

УДК 621.315.592: 621.383.5: 537.311.322

## НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ КОЛОДЦАХ ДИЭЛЕКТРИК/КРЕМНИЙ/ДИЭЛЕКТРИК

А.Л. ДАНИЛЮК, Ю.А. БЕРАШЕВИЧ, А.В. КОРОЛЕВ, А.Н. ХОЛОД, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 19 ноября 2003*

Обобщены результаты исследования закономерностей транспорта носителей заряда, зарядовых и резонансных эффектов в наноразмерных периодических структурах диэлектрик/кремний/диэлектрик. Рассмотрены механизмы возникновения отрицательного дифференциального сопротивления и гистерезиса на их вольт-амперных характеристиках. Представлены конструкции новых нанoeлектронных приборов на нелинейных электронных свойствах квантовых колодцев: логические элементы, элемент памяти, аналого-цифровой преобразователь, генератор колебаний, логические элементы для квантовых вычислений, рабочие характеристики которых оценены на примере периодических  $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$  наноструктур.

*Ключевые слова:* кремний, квантовые колодцы, наноразмерная периодическая структура, отрицательное дифференциальное сопротивление, туннелирование.

### Введение

Основными задачами современной нанoeлектроники остаются увеличение быстродействия и уменьшение размеров электронных приборов. Одним из актуальных направлений является создание приборов на кремнии ввиду того, что наноразмерный кремний — прямозонный полупроводник, пригодный для применения в нанoeлектронике [1–3]. Интенсивное развитие кремниевой нанoeлектроники и поиск новых технологий получения нанокристаллического кремния привели к созданию наноразмерных периодических структур с квантовыми колодцами диэлектрик/кремний/диэлектрик. В таких структурах обнаружены эффекты электролюминесценции, гистерезиса вольт-амперных характеристик (ВАХ), отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), сдвига нулевого тока при комнатной температуре. Механизмы возникновения этих эффектов к началу наших исследований не получили приемлемого теоретического описания.

В данном обзоре обобщены результаты выполненных нами исследований переноса носителей заряда, зарядовых и резонансных эффектов в наноразмерных периодических структурах диэлектрик/кремний/диэлектрик и представлены разработанные на их основе нанoeлектронные приборы для интегральных систем обработки информации.

### Перенос носителей заряда через квантовые колодцы в структуре диэлектрик/кремний/диэлектрик

Нами предложено учитывать два параллельно действующих механизма переноса носителей заряда через квантовые колодцы в структуре диэлектрик/кремний/диэлектрик [4–6]. Это

упругое туннелирование носителей заряда, характерное для всех систем с потенциальными барьерами и перенос носителей заряда по дискретным ловушечным уровням в диэлектрике, рис. 1. Математическое описание этих процессов основано на кинетических уравнениях, представляющих изменение заряда в каждом квантовом колодце структуры.

