalized electron concentration in gate when $V_g = 0$ V and $V_g = -0.73$ V (b)

Один из таких приборов — полевой транзистор с каналом из нанопровода и металлическим затвором (ПТНПМЗ) [40, 41], конструкция которого представлена на рис. 6. От обычного полевого транзистора он отличается принципом формирования потока электронов в канале. Здесь избыточные электроны инжектируются в канал из пересекающего его металлического нанопровода, а количество этих электронов регулируется напряжениями на затворах. Изменяя площадь сечения канала, можно создавать как нормально закрытые, так и нормально открытые транзисторы этого типа. Носителями заряда в обоих случаях остаются электроны.

На рис. 7 показаны потенциальный рельеф для электронов вдоль канала ПТНПМЗ при нулевых приложенных напряжениях $V_{ds} = 0$ В и $V_g = 0$ В и распределение электронов в затворе при $V_g = 0$ В и $V_g = -0.73$ В. Металлический затвор образует потенциальную яму для электронов. При приложении к контактам затвора отрицательного напряжения концентрация электронов в центре затвора увеличивается и, кроме того, энергия дна потенциальной ямы увеличивается. Оба эти процесса приводят к обогащению канала транзистора электронами. Если приложенное к контактам затвора напряжение положительно, то происходит уменьшение концентрации электронов в канале.

ВАХ транзистора представлены на рис. 8. В статьях [40, 41] показано, что его подпороговая крутизна может в несколько раз превышать термозмиссионный предел — величину $e/k_B T \ln(10) \sim (60 \text{ мВ/декаду})^{-1}$ при комнатной температуре. Этот результат является следствием изменения положения дна потенциальной ямы для электронов, образованной металлическим затвором при изменениях V_g . Отношение токов транзистора в

открытом и закрытом состоянии порядка 10^{15} , а мощность, выделяемая в закрытом состоянии, зависит от сечения канала нанопровода и для площади в 25 нм^2 составляет сотые доли пВт.

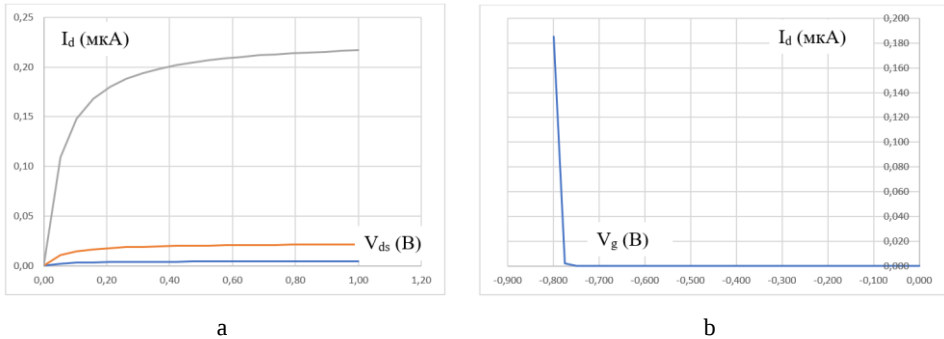


Рис. 8. ВАХ ПТНПМЗ: а — выходные характеристики транзистора при $V_g = -0.73 \text{ В}, -0.735 \text{ В}, -0.740 \text{ В}$ (кривые снизу вверх);

б — передаточная характеристика транзистора при $V_{ds} = 0.530 \text{ В}$.

Fig. 8. Current-voltage characteristics of the field effect transistor with nanowire channel and metal gate: а — output characteristics of the transistor under conditions $V_g = -0.73 \text{ V}, -0.735 \text{ V}, -0.740 \text{ V}$;

б — transfer characteristic of the transistor under condition $V_{ds} = 0.530 \text{ V}$

Следующий прибор, от которого можно ожидать рекордных характеристик, это релаксационный квантовый транзистор (РКТ). Вариант конструкции этого прибора показан на рис. 9. В основе функционирования РКТ лежит управление потоком инжектируемых из эмиттера в базу неравновесных электронов посредством внешнего сигнала [35, 38], а не эффект поля. Поэтому на него не распространяются указанные ранее ограничения, присущие полевым транзисторам.

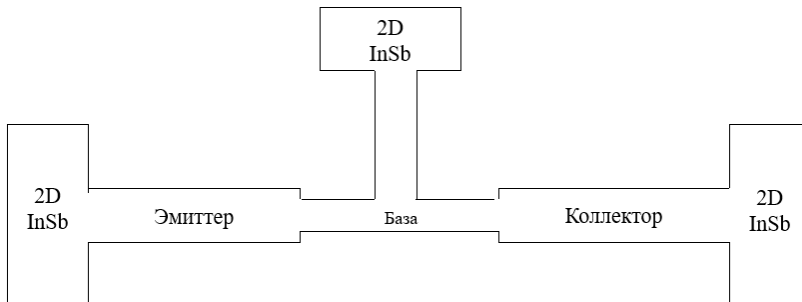


Рис. 9. Релаксационный квантовый транзистор, вид сверху.

Fig. 9. Relaxation quantum transistor, top view

Таблица 3. Характеристики транзисторов для цифровых схем.

