

# СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*А.А. Лебедев, С.А. Цыникин, А.М. Леднев, Б.В. Жалнин, к.ф.-м.н.,  
Е.В. Обручева, к.ф.-м.н., М.Б. Каган, д.т.н.*

*НПП «Квант»*

## Введение

На настоящий момент в мире разработаны и серийно изготавливаются трехкаскадные солнечные элементы (СЭ) на основе гетероструктур InGaP/InGaAs/Ge на германиевой подложке. Солнечные элементы из таких гетероструктур применяются в солнечных батареях (СБ) космических аппаратов и имеют эффективность преобразования солнечного излучения от 26 до 29,5 % с максимумом распределения около 28 – 29 % по спектру с нулевой эффективной массой атмосферного поглощения света (AM0). На рис. 1 представлен типовой трехкаскадный СЭ, изготовленный в технологической лаборатории ОАО «НПП «Квант».

Современные СЭ космического назначения – это сложные наногетероструктурные приборы (рис. 2), которые при общей толщине в 180 мкм содержат более 30-ти микро- и наноразмерных слоёв полупроводниковых соединений, металлических контактных слоев и прозрачных оксидов. Технология создания такого прибора многостадийна [1].



Рис. 1. Трехкаскадный солнечный элемент космического назначения, изготовленный в технологической лаборатории ОАО «НПП «Квант».

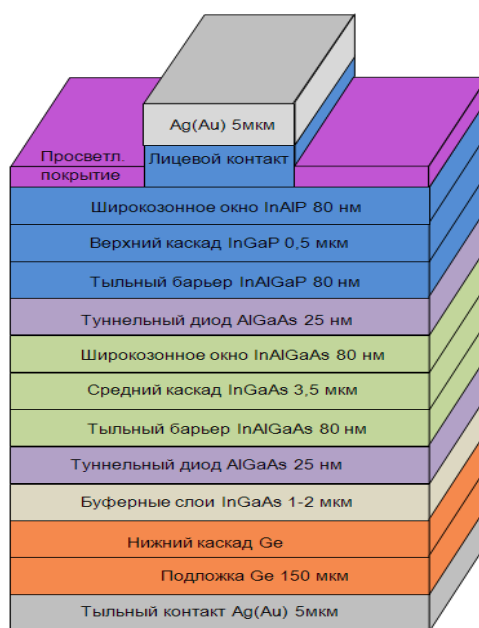


Рис. 2. Схематическое изображение одного из вариантов СЭ с трехкаскадной гетероструктурой.

Основные технологические этапы разделяют на ростовые процедуры и постростовые операции. Ростовые процессы обеспечиваются технологией

эпитаксиального роста наногетероструктур. В современных наиболее продвинутых в разработке промышленных машинах эпитаксиального роста успешно реализованы процессы газофазовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ), позволяющие проводить равномерный рост бездефектного многослойного гетероструктурного монокристалла из чередующихся слоев InGaP-InAlP-InGaAs-InGaAlAs. Постростовые операции обеспечиваются, во-первых, технологией формирования контактного рисунка с выдерживанием особых адгезионных и омических свойств переходов металл-металл и металл-полупроводник. Во-вторых, постростовые операции связаны с технологией нанесения просветляющего или антиотражающего покрытия из интерференционных наноструктурных прозрачных оксидов на лицевой поверхности СЭ.

Наиболее многофакторным является процесс эпитаксиального роста полупроводниковых слоев в реакторе МОСГФЭ. Для того чтобы выявить роль этих факторов в формировании структуры и свойств прибора необходим систематический подход к измерениям, регистрации и обработке потока данных, получаемых с данного участка технологических процессов. Поэтому, представляется актуальным и необходимым создание системы контроля параметров эпитаксиального роста.

#### **Система контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур в технологическом процессе разработки и изготовления СЭ**

Для солнечных батарей космических аппаратов конструкторы задают целевые удельные энергетические и энергомассовые характеристики, исходя из минимизации веса коммутирующей системы и максимизации площади фотогенерирующей части СБ, то есть СБ для таких СБ необходимы тонкие СЭ большой площади. Это обстоятельство накладывает особые условия на разработку технологии изготовления СЭ космического назначения, состоящие в повышенных требованиях к однородности полупроводниковой гетероструктуры на всей площади солнечного элемента, это требование не столь критично для других приборов на гетероструктурах (транзисторов, фотодиодов, лазеров, СЭ для концентраторов и др.) в силу их малых размеров.

