

Накопление заряда в квантовых точках Ge в транзисторной структуре GaAs/ZnSe/KT–Ge/ZnSe/Ge с плавающим затвором

И. А. Литвинова, И. Г. Неизвестный, А. В. Прозоров, С. П. Супрун, В. Н. Шерстякова, В. Н. Шумский

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2003 г.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии получена и исследована транзисторная структура GaAs/ZnSe/KT–Ge/ZnSe/Ge с плавающим затвором из квантовых точек германия. Показано, что при освещении светом с длиной волны более 0.5 мк наблюдается положительное, а при меньших длинах волн отрицательное изменение тока канала, связанное с зарядкой квантовых точек. Измерения релаксационных кривых после выключения освещения показывают, что спад тока продолжается в течение от десятков секунд вплоть до нескольких часов в зависимости от температуры образца. Указанные изменения тока канала и релаксационных кривых объясняются на основе трех типов переходов в квантовых точках при поглощении излучения с привлечением изменения состояния канала вблизи гетерограницы от обеднения до инверсии в результате накопления заряда на квантовых точках.

PACS: 78.67.Hc

В настоящее время в связи с развитием нанотехнологий появились работы, в которых обсуждается возможность создания элементов памяти на основе одноэлектронных полевых транзисторов, в которых один бит информации соответствует электрону, захваченному на квантовую точку (КТ), расположенную между основным затвором и каналом. В работе [1] описан такой элемент памяти, работающий при комнатной температуре. КТ размерами 7×7 нм являлась плавающим затвором кремниевого МОП-транзистора с шириной канала около 10 нм, что меньше дебаевского радиуса экранирования электрона. В этом случае один захваченный на КТ электрон полностью экранирует потенциал основного затвора и приводит к значительному сдвигу напряжения отсечки. Туннелирование электрона на КТ происходило при приложении импульсного напряжения между управляющим затвором и каналом. Создание исходной структуры проводилось с помощью самосовмещенных технологий, включающих в себя электронно-лучевую литографию, ионное реактивное травление, прецизионное термическое окисление и плазмохимическое осаждение, что и позволило получить указанные выше размеры структуры.

Наряду с развитием технологии получения отдельных КТ развивается направление, связанное с получением ансамблей квантовых точек (АКТ) в системах Ge/Si и AlGaAs/GaInAs [2–5]. В перспективе системы с АКТ должны найти применение в обла-

сти создания высокоэффективных лазеров на основе соединений $A^{III}B^V$, а также других приборов, как, например, фотоприемников и транзисторов на основе Ge/Si.

В течение ряда лет нами исследуются свойства ансамблей КТ в ненапряженной системе GaAs/ZnSe/KT–Ge/ZnSe. Отличительными свойствами этой системы является малое рассогласование параметров решетки ($\sim 0.2\%$), высокая плотность КТ (до 10^{12} см $^{-2}$) и большие значения энергетического барьера как для электронов, так и для дырок. Как показано в работе [6], для структур с Ge КТ, расположенными между одинаковыми по толщине слоями ZnSe, на ВАХ при комнатной температуре наблюдались особенности типа “кулоновской лестницы”, а спектральные зависимости фото-ЭДС в направлении роста свидетельствовали о том, что поглощение происходит в слое с КТ. Полученные данные позволили построить зонную диаграмму структуры. Из рассмотрения этой диаграммы стало понятно, что в несимметричной относительно толщины слоев ZnSe структуре при освещении в слое с КТ может происходить накопление заряда при уходе электронов путем туннелирования в арсенид галлия. Если использовать такой слой в качестве плавающего затвора в структуре полевого транзистора, где роль канала выполняет эпитаксиальный слой тонкого германия, то появляется возможность изучения процесса накопления заряда в структуре с

Ge КТ. В этом случае накопление даже очень малого заряда должно приводить к измеряемому изменению тока в канале.

Целью настоящей работы являлось изучение процесса накопления заряда в КТ и определение характерных времен релаксации.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) были изготовлены транзисторные структуры, которые представляли собой следующую последовательность слоев на подложке $n+\text{GaAs}$. Вначале на пластине арсенида галлия был выращен слой SiO толщиной 0.4 мкм. Затем, с помощью фотолитографии, в SiO вскрывались окна и в них проводился рост структуры: $\text{ZnSe} - \text{КТ-Ge} - \text{ZnSe} - p\text{-Ge}$. Причем толщина первого слоя ZnSe составляла величину ~ 15 нм, второго 120–150 нм, толщина эпитаксиальной монокристаллической пленки германия равнялась 40 нм. Следующим процессом было нанесение металла и создание алюминиевых контактов с помощью фотолитографии. Расстояние между алюминиевыми контактами составляло 8 мкм. Контакт к арсениду галлия служил индий. Схематическое изображение структуры приведено на вставке к рис.1.