Table 3. Characteristics of the transistors for digital circuits

Прибор	Частота отсечки (ГГц)	Рабочее напряжение (В)	Управляющее напряжение (В)	Рабочая плотность тока (мкА/мкм)	Плотность тока утечки (мкА/мкм)	Энергопотребление в открытом состоянии (нВт)	Энергопотребление в закрытом состоянии (нВт)
Si FinFET	199	0,75	0,75	100	0,100	11250	11,2500
Si GAAFET	318	0,60	0,60	500	0,100	15000	3,0000
Si-Ge GAAFET	354	0,50	1,00	700	0,001	35000	0,500
InGaAs-on-Insulator n-FinFET	980	0,50	0,50	250	0,100	7500	3,0000
InSb PKT	3180	0,1	0,01	10	0,001	10	0,05

На рис. 10, 11 и 12 представлены статические характеристики InSb PKT с длиной базы 30 нм, рассчитанные при комнатной температуре. Оценка предельной частоты транзистора с учетом вклада в удельную емкость заряда подвижных носителей дает величину в 2 120 ГГц. При уменьшении длины базы до 25 нм расчетная частота оказывается выше 3 ТГц. Сравнение характеристик InSb PKT с характеристиками других транзисторов для цифровой электроники дано в таблице 3.

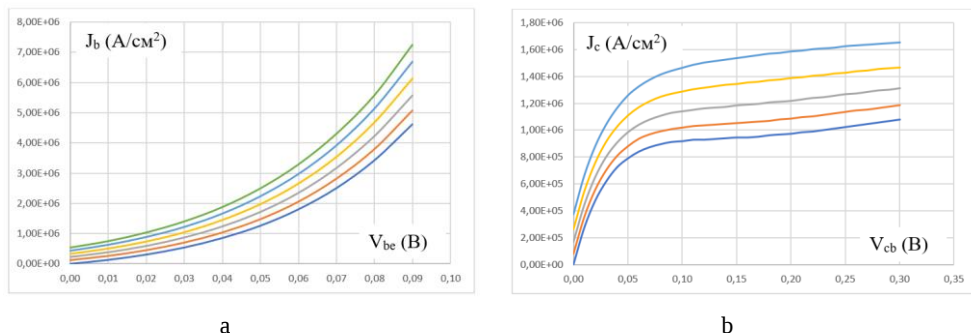


Рис. 10. ВАХ PKT при схеме включения с общей базой: а — входные ВАХ при изменении V_{cb} от 0 В до 0,25 В с шагом 0,05 В (кривые снизу вверх); б — выходные ВАХ при изменении плотности тока базы J_b от 0 мА/см² до 4 мА/см² с шагом 1 мА/см² (кривые снизу вверх).

Fig. 10. Current-voltage characteristics of the relaxation quantum transistor in circuit with a common base: a – input current-voltage characteristics when changes V_{cb} from 0 V to 0.25 V in steps of 0.05 V (curves from bottom to top); b – output current-voltage characteristics when the base current density J_b changes from 0 mA/cm² to 4 mA/cm² with a step of 1 mA/cm² (curves from bottom to top)

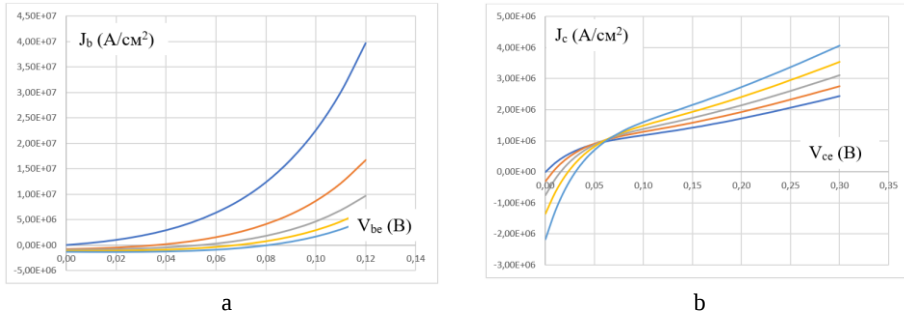


Рис. 11. ВАХ РКТ при схеме включения с общим эмиттером: а — входные ВАХ при изменении V_{ce} от 0 В до 0,2 В с шагом 0,05 В (кривые снизу вверх); б — выходные ВАХ при изменении V_{be} от 0 В до 0,04 В с шагом 0,01 В (кривые снизу вверх).

Fig. 11. Current-voltage characteristics of the relaxation quantum transistor in circuit with a common emitter: а — input current-voltage characteristics when changes V_{ce} from 0 V to 0.2 V in steps of 0.05 V (curves from bottom to top); б — output current-voltage characteristics when changes V_{be} from 0 V to 0.04 V with a step of 0.01 V (curves from bottom to top)

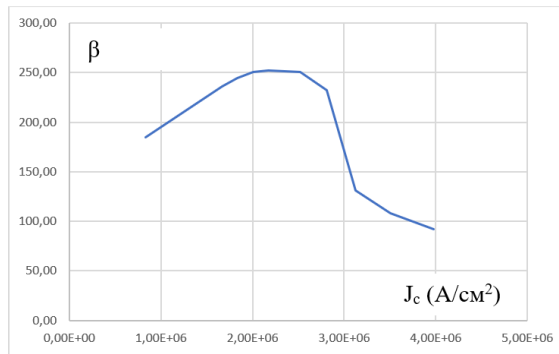


Рис. 12. Зависимость коэффициента усиления РКТ по току при схеме включения с общим эмиттером β от плотности тока коллектора при $V_{ce} = 0.25$ В.