Однородность полупроводниковой гетероструктуры по всей площади солнечного элемента достигается на стадии эпитаксиального роста. И сам процесс эпитаксиального роста монокристалла, и подготовка газовой смеси для роста по составу, температуре, давлению, и регулировка подачи газовой смеси в реактор, а также реакторные параметры – давление, температура и скорость вращения подложконосителя – непрерывно фиксируются, контролируются и при необходимости корректируются в процессе роста. Однако, системы управления процессами, созданные разработчиками МОСГФЭ-реакторов, хотя и постоянно совершенствуются, но пока еще не могут обеспечить требуемой однородности эпитаксиального роста, необходимой для изготовления планарных СЭ максимальной площади. А ведь именно такие СЭ применяются при проектировании и изготовлении солнечных батарей космических аппаратов.

Для того, чтобы обеспечить управление процессами роста с требуемыми характеристиками однородности необходимо создать более развитую систему контроля, включающую системы контроля, созданные разработчиками МОСГФЭ-реакторов, а также систему дополнительного мониторинга совершенства кристаллической решетки, зонных характеристик полупроводниковой гетероструктуры

и однородности легирования по площади растущей гетероструктуры. Её необходимо иметь и использовать как на стадии разработки отдельных слоев гетероструктуры, так и на стадии «сборки» гетероструктуры из отдельных слоев или блоков. Это касается и генерирующих слоев с р-п-переходом [2] и служебных слоев, таких как туннельный диод [3], слои зарождения, буферные слои, барьерные широкозонные слои [4] и т.д. Также такой контроль необходим непосредственно при эксплуатации установки МОСГФЭ во время проведения технологического процесса для осуществления регулярной периодической проверки параметров и определения путей их корректировки. Наличие такого контроля обусловлено постепенным изменением условий роста от процесса к процессу из-за осаждения продуктов реакции на стенках камеры реактора, подводящих и отводящих газовых магистралях и на подложконосителе. Эти факторы приводят к изменению теплопроводности подложконосителя, изменению реальных газовых потоков, регламентированных в исходном технологическом рецепте, а также к возникновению дополнительных турбулентных потоков в камере реактора.

В современных реакторах МОСГФЭ в процессе роста контроль осуществляется по следующим параметрам:

- состав газовых растворов арсина и фосфина в водороде;
- состав газовых растворов металлоорганических соединений в водороде;
- распределение впрыска реагентов в верхней части реактора;
- скорость вращения подложконосителя;
- температура подложконосителя в разных зонах;
- температура поверхности каждой растущей структуры;
- коэффициент отражения поверхности каждой растущей структуры;
- кривизна каждой подложки с растущей структурой;
- толщина растущего слоя по осцилляциям коэффициента отражения.

Все измерения на поверхностях растущих структур, как правило, проводятся внутри реактора с помощью встроенных лазерных пирометров-интерферометров или дефлектометров, а характеристики газовых потоков задаются и регулируются с помощью весьма сложной системы контроллеров, управляемых специальным программным обеспечением. На рис. 3 изображена структурная схема системы контроля параметров эпитаксиального роста наногетероструктур солнечных элементов. Вышеперечисленное оборудование и соответствующие параметры приведены в левой части схемы, относящейся к внутреннему контролю параметров эпитаксиального роста. Обычно данные пирометрии и рефлектометрии являются локальными, поэтому по ним можно лишь приблизительно оценить равномерность скорости роста и толщины слоя по нескольким точкам измерения в реакторе. Для более точной настройки ростовых процессов требуется более детальная информация об однородности роста, поэтому разработчики технологии роста гетероструктур каскадных СЭ расширяют систему контроля параметров дополнительными внешними измерительными методиками и приемами, которые, в большинстве случаев позволяют проводить картографирование гетероструктуры по всей площади. Эти внешние методы контроля, оборудование и соответствующие параметры приведены в правой части схемы на рис. 3. Для отслеживания равномерности параметров роста используется картографирование данных, получаемых следующими методами:

- фотолюминесценции – методика контроля состава полупроводникового слоя по ширине запрещенной зоны (ШЗЗ);

- спектрофотометрии отражения брэгговского зеркала (БЗ) – методика контроля толщины слоя;
- проводимости (сопротивления) бесконтактным методом – методика контроля легирования слоя;
- электрохимических профилей травления – методика контроля легирования и толщины слоев;
- рентгенофазного и рентгеноструктурного анализа – методика контроля совершенства кристаллической решетки и качества сопряжения эпитаксиальных слоев.