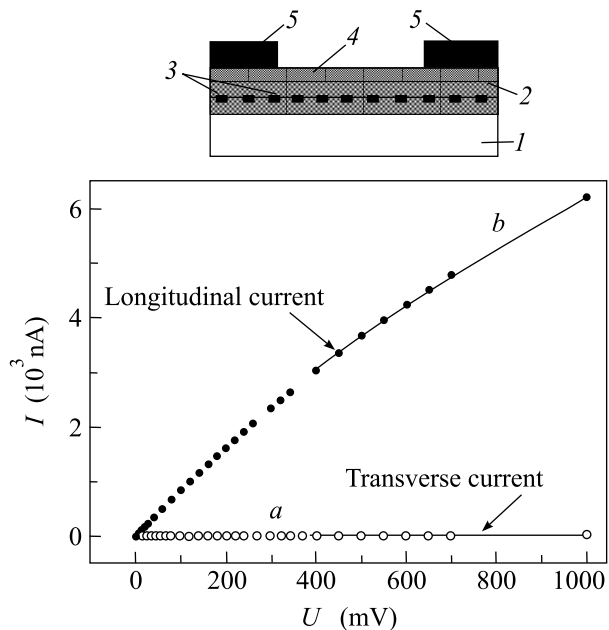


Рис.1. ВАХ и схематическое изображение структуры: a – поперечный, b – продольный ток через структуру; 1 – GaAs , 2 – ZnSe , 3 – КТ-Ge ; 4 – канал ($p\text{-Ge}$); 5 – Al -контакт. $T = 300$ К

ВАХ. Измерения тока германиевого канала проводились при $T = 300$ и 77 К. Типичные вольт-амперные характеристики в темноте приведены на рис.1.

Поперечный ток через структуру много меньше продольного тока канала, так что не может вносить какую-либо ошибку в измерения, а ток в канале имеет тенденцию к насыщению для обеих температур. Причем, как оказалось, при освещении структуры со стороны канала белым светом наблюдалось уменьшение полного тока.

Зависимость тока канала от спектра падающего излучения. Для подробного исследования поведения структуры при освещении были измерены спектральные зависимости тока канала на постоянном сигнале с использованием спектрального комплекса КСВУ-6. Измерения проводились при температуре 77 и 300 К и напряжении на канале $20\text{--}150$ мВ. Спектральная зависимость изменения полного тока в германиевом канале при тянущем напряжении 50 мВ приведена на рис.2.

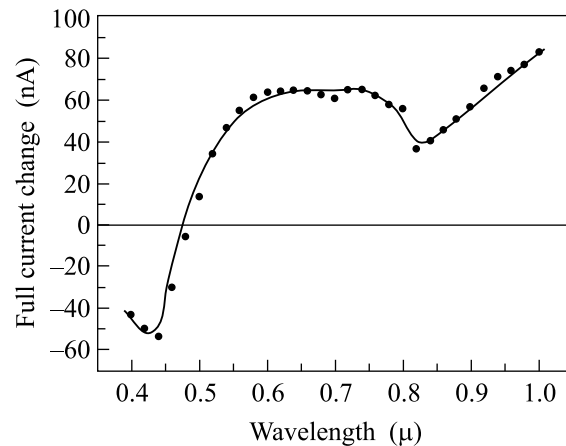


Рис.2. Спектральная зависимость изменения полного тока канала

Освещение светом с длиной волны, меньшей, чем 0.5 мкм, приводит к уменьшению тока, а при больших длинах волн ток увеличивается.

Релаксация тока при включении и после выключения освещения. На рис.3 приведены релаксационные кривые тока в канале после выключения освещения, измеренные при комнатной температуре для длин волн 0.6 , 0.5 и 0.4 мкм. Наблюдаемая перемена знака тока канала при освещении в принципе может быть связана либо с влиянием заряда, накопленного в том или ином месте структуры, на проводимость канала, так как влияние поперечного тока было исключено.

