



УДК 621.318.151

Ю. Ф. Головнев, Д. А. Нургулеев

Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого

Е. В. Мараева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Спиновые транзисторы на основе гетероструктур EuO–SrO

Предложена модель спинового полевого транзистора на основе наногетеросистемы EuO–SrO, в которой нанослои ферромагнитного полупроводника будут сонаправленно намагничены обменным взаимодействием, дан анализ основных характеристик модели спинового транзистора, показаны полученные значения параметров крутизны и быстродействия.

Спиновый полевой транзистор, ферромагнитные полупроводники, сверхрешетки EuO–SrO

Наноразмерные гетеросистемы на основе оксидов и халькогенидов элементов IV группы являются перспективными для оптоэлектроники и сенсорики [1]. В последнее время особый интерес вызывают структуры на основе ферромагнитных металлов и полупроводников, которые обладают целым спектром необычных физических свойств [2].

Целью настоящей статьи является разработка модели спинового полевого транзистора на основе наногетеросистемы EuO–SrO.

При создании спинового транзистора наноструктура из ферромагнитного и парамагнитного полупроводников EuO–SrO учитывается их согласование по параметру решеток $a_{\text{EuO}} = 5.445 \text{ \AA}$

и $a_{\text{SrO}} = 5.446 \text{ \AA}$, которое составляет 0.12 %, а допустимые значения могут достигать до 0.5 % согласно «карте мира» [3]. При этом в запрещенных зонах, которые образует нанослой EuO, имеется «донорная примесь» из $4f^7$ -уровней, имеются поляризованные по спину электроны из-за обменного взаимодействия при $T < T_C$, где T_C – температура Кюри. Эти электроны имеют уникально высокую плотность 10^{26} м^{-3} [4]. Максимальные скорости под действием молекулярного

поля, созданного обменным взаимодействием, параллельного плоскости гетерограниц EuO–SrO, составляют более $3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ [5].

Если использовать такие сверхрешетки в полевых транзисторах с длиной затвора порядка $L = 1 \text{ мкм}$ и длиной канала n около 3 мкм при температуре $T < T_C$, то их можно применять для создания спиновых полевых транзисторов с оптимальными параметрами и наилучшими характеристиками, например значением крутизны $S = \Delta I / \Delta U_g$. Если крутизна S возрастает, то существенно увеличивается коэффициент усиления полевого транзистора. В рассматриваемом случае $S = e\mu N B d / (3L)$, где e – заряд электрона; μ – подвижность; N – число электронов в n -канале; B – длина затвора; d – ширина n -канала (суммарная толщина проводящих слоев в EuO сверхрешетки EuO–SrO) и L – ширина затвора. Схема модели спинового транзистора на основе наногетеросистемы EuO–SrO представлена на рис. 1, где обозначены: U_0 – напряжение между истоком и стоком; U_g – запирающее напряжение на затворе; I – регулируемый ток в цепи источника U_0 .