Fig. 12. . Dependence of the relaxation quantum transistor current gain in a common-emitter circuit β from collector current density at $V_{ce} = 0.25$ V

В работах [30, 42] и на рис. 13, 14 представлены результаты расчетов характеристик некоторых логических схем на основе РКТ. Частоты функционирования этих схем превышают 100 ГГц при максимальном удельном энергопотреблении в десятки нВт на элемент. При помощи РКТ может быть реализована сверхбыстродействующая транзисторно-транзисторная логика, широко применявшаяся в цифровой электронике вплоть до 90-х годов прошлого столетия. От нее отказались в пользу КМОП логики из-за высокого энергопотребления используемых биполярных транзисторов и соответствующего сильного разогрева микросхем при эксплуатации, пре-

пытствовавшего повышению уровня интеграции элементов. Предлагаемый релаксационный квантовый транзистор имеет низкое энергопотребление и сверхвысокую предельную частоту функционирования.

Против применения антимонида индия в электронике часто используется аргумент: у этого материала слишком узкая запрещенная зона (0,17 эВ при комнатной температуре), и поэтому приборы на его основе станут неработоспособными даже при незначительном повышении температуры. Однако, как видно на рис. 3, у нанопроводов из антимонида индия эффективная ширина запрещенной зоны существенно изменяется и может достигать величин на порядок больших, чем в объемном материале. Так, при комнатной температуре в пленке, толщиной 20 нм $E_g^{eff} = 0,244$ эВ в нанопроводе с площадью сечения 400 нм^2 — 0,370 эВ, а при площадях сечения в 100 нм^2 , 56 нм^2 и 25 нм^2 — 0,76 эВ, 1,22 эВ и 2,54 эВ соответственно. Так что указанный аргумент оказывается несостоятельным.

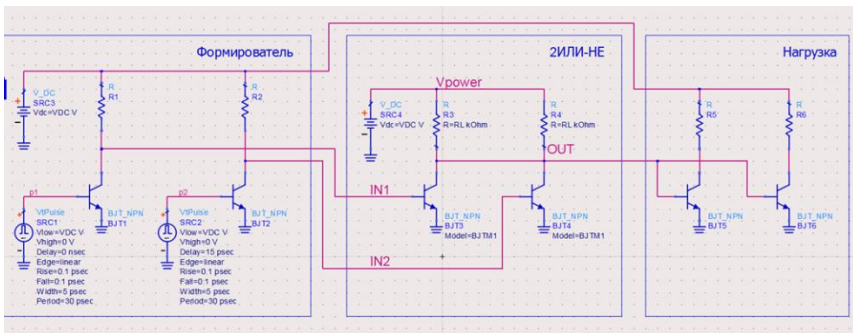


Рис. 13. Схема 2ИЛИ-НЕ на основе ПКТ.

Fig. 13. Circuit 2OR-NO, based on relaxation quantum transistor

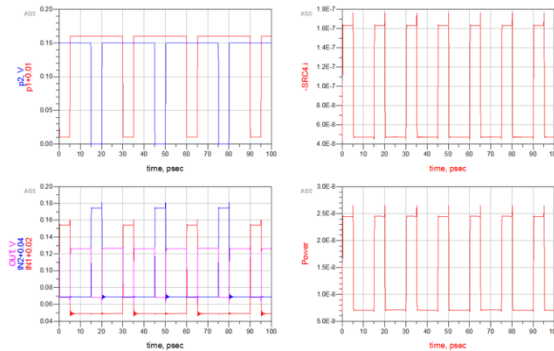


Рис. 14. Результаты моделирования схемы, представленной на рис. 13.

Fig. 14. Results of simulation of circuit presented on fig. 13

Важнейшим устройством современной цифровой электроники является энергонезависимая память. Сейчас большинство микросхем памяти использует в качестве базового элемента полевой транзистор с плавающим затвором. Для него справедливы все ограничения по быстродействию для полевых транзисторов, рассмотренные выше.

