

УДК 621.315.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗМЕРОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ВЫРАЩИВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

С.В. Бондарец, науч. сотр., С.Ю. Быковский, с.н.с., В.В. Довгаленко, препод.,  
И.И. Марончук, к.т.н.

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

По отработанной оригинальной технологии проведены процессы получения открытых квантовых точек германия на буферных кремниевых слоях на исходной подложке кремния при различных технологических условиях. На различных подложках выращены квантовые точки при 1, 3, 5, 7 и 10 импульсах холода методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки. Морфологию поверхности структур изучали с помощью мультимикроскопа СММ-2000. Определены размеры квантовых точек при формировании их в различных технологических условиях. Показана хорошая корреляция полученных результатов с литературными данными.

### Введение

Мировой рынок солнечной фотоэлектрэнергетики растет с 2005 г. в среднем на 40 % в год. По пессимистическим оценкам, до 2017 г. ежегодное производство солнечных элементов (СЭ) достигнет 40 GW, а по оптимистическим - 90 GW. Ожидается, что в ближайшие 20 лет солнечная фотоэнергетика создаст более 2 млн рабочих мест, сократит выбросы парниковых газов в атмосферу на 350 млн т CO<sub>2</sub>, что эквивалентно остановке 140 угольных электростанций. Общая мощность солнечной фотоэнергетики к 2030 г. превысит 650 GW [1, 2].

В настоящее время 80 % СЭ, превращающих прямое (не концентрированное) солнечное излучение с эффективностью в пределах 12...21 % изготавливают из монокристаллического, поликристаллического или аморфного кремния. При скорости роста фотоэнергетики 30 %/год до 2030 г. потребность в кремнии возрастет более чем в 200 раз, что представляет проблему, как технологическую, так и экологическую.

В связи с этим предельное интенсивное развитие фотоэнергетики возможно не путем преобразования прямого солнечного излучения кремниевых СЭ, а путем преобразования концентрированного (степень концентрации  $K = 500 - 1000 \times$ ) солнечного излучения с помощью высокоэффективных концентраторных СЭ.

В настоящее время высокоэффективные ФЭП изготавливают на основе многопереходных (каскадных) гетероструктур, которые выращиваются методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) или эпитаксии из газовой фазы, которая содержит металлоорганические соединения (МОСVD-технология).

Альтернативой создания каскадных многопереходных СЭ является создание однопереходных концентраторных фотоэлектрических преобразователей (КФЭП) на основе наногетероэпитаксиальных структур (НГЭС) с квантовыми точками (КТ). Теоретический анализ показывает, что утилизация длинноволновой и коротковолновой части спектра солнечного излучения с помощью КТ позволяет достичь эффективности СЭ близким к термодинамической границе (до 84 %).

Попытка создания методами МВЕ и МOCVD высокоэффективных ФЭП на основе НГЭС с КТ, где в качестве матричного материала используется GaAs, а материала для КТ – InAs, не увенчалась успехом, так как введение КТ не увеличивало, а уменьшало квантовую эффективность ФЭП, причем с увеличением количества массивов КТ эффективность ФЭП уменьшалась. Авторы связывают это с наличием в гетероструктурах деформированных напряженно «смачивающих» слоев узкозонных полупроводников, образующихся между КТ, в которых создаются генерационно-рекомбинационные центры, ответственные за безызлучательные каналы рекомбинации [3].

Используемый нами метод выращивания НГЭС в процессе жидкофазной эпитаксии при импульсном охлаждении подложки (PCS LPE) позволяет получать массивы КТ, не содержащих упруго-напряженные «смачивающие» слои в промежутках между КТ, что позволяет осуществлять процесс формирования квантовых точек в условиях, близких к равновесию, и тем самым выращивать структуры с минимальными генерационно-рекомбинационными токами, а это способствует возможности получения высокоэффективных КФЭП с эффективностью более 30 % [4].

В последнее время все больше внимания уделяется наногетероструктурам на основе кремния с КТ германия, которые становятся новым классом материалов для фотоэлектрического преобразования. В различных научных центрах начаты исследования таких структур в целях применения их в солнечных батареях и теплофотогенераторах [5]. Поэтому в нашей исследовательской работе мы использовали данные материалы для получения НГЭС с КТ.

### **Постановка цели и задач научного исследования**

Целью работы являлись исследование зависимости размера квантовой точки от технологических параметров ее выращивания методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки, изучение и характеристика морфологии поверхности полученных наногетероэпитаксиальных структур и структур с открытыми квантовыми точками методом атомно-силовой микроскопии.