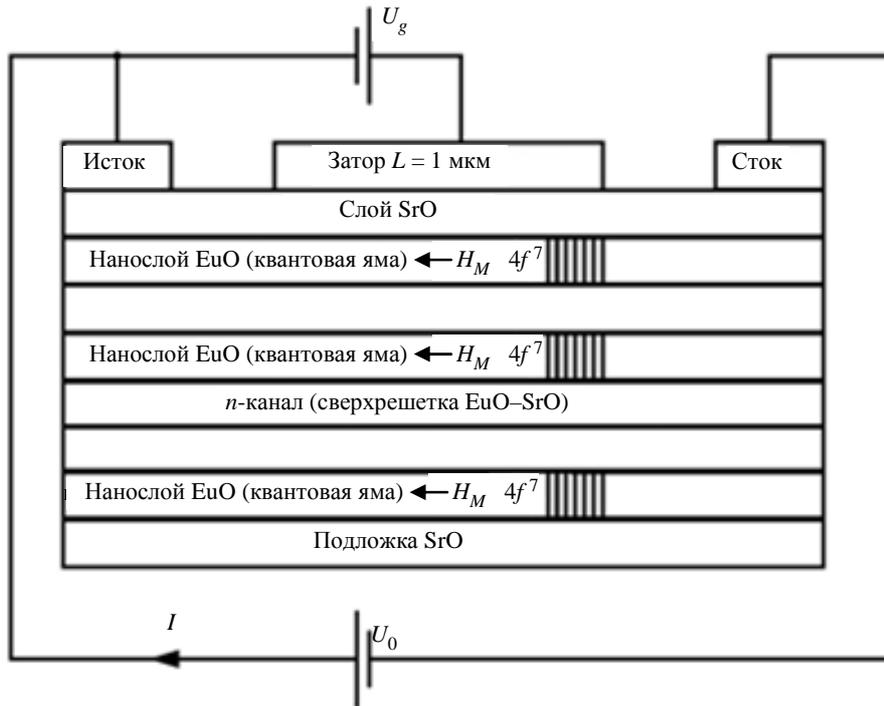


Рис. 1

По экспериментальным данным построена схема энергетических уровней для EuO, где зона проводимости образована $5d_{t_{2g}}$ -состояниями катионов, а валентная зона получена из $2p$ -состояний анионов. В зазоре между ними ~ 3 эВ расположены $4f^7$ -уровни шириной ~ 0.5 эВ. Между дном зоны проводимости и этими уровнями энергетический зазор равен ~ 1.1 эВ. Схема энергетических уровней в EuO представлена на рис. 2, где обозначены: E_C – дно зоны проводимости; E_V – потолок валентной зоны; $10Dq$ – расщепление d -уровней в кристаллическом поле [6].

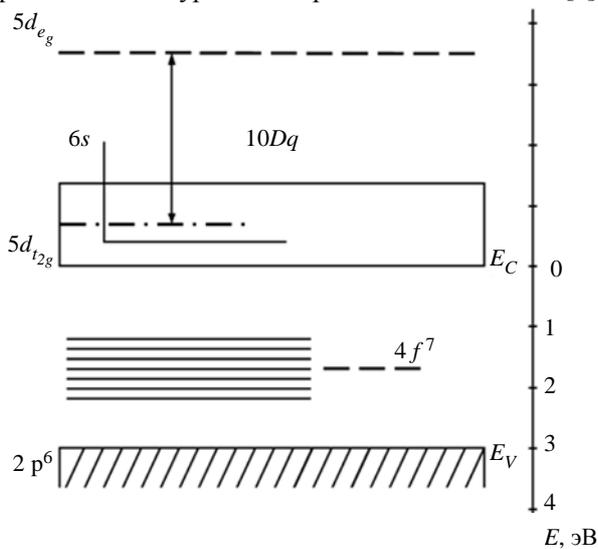


Рис. 2

Суммарный спин электронов в EuO является интегралом движения, так как для монооксида европия в гамильтониане можно не учитывать влияние спин-орбитального взаимодействия. Возбужденные состояния, соответствующие переходу электронов в незанятое состояние с большей энергией $4f^7(^8S_{7/2}) \rightarrow 4f^6(^7F)5d_{t_{2g}}$, являются триплетными (магнитными) возбужденными состояниями. Ввиду сильного df -обменного взаимодействия $5d_{t_{2g}}$ -электрон выстраивает спины $4f^7$ -электронов иона европия параллельно своему спину. Таким образом, электрон оказывается в состоянии узкой проводящей d -зоны, а образующаяся дырка локализована в $4f$ -оболочке центрального иона европия. В таком случае магнитное красное смещение в спектре возбуждения будет связано с красным смещением полосы поглощения. То, что красное смещение в излучении больше, чем в поглощении, объясняется искажением решетки вокруг дырки и ростом его вслед за увеличением размытия поляронного состояния. При полном ферромагнитном упорядочении люминесценция подавляется, так как возбужденный электрон делокализуется из иона европия и рекомбинирует в неизлучательном процессе [7].

Влияние ферромагнитного порядка на спектральные линии можно свести к рассмотрению эффекта Зеемана в молекулярном поле H_M обменного взаимодействия:

$$H_M = -\frac{J_{il}\bar{S}_l}{\mu_B},$$

где \bar{S}_l – операторы спина соседних ионов, замененные их средним значением в наиминимизированном состоянии; μ_B – магнетон Бора [7].

Современная спинтроника базируется на спин-зависимом транспорте электронов. Спинтронные приборы, основанные на эффекте спиновой инжекции, позволяют перерабатывать информацию в спиновые степени свободы. К таким приборам относятся и спиновые транзисторы [8].

Обычные полевые транзисторы (ПТ) обладают очень большим входным сопротивлением и быстродействием. Они определяются шириной затвора и скоростью электронов в n -канале. Коэффициент усиления транзистора определяется крутизной S и сопротивлением нагрузки. Усиление возникает за счет того, что напряжение между затвором и пластинкой полупроводника изменяет концентрацию электронов. Проанализируем основные характеристики ПТ, n -каналом которого является сверхрешетка EuO–SrO на толстой подложке SrO. При подаче на затвор положительного напряжения U_g в n -канале возрастает концентрация электронов путем туннелирования через тонкие слои SrO, а в нанослоях EuO – ток I от источника U_0 , т. е. ток I , текущий вдоль полупроводниковой пластины (сверхрешетка EuO–SrO), управляется перпендикулярным току электрическим полем (рис. 1). Роль квантовых ям выполняют слои EuO. Они инжектируют в n -канал при знаке «плюс» на затворе электроны, концентрация которых, благодаря $4f^7$ -уровням в запрещенной зоне, достигает 10^{26} м^{-3} [2]. При температуре $T < T_C$ в слоях EuO действует обменное взаимодействие, которое ориентирует спины туннелирующих электронов через тонкие барьеры ($\approx 10 \text{ \AA}$) в одном направлении. В этом случае все нанослои EuO будут намагничены обменным взаимодействием сонаправленно и ток I увеличивается во много раз [8].

В ПТ изменение выходного тока ΔI достигается напряжением на затворе ΔU_g . Их отношение и дает значение крутизны [9]:

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta U_g}.$$

В данном случае вольт-амперная характеристика ПТ выглядит следующим образом (рис. 3, где ΔI – диапазон токов насыщения; U_{g2} , U_{g1} –

различные напряжения на затворе; U_0 – напряжение между истоком и стоком).

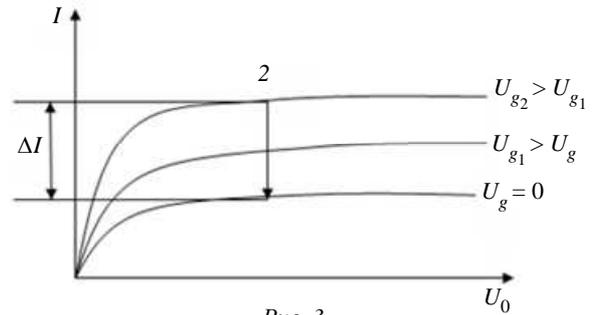


Рис. 3

Крутизну транзистора можно задать и через другие параметры при переходе из режима $U_g = 0$ к режиму $U_g > U_{g1}$:

$$S = \frac{e\mu NBd_0}{3L}, \quad (1)$$

где d_0 – ширина n -канала (суммарная толщина проводящих слоев в EuO сверхрешетки EuO–SrO). Из (1) видно, что крутизна S , а значит и коэффициент усиления ПТ, тем больше, чем меньше ширина затвора L и чем выше подвижность электронов μ в n -канале ПТ [5].

Максимальные скорости движения электронов под действием сильного поля E , приложенного параллельно плоскости наногетеросистемы EuO–SrO, при $T < T_C$ будут составлять $3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. С помощью современной фотолитографии можно изготавливать ПТ с длиной и шириной затвора в десятые доли микрометра, подвижность электронов в которых составляет $10^6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Тогда максимальное значение крутизны может достигать $\approx 8 \cdot 10^2 \text{ мСм/мм}$. В таких ПТ минимально возможное время установления τ определяется временем движения электронов от источника до стока $\tau \approx L/v$, где ширина затвора L составляет десятые доли микрометра; $v = 3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ (максимальные скорости движения электронов под действием сильного поля E , приложенного параллельно плоскости наногетеросистемы EuO–SrO). При таких значениях L и v время составляет $\tau \approx 5 \text{ пс}$. Это значит, что такие ПТ обладают наилучшим быстродействием.

Таким образом, в статье предложена модель спинового полевого транзистора на основе наногетеросистемы EuO–SrO. Основная идея нового транзистора сводится к образованию сверхрешеток, в запрещенных зонах которых имеется донорная примесь. Такие сверхрешетки можно применять для создания спиновых полевых транзисторов с высоким значением крутизны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение / О. А. Александрова, А. И. Максимов, В. А. Мошников, Д. Б. Чеснокова. СПб.: Технолит, 2008. 240 с.
2. Головнев Ю. Ф. Наноразмерные гетеросистемы на основе ферромагнитных металлов и полупроводников: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2008. 32 с.
3. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН. 2002. Т. 172, № 9. С. 1068–1086.
4. Тетерин П. Е. Исследование структурных и функциональных свойств тонкопленочных слоев монокристаллических редкоземельных металлов, выращенных методом импульсного лазерного осаждения: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2013. 20 с.
5. Полевые транзисторы на основе ферромагнитных гетероструктур / Ю. Ф. Головнев, Л. В. Никольская, А. В. Парамонов, М. О. Тюрина // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 2007. Т. 2. С. 16–17.
6. Капустин В. А. Аномальные явления переноса в халькогенидах европия / под ред. В. П. Жузе, И. А. Смирнова. Л.: Наука, 1977. С. 82–104.
7. Головнев Ю. Ф., Сомова Н. Ю. Магнитный экситон. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2014. 207 с.
8. Звездин А. К., Мищенко А. С., Хвальковский А. В. Вольтамперные характеристики спинового полуметаллического транзистора // ЖЭТФ. 2003. Т. 73, вып. 4. С. 53–58.
9. Сомова Н. Ю. Характеристики спинового полевого транзистора // Исследовательский потенциал молодых ученых: взгляд в будущее: сб. материалов XI Региональной науч.-практ. конф. аспирантов, соискателей, молодых ученых и магистрантов. Тула, 2015. С. 293–295.

Yu. F. Golovnev, D. A. Nurguleev
Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University

E. V. Maraeva
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SPIN TRANSISTOR BASED ON HETEROSTRUCTURES EuO–SrO

A model of the spin FET based nanoheterosystems EuO–SrO, in which the ferromagnetic semiconductor nanolayers will be co-directed magnetized by the exchange interaction, the analysis of the main characteristics of the model of the spin transistor shown the values obtained for the slope parameters and performance.

Spin transistor, ferromagnetic semiconductors, superlattices EuO–SrO

УДК 621.38

Е. В. Крылова, В. В. Овчинников
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Влияние конструкции катода имплантера на сортовой и зарядовый состав ионного пучка

Показано, что применяя различные конструкции составных катодов с элементами с большой разницей в атомных массах и управляя временем горения дуги и тем самым регулируя количественное соотношение между имплантируемыми ионами, можно обеспечить равномерное легирование мишени на глубину до 450...600 нм.

Катод, имплантер, ионная имплантация, многокомпонентные пучки, сорт ионов, зарядность ионов

Использование многоэлементных катодов в ионной имплантации в ряде случаев также позволяет осуществить высококонцентрационное легирование приповерхностных слоев материала. Подбором определенной композиции катода, режимов горения дуги и ускоряющего напряжения