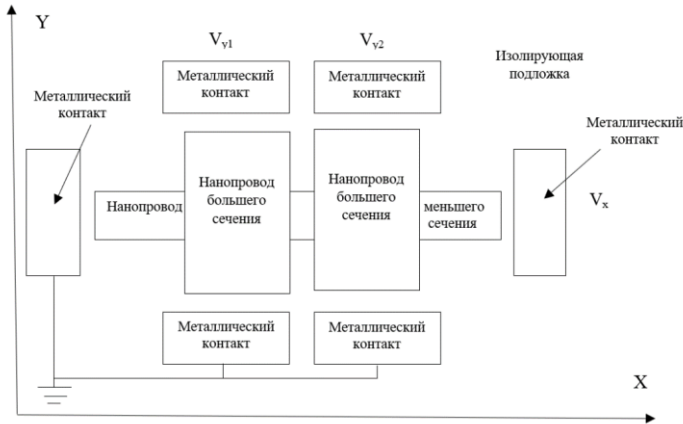
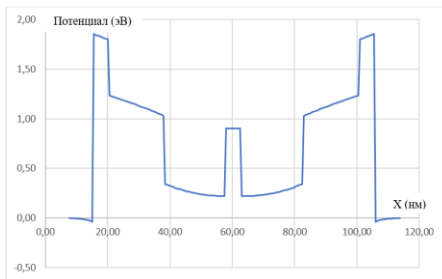
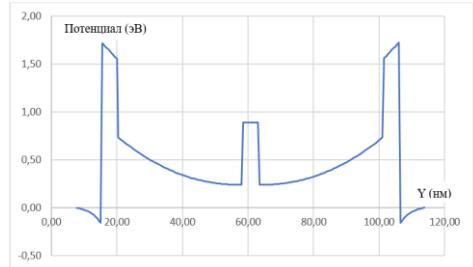


Рис. 15. Ячейка памяти на пересекающихся нанопроводах.

Fig. 15. Memory cell based on crossed nanowires



a



b

Рис. 16. Потенциальные рельефы для электронов в ячейке памяти на основе пересекающихся нанопроводов при нулевых смещениях: а — вдоль «тонкого» нанопровода; б — вдоль «толстого» нанопровода.

Fig. 16. Potential reliefs for electrons in memory cell based on crossed nanowires under zero voltage: a – in a “thin” nanowire; b – in a “thick” nanowire

В работах [41, 43] предложен вариант ячейки памяти на пересекающихся нанопроводах. Ее конструкция показана на рис. 15, а на рис. 16 представлены потенциальные рельефы вдоль «тонкого» и «толстого» нанопроводов при нулевых смещениях V_x и $V_{y1,2}$. Как и в случае РКТ, по-

тенциальные рельефы здесь формируются путем соединения нанопроводов из одного и того же материала, но различного поперечного сечения.

Приложение напряжения $V_x > 0$ искажает потенциальный рельеф и приводит к перетеканию электронов между потенциальными ямами вдоль «тонкого» нанопровода, как показано на рис. 17. Это индуцирует разность потенциалов между контактами «толстых» нанопроводов V_{y1} и V_{y2} . В случае, представленном на рис. 17, 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 возникнет разность потенциалов $V_y = V_{y1} - V_{y2} = 0,236$ В.

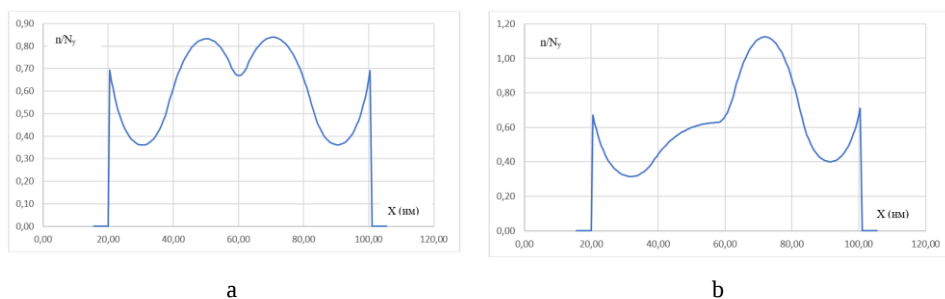


Рис. 17. Концентрация электронов в «тонком» нанопроводе, нормированная на уровень легирования «толстого» нанопровода N_y , при: а — $V_x = 0$ В, б — $V_x = 0.5$ В.

Fig. 17. Electron concentration in a “thin” nanowire normalized to impurity concentration in “thick” nanowire N_y under conditions: а — $V_x = 0$ V, б — $V_x = 0.5$ V

Согласно сделанным в работах [41, 43] оценкам, ячейка памяти на пересекающихся нанопроводах может обеспечить скорость записи информации в сотни Тбайт/с. Характерные значения напряжений записи и чтения информации — десятки доли вольт. При напряжении в $V_x = 0,5$ В расчетный ток утечки прибора порядка 10^{-29} А, а емкость порядка 10^{-20} Ф. То есть время хранения информации в ячейке составляет примерно 16 лет.

4. Заключение

В статье рассмотрены современное состояние и перспективы развития компонентной базы цифровой электроники, уже длительное время находящейся в стагнации. Большая часть исследований в этой области посвящена разнообразным способам совершенствования основного элемента — полевого транзистора все меньших и меньших размеров. Однако на этом пути имеется принципиальное ограничение: чем меньше транзистор, тем менее эффективным становится полевое управление его характеристиками. Судя по наблюдаемым трендам, предел повышения эффективности уже достигнут.