Основные задачи данной работы заключались в решении научно-исследовательской проблемы, связанной с изучением процессов получения массивов квантовых точек разных размеров из узкозонного полупроводникового материала на подложке широкозонного полупроводникового материала от технологических параметров их выращивания методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки на примере кремния - подложка и германия - квантовая точка; в определении морфологии поверхности структур с открытыми квантовыми точками германия в матрице кремния, выращенных методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки при различных технологических условиях, определении размеров квантовых точек методом атомно-силовой микроскопии.

### **Описание эксперимента**

В ходе выполнения данной работы проводили процессы выращивания открытых квантовых точек германия на буферном кремневом слое, выращенном на исходной кремниевой подложке с кристаллографической ориентацией (111). Эксперименты проводили на оригинальном разработанном авторами оборудовании [6]. Ход проведения процессов формирования вышеописанных структур можно выразить в виде циклограммы, приведенной на рис. 1.

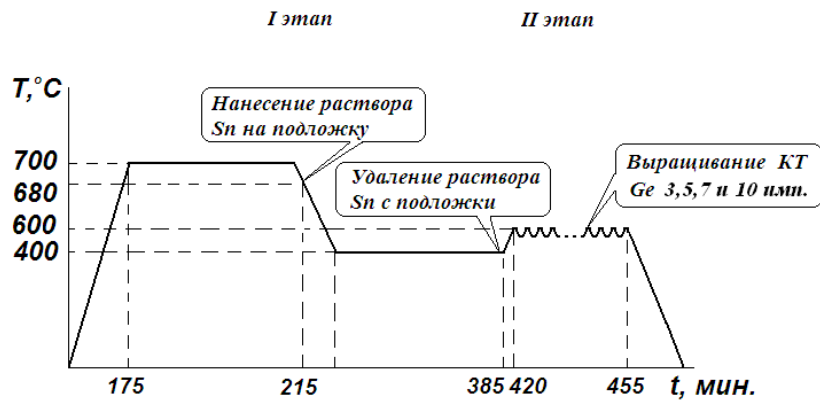


Рис. 1. Циклограмма процесса выращивания буферного кремниевого слоя и открытых квантовых точек германия на подложке кремния с помощью оловянных растворов-расплавов

Таким образом были получены образцы с 1, 3, 5, 7 и 10 импульсами холода при разности температуры в системе и на теплопоглотителе в  $\Delta T_F = 5^\circ$ .

Пластину с полученной структурой в целях избавления от остатков растворителя (олова) отмывали в слабом водном растворе азотной кислоты. Наличие олова на подложке проверяли методом рентгено-флуоресцентного анализа. При наличии остатков олова операцию отмывки повторяли.

### Результаты исследования

Морфологию поверхности полученных образцов исследовали с помощью микроскопа СММ-2000 производства ЗАО «Протон-МИЭ», г. Зеленоград, в режиме атомно-силовой микроскопии по методике, описанной в [7]. Результаты исследований приводятся ниже.

На рис. 2 показан двухмерный кадр с выращенными слоями КТ германия после добавления одного импульса холода теплопоглотителем. Структура получена на кремниевом буферном слое на исходной подложке кремния с ориентацией (111), изготовлена по методике, описанной выше.

Исходя из данных обработанной информации, отображенной на рис. 3, можно определить линейные размеры полученных квантовых точек, которые в среднем составляют 48...50 нм по диаметру и до 5 нм в высоту. Разброс по размерам КТ из полученного кадра составляет не более 20 %. Шероховатость поверхности структуры не превышает одного ангстрема. Из полученного изображения можно сделать выводы, что образования очень малы и четкой огранки квантовых точек в соответствии с кристаллографической ориентации исходной кремниевой подложки еще не видно. Похожая картина наблюдается в образцах, полученных при трех импульсах холода, отличие наблюдаем лишь в размерах полученных КТ, которые в среднем составляют 65...92 нм по диаметру до 10 нм в высоту. Разброс по размерам составляет не более 30 %.

