ЛИТЕРАТУРА

1. Кашерининов П.Г. Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи и обработки изображений / П.Г. Кашерининов, А.А. Томасов // ФТП. – 2008. – Т. 42 № 11. – с. 1391 – 1399.
2. Британ В.Б. Про пасивацію воднем електрично активних центрів в $Cd_xZn_{1-x}Te$ / Британ В.Б., Пигур О.М., Цюцюра Д.І. – УФЖ. – 2005. – Т.50, №6. – С. 594-596.
3. Британ В.Б. Вплив обробки монокристалів Cd1-xZnxTe у атмосфері водню на електрично-активні центри // В.Б. Британ, Р.М. Пелещак, Д.І. Цюцюра, Д.В. Корбутяк // ФХТТ. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 41-44.
4. Березин Г.Н. Оптические основы контактной лотографии / Г.Н.Березин, А.В. Никитин, Р.А. Сурис – М.: Радио и связь, 1982. – 104 с.
5. Кашерининов П.Г. Фотоэлектрические явления в структурах на высокоомных полупроводниковых кристаллах с тонким слоем диэлектрика на границе полупроводник-металл / П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, А.А. Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т. 29, № 11. – С. 2092-2107.
6. Extension of Ramo's theorem as applied to induced charge in semiconductor detectors / G. Cavalleri [и др.] ; под общ. ред. G. Cavalleri. – Nucl. Instrum. Methods. – 1971, 92. – P 137–140.
7. Особенности электропроводимости монокристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ и $Cd_{1-x}Mn_xTe$ / Л.А. Косяченко [и др.]; под общ. ред. Л.А. Косяченко. – Nucl. Instrum. Methods. – ФТП. – 2003. – Том. 3, № 12. – Р. 1420-1426.
8. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості: монографія Корбутяк Д. В [и др.] ; под общ. ред. Д. В. Корбутяк. – К.: "Іван Федоров", 2000. – 198 с.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ НАНОСТРУКТУР ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

А. А. Вельченко[1], И. И. Марончук[2], Д. Д. Саникович[2], П. В. Потапков[2]

[1]УО Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, anna.velchenko@gmail.com
[2] ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия, igimar@mail.ru

Аннотация. Выявлены недостатки в оборудовании и технологических подходах проведения процессов выращивания наноструктур с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии, используемых нами ранее. Проведено физико-математическое моделирование процессов выращивания наноструктур жидкофазной эпитаксией используя SolidWorks, программу FlowSimulation, определившее наличие негативных факторов, влияющих на процессы. Проведена оптимизация математической модели и оборудования, его настройка. Выращены открытые квантовые точки Ge на Si подложке, исследованные атомно-силовой микроскопией. Установлено хорошее согласие расчетного и экспериментального распределения температур в процессе выращивания воспроизводимых структур.

На современном этапе развития устройств солнечной энергетики и электроники актуальным становится получение полупроводниковых наногетероэпитаксиальных структур (НГЭС), которые имеют в активной области квантово-размерные объекты типа квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ) [1].

В этой связи развитие методов, позволяющих получать НГЭС по механизму Странского-Крастанова, не содержащих «смачиваемых» слоев между КТ [2], в частности, используемый нами метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с импульсным охлаждением подложки (ИОП) [3,4], является весьма перспективным и актуальным направлением. Переход к приборам на основе НГЭС с КТ сопровождается ужесточением требований к качеству структур и прежде всего: снижению дефектности; однородности толщин КЯ и структуры в целом; удельному сопротивлению; однородности размеров, концентрации и распределения КТ по радиусу подложки; воспроизводимости структур от процесса к процессу. Использование подложек больших диаметров еще более ужесточает требования к качеству таких структур.

Применяемое нами экспериментальное эпитаксиальное оборудование при выращивании НГЭС с КТ не всегда позволяет получать воспроизводимый результат, что требует объективного внимания к усовершенствованию рабочей кассеты и технологической оснастки, оптимизации технологических параметров.

Целью данной работы являлось усовершенствование технологического оборудования и оптимизация тепловых режимов получения НГЭС с КТ методом ЖФЭ с ИОП.

