

3 - Физика полупроводников и диэлектриков

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.

Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаб. 10

Сегнетоэлектрическая память FRAM - кандидат на роль универсальной памяти

e-mail: damir@isp.nsc.ru

стр. 36

Краснова Ирина Андреевна, магистрант 2 года обучения

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Физический

Исследование влияния собственного оксида на поверхность CdHgTe после жидкостного травления

Сидоров Георгий Юрьевич, Горшков Дмитрий Витальевич,

e-mail: i.krasnova@g.nsu.ru

стр. 37

Остальцова Анастасия Дмитриевна, 1 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, физико-технический институт

Фототранзисторы на основе производных фуллерена

Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н.

e-mail: nastia.ostaltsova@yandex.ru

стр. 38

Сегнетоэлектрическая память FRAM – кандидат на роль универсальной памяти

Исламов Дамир Ревинирович

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

damir@isp.nsc.ru

Одной из наиболее приоритетных задач современной микроэлектроники является создание универсального запоминающего устройства, обладающего высокой скоростью записи и считывания информации, вместе с большим временем хранения, высокой информационной плотностью и энергонезависимостью. Для создания универсальной памяти необходимо эксплуатировать новые материалы и их функциональные свойства, поскольку физические принципы работы выпускаемых промышленностью устройств памяти и технологии, основанные на них, практически уже достигли предела своих возможностей. Исследования памяти на основе сегнетоэлектрического переключения FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) осуществляются на протяжении более 30 лет. Детально изучены технология и сегнетоэлектрические свойства SrTiO_3 , $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ (PZT), $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT), $\text{Bi}_{3,75}\text{La}_{0,25}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BLT) и других сегнетоэлектрических плёнок. Проблема применения перечисленных материалов в качестве активной среды FRAM состоит в том, что их поляризация катастрофически падает при толщинах плёнок менее 100 нм. В свою очередь большая толщина сегнетоэлектрических плёнок (большое аспектное соотношение) приводит к большим размерам ячейки памяти FRAM. По этой причине информационная ёмкость современных FRAM не превышает 128 Мбайт/чип (Компания Ramtron, США). Для сравнения ёмкость современной флэш памяти составляет 256 Гбайт/чип.

Открытие сегнетоэлектрического эффекта в нанометровых слоях HfO_2 вызвало взрывной интерес к изучению физических свойств этих материалов, в связи с перспективой разработки FRAM памяти терабитного масштаба, способной претендовать на роль универсальной памяти. Сегнетоэлектрические свойства тонких легированных плёнок HfO_2 были обнаружены в 2007 году членами группы из NaMLab в компании Qimonda совместно с RWTH Aachen при поиске материалов с высокой диэлектрической проницаемостью для использования в конденсаторах ДОЗУ. Авторами была обнаружена ранее не наблюдавшаяся в нормальных условиях нецентросимметричная (полярная) орторомбическая фаза (o-фаза) между моноклинной (m-) и тетрагональной (t-) фазами в легированных слоях HfO_2 толщиной от 5 до 50 нм [1–3]. Для более толстых плёнок доля m- фазы увеличивается по отношению к o- фазе, что приводит к снижению сегнетоэлектрических свойств. Поляризация плёнки происходит внутри элементарных ячеек o- фазы, перемещая четыре атома кислорода между двумя зеркально симметричными положениями, определяемыми двумя локальными минимумами, разделёнными энергетическим барьером. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы в HfO_2 требует легирования различными элементами, в том числе Si, Al, Y, Gd, La и другими, с последующим высокотемпературным отжигом (~1000 °C). При переборе легирующих примесей выявлено, что окно уровня легирования для формирования сегнетоэлектрической фазы увеличивается с атомным радиусом легирующей примеси. Для легирующих примесей относительно малого ионного радиуса, таких как Si и Al (радиус 110/125 пм), имеется небольшое окно уровня легирования (~2 ат.%) в отличие от более «крупных» атомов, таких как La (радиус 195 пм), для которых окно легирования >10 ат.%. До сих пор неясно, что больше влияет на формирование сегнетоэлектрической фазы легированного слоя HfO_2 : ионный радиус примеси или связанная с примесью повышенная концентрация вакансий кислорода в HfO_2 . Для разных концентраций вакансий кислорода была обнаружена прямая корреляция с долей фазы беспримесного HfO_2 в структуре легированной плёнки [4, 5]. Несмотря на то, что небольшая концентрация вакансий кислорода стабилизирует сегнетоэлектрическую фазу в HfO_2 , повышение количества дефектов приводит к разрушению этой фазы и деградации всего прибора памяти.

Особый интерес представляет тот факт, что сегнетоэлектрические свойства также были продемонстрированы в тонких плёнках твёрдого раствора $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$, для которых высокотемпературный отжиг не требуется, что делает этот материал совместимым с современным технологическим процессом кремниевого производства.

В настоящем обзоре описаны физические принципы работы FRAM, основные проблемы, которые необходимо решить перед массовым коммерческим производством.