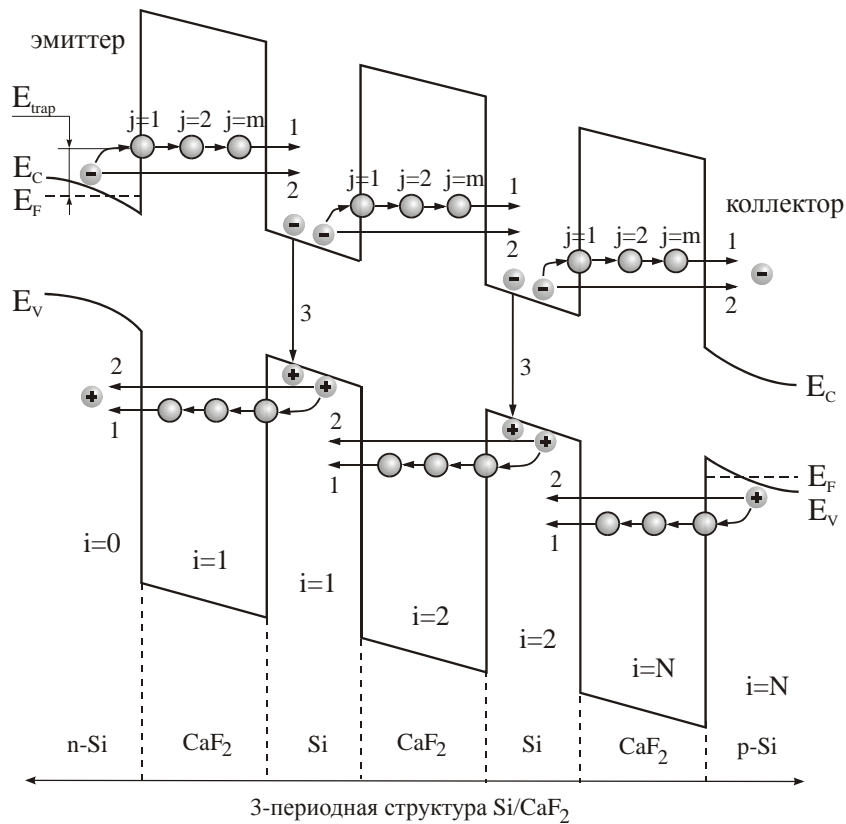


Рис. 1. Энергетическая диаграмма трехпериодной структуры кремний–диэлектрик и процессы переноса и рекомбинации носителей заряда в ней: 1 — перенос носителей по ловушечным состояниям в диэлектрике; 2 — упругое туннелирование носителей заряда через потенциальный барьер; 3 — межзонная рекомбинация носителей заряда [5–7]

Темпы прямых туннельных переходов электронов через каждый слой диэлектрика записываем на основе приближения ВКБ [4]. Темп переноса электронов через ловушечный уровень каждого слоя диэлектрика пропорционален сечению захвата носителей на ловушку, их тепловой скорости электронов в яме, соотношению между энергией носителей в яме и энергией ловушечного уровня, степени заполнения ловушечных состояний носителями заряда и вероятности перемещения в диэлектрике по туннельно-резонансному механизму с учетом наличия нескольких локальных состояний в диэлектрике [4, 5]. Захваченные электроны на первую ловушку ловушечного уровня в диэлектрике перемещаются туннельно-резонансными переходами по нему. Для данного механизма нами получена вероятность такого процесса, которая имеет вид [6]

$$D_n = A \cdot \sum_{m=0}^m \left( \frac{(N_t a^2 d_D)^m}{a} \right) \left( \left[ \frac{2m_x}{\hbar^2} \cdot \left( qU_n - E_t - \frac{q\varphi_D a}{d_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} f_D \right)^m, \quad (1)$$

где фактор  $A = \exp(-N_t a^2 d_D)$ ;  $a$  — расстояние между ловушечными состояниями;  $m = (d_D / a)(1 + (\theta^2 / 2))$  — количество состояний на траектории движения носителей заряда по ловушечному уровню;  $\theta$  — угол в радианах, характеризующий извилистость траектории, т.е. отклонение от прямолинейной;  $N_t$  — плотность ловушечных состояний;  $d_D$  — толщина ди-

электрика;  $m_x$  — эффективная масса электрона в направлении токопереноса;  $U_n$  — высота потенциального барьера в структуре;  $E_t$  — энергия ловушечного уровня;  $f_D$  — функция, определяемая отношением между энергией электронов  $E$  в яме и энергией ловушечного уровня  $E_t$ .

Транспорт носителей заряда через дискретный ловушечный уровень в диэлектрике осуществляется по двухступенчатому механизму, включающему активационный захват носителей на уровень с последующим переходом захваченных носителей заряда от одной ловушки к другой по туннельно-резонансному механизму. Вид доминирующего процесса, определяемого положением ловушечного уровня в диэлектрике относительно дна зоны проводимости (потолка) кремния, обуславливает ВАХ структуры кремний/диэлектрик [4–8].

По представленной модели проведены расчеты вероятности переноса носителей заряда через барьер посредством упругого туннелирования носителей заряда и транспорта через уровень ловушек в диэлектрике. Они показали, что для  $\text{CaF}_2$  вероятность переноса носителей заряда по двум разным механизмам различаются на 2–2,5 порядка, в то время как для  $\text{SiO}_2$  различие составляет всего 1 – 1,5 порядка. Высота барьера диэлектрика принималась равной  $U = 3,3$  эВ для  $\text{CaF}_2$  и  $U = 2,51$  эВ для  $\text{SiO}_2$ , извилистость траектории 0,3 рад, концентрация ловушек в диэлектрике  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_t = 0,35$  эВ для  $\text{Si}/\text{CaF}_2$ ,  $E_t = 0,32$  эВ для  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  [4–9]. Таким образом, перенос носителей заряда через ловушечный уровень в диэлектрике оказывает значительное влияние на общий токоперенос в структуре.

Установлено преобладание одного из рассмотренных механизмов переноса носителей заряда в зависимости от расположения ловушечного уровня в диэлектрике. Если уровень расположен вблизи зоны проводимости (валентной) кремния, т.е.  $E_t = 0–0,15$  эВ, то транспорт через дискретный уровень ловушек осуществляется непосредственно по туннельно-резонансному механизму. Превышение энергии электронов энергетического положения уровня ловушек так же, как и уменьшение концентрации пустых ловушек, приводит к нарушению условий резонансного переноса. Если энергия ловушечного уровня  $E_t = 0,15–0,3$  эВ, то транспорт носителей по ловушечному уровню осуществляется по двухступенчатому механизму (см. выше). Поскольку перенос носителей через уровень ограничен концентрацией ловушек, то вероятность такого переноса стремится к насыщению по мере уменьшения концентрации пустых ловушек. Сближение энергии носителей заряда в яме с энергией ловушечного уровня приводит к преобладанию туннельно-резонансного переноса носителей заряда через ловушки. Наоборот, при росте разности этих энергий основное влияние на электрические характеристики оказывает накопление заряда в диэлектрике, что приводит к появлению отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) и гистерезиса ВАХ структуры [5–13].