При ранее проведенных научно-исследовательских работах в области выращивания НГЭС с КТ [1, 3, 4] нами был выявлен ряд недостатков в конструкции используемого нами ростового оборудования и в технологических подходах проведения процессов, которые негативным образом влияли на качество получаемых нами наноструктур методом ЖФЭ с ИОП.

Для оптимизации тепловых режимов и конструкций теплового узла установки и находящейся в ней графитовой кассеты, нами было проведено физико-математическое моделирование процессов выращивания НГЭС с КТ методом ЖФЭ с ИОП со стороны анализа термодинамического состояния. В качестве рабочей среды для анализа был выбран продукт SolidWorks программа FlowSimulation, которая обладает удовлетворительной точностью расчетов для подобного моделирования тепловых процессов. В основу проведения расчетов, были положены материалы, полученные нами в ранних работах, которые позволили задать граничные условия для математической модели.

Проведенный анализ позволил определить наличие негативных факторов, влияющих на процесс выращивания. А именно: неравномерность теплового поля в реакторе (как по его оси, так и по радиусу); наличие негативного температурного градиента («факела» температуры) вблизи теплопоглотителя; высокую инертность процесса при смене тепловых условий; зависимость качества, равномерность и воспроизводимость выращивания НГЭС с КТ от позиционирования теплопоглотителя на тыльной стороне подложки; несовершенство технологической оснастки.

При оптимизации математической модели теплового узла установки и конструкции графитовой кассеты с оснасткой и теплопоглотителем, удалось устранить (минимизировать) влияние негативных характеристик на процесс выращивания. Значительно усложнена сборная конструкция теплопоглотителя, подобраны материалы с различной теплопроводностью для его изготовления. Оптимизированы материалы для изготовления других конструкционных деталей кассеты. С целью выравнивания теплового поля на подложке изменена конструкция ее крепления в кассете, использованы материалы с различной теплопроводностью. Разработана система экранов в тепловой зоне вокруг кассеты, подобраны материалы для их изготовления. Оптимизация математической модели позволила произвести модернизацию имеющегося

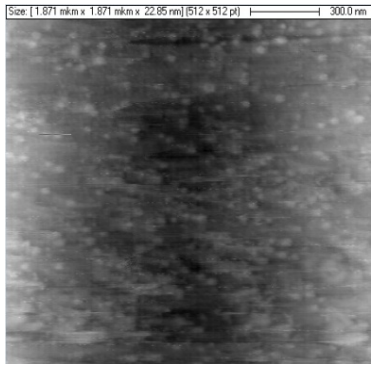
оборудования, изготовление новой кассеты и оснастки без дополнительных многочисленных опытов и измерений.

Проведен анализ динамики потоков течения газа в реакторе при различных расходах. Установлено распределение температуры по потоку в сечениях реактора, выявлен недостаток конструкции подачи газа на входе в реактор.

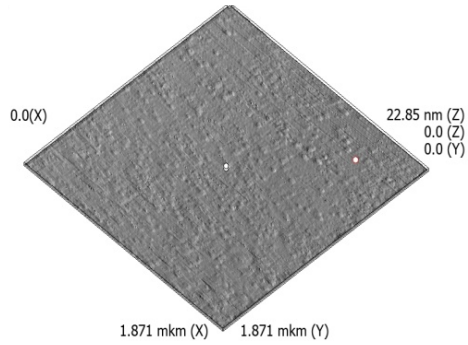
В процессе работы был сконструирован и изготовлен имитатор рабочей кассеты из материалов, идентичных (используемых) штатной кассете. Разработана система и методика одновременного мониторинга температур: по оси рабочей кассеты и имитатора при различных этапах проведения ростового эксперимента; растворах-расплавах и подложке; на поверхности кварцевого реактора и в различных элементах теплового блока в процессе выращивания НГЭС с КТ. Усовершенствована методика настройки установки.