Для выхода из сложившейся ситуации предлагается обратить внимание на два эффекта, которые в настоящее время практически не используются в конструкциях современных твердотельных электронных приборов. Первый — это сильная зависимость эффективной ширины запрещенной зоны полупроводниковых структур пониженной квантовой размерности от их геометрических размеров, если эти размеры меньше некоторого порогового значения, определяемого эффективными массами электронов и дырок. Это позволяет, изменяя только геометрию структуры, создавать разнообразные потенциальные рельефы для носителей заряда. Второй — формирование потоков неравновесных носителей заряда при протекании тока через неоднородности потенциального рельефа. Длина и время релаксации неравновесных квазичастиц к состоянию равновесия малы, и по этой причине они мало влияют на функционирование стандартных полупроводниковых приборов. Используя эту неравновесность, можно попытаться спроектировать новые приборы с уникальными характеристиками.

В качестве примеров полупроводниковых приборов, при проектировании которых использованы указанные эффекты, рассмотрены: полевой транзистор с металлическим затвором, релаксационный квантовый транзистор и ячейка памяти на пересекающихся нанопроводах. Если эти элементы будут созданы и эксперименты подтвердят расчетные характеристики, то можно надеяться на появление микропроцессоров с тактовыми частотами до 100 ГГц и энергопотреблением на порядок меньшим, чем у современных, а также других сверхбыстродействующих электронных схем. Нет сомнений, что для таких устройств найдутся многочисленные применения, особенно в мобильных и робототехнических системах. Отдельно отметим, что для создания рассмотренных приборов достаточно имеющихся в нашей стране технологий.

Список литературы

1. Nanodevices for Integrated Circuit Design. Ed. by S. L. Tripathi, A. Kumar, K. Srinivasa Rao, P. R. Mudimela. Scrivener Publishing, Wiley, 2023. 275 p.
2. Josephine A. A., Gracia D., Jackuline M. D., DC and RF analysis of Vertical 3D p-type Silicon Nanotube FET for low power applications // *International Journal of Electronics*. 2022. V. 109. P. 721–734.
3. Жалнин В. П., Власов А. И., Коробенко И. С., Шадрин Ю. А. Анализ тенденций развития полевых транзисторов // *Труды МЭС-2022*. 2022. С. 53—60.
4. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13, № S5-1 (102). С. 13—19.
5. Ляпидевский А. В., Жмудь В. А. Основные исследования зарубежной электроники и фотоники // *Автоматика и программная инженерия*. 2023. № 2(44). С. 100—150.
6. Joshi Y. DARPA Thermal Management Initiatives in Support of Three Dimensional Heterogeneous Integration. In : *IMAPS/IPC Workshop on ON-SHORING ADVANCED PACKAGING AND ASSEMBLY*. Tysons Corner, VA, July 11, 2023, 31 p.

7. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 488 с.
8. Magno R., Boos J. B. Campbell P. M. et al. High speed, low power electronics using Sb-based semiconductors. In : IEEE Conference: Compound Semiconductors, 2003. P. 175–176.
9. Intel и QinetiQ анонсировали некремниевый высокопроизводительный транзистор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kv.by/archive/index2005073401.htm>. (дата обращения: 22.11.2024).
10. Ashley T., Barnes A. R., Buckle L. et al. InSb-based Quantum Well Transistors for High Speed, Low Power Applications. In : 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr. 2005.
11. Datta S., Ashley T., Brask J. et al. 85nm Gate Length Enhancement and Depletion mode InSb Quantum Well Transistors for Ultra High Speed and Very Low Power Digital Logic Applications. In : IEDM Technical Digest. 2005. P. 763–766.
12. Liu J. An Evaluation of Indium Antimonide Quantum Well Transistor Technology. MIT, 2006. 102 p.
13. Radosavljevic M., Ashley T., Andreev A. et al. High-Performance 40nm Gate Length InSb p-Channel Compressively Strained Quantum Well Field Effect Transistors for Low-Power (VCC=0.5V) Logic Applications. In : IEDM 2008. IEEE International, 2008. P. 727–730.
14. Kulkarni J. P., Roy K. Technology Circuit Co-Design for Ultra Fast InSb Quantum Well Transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55, No. 10. P. 2537–2545.
15. Subash T. D., Gnanasekaran T., Divya C. Performance analysis of InSb based QWFET for ultra high speed applications // Journal of Semiconductors. 2015. Vol. 36, No. 1. P. 014003-1–014003-4.
16. Mahtab S. S., Alam M. J., Khan A. M. et al. Optimization of InSb QWFET Layer Structure for High-Speed and Low Power Nano Electronics Applications. In : Proceedings of the 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). 2017. P. 707–712.
17. Обухов И. А., Обухов И. И. Моделирование характеристик полевого транзистора с каналом из антимионид индия // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 2. С. 190—207.
18. Royter Y., Elliott K. R., Deelman P. W. et al. High frequency InAs-channel HEMT's for low power ICs. In : IEDM'03 Technical Digest. IEEE International, 2003. P. 731–734.
19. Суханов М. А., Бакаров А. К., Журавлев К. С. AlSb/InAs-гетероструктуры для СВЧ транзисторов // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, вып. 3. С. 37—39.
20. Martel R., Schmidt T., Shea H. R. et al. Singl- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors // Apl. Phys. Lett. 1998. V. 73, No 17. P. 2447–2449.
21. Das S. R., Delker C. J., Zakharov D. et al. Room temperature device performance of electrodeposited InSb nanowire field effect transistors // Apl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 243504-1–243504-3.
22. Yang Z-X., Han N., Wang F. et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors // Nanoscale. 2013. V. 5. P. 9671–9676.
23. Khan M. I., Penchev M., Jing X. et al. Electrochemical Growth of InSb Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. 2008. V. 3. P. 199–202.
24. Zhang C., Miao X., Mohseni P. K. et al. Site-Controlled VLS Growth of Planar Nanowires: Yield and Mechanism // Nano Letters. 2014. V. 14, No 12. P. 6836-41. doi: 10.1021/nl502525z.
25. Fadaly E. M. T., Zhang H., Conesa-Boj S. Observation of Conductance Quantization in InSb Nanowire Networks // Nano Letters. 2017. V. 17(11). doi: 10.1021/acs.nanolett.7b00797.
26. Gazibegovic S., Car D., Zhang H. et al. Epitaxy of advanced nanowire quantum devices // Nature. 2017. V. 548. P. 434–445.
27. Badawy G., Zhang B., Rauch T. et al. Electronic Structure and Epitaxy of CdTe Shells on InSb Nanowires // Adv. Sci. 2022. V. 9. P. 2105722-1–2105722-8.