Экспериментальные данные, получаемые как от внутренних приборов управления реактором, так и от внешнего исследовательского оборудования находятся в неструктурированном, неупорядоченном, несистематизированном состоянии в разных электронных форматах, и даже на разных носителях. Для обработки таких данных в структуру системы контроля параметров эпитаксиального роста был введён разработанный программный комплекс SWComplexAnalysis (ПК SWComplexAnalysis) [5]. На рис. 3 пунктиром выделены параметры и данные, большая часть которых обрабатывается этим программным комплексом.

Таким образом, методики внутреннего параметрического контроля в реакторе газовой эпитаксии в совокупности с перечисленными внешними методиками на дополнительной исследовательской аппаратуре и программой обработки данных формируют систему контроля параметров эпитаксиального роста.

Для выращенной полупроводниковой структуры критическими являются толщины слоёв и равномерность толщины каждого слоя по поверхности плоскостной структуры, уровень легирования, равномерность легирования, химический состав слоёв и его соблюдение во всём слое. Каждый из перечисленных параметров определяющим образом влияет на свойства структуры. Несоблюдение толщин слоёв приводит к недостаточному или чрезмерному поглощению излучения, следствием чего являются разбалансировка полупроводникового прибора и падение его характеристик. Несоблюдение заданного уровня легирования ведет к изменению электрических полей и проводимости. Изменение химического состава приводит к изменению параметров кристаллической структуры, дефектообразованию, изменению значения ширины запрещённой зоны. Неравномерность этих параметров по поверхности структуры порождает локальные изменения свойств, приводящие к разбалансировке ее работы результатом чего может стать получение неработоспособного прибора.

На рис. 4 представлена схема, на которой совмещены контуры будущих СЭ и цветовая карта измерений спектрального максимума отражения брегговского зеркала (БЗ), отражающего в диапазоне 550 - 580 нм, а также построенная по этим данным трехмерная карта. Цветовая шкала настроена на соответствие видимой части солнечного спектра, поэтому изображение образца при нормальном освещении повторяет приведенную карту. Сравнительно небольшие отклонения в толщинах слоёв такого БЗ хорошо обнаруживаются визуально как изменения цвета по поверхности образца до желтого или даже оранжевого оттенка, что подтверждается измерениями спектров отражения. Однако по экспериментальным данным можно более точно выделить область с недопустимыми отклонениями толщин слоёв. Как видно из наложения контуров СЭ, значительная часть будущего прибора имеет отклонения от заданных толщин слоёв, и, следовательно, оптико-электрические свойства прибора будут неудовлетворительными.