### **Отрицательное дифференциальное сопротивление и гистерезис ВАХ**

Из экспериментальных данных известно, что гистерезис ВАХ в периодических наноструктурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  зависит от геометрии структуры и условий электрических измерений (температуры, величины и длительности шага прикладываемого внешнего смещения). Появление гистерезиса ВАХ связано с накоплением заряда в диэлектрике при переносе носителей заряда через ловушечные уровни [5, 6].

Проведенное моделирование ВАХ 20- и 50-периодной структуры  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  при температуре 300 К, когда превалирует перенос носителей заряда по ловушкам при дискретном изменении внешнего смещения с шагом 0,2 В, длительностью шага 1,0 с показало наличие эффекта гистерезиса (рис. 2). Смещение потенциала нулевого тока и образование гистерезиса связаны с процессами заряда и разряда локализованных состояний в слоях диэлектрика периодической структуры при дискретном приложении внешнего смещения. При изменении внешнего смещения от отрицательных значений до нуля при фиксированном шаге и его длительности захваченный в диэлектрике заряд не успевает рассасываться за время поддержания фиксированного потенциала и накапливается на ловушках. Поляризация накопленного заряда внешним полем

приводит к возникновению внутреннего поля. Изменение направления тока происходит при ненулевом потенциале, когда внутренние поля уравнивают внешнее поле [5, 12].

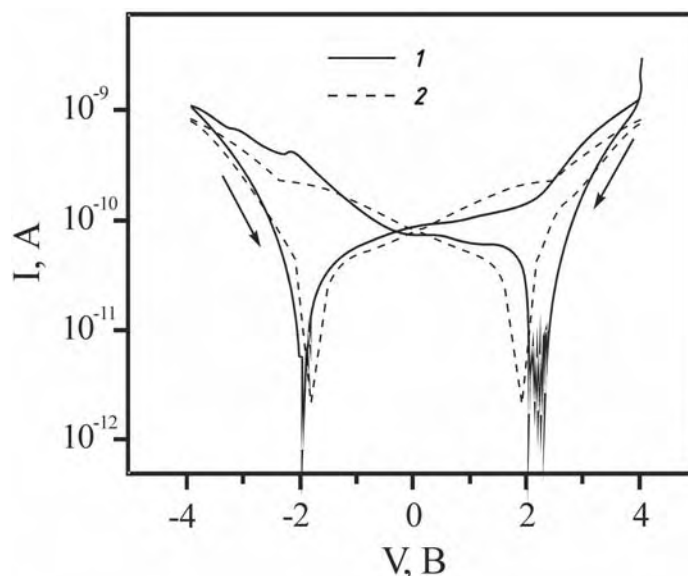


Рис. 2. Гистерезис ВАХ 50-периодной Si/CaF<sub>2</sub> структуры при 300 К: 1 — эксперимент; 2 — расчет

Уменьшение числа периодов Si/CaF<sub>2</sub> структуры ведет к появлению ОДС на ВАХ, обусловленного ростом скорости разряда и заряда ловушечных состояний в диэлектрике из-за увеличения падения потенциала на одном периоде структуры [6, 9]. При снижении внешнего смещения в пошаговом режиме на ловушечных состояниях в диэлектрике остается захваченный заряд, который обуславливает появление внутреннего поля. Как и в случае с гистерезисом, при равновесии внешнего и внутреннего полей в структуре ток принимает минимальное значение. При дальнейшем уменьшении отрицательного смещения начинает превалировать ток противоположного направления за счет разряда ловушечных состояний. Величина этого тока зависит от концентрации заряда на ловушках диэлектрика, которая выше для структур с малым числом периодов. Ток разряда возрастает до максимального значения при нулевом внешнем смещении, что и определяет образование ОДС.

При переходе потенциала в область положительных значений ток, обусловленный внешним смещением, начинает расти тем быстрее, чем выше падение потенциала на каждом периоде структуры, что ведет к компенсации тока разряда. В минимуме ОДС происходит выравнивание этих токов. Уменьшение числа периодов ведет не только к появлению участка ОДС на ВАХ этих структур и увеличению протекающего через структуру тока, но и снижает сдвиг нулевого тока относительно нулевого смещения. Понижение максимума тока ОДС и сглаживание этой области при увеличении шага внешнего смещения и его длительности объясняется снижением внутренних полей в структуре за счет уменьшения концентрации захваченного заряда на локализованных состояниях в диэлектриках, так как большая часть этого заряда успевает покинуть ловушки.