28. Zatelli F., Driell D. van, Xu D. et al. Robust poor man's Majorana zero modes using Yu-Shiba-Rusinov states // *Nature Communications*. 2024. V. 15. P.7933-1 –7933-9. doi: 10.1038/s41467-024-52066-2.
29. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : Вебер, 2005. 226 с.
30. Балабанов В. М., Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Цифровые схемы на основе квантовых транзисторов // *Микроэлектроника*. 2021. Т. 50, № 3. С. 190–198. doi: 10.31857/S0544126921030030.
31. Божьев И. В., Горох Г. Г., Карушкин Н. Ф. и др. Электрические характеристики нанопроводов антимонида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 1041—1046.
32. Федоров Ю. В., Щербакова М. Ю., Гнатюк Д. Л. И др. НЕМТ на гетероструктурах $In_{0,52}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As/InP$ с предельной частотой усиления по мощности до 323 ГГц // *Доклады ТУСУР*. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 191—197.
33. Майская В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон // *Электроника. Наука, технология, бизнес*. 2011. № 8 (00114). С. 74—87.
34. Малеев Н. А., Васильев А. П., Кузьменков А. Г. и др. InAlAs/InGaAs/InP HEMT's с композитным каналом и улучшенными пробивными характеристиками // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45, вып. 21. С. 29—33.
35. Обухов И. А. О возможности создания релаксационных квантовых приборов // *Письма в ЖТФ*. 1993. Т. 19, вып. 17. С. 12—16.
36. Обухов И. А. Приборы на основе квантовых проводов : перспективы и проблемы. В сб. : 6-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'96 (Севастополь, 16—19 сент. 1996 г.). 1997. С. 55—64.
37. Обухов И. А. Неравновесные эффекты в электронных приборах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : Вебер, 2010. 303 с.
38. Obukhov I. A. Planar One-Dimensional Quantum Devices // *Nanoscience and Nanotechnology*. 2013. V. 3, No.5. P. 115—122. doi: 10.5923/j.nn.20130305.02.
39. Obukhov I. A. Nonequilibrium Effects in One-Dimensional Quantum Devices. Saarbrucken. LAMBERT Academic Publishing, 2014. 132 p.
40. Обухов И. А. Полевой транзистор с металлическим затвором // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 275—284. doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21.
41. Обухов И. А., Обухов И. И. Приборы на основе пересекающихся нанопроводов // *Нано- и микросистемная техника*. 2024. Т. 26, № 1. С. 42—51. doi: 10.17587/nmst.26.42-51.
42. Обухов И. А., Балабанов В. М. Некоторые возможности квантовых интегральных схем. В сб. : 9-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'99 (Севастополь, 13—16 сент. 1999 г.). 1999. С. 76—77.
43. Обухов И. А., Обухов И. И. Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 44—52. doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.04.

Информация об авторе

Обухов Илья Андреевич, доктор физико-математических наук, технический директор АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Ultra-High-Speed Low-Power Electronics

I. A. Obukhov

Scientific-Industrial Company "Radiotechnika"

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

Received: November 29, 2024

Peer-reviewed: December 2, 2024

Accepted: December 2, 2024

Abstract: The current state and prospects of development of the component base for ultra-high-speed electronics with low power consumption are considered. Approaches to the design of solid-state electronic devices based on nanowires that can be used in future digital electronics and they constructions are proposed. Estimates of the expected characteristics of these devices are presented.

Keywords: nanowire, field effect transistor, relaxation quantum transistor, indium antimonide (InSb), indium arsenide (InAs), digital electronics, terahertz range.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov, "Ultra-High-Speed Low-Power Electronics," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 72–93, 2025.
doi: 10.21227/43ay-6s44. (In Russ.).