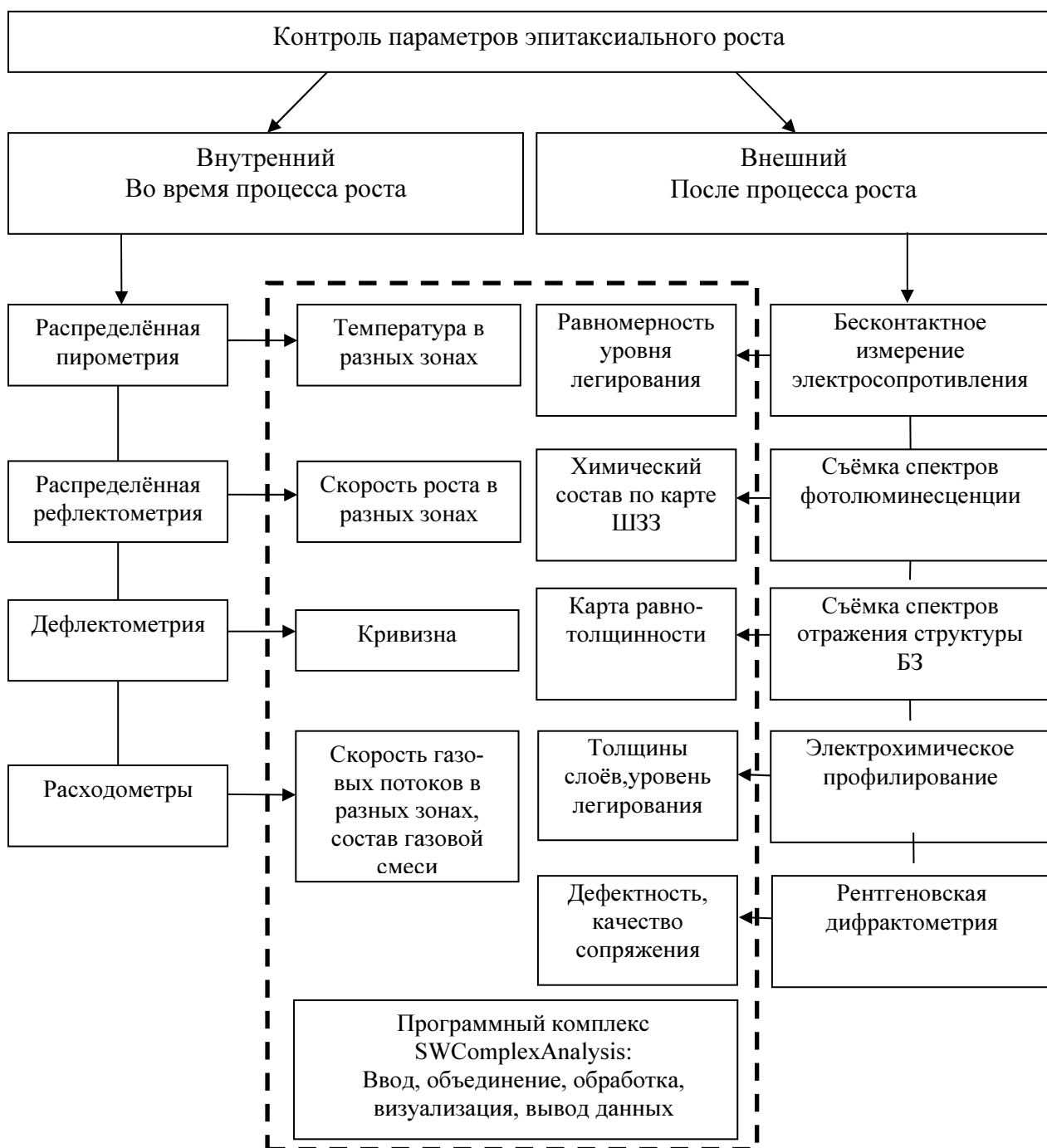


Рис 3. Структура системы контроля параметров эпитаксиального роста наногетероструктур солнечных элементов. Пунктиром выделены экспериментальные данные, большая часть которых обрабатывается программным комплексом SWComplexAnalysis.

Разнотолщинность в процессе эпитаксиального роста в гетероструктуре может быть обусловлена целым рядом факторов. Для достоверного выявления её причин следует сопоставить экспериментальные данные по образцам со значениями параметров роста, согласно их расположению в камере роста, а также провести дополнительные эксперименты по росту структур с дальнейшим повторением операций обработки и анализа данных. Прежде всего, следует более точно отрегулировать баланс потоков парогазовой смеси – источника реагентов для реакции синтеза материалов

слоёв, проверить однородность температурного поля в камере роста и осуществить другие необходимые для работы настройки.