Из полученных результатов можно заключить, что область ОДС наиболее выражена при максимальной концентрации носителей заряда на контактах и с ее уменьшением сглаживается. Как показали полученные результаты, область ОДС становится не столь выраженной при понижении температуры до 280 К и исчезает при температуре 250 К в результате снижения темпа активационного захвата носителей заряда на локализованные состояния в диэлектрике и их накопления на этих состояниях. Уменьшение толщины диэлектрика также снижает возможность накопления заряда в структуре и сглаживает эффект ОДС [5, 8, 9, 10]. Рост числа периодов структуры  $N$  ведет к уширению резонанса на ВАХ и размыванию области ОДС, которая исчезает при  $N=14$  [6, 7, 9, 10].

## Приборные структуры на нелинейных электронных свойствах квантовых колодцев

Проведенный анализ экспериментальных характеристик периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик и моделирование их транспортных свойств позволили предложить новые нанoeлектронные устройства на их основе: логические переключатели структуры на основе ОДС, элементы памяти, генераторы колебаний, структуры для квантовых вычислений [14–21].

Предпосылки создания логических устройств и динамических ячеек памяти основаны на немонотонности ВАХ периодических наноразмерных структур кремний/диэлектрик, возникающих при туннельно-резонансном переносе носителей заряда через уровни ловушек в диэлектрике. ОДС в таких структурах открывает возможность создания логических устройств с двумя устойчивыми состояниями: в максимуме и минимуме тока. При этом важными параметрами являются отношение токов в максимуме и минимуме области ОДС и скорость перехода системы из одного состояния в другое. Этим требованиям отвечают периодические структуры Si/CaF<sub>2</sub> с малым числом периодов, где перенос по ловушкам значительно превышает упругое туннелирование носителей заряда через диэлектрик.

Для разработки эквивалентной схемы прибора с ОДС применяли описание ОДС как источника тока, управляемого напряжением по заданному нелинейному закону. Эквивалентная схема двухпериодной структуры Si/CaF<sub>2</sub> представлена на рис. 3 [13, 14]. Здесь  $V_{\text{bias}}$  - источник постоянного напряжения;  $I(V)$  — источник тока, управляемый напряжением, представляющий активную область исследуемой структуры;  $R_p$  — паразитное сопротивление, возникающее при интегральном исполнении рассматриваемой структуры;  $R_N$  — сопротивление нагрузки. Моделирование токопереноса по эквивалентной схеме (рис. 3) проводили в сравнении с переносом носителей заряда по кинетической модели в стационарных условиях с использованием выражения для плотности тока [13–15]:

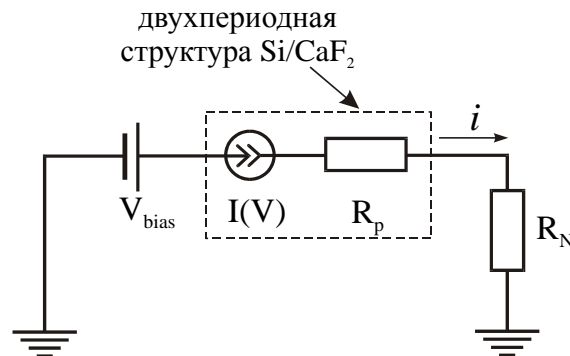


Рис. 3. Эквивалентная схема двухпериодной структуры Si/CaF<sub>2</sub> [14]

$$J(V) = \frac{J_0 E_1 (U_n - E_{t1} - Vm)^\delta}{1 + E_1 W} \left[ \frac{1}{1 + E_1 W} + \frac{E_2}{E_1} \left[ \frac{1 + E_1 W}{1 + E_2 W} \right] \cdot \left[ \frac{U_n - E_{t2} - Vm}{U_n - E_{t1} - Vm} \right]^\delta \right], \quad (2)$$

где  $J_0 = Sv_T n_0 N_t q d_D p_m$ ;  $p_m$  — вероятность расположения  $m$  ловушек на траектории движения носителей заряда через диэлектрик;  $\delta = -0,5m$ ;  $E_{1(2)} = \exp(-qE_{t1(2)}/k_B T)$ ;  $W = \exp(qV/k_B T)$ ;  $S$  — сечение захвата носителя на ловушечный уровень из квантовой ямы;  $v_T$  — их тепловая скорость;  $E_{1(2)}$  — положение уровня ловушек в диэлектрике относительно дна потенциальной ямы кремния.

Моделирование ВАХ периодической структуры Si/CaF<sub>2</sub> с использованием эквивалентной схемы показало практически полное соответствие с описанной выше кинетической моделью переноса [13–15]. Предложенная эквивалентная схема пригодна для стационарного анализа работы моделируемой структуры в составе различных схем с помощью пакетов схемотехнического моделирования, например, *PSpice*.