Для определения роли КТ на фототок в канале и его релаксацию были изготовлены структуры, в которых вместо слоя с КТ был выращен слой сплошного материала той же эффективной толщины. В таких структурах не наблюдалось зависимости тока через

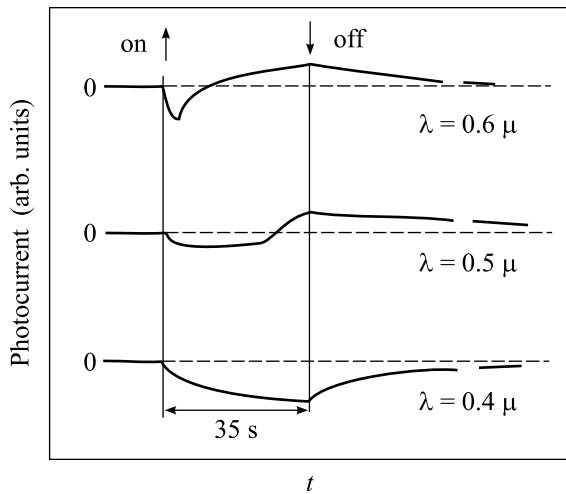


Рис.3. Зависимость тока канала при включении и выключении освещения для разных длин волн, $T = 300$ К

канал от освещения. Это свидетельствует в пользу того, что определяющим является поглощение в слое с КТ. Возможный механизм уменьшения тока канала при освещении и долговременной релаксации тока после выключения освещения можно проанализировать, рассмотрев зонную диаграмму структуры (рис.4), построенную на основании данных о разрывах зон, полученных в нашей предыдущей работе [6].

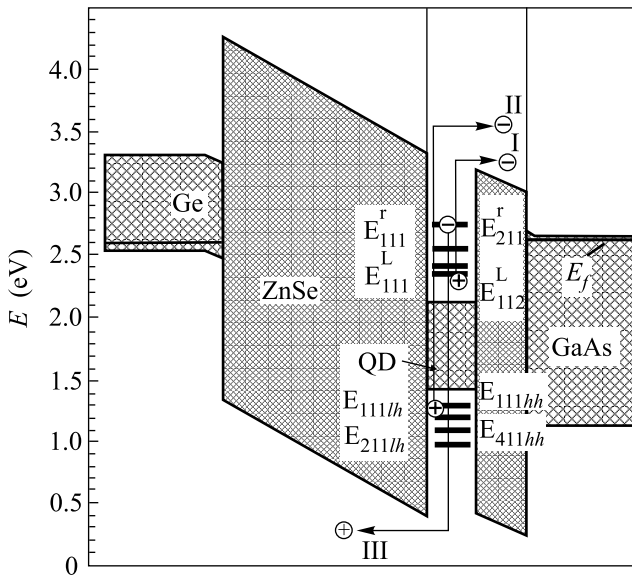


Рис.4. Зонная диаграмма структуры в равновесии. Стрелками показаны возможные оптические переходы с последующим уходом электрона (дырки) и локализацией второго носителя заряда. Показаны только надбарьерные переходы, хотя может осуществляться и туннелирование в GaAs

В результате расчета при отсутствии внешнего напряжения и без освещения было получено, что часть встроенного потенциала, приложенного к германию, плотность заряда на КТ и плотность электронов на заряженных КТ составляют соответственно: $V_{Ge} = 0.033$ В; $\sigma_{КТ} = -6.1 \cdot 10^{-8}$ Кул·см⁻²; $N_{eКТ} = 3.8 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Поскольку поперечные токи утечки через структуру малы, изменение тока канала может происходить только за счет пространственной локализации электронов и дырок. Рассмотрим возможные оптические переходы в структуре (рис.4), начиная с малых энергий фотона. Из зонной диаграммы видно, что переходы I типа с уровнями зоны проводимости, находящихся ниже уровня Ферми, на уровни квазинепрерывного спектра могут происходить при $h\nu \geq 1.0$ эВ, а в эксперименте появление фототока наблюдается при $h\nu \cong 1.25$ эВ. Для переходов: “первый уровень в валентной зоне – уровни, с которых возможно туннелирование электронов в GaAs, либо на уровни квазинепрерывного спектра” (переход II на рис.4) – минимальная энергия кванта примерно равна 2.0–2.1эВ. Наконец, для переходов электронов из квазинепрерывного спектра валентной зоны на пустые электронные уровни КТ (переход III на рис.4) требуется минимальная энергия более 2.3эВ.