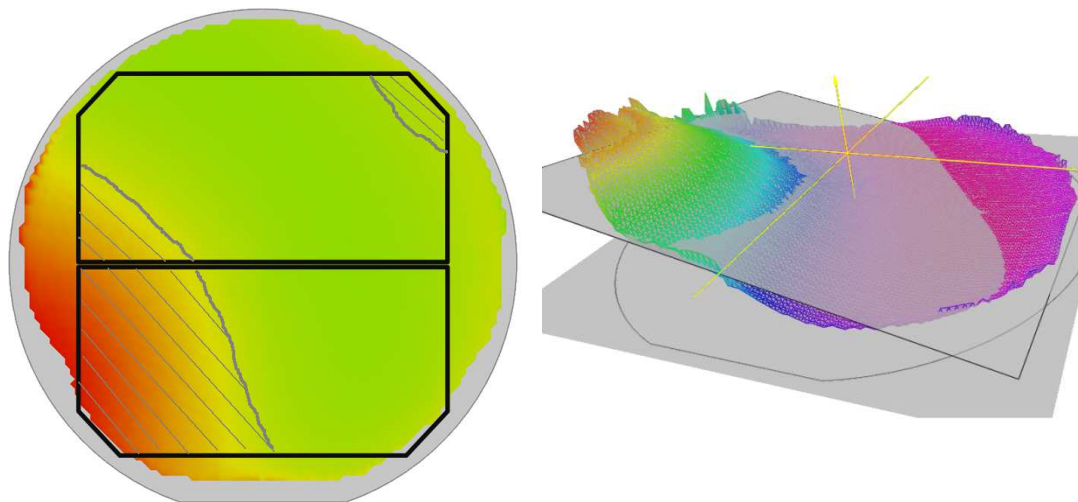


Рис. 4. Иллюстрация проявления неоднородности эпитаксиального роста в локальных характеристиках СЭ. Наложение контуров СЭ и цветовая карта измерений спектрального максимума отражения брегговского зеркала (слева). Визуализация экспериментальных данных в виде трехмерного изображения карты (справа).

Приведённый выше подход к представлению и анализу экспериментальных данных может быть применён также к большим массивам экспериментальных данных, представляющих карты поверхностной однородности, полученные методами фотолюминесценции, спектрофотометрии, измерений поверхностной проводимости, электрохимического профилирования, рентгеновской дифрактометрии.

Анализ и сопоставление результатов измерений, как между собой, так и с задаваемыми и контролируемыми параметрами роста осложнены недостаточной наглядностью экспериментального материала и требуют проведения трудоёмких процедур визуализации и трансформации данных. Для упрощения процесса обработки разнородных потоков однотипных экспериментальных данных системы контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур, а также их систематизации и визуализации был разработан программный комплекс SWComplexAnalysis – Semiconductor Wafer Complex Analysis (Комплексный Анализ Полупроводниковых Пластинок).

### **Программный комплекс SWComplexAnalysis**

Среди основных этапов работы с массивами экспериментальных данных, полученных на выходе системы контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур можно выделить три процесса – ввод, обработка, вывод данных. Упрощение работы с массивами экспериментальных данных обеспечивается сокращением количества необходимых операций, повторяющихся не только при измерениях и анализе данных, но и при вводе, обработке, выводе данных. Естественно, эти процессы, являясь эквивалентными по цели, оказываются весьма различны по реализации.

Что касается ввода данных, то для различных методик экспериментальные результаты структурированы в виде таблиц, данных в декартовых координатах, в виде файловых записей последовательного построчного ввода, в виде линейного потока,

описывающего последовательные концентрические траектории или спиральные траектории в круговых (цилиндрических) координатах и другие. В большинстве случаев массив экспериментальных данных формируется программой, обслуживающей экспериментальное оборудование, и его ввод не представляет затруднений. Исключение составляет лишь методика картографирования образца на установке бесконтактного измерения электросопротивления, используемая для контроля равномерности легирования. В основу метода контроля удельного сопротивления полупроводниковых слоев положен графоаналитический теоретический способ исследования распространения электромагнитных волн в полупроводниковую слоистую структуру [6]. Поскольку этот метод чувствителен к сторонним воздействиям (вибрация, движение воздуха, изменение температуры, электромагнитные поля) то автоматизация процесса картографирования с помощью электронных механизмов позиционирования, перемещения, ориентирования образца во время измерений крайне затруднена, и сам процесс измерения является наименее технологичным. При этом поток данных формируется в цилиндрическом координатном представлении, но с использованием диаметральной последовательности.