На основе двухпериодной структуры Si/CaF<sub>2</sub> с несимметричной ВАХ, определяемой полярностью внешнего смещения, реализованы цифровые схемы, использующие два устойчивых состояния в максимуме и минимуме области ОДС в качестве высокого и низкого уровня сигнала. При этом данная приборная структура классифицируется как туннельно-резонансный диод, являющийся аналогом резонансно-туннельных приборов на основе бинарных полупроводников. Туннельно-резонансный диод с двумя стабильными состояниями может использоваться в логических схемах как элемент, выполняющий операцию отрицания. При различных включениях двух параллельных туннельно-резонансных диодов реализуются операции логического сложения и умножения. Преимуществом таких схем является быстроедействие, низкая потребляемая мощность, простота исполнения и возможность получения таких приборов в едином технологическом цикле при изготовлении кремниевых интегральных схем.

Наличие ОДС в периодических наноразмерных структурах кремний/диэлектрик позволяет использовать их для получения пилообразной ВАХ. Эквивалентная схема преобразователя сигналов с параллельным включением туннельно-резонансных двухпериодных структур Si/CaF<sub>2</sub>, содержащая  $n$  цепочек (рис. 3), в которых источники напряжения  $E_k$  сдвигают смещение каждой цепочки на величину  $k(k-1)n$ . Это позволяет получать условие резонанса в  $k$ -х слоях структур Si/CaF<sub>2</sub> при различном входном потенциале. В результате получается многопиковая ВАХ, обусловленная суммированием токов в параллельных цепях схемы. Относительный сдвиг потенциалов в параллельных цепях изменяется при задании параметра  $n$ , что позволяет регулировать амплитуду и период сигнала (величину разности потенциала между соседними максимумами многопиковой характеристики) на выходе преобразователя [14, 15]. На рис. 4 представлен вид преобразователя сигнала, реализованного в виде граничащих вертикальных туннельно-резонансных Si/CaF<sub>2</sub> структур, разделенных между собой слоями CaF<sub>2</sub>. Эта структура изготавливается в едином технологическом цикле и может использоваться в кремниевых интегральных схемах [15]. Также предложена ступенчатая конструкция аналого-цифрового преобразователя на основе периодической структуры Si/CaF<sub>2</sub>, в которой управляющие потенциалы подаются на каждый период структуры путем создания специальной многоуровневой металлизации [16, 17].

Разработана конструкция и эквивалентная схема элемента памяти, использующего зарядовые свойства периодических Si/CaF<sub>2</sub> структур [14, 15]. Описанная выше двухпериодная Si/CaF<sub>2</sub> структура обладает емкостными свойствами, обусловленными переносом носителей заряда через ловушки. В этом случае в зависимости от соотношения времени заряда и разряда ловушечных состояний в слое диэлектрика накапливается захваченный заряд. Этот эффект может быть использован для хранения информации. Основными параметрами в этом случае являются времена накопления заряда в слоях структуры и ее разряда, которые определяют быстроедействие. Длительность и задержка импульса внешнего смещения, определяющие частоту переключения входного сигнала, ограничиваются временем накопления заряда в емкости слоя и его разряда. В рамках предложенной модели переноса носителей заряда через периодические структуры кремний/диэлектрик время накопления заряда в емкости слоя определяется темпом активационного захвата носителей заряда на ловушки в диэлектрике, а разряд – туннельно-резонансным переносом носителей заряда по ловушкам.

На основе емкостных свойств периодической структуры Si/CaF<sub>2</sub> предложена ячейка для хранения информации динамического типа, в которой заряд емкости слоя служит битом информации. Как показали результаты моделирования, характерное время протекания переходных процессов в однопериодной Si/CaF<sub>2</sub> структуре лежит в диапазоне  $10^{-12}$ - $10^{-10}$  с. Для увеличения быстроедействия ячейки памяти логическая единица может обуславливаться частичным зарядом емкости слоя, а логический ноль — частичным ее разрядом. При этом характерное время соответствует  $10^{-12}$  с, что является перспективным для использования предложенного элемента в сверхбыстродействующих логических схемах.