Список публикаций:

- [1] T. S. Böске, St. Teichert, J. Müller et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 102903.
- [2] T. S. Böске, St. Teichert, J. Müller et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 112904.
- [3] X. Sang, E. D. Grimley, T. Schenk et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 162905.
- [4] A. Pal, V. Narasimhan, S. Weeks et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 110. P. 022903.
- [5] D.R. Islamov, V.A. Gritsenko, T.V. Perevalov et al. // *Acta Materialia.* 2019. V. 166. P. 47.

Исследование влияния собственного окисла на поверхность CdHgTe после жидкостного травления

Краснова Ирина Андреевна

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Сидоров Георгий Юрьевич, Горшков Дмитрий Витальевич

i.krasnova@g.nsu.ru

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) широко применяется в науке и технике при создании фотоприемных матриц инфракрасного диапазона спектра [1], исследовании топологических изоляторов, двумерного электронного газа. Для любых применений необходимо пассивирующее покрытие. Из литературы [2] известно, что хорошим пассивирующим покрытием для КРТ является оксид алюминия (Al_2O_3), выращенный методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) при температуре $120^\circ C$. Но при изготовлении фотоприемных матриц также необходимо производить травление меза-структур для уменьшения фотоэлектрической связи между фотоприемными элементами. В настоящее время для этих целей применяется раствор Вг в НВг. При таком травлении на боковых поверхностях меза-структур появляется избыточный теллур, окисел теллура, которые влияют на электрофизические свойства границы раздела КРТ- Al_2O_3 . Таким образом, в данной работе исследуется влияние отсутствия собственного окисла КРТ на электрофизические свойства границы раздела КРТ- Al_2O_3 .

Исследования проводились на пластине КРТ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с молярным составом $Cd\ x=0.22$. Затем пластина отжигалась при минимальном давлении паров ртути для преобразования проводимости пленки КРТ в р-тип. Концентрация дырок и их подвижность после роста КРТ, измеренные методом эффекта Холла, были равны $1.2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $520\text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, соответственно. Затем собственный окисел и варизонный слой удалялись жидкостным травлением водным раствором Вг + НВг. После этого пластина была разделена на несколько частей, каждая из которых представляет собой единый образец. Это позволило минимизировать разброс объемных параметров образцов (плотности, подвижности носителей и концентрации дефектов) с точностью до неоднородности пленки КРТ по площади пластины. После травления на образцах проводилась дополнительная обработка. Для изучения влияния наличия собственного окисла КРТ был изготовлен образец, который в течение суток хранился на воздухе, результате чего на нем образовалось около 1 нм собственного окисла [3]. Так же был изготовлен образец, который в течение суток находился в парах перекиси водорода (H_2O_2), согласно данным работы [3] на поверхности образовалось 2.5 нм собственного окисла. Для исследования влияния отсутствия собственного окисла был сделан образец, на котором проводилось удаление собственного окисла с помощью HCl и ИПС. Был изготовлен образец, который после травления загружался в вакуумную камеру роста Al_2O_3 и на него наносился триметиалюминия (ТМА) без окисления. Взаимодействуя с кислородом в окисле КРТ, ТМА восстанавливает его с образованием оксида алюминия. Так же был сделан образец, на котором после травления не проводились дополнительные обработки. Далее на все образцы наносился Al_2O_3 , методом ПАСО при температуре $120^\circ C$, и изготавливались МДП структуры. На этих структурах измерялся импеданс в зависимости от напряжения и частоты при температуре жидкого азота ($77^\circ K$). Из полученных данных были найдены значения емкости диэлектрика, ширины гистерезисов, положения напряжения плоских зон и карты нормированной параллельной проводимости, из которых оценивались плотности поверхностных состояний.

Измерение вольт-фарадных характеристик при различном начальном напряжении показало для большинства образцов, что при увеличении начального напряжения увеличивается ширина гистерезиса, а так же вся вольт-фарадная характеристика сдвигается по оси напряжений. Это свидетельствует о зарядки медленных состояний в диэлектрике. Исключение составил образец, который сутки пролежал в парах H_2O_2 . Для него даже при большом напряжении практически не наблюдается гистерезиса. Полученные данные позволили определить оптимальный диапазон дальнейших измерений для минимизации влияния зарядки медленных состояний. Получено, что на всех образцах наблюдается одинаковый разброс емкости диэлектрика, что говорит об однородности слоя Al_2O_3 . Установлено, что наибольшее смещение положения плоских зон достигается для образца, который сутки окислялся в парах H_2O_2 . Это свидетельствует о наибольшем значении фиксированного встроенного заряда в диэлектрик. У остальных образцов наблюдается близкое в пределах погрешности значение смещения положения плоских зон. Из полученных карт нормированной параллельной проводимости было оценено, что наибольшее значение плотности поверхностных состояний достигается в образце с собственным окислом КРТ, выращенным в парах H_2O_2 и в образце, на котором проводилось удаление собственного окисла КРТ в HCl и ИПС. А для образца, на котором проводилось нанесение после травления ТМА без окисления, наблюдается наименьшее значение плотности поверхностных состояний.