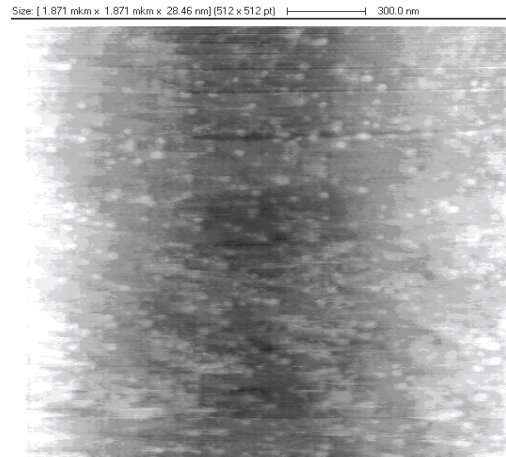


Рис. 2. Структура с открытыми КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), один импульс

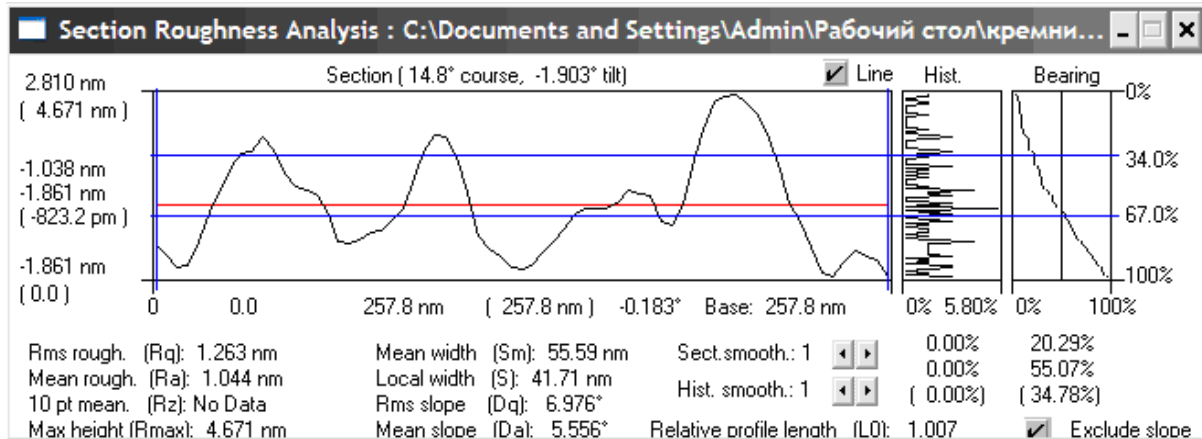


Рис. 3. Профиль КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), один импульс

На рис. 4, а показан двухмерный кадр, а на рис. 4, б – трехмерное изображение выращенного слоя КТ германия после добавления пяти импульсов холода теплопоглотителем. Структура получена по аналогичной, приведенной выше методике. На рис. 5 изображен профиль КТ германия на кремниевом буферном слое. Проанализировав данные, полученные на рис. 5 можем определить линейные размеры полученных квантовых точек, которые в среднем составляют от 200 нм до 300 нм по грани и от 30 нм до 100 нм в высоту. Разброс по размерам составляет уже не более 35 %. Шероховатость поверхности не более 5 Ангстрем. С обработки изображений видно, что образования значительно увеличились в размерах, имеют форму близкую к пирамидальной, разброс по размерам образований очень значителен. Похожая картина наблюдается в образцах, полученных при десяти импульсах холода, размеры в среднем составляют от 200 нм до 350 нм по грани и от 60 нм до 200 нм в высоту.