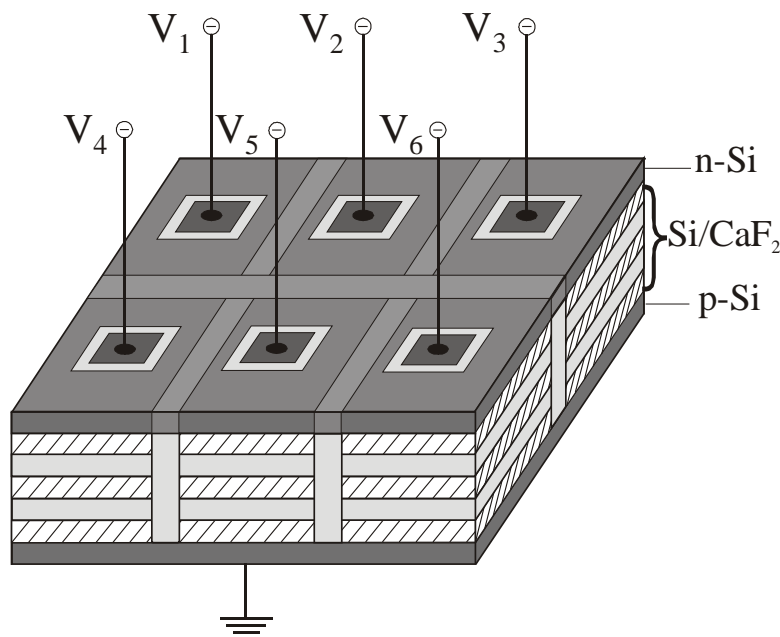


Рис. 4. Структура преобразователя сигнала из шести параллельных цепочек, содержащих туннельно-резонансные Si/CaF<sub>2</sub> структуры [15]

Одним из перспективных способов схемотехнической разработки ячейки памяти на основе периодических структур кремний/диэлектрик является использование как емкостных, так и переключающих свойств периодической структуры Si/CaF<sub>2</sub>. Предложен элемент памяти, в котором для хранения информации используются зарядовые свойства 10-периодной Si/CaF<sub>2</sub> структуры, последовательно включенной с однопериодной Si/CaF<sub>2</sub> структурой, выполняющей функцию переключения [14].

Наличие зарядовых эффектов, приводящих к возникновению ОДС в периодической наноразмерной структуре кремний/диэлектрик, обусловленных туннельно-резонансным переносом носителей заряда через уровни ловушек в диэлектрике, позволяет использовать такие структуры для разработки нанoeлектронных генераторов колебаний. Моделирование самопроизвольных колебаний заряда и тока в периодической наноразмерной структуре кремний/диэлектрик при постоянном внешнем смещении показало, что характерная частота таких колебаний в зависимости от параметров структуры и внешнего смещения лежит в области от единиц до сотен МГц. Самопроизвольные колебания инициируются путем выбора специального режима электронного токопереноса, когда создаются условия для возникновения зарядовой неустойчивости [18].

Каждая отдельная двухпериодная структура представляет собой нелинейный элемент, в котором выполняются условия токопереноса через ловушечные уровни диэлектрика, приводящие к возникновению ОДС и к самопроизвольным колебаниям заряда при постоянном внешнем смещении. Генерация колебаний заряда в отдельном элементе осуществляется при фиксированном внешнем смещении, соответствующем участку ВАХ, на котором наблюдается уменьшение туннельного тока с ростом потенциала. В этом случае, как установлено с помощью расчетов, возникает зарядовая неустойчивость при токопереносе через ловушечные состояния в диэлектрике.

Механизм возникновения зарядовой неустойчивости состоит в том, что при определенном заполнении ловушечного канала носителями заряда, его энергия, приближаясь к энергии Ферми соседней квантовой ямы, изменяется таким образом, что увеличивается темп переноса заряда из одной ямы в другую. Это ведет к возникновению незатухающих самопроизвольных колебаний тока в структуре кремний/диэлектрик. Частота колебаний обусловлена характерным временем перехода электронов между квантовыми ямами по ловушечному каналу. Согласно проведенным оценкам, это время составляет  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  с. Амплитуда колебаний заряда в данном

случае определяется величиной изменения энергии ловушечного уровня относительно энергии дна квантовой ямы кремниевого слоя и составляет 30–50 мВ.

На основе указанных механизмов предложена приборная структура для генератора СВЧ колебаний с частотой порядка  $10^8$ – $10^9$  Гц. Она состоит из 6–10 параллельно соединенных наноразмерных периодических структур кремний/диэлектрик с числом периодов 2–3, сформированных на общей подложке. При этом отдельные двухпериодные структуры включаются параллельно. В связи с тем что двухпериодные структуры, сформированные на одной подложке, будут иметь определенный разброс параметров, то для создания генератора СВЧ колебаний предлагается использовать их параллельное соединение с учетом возможности индивидуальной регулировки потенциалов, подаваемых на каждый квантовый колодец.