Процесс обработки экспериментальных данных, сводится, прежде всего, к проведению большого числа однотипных математических операций с элементами массива данных – преобразования и масштабирования перевода размерности, корректировки с помощью поправочных коэффициентов. Часто требуется проведение преобразований самого массива данных, связанных с переводом в иное координатное представление. Визуализация полученных данных затруднена из-за необходимости перерасчёта из полярных координат в декартовы для графической интерпретации с помощью стандартных доступных программных средств. Такое преобразование, безусловно, требует аналитической обработки данных, необходимых для выявления закономерностей, связанных не с локальными проявлениями на отдельных образцах, а с общей картиной процесса в реакторе. Для выявления причин возможной неоднородности легирования образцов в процессе эпитаксиального роста требуется сопоставление данных (карт) от нескольких образцов с соответствующей их взаимной ориентировкой. Необходимо также сопоставление с геометрическими параметрами ростовой камеры: точками впрыска источников элементов III группы, V группы, водорода, легирующих элементов, позволяющее реконструировать существовавшее распределение парогазовой смеси в реакторе во время эпитаксиального роста. Важно также соотнести экспериментальные данные с геометрическим расположением встроенного контрольно-аналитического оборудования – пирометров, дефлектометров, интерферометров, термопар – фиксирующих изменение параметров роста *in situ* – для анализа их отклонений в процессе роста, приводящих к возникновению неоднородности.

На рис. 5 представлено изображение карты, построенной с помощью SWComplexAnalysis по экспериментальным данным сопротивления, введённым через интерфейсный модуль программы, предназначенный для первичной обработки данных. Следует отметить, что программный комплекс позволяет строить по различным экспериментальным данным и обрабатывать карты, снятые по одной методике последовательных измерений вдоль диаметров полупроводниковых пластин, выбранных с определённым угловым шагом. С помощью этого модуля ввода данных, возможно вносить и с помощью инструментария основной программы визуализировать результаты многократного электрохимического профилирования в разных областях образца, позволяющие судить о концентрациях основных носителей зарядов, а по ним о концентрации легирующих примесей и о толщинах слоёв.

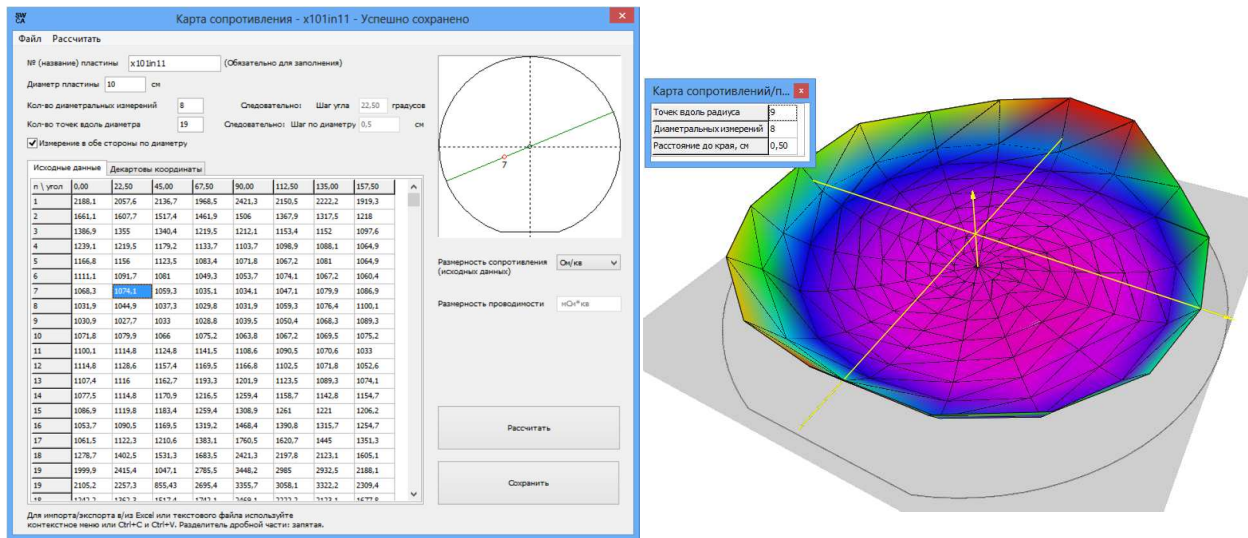


Рис. 5. Форма интерфейсного модуля ввода данных и позиционирование экспериментальных точек карты образца гетероструктуры (слева); трехмерная (3d) визуализация в карты электросопротивления (справа).

Таким образом, интерфейсный модуль ввода данных фактически является универсальным, а для установки измерения сопротивления бесконтактным методом SWComplexAnalysis с этим модулем является единственно возможной на данный момент специальной программой визуализации и обработки данных.