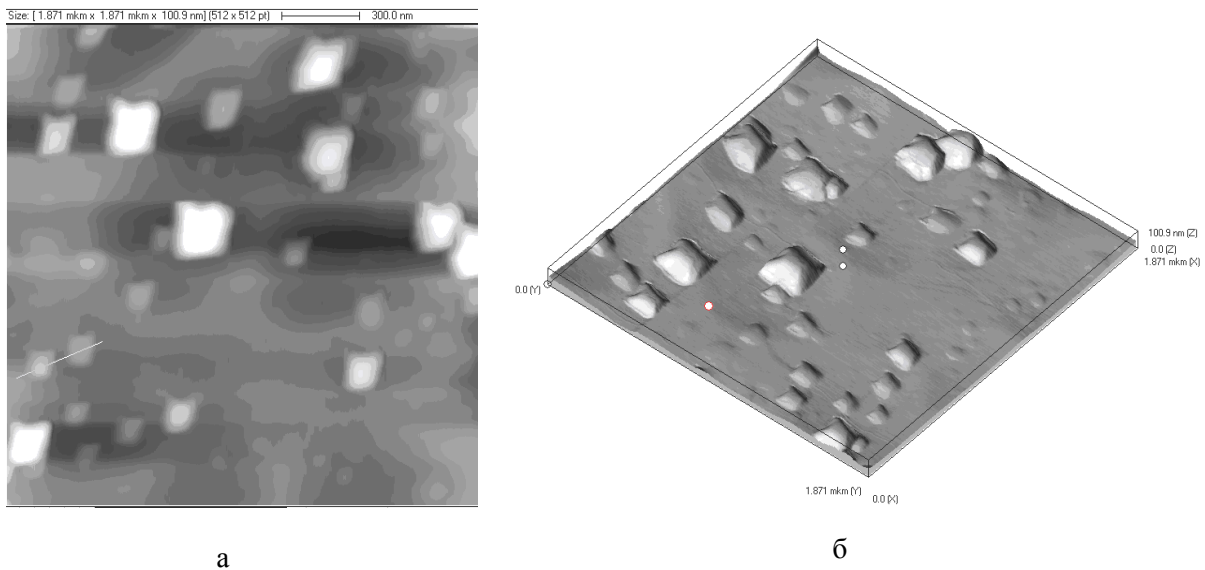


Рис. 4. Структура с открытыми КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), пять импульсов: а – двухмерный кадр; б – трехмерный кадр

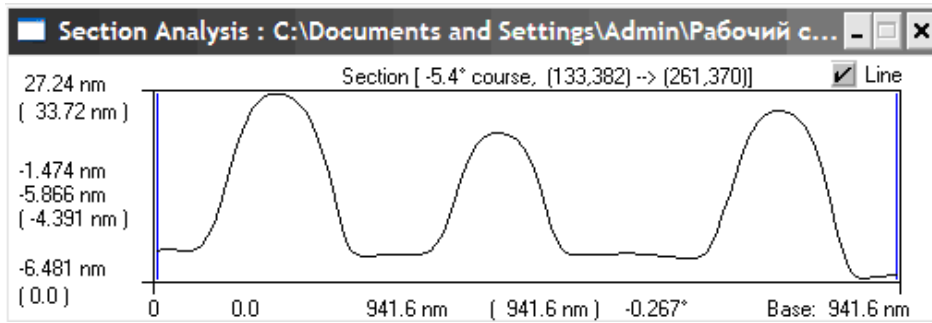


Рис. 5. Профиль КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), пять импульсов

Образцы с семью импульсами холода кардинально отличаются от других приведенных в этой работе экспериментов. Из рис. 6, а и б видно, что образования по сравнению с пятью и десятью импульсами четкой огранки квантовых точек не имеют, высота их резко уменьшилась, они имеют форму капли, но со смещенной вершиной, наклоненной на всех образованиях в одну сторону. Нам кажется, что подобная форма связана с тем, что на подложке не произошло эпитаксиального роста в связи с наличием окислов на буферном слое. Проанализировав данные, полученные на рис. 7, мы можем определить линейные размеры полученных квантовых точек, которые в среднем составляют 140...180 нм по диаметру и до 16 нм в высоту. Разброс по диаметру составляет не более 20 %. Шероховатость поверхности не более одного ангстрема.

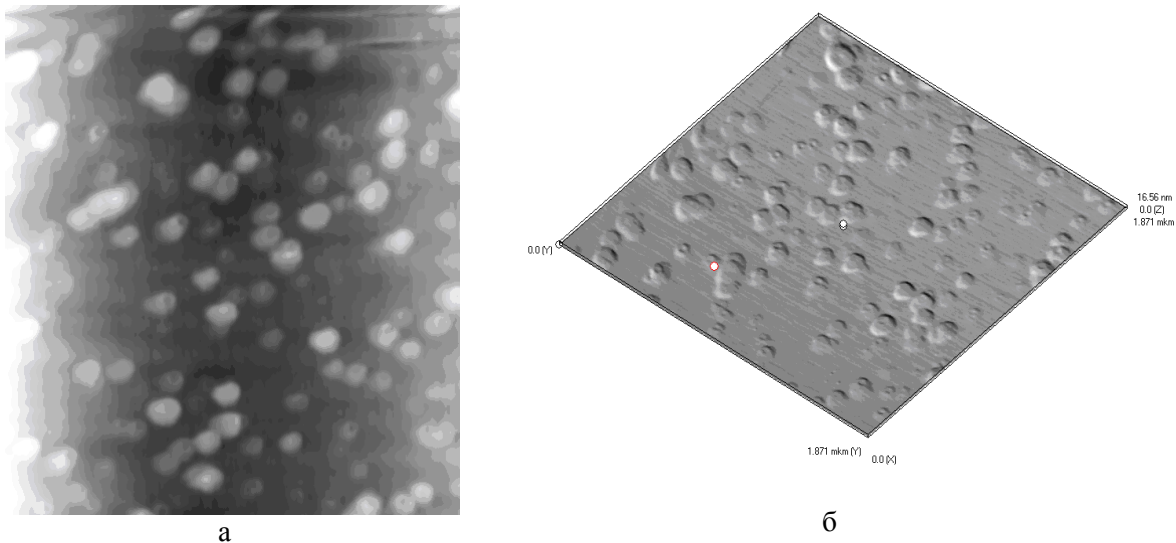


Рис. 6. Структура с открытыми КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), семь импульсов: а – двухмерный кадр; б – трехмерный кадр