References

- [1] *Nanodevices for Integrated Circuit Design*, ed. by S. L. Tripathi, A. Kumar, K. S. Rao and P. R. Mudimela. Scrivener Publishing, Wiley, 2023.
- [2] A. A. Josephine, D. Gracia, and M. D. Jackuline, "DC and RF analysis of Vertical 3D p-type Silicon Nanotube FET for low power applications", *International Journal of Electronics*, vol. 109, pp. 721–734, 2022.
- [3] V. P. Zhalnin, A. I. Vlasov, I. S. Korobenko, and Y. A. Shadrin, "Analysis of trends in the development of field-effect transistors," in : *Proceedings of MES-2022*, pp. 53–60, 2022. doi: 10.31114/ 2078-7707-2022-2-53-60. (In Russ.).
- [4] G. Ya. Krasnikov, "The Capabilities of Microelectronic Processes with 5 nm Critical Dimension and Less," *Nanoindustry*, vol. 13, no. S5-1 (102), pp. 13–19, 2020. (In Russ.).
- [5] A. V. Liapedevskii and V. A. Zhmud, "Osnovnie issledovaniia zarubeznoi elektroniki i fotoniki [Main researches of foreign electronics and photonics]", *Avtomatika i programnaia inzheneria*, no 2(44), pp. 10–150, 2023. <http://www.jurnal.nips.ru> (In Russ.).
- [6] Y. Joshi, "DARPA Thermal Management Initiatives in Support of Three Dimensional Heterogeneous Integration", in: *IMAPS/IPC Workshop on ON-SHORING ADVANCED PACKAGING AND ASSEMBLY*. Tysons Corner, VA, July 11, 2023.
- [7] A. I. Lebedev, *Physics of semiconductor devices*. Moscow: FIZMATLIT, 2008. (In Russ.).
- [8] R. Magno, J. B. Boos, P. M. Campbell, et al., "High speed, low power electronics using Sb-based semiconductors", in: *IEEE Conference: Compound Semiconductors, 2003*, pp. 175–176, 2003. doi: 10.1109/ISCS.2003.1239962.
- [9] High-Tech Club, Intel and QinetiQ announce non-silicon high-performance transistor. High-Tech Club. URL: <https://www.kv.by/archive/index2005073401.htm> (Accessed: November 30, 2024). (In Russ.).

- [10] T. Ashley, A. R. Barnes, L. Buckle, et al., "InSb-based Quantum Well Transistors for High Speed, Low Power Applications," in : *2005 GaAs MANTECH Conf. Dig.*, pp., 2005.
- [11] S. Datta, T. Ashley, J. Brask, et al., "85nm Gate Length Enhancement and Depletion mode InSb Quantum Well Transistors for Ultra High Speed and Very Low Power Digital Logic Applications", in *IEDM Technical Digest*, pp. 763–766, 2005.
- [12] J. Liu, "An Evaluation of Indium Antimonide Quantum Well Transistor Technology," MIT, 2006.
- [13] M. Radosavljevic, T. Ashley, A. Andreev., et al., "High-Performance 40nm Gate Length InSb p-Channel Compressively Strained Quantum Well Field Effect Transistors for Low-Power (VCC=0.5V) Logic Applications," in *IEDM 2008. IEEE International, 2008*, pp. 727–730, 2008. doi: 10.1109/IEDM.2008.4796798.
- [14] J. P. Kulkarni and K. Roy, "Technology Circuit Co-Design for Ultra Fast InSb Quantum Well Transistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 55, no. 10, pp. 2537–2545, 2008. doi: 10.1109/TED.2008.2003030.
- [15] T. D. Subash, T. Gnanasekaran, and C. Divya, "Performance analysis of InSb based QWFET for ultra high speed applications," *Journal of Semiconductors*, vol. 36, no. 1, pp. 014003-1–014003-4, 2015. doi: 10.1088/1674-4926/36/1/014003.
- [16] S. S. Mahtab, M. J. Alam, A. M. Khan, et al., "Optimization of InSb QWFET Layer Structure for High-Speed and Low Power Nano Electronics Applications," in *Proceedings of the 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 707–712, 2017. doi: 10.1109/ICAEE.2017.8255447.
- [17] I. A. Obukhov and I. I. Obukhov, "Simulation of Characteristics of FET with Indium Antimonide Channel," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 2, pp. 190–207, 2024. (In Russ.).
- [18] Y. Royter, K. R. Elliott, P. W. Deelman, et al., "High frequency InAs-channel HEMT's for low power ICs," in *IEDM'03 Technical Digest. IEEE International, 2003*, pp. 731–734, 2003. doi: 10.1109/IEDM.2003.1269385.
- [19] M. A. Sukhanov, A. K. Bakarov, and K. S. Zhuravlev, "AlSb/InAs Heterostructures for Microwave Transistors", *Tech. Phys. Lett.*, vol. 47, pp. 139–142, 2021. doi: 10.1134/S1063785021020127.
- [20] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and Ph. Avouris, "Singl- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors," *Apl. Phys. Lett.*, vol. 73, no 17, pp. 2447–2449, 1998.
- [21] S. R. Das, C. J. Delker, D. Zakharov, et al., "Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, p. 243504-1–243504-3, 2011. doi: 10.1063/1.3587638.
- [22] Z.-X. Yang, N. Han, et al., "Carbon doping of InSb nanowires for high-performance pchannel field-effect-transistors," *Nanoscale*, vol. 5, pp. 9671–9676, 2013. doi: 10.1039/c3nr03080f.
- [23] M. I. Khan, M. Penchev, X. Jing, et al., "Electrochemical Growth of InSb Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor," *J. Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol. 3, pp. 199–202, 2008.
- [24] C. Zhang, X. Miao, P. K. Mohseni, et al., "Site-Controlled VLS Growth of Planar Nanowires: Yield and Mechanism," *Nano Letters.*, vol. 14, no 12, pp. 6836–6841, 2014. doi: 10.1021/nl502525z.
- [25] E. M. T. Fadaly, H. Zhang, and S. Conesa-Boj, "Observation of Conductance Quantization in InSb Nanowire Networks," *Nano Letters*, vol. 17(11), 2017. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b00797.
- [26] S. Gazibegovic, D. Car, H. Zhang, et al., "Epitaxy of advanced nanowire quantum devices," *Nature*, vol. 548, pp. 434–445, 2017.
- [27] G. Badawy, B. Zhang, T. Rauch, et al., "Electronic Structure and Epitaxy of CdTe Shells on InSb Nanowires," *Adv. Sci.*, vol. 9, pp. 2105722-1–2105722-8, 2022.