Выявленные зарядовые эффекты и нанометровые размеры периодических структур Si/CaF<sub>2</sub> и Si/SiO<sub>2</sub> позволили предложить на их основе логические элементы для систем квантовых вычислений. В результате проведенного моделирования эволюции электронных и спиновых систем в резонансных полях с учетом непрерывных квантовых измерений [19, 20] предложены механизмы реализации квантовых логических элементов для проведения квантовых вычислений, реализующих функции "НЕ", "Контролируемое НЕ" и "Дважды контролируемое НЕ". Предложен принцип функционирования логических элементов для квантовых вычислений, основанный на изменении частоты колебаний ядерных спинов в резонансном периодическом поле, реализуемый посредством применения периодической наноструктуры кремний/диэлектрик, в которой диэлектрические слои используются в качестве ансамблевых кубит. Разделение резонансных частот кубит осуществляется посредством приложения магнитного поля с градиентом порядка 0,2–0,5 Т/мкм (рис. 5). Инициализацию кубит в нулевое базисное состояние предлагается осуществлять путем синхронизации колебаний ансамбля ядерных спинов диэлектрического слоя периодической наноструктуры с помощью селективных резонансных воздействий с учетом межатомных спин-спиновых взаимодействий [21–24].

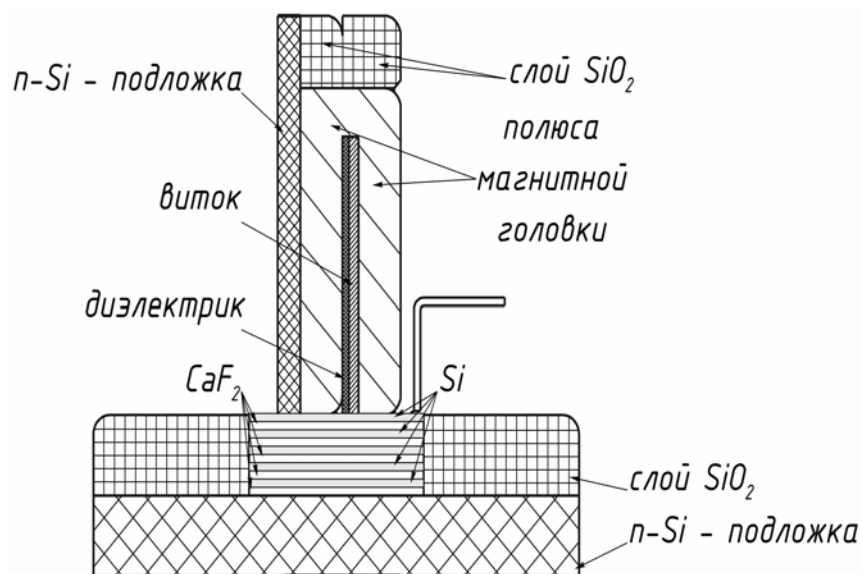


Рис. 5. Конструкция наноразмерной структуры для квантовых вычислений

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что в наноразмерных периодических структурах диэлектрик/кремний/диэлектрик туннельно-резонансный перенос носителей заряда через ловушечные уровни в диэлектрике обуславливает возникновение отрицательного дифференциального сопротивления и гистерезиса ВАХ. При комнатной температуре эти особенности наиболее ярко проявляются с ростом концентрации инжектируемых с контактов носителей за-



ряда, а также при увеличении толщины диэлектрика и уменьшении числа периодов структуры. Предложен ряд новых нанoeлектронных приборов на исследованных нелинейных электронных свойствах квантовых колодцев — от простых логических устройств до генератора колебаний, определены их рабочие характеристики на примере  $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$  наноструктур, показаны преимущества их использования в традиционных кремниевых интегральных схемах и в качестве логических элементов для квантовых вычислений.

Полученные результаты, а также дальнейшее исследование спин-зависимых свойств нанoeлектронных структур на квантовых колодцах создадут основы как для разработки быстродействующих спин- и нанoeлектронных приборов на новых принципах, совместимых с достижениями кремниевой технологии, так и для реализации элементов квантовых вычислительных машин, которые, обладая принципиально иными возможностями, позволяют решать вычислительные задачи, недоступные для решения на классических компьютерах.

## NANOELECTRONICS DEVICES ON INSULATE/SILICON/INSULATE QUANTUM WELLS

A.L. DANILYUK, J.A. BERASHEVICH, A.V. KOROLEV, A.N. KHOLOD, V.E. BORISENKO

### Abstract

The results of theoretical and experimental study of carrier transport, charging and resonant effects in periodic dielectric/silicon/dielectric quantum well nanostructures are summarized. Origins of negative differential resistance and hysteresis on their current-Voltage characteristics are considered. New nanoelectronic devices employing nonlinear electronic properties of the quantum wells are proposed: logic elements, memory, analog-digital converter, oscillator, elements for quantum calculations, which performance are demonstrated with examples of periodic  $\text{CaF}_2/\text{Si}/\text{CaF}_2$  nanostructures.