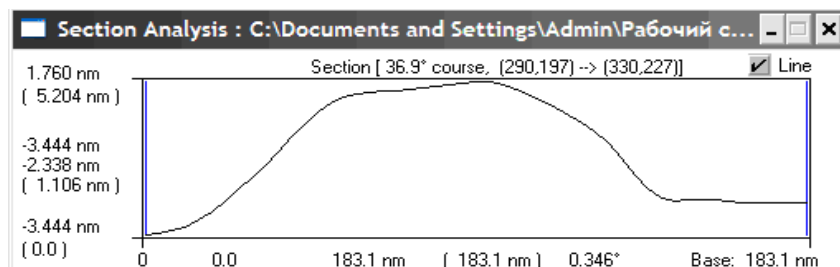


Рис. 7. Профиль КТ германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111), семь импульсов

Полученные результаты, описанные в данной работе, по выращиванию открытых квантовых точек германия на кремниевых пластинах сведены в таблицу.

Т а б л и ц а

**Данные по исследованию открытых квантовых точек германия на кремниевом буферном слое, подложка кремния с ориентацией (111)**

№ п/п	Количество импульсов холода	Средний линейный размер КТ, нм	Средняя высота КТ, нм	Разброс по размерам КТ, %	Плотность высева КТ ( $\times 10^{10}$ см <sup>-2</sup> )
1	1 импульс	48	4,65	20	2,0
2	3 импульса	72	10,76	30	2,0
3	5 импульсов	196	69,27	35	2,0
4	7 импульсов	162	16,56	20	1,5
5	10 импульсов	245	150	35	1,0

Исходя из вышеописанного, можно сказать, что размеры полученных квантовых точек не всегда соответствуют размерам, которые мы получили, проведя теоретические расчеты [8].

Прежде всего, это можно объяснить тем, что:

- во-первых, толщина нашего реального теплопоглотителя намного отличается от той модели, которая была использована в теоретических расчетах;
- во-вторых, возможны некоторые погрешности при измерении температур на теплопоглотителе в реальных условиях;
- в-третьих, из-за ручного позиционирования слайдеров и теплопоглотителя на кассете и ее размещения в реальной установке могут возникать некоторые несоответствия и рассогласования.

### Выводы

По разработанному технологическому регламенту проведены процессы получения открытых квантовых точек германия на буферных кремниевых слоях на исходной подложке кремния при различных технологических условиях. На различных подложках выращены квантовые точки при 1, 3, 5, 7 и 10 импульсах холода теплопоглотителя при  $\Delta T_F = 5^\circ$ . Получено более 10 выращенных структур с открытыми квантовыми точками германия и проведены их исследования методом атомно-силовой микроскопии на мультимикроскопе СММ-2000. Выявлены размеры квантовых точек при формировании их в различных технологических условиях.

Более четкое проведение как процесса выращивания, так и доведения теоретической модели будут выполнены нами в дальнейшей работе. Однако необходимо отметить, что полученные нами результаты в процессе выращивания открытых квантовых точек германия на буферных слоях кремния и их исследования имеют неплохую совместимость с литературными данными [9], а именно: плотность высева квантовых точек и их размеры сопоставимы с подобными экспериментами других научных коллективов. При этом необходимо отметить, что мы получаем наши результаты, используя более дешевое оборудование и оригинальный метод. В настоящее время нами активно ведутся работы по совершенствованию ростового оборудования что, как нам кажется, должно заметно сблизить наши экспериментальные работы с теоретическими.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ РОЗМІРІВ КВАНТОВИХ ТОЧОК ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇХ ВИРОЩУВАННЯ В ПРОЦЕСІ РІДИННО-ФАЗНОЇ ЕПІТАКСІЇ

**С.В. Бондарець, С.Ю. Биковський, В.В. Довгаленко, І.І. Марончук**

За відпрацьованою оригінальною технологією проведені процеси отримання відкритих квантових точок германію на буферних кремнієвих шарах на вихідній підкладці кремнію при різних технологічних умовах. На різних підкладках вирощені квантові точки при 1, 3, 5, 7 і 10 імпульсах холоду методом рідинно-фазної епітаксії з імпульсним охолодженням підкладки. Морфологію поверхні структур вивчали за допомогою мультимікроскопа СММ-2000. Визначено розміри квантових точок при формуванні їх в різних технологічних умовах. Показана хороша