Выращены образцы открытых КТ Ge на Si подложке. Процессы проводили по технологической схеме и методикам, описанным в наших предыдущих работах [1, 3, 4]. Морфологию поверхности полученных образцов исследовали с помощью микроскопа СММ-2000 методом атомно-силовой микроскопии. На рис. 1 представлены результаты исследования атомно-силовой микроскопией, структуры с открытыми КТ Ge на Si буферном слое, подложка Si с ориентацией (111) полученной после модернизации и оптимизации оборудования, один импульс холода. На рис. 1 *а* показан двухмерный кадр, а на рис. 1 *б* его трехмерное изображение. Обработав информацию с рис. 1 получили линейные размеры КТ, которые в среднем составляют около 30 нм по диаметру и до 5 нм в высоту. Разброс по размерам КТ не превышал 20%. Шероховатость поверхности структуры не более 1 Å. Плотность высева образований была на уровне $2 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$. В получаемых нами структурах до модернизации оборудования при тех же условиях выращивания плотность высева КТ была ниже и составляла менее 10^{10} см$^{-2}$, равномерность высева КТ была значительно хуже. Размеры КТ и шероховатость поверхности структуры находились примерно на том же уровне.

Установлено хорошее согласие расчетного и экспериментального распределения температур в процессе выращивания НГЭС с КТ. Проведенные контрольные эксперименты, показали хорошую воспроизводимость при выращивании открытых КТ, что подтверждает правильность проведенной модернизации.



а



б

Рисунок – Структура с КТ Ge на Si подложке: *а* – двумерное изображение, *б* – трехмерное изображение

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по базовой части государственного задания №2014/702.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maronchuk I.I. An obtaining of nanoheteroepitaxial structures with quantum dots for high effective photovoltaic devices, investigation of their properties / S.Bykovsky, S.Bondarec, I. Maronchuk, A.Velchenko // TEKA, Polish academy of sciences. UEER. – 2014. – Vol. 14. – No. 1. – P. 154–163.
2. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор. /Леденцов Н.Н [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. − С. 385–410.
3. Maronchuk I.I. Deposition by liquid epitaxy and study of the properties of nano-heteroepitaxial structures with quantum dots for high efficient solar cells / D. Dimova-Malinovska, K. Lovchinov, I.I. Maronchuk, I.E. Maronchuk, D.D. Sanikovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – № 558. – 012049.
4. Maronchuk I.I. Study of the morphology of ge quantum dots grown by liquid phase epitaxy/ D. Dimova-Malinovska, H. Nichev, I.I. Maronchuk, I.E. Maronchuk, D.D. Sanikovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 700. – 012043.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ $Cu(In, Ga)Se_2$ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs

А. А. Вельченко[1], В. И. Мирончук[1], Р. М. Пелещак[2], И. В. Протосовицкий[1]

[1]Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, anna.velchenko@gmail.com
[2]Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко, г. Дрогобыч, Украина, peleshchak@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается расчет оптических потерь в наногетероструктере $Cu(In, Ga)Se_2$ с квантовыми точками InAs. Для данной наногетероструктуры определены коэффициенты отражения для трех интерфейсов и поглощения в слоях ZnO и CdS. Аналитические выражения позволяют определить квантовую эффективность солнечных элементов $Cu(In, Ga)Se_2$ с квантовыми точками InAs.

Солнечные энергетические установки находят все более широкое практическое применение как источник электроэнергии для малых и средних потребителей, требующих автономного энергоснабжения, в некоторых случаях они подключены к электрическим сетям. В Германии работают фотоэлектрические установки мощностью 5 МВт, которые включены в единую государственную систему электрогенерирования.

Значительное внимание данной проблеме уделяется организациями, входящими в ООН, такими как ЮНЕСКО, ЕЭК, ЮНЕП, ЮНИДС, а также другими межправительственными и неправительственными международными организациями. Выделяются значительные средства на работы в области НВИЭ из целевых ассигнований ЕЭС, Европейского фонда национального развития, Евроатома и других организаций.

Солнечные элементы на основе $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ (CIGS), показывают долговременную стабильность и высокую радиационную стойкость, являются легкими, гибкими и портативными, занимают одну из перспективных позиций в тонкопленочной фото-