Принципиально иным является ввод экспериментальных данных фотолюминесценции. SWComplexAnalysis способен считывать массив данных из файла, сгенерированного программным обеспечением установки фотолюминесценции, позволяющей также проводить съёмку спектров отражения многослойной структуры БЗ на белом свете. Метод фотолюминесценции, основанный на возбуждении падающим излучением характеристического сигнала, даёт возможность по анализу спектров отклика определять ширину запрещённой зоны материалов слоёв, зависящую от химического состава. Вид спектра сигнала отражённого структурой БЗ (многослойной структурой с чередующимися с заданной периодичностью толщинами слоёв и значениями их коэффициентов преломления) белого света позволяет судить о толщине слоёв, их количестве и качестве, а карта – набор значений сигналов отклика от точечных источников – показывает разброс этих параметров по поверхности планарной структуры.

SWComplexAnalysis с помощью специального модуля позволяет проводить аналитическую обработку экспериментальных данных, представленных в виде карт фотолюминесценции и отражения БЗ с возможностью как автоматической, так и ручной обработкой по нескольким моделям. Визуализация всех карт проводимости, фотолюминесценции и др. (см. рис. 4 и рис. 5) реализована в SWComplexAnalysis в 3d единым образом: доступен статистический анализ (стандартное отклонение, поиск минимального и максимального значений, стандартное отклонение от аппроксимирующей плоскости и др.), возможность линейного анализа (построение линейных профилей) и геометрических измерений. Значения привязаны к реальным размерам образца и величинам параметров, что особенно важно при замерах интересующих областей, расстояний между ними и их положения на образцах.





ментальным данным и сопоставление с задаваемыми параметрами роста является действенным способом корректировки процесса для достижения равномерного роста слоёв с заданными свойствами.

### Заключение

В результате реализации системного подхода к проведению сложных многофакторных экспериментов по обеспечению высокой однородности эпитаксиального роста полупроводниковых слоев в реакторе МОСГФЭ была разработана система контроля параметров эпитаксиального роста. Эта система включает в себя собственную аппаратную и программную базу реактора МОСГФЭ, аппаратный исследовательский комплекс и программный комплекс обработки данных SWComplexAnalysis. Такая система необходима как на стадии разработки гетероструктур, так и для осуществления регулярной периодической проверки параметров роста при эксплуатации установки МОСГФЭ.

Программный комплекс SWComplexAnalysis призван сократить трудоёмкость проведения исследований и периодического контроля качества полупроводниковых структур, создаваемых методом МОСГФЭ в технологической лаборатории эпитаксиального роста. Этот программный комплекс позволяет проводить обработку и анализ больших массивов экспериментальных данных методами математической статистики, вариационного анализа и транскоординатной реконструкции. Хорошая наглядность экспериментальных данных, получаемая с помощью программы и удобный инструментарий, позволяет сократить время их анализа.

### Литература

1. Разработка и создание опытного производства наноструктурных каскадных ФЭП в системе  $A^3B^5$ /Б.В. Жалнин, М.Б. Каган, В.В. Семёнов и др.//Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2009, № 26.
2. Лебедев А.А., Жалнин Б.В., Обручева Е.В. Технологические условия обеспечения высокой остроты р–п-перехода фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе арсенида галлия//Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / ОАО «НПЦ «Полус». Томск, 2013, 268 с.
3. Попов М.М., Жалнин Б.В., Обручева Е.В., Слыщенко Е.В. Изучение модельных структур с нанометрическими слоями  $A^{III}B^V$  для солнечных элементов космического назначения//Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов/ОАО «НПЦ «Полус». Томск, 2013, 268 с.
4. Леднев А.М., Жалнин Б.В. Влияние легирования широкозонного слоя и эмиттера на характеристики солнечных элементов на основе  $A^{III}B^V$ //Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов/ОАО «НПЦ «Полус». Томск, 2013, 268 с.
4. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013612996 от 20.03.13.
5. Аболтныш Э.Э. Неразрушающие методы контроля характеристик полупроводниковых слоёв. Computer Modelling & New Technologies. Riga, 1998, 2, pp 71-78;
6. Brieland W.G., Coltrin M.E., Creighton J.R. et al. Organometallic vapor phase epitaxy (OMVPE). Materials Science and Engineering, R24 (1999), pp 241-274.