### Литература

1. Холод А.Н., Филонов А.Б., Борисенко В.Е. Изменение электронных свойств нано-кристаллического кремния при формировании в нем межзеренных границ // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41(4). С.58-61.
2. Filonov A.B., Kholod A.N., Novikov V.A., et al. Grain interaction effect in electronic properties of silicon nanosize films // Appl. Phys. Lett. 1997/ Vol.70 (№6). P.744-746.
3. Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E., et al. Oxygen effect in optical properties of nanosize silicon clusters // Phys. Rev. 1998. Vol.57, B(3). P.1394-1397.
4. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Холод А.Н., Борисенко В.Е. Перенос носителей заряда в наноразмерных периодических структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  с участием ловушек // ФТП. 2001. Т.35, № 1. С.110-114.
5. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Холод А.Н., Борисенко В.Е. Зарядовые эффекты, контролирующие токовый гистерезис и отрицательное дифференциальное сопротивление в периодических наноразмерных структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  // ФТП. 2002. Т.36, № 1. С.91-96.
6. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. Резонансный перенос носителей заряда через ловушечные состояния в диэлектрике в периодических наноструктурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  // ФТП. 2002. Т.36, № 6. С.718-723.
7. Берашевич Ю.А., Холод А.Н., Борисенко В.Е. Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных периодических структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  // Изв. Белорус. инж. акад. 1999. № 1(7)/2. С.44-46.
8. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Холод А.Н., Борисенко В.Е. Активационный транспорт в периодических наноструктурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  // Изв. Белорус. инж. акад. 2000. № 1(9)/2. С.51-53.
9. J.A.Berashevich, A.L.Danilyuk, A.N.Kholod, et al. Charge effects and related transport phenomena in nanosize silicon/insulator structures // Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology. Singapore: World Scientific. 2001. P. 33-36.
10. Berashevich J.A., Danilyuk A.L. The Role of Shallow and deep traps carrier transport across nanosize silicon/insulator structures // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore: World Scientific, 2001. P.463-465.

11. *Берашевич Ю.А., Холод А.Н., Борисенко В.Е.* Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных периодических структурах Si/CaF<sub>2</sub>// Изв. Белорус. инж. акад. 1999. № 1(7)/2. С. 44-46.
12. *Berashevich J.A., Danilyuk A.L., Kholod A.N., Borisenko V.E.* Carrier transport and related phenomena in nanosize periodic silicon/insulator structures// Material Science and Engineering, ser. B. 2003. Vol.101, No.1-3. P.111-118.
13. *Берашевич Ю.А., Королев А.В.* Резонансное туннелирование в периодических структурах Si/CaF<sub>2</sub>// Изв. Белорус. инж. акад. 2001. № 1(11)/3. С. 44-47.
14. *Берашевич Ю.А., Королев А.В., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* Элемент памяти на периодических наноразмерных Si/CaF<sub>2</sub> структурах// ЖТФ. 2003. Т. 73, № 1. С.67-72.
15. *Berashevich J.A., Danilyuk A.L., Borisenko V.E.* Digital devices based on tunnel-resonant transport of charge carriers in periodic Si/CaF<sub>2</sub> nanostructures// Material Science and Engineering, ser. B. 2003. Vol.101, No.1-3. P.300-304.
16. *Kholod A.N., Liniger M., Zaslavskiy A., et al.* A new Multipeak Resonant Tunneling Diode For Signal Processing Application // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore: Word Scientific, 2001. P.454-458.
17. *Kholod A.N., Liniger M., Zaslavsky A. and F.Arnaud d'Avitaya.* Cascaded resonant tunneling diode quantizer for analog-to-digital flash conversion// Appl. Phys. Lett. 2001. Vol.79, No. 1. P.129-131.
18. *Данилюк А.Л., Маковская Т.И.* Колебания заряда и спиновая поляризация в периодических наноразмерных структурах // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. №2(14)/2. С.81-83.
19. *Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* Модель и логические элементы для квантовых вычислений на двухуровневой системе в резонансном периодическом поле// Микроэлектроника. 2002. Т.31, № 2. С.135-141.
20. *Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А., Борисенко В.Е.* Модель и логические элементы для квантовых вычислений на спиновых системах в резонансных полях// Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т.7, № 3. С.67-72.
21. *Королев А.В., Данилюк А.Л.* Универсальный квантовый гейт на периодических структурах кремний/диэлектрик// Изв. Белорус. инж. акад. 2002. С.72-74.
22. *Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А.* Эволюция двухуровневой спиновой системы в резонансном периодическом поле// Изв. Белорус. инж. акад. 2001. № 1(11)/3. С. 69-71.
23. *Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А.* Модели логических спиновых элементов для квантовых вычислений// Изв. Белорус. инж. акад. 2001. № 1(11)/3. С. 66-68.
24. *Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А.* Синхронизация колебаний связанных двухуровневых спиновых систем в резонансном поле для квантовых вычислений// Изв. Белорус. инж. акад. 2002. №2(14)/2. С.75-77.