Установлено, что перспективным способом обработки КРТ, после жидкостного травления, для улучшения границы раздела КРТ- Al_2O_3 является уменьшение собственного окисла КРТ с помощью ТМА.

Список публикаций:

[1] Рогольский А. // Инфракрасные детекторы: пер. с англ./под ред. А.В. Войцеховского. Новосибирск: Наука. 2003. С. 636.

[2] Gorshkov D. V. and etc. // Technical Physics Letters. 2020. 53, 741.

[3] Сидоров Г. Ю. и др. // Автометрия. 2017. 46, 97.

Фототранзисторы на основе производных фуллерена

Остальцова Анастасия Дмитриевна

Бакирский государственный университет

Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н.

nastia.ostaltsova@yandex.ru

На основе фотохромных гибридных молекул изготовлены светорегулируемые органические полевые транзисторы, которые продемонстрировали достаточно высокую светочувствительность и чувствительность, быструю реакцию на облучение. Были исследованы тонкие пленки образцов 3-х видов: с отдельными слоями (P), механически-перемешанные (M) и химически-связанные производные фуллерена и фотохрома (X).

Подвижности носителей заряда активного слоя μ , изготовленных органических фототранзисторов, оценена с помощью формулы (1):

$$I_{DS} = (W/L)\mu C(U_G - U_{th}) U_{DS}, \quad (1)$$

где W — ширина канала, L — длина канала, C — емкость на квадрат площади подзатворного диэлектрика AlO_x (для толщины $W=400\text{ нм}$ $C=8,9\text{ нФ/см}^2$), U_G — напряжение на затворе, U_{DS} — напряжение между стоком и истоком, U_{th} — пороговое напряжение.

Оценочные значения подвижности носителей составляют $\mu(P)=0,003\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; $\mu(M)=0,012\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; $\mu(X)=0,043\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. Рассчитанное значение подвижности носителей заряда обусловлено малой концентрацией носителей заряда в полученных пленках.

Основным преимуществом таких гибридных структур является их высокая стабильность, что было подтверждено во время высокоскоростных испытаний с многократным включением (ВКЛ и ВЫКЛ), которые отражают производительность устройства. Все измерения проводились в нормальных условиях - на воздухе, что является неоспоримым преимуществом изученных транзисторных структур по сравнению с большинством экспериментальных структур на основе других соединений [1].

Исследование вольт-амперных характеристик изготовленных транзисторов показало, что в отсутствие облучения токи в фототранзисторах не превышают 1 нА или имеют такой же порядок величины. При облучении УФ-светом (350 нм) в поле зазора транзистора ток сток-исток увеличивается на три порядка для обоих устройств. Таким образом, отношение тока I_{on}/I_{off} составляет около 1000. Кинетика фотоотклика показана на рис. 1. Подавались световые импульсы разной длительности. Как видим, органические фототранзисторы реагируют по-разному.

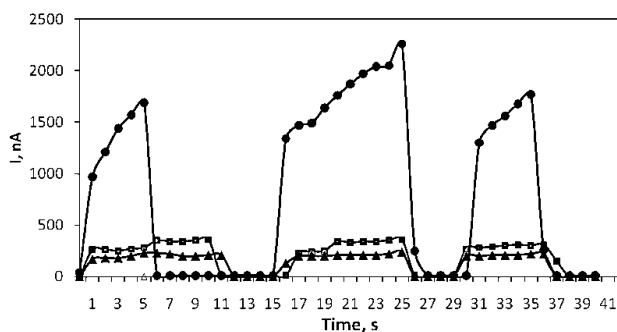


рис.1. Кинетика увеличения и уменьшения токов I_{DS} для органических фототранзисторов: пирролидинофуллерена X (круглые точки), отдельных слоев фуллерена C_{60} и дитиенилэтена P (треугольные точки), а также смешанных слоев C_{60} и дитиенилэтена M (квадратные точки). При включении и выключении ультрафиолета (150 Вт, 350 нм) для $V_{DS} = 16\text{ В}$ и $V_G = 16\text{ В}$

Мы изготовили и исследовали фотоуправляемый органический фототранзистор, содержащий фуллерены дитиенилэтена/пирролидинофуллерена в качестве активного слоя. Одновременно, для строгого и объективного сравнения наших результатов с литературными данными, был изготовлен многослойный транзистор, в котором полупроводник (фуллерен C_{60}) и светууправляемое соединение (дитиенилэтена) образовывало отдельные слои[2].

Список публикаций:

[1] Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Dzhemilev U.M., Salikhov R.B., Safargalin I.N., Mullagaliev I.N., Venidiktova O.V., Valova T.M., Barachevsky V.A. Optically controlled field effect transistors based on photochromic spiropyran and fullerene C_{60} films. //Mendeleev Communications. 2019. T. 29. № 2. С. 160.

[2] Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Popodko N.R., Dzhemilev U.M., Salikhov R.B., Safargalin I.N., Mullagaliev I.N. Photocontrolled organic field effect transistors based on the fullerene C_{60} and spiropyran hybrid molecule. // RSC Advances. 2019. T. 9. № 13. С. 7505-7508.