- [28] F. Zatelli, D. van Driel, D. Xu, et al., “Robust poor man’s Majorana zero modes using Yu-Shiba-Rusinov states,” *Nature Communications*, vol. 15, P.7933–1–7933-9, 2024. doi: 10.1038/s41467-024-52066-2.
- [29] I. A. Obukhov, *Modeling of charge transport in mesoscopic structures*, Moscow–Kiev–Minsk–Sevastopol: Weber, 2005. (In Russ.).
- [30] V. M. Balabanov, N. F. Karushkina, I. A. Obukhov, and E. A. Smirnova “Digital Circuits Based on Quantum Transistors,” *Russian Microelectronics*, vol. 50, no. 3, pp. 161–169, 2021. doi: 10.1134/S1063739721030033.
- [31] I. V. Bozh’ev, G. G. Gorokh, N. F. Karushkin, et al., “Electrical characteristics of indium antimonide nanowires in porous matrices of anodic aluminum oxide,” in *28th Int. Crimean conf. “Microwave and telecommunication technology” – CriMiCo’2018*, Sevastopol, 2018, vol. 4, pp. 1041–1046, 2018. (In Russ.).
- [32] Yu. V. Fedorov, M. Yu. Scherbakova, D. L. Gnatyuk, N. G. Yaremenko, and V. A. Strahov, “ $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As/InP$ HEMT with Maximum Frequency of Oscillation up to 323 GHz,” *Doklady TUSURa*, no. 2(22), part 1, pp. 191–197. (In Russ.).
- [33] V. Maiskaia “Osvoenie teragertsovoi theli. Poluprovodnikovie pribori vtorgautsia v milimetrovii diapazon [Mastering the Terahertz Gap: Semiconductor Devices Enter the Submillimeter Range],” *Elektronika. Nauka, tekhnologiya, biznes*, no 8 (00114), pp. 74–87, 2011. (In Russ.).
- [34] N. A. Maleev, A. P. Vasil’ev, A. G. Kuzmenkov, et al., “InAlAs/InGaAs/InP High-Electron-Mobility Transistors with a Composite Channel and Higher Breakdown Characteristics,” *Tech. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 1092–1096, 2019). doi: 10.1134/S1063785019110075.
- [35] I. A. Obukhov, “About the Possibility of Relaxation Quantum Devices Creation,” *Tech. Phys. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 537–538, 1993.
- [36] I. A. Obukhov “Devices dased on quantum wires: perspectives and problems,” in *6th Int. Crimean conf. “Microwave and telecommunication technology” – CriMiCo’1996*, Sevastopol, 1996, pp. 55–64, 1997. (In Russ.).
- [37] I. A. Obukhov, *Nonequilibrium effects in electron devices*, Moscow–Kiev–Minsk–Sevastopol: Weber, 2010. (In Russ.).
- [38] I. A. Obukhov, “Planar One-Dimensional Quantum Devices,” *Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 3, no.5, pp. 115–122, 2013. doi: 10.5923/j.nn.20130305.02.
- [39] I. A. Obukhov, *Nonequilibrium Effects in One-Dimensional Quantum Devices*, Saarbrucken : LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- [40] I. A. Obukhov, “Field Effect Transistor with Metal Gate,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 275–284, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21. (In Russ.).
- [41] I. A. Obukhov and I. I. Obukhov, “Devices Based on Crossed Nanowires,” *Nano- i Mikro-sistemnaya Tekhnika*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 42–51, 2024. doi: 10.17587/nmst.26.42-51.
- [42] I. A. Obukhov and V. M. Balabanov, “Some possibilities of quantum integrated circuits,” in *9th Int. Crimean conf. “Microwave and telecommunication technology” – CriMiCo’99*, Sevastopol, 1999, pp. 76–77. (In Russ.).
- [43] 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.).

Information about the author

Ilya A. Obukhov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.