Как происходит локализация зарядов при этих переходах? При переходе I электрон во встроенном электрическом поле уходит в арсенид галлия, а дырка локализуется на КТ. Такая же ситуация наблюдается для перехода II. В то же время при переходах III в КТ локализуется электрон, а дырка уходит в германий (либо захватывается на ловушки в ZnSe).

Зарядка КТ дырками (переходы I и II на рис.4) должна привести к увеличению поперечного поля и подтоку электронов к гетерогранице Ge – ZnSe, то есть должен наблюдаться эффект поля. По мере роста положительного заряда на КТ обеднение переходит в инверсию, что влечет за собой увеличение проводимости и тока канала и приводит в результате к стационарному состоянию, в котором наблюдается приращение тока. Динамика изменения проводимости канала от времени накопления заряда хорошо видна на рис.3 – кривые, соответствующие поглощению излучения с длиной волны 0.6 и 0.5 мкм. При энергии фотона, начиная с 2.3эВ, могут наблюдаться, по крайней мере, переходы двух типов – II и III, то есть возможна зарядка КТ и дырками, и электронами.

В этом случае в стационарном состоянии ток канала будет определяться установившимся равновесием между процессами генерации и рекомбинации но-

сителей заряда обоих знаков и процессом их разделения. Кроме того, при переходах III типа выброс дырок в канал и уменьшение поперечного поля в канале препятствуют достижению состояния инверсии. Поэтому при реализации такого типа возбуждения в эксперименте при $\lambda < 0.5$ мкм наблюдается обеднение канала, что приводит к отрицательному изменению тока (рис.3), в отличие от $\lambda > 0.5$, когда реализуются переходы только I и II типов с накоплением положительного заряда на КТ.

Релаксационные кривые позволяют оценить характерные времена достижения стационарного состояния, в данном случае такого состояния, когда генерация уравнивается рекомбинацией электронно-дырочных пар, а потоки носителей из слоя Ge КТ в обе стороны туда и обратно равны. Эти времена при комнатной температуре составляют десятки секунд, а при понижении температуры до 77 К увеличиваются до часов.

Оценка заряда, который надо накопить в КТ для достижения точки инверсии (равенства концентрации неосновных носителей заряда, электронов, концентрации дырок) в квазинейтральном объеме германиевого канала показывает, что $\sigma_{КТ} = (4.2-4.7) \cdot 10^{-7}$ Кул \cdot см $^{-2}$, что соответствует плотности дырок на заряженных КТ – $N_{рКТ} = (2.6-2.9) \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$.

Таким образом, временные изменения фототока при длине волны падающего света 0.5 и 0.6 мкм связаны с постепенным накоплением дырок в КТ и должны зависеть от интенсивности освещения. В то же время стационарное состояние, характеризующееся уменьшением фототока при возбуждении светом с длиной волны 0.4 мкм, связано с появлением еще одного типа

перехода. Более детальный анализ процессов поглощения можно будет провести при известных коэффициентах поглощения света в КТ.

Итак, в транзисторной структуре в системе GaAs/ZnSe/QD-Ge/ZnSe/Ge при освещении светом разного спектрального состава экспериментально обнаружены изменения тока канала, связанные с зарядкой КТ. Измерения релаксационных кривых после выключения освещения показывают, что спад тока продолжается в течение от десятков секунд вплоть до нескольких часов в зависимости от температуры объекта. Указанные изменения тока канала объяснены с привлечением изменения состояния канала вблизи гетерограницы от обеднения до инверсии. Эффект может быть использован в качестве долговременной оптической памяти.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 02-02-17800), проектов “Поверхностно атомные структуры” и “Низкоразмерные квантовые структуры”.

1. Lingjie Guo, Effendi Leobundung, and Stephen Y. Chou, *Science* **275**, 649 (1997).
2. Н. Н. Леденцов, В. М. Устинов, В. А. Щукин и др., *ФТП* **32**, 385 (1998).
3. M. Iwamatsu and Y. Okabe, *J. Appl. Phys.* **86**, 5541 (1999).
4. Y. W. Zhang, *Phys. Rev.* **B61**, 10388 (2000).
5. A. I. Yakimov, C. J. Adkins, R. Boucher et al., *Phys. Rev.* **B59**, 12598 (1999).
6. И. Ю. Бородин, И. А. Литвинова, И. Г. Неизвестный и др., *Письма в ЖЭТФ* **78**, 184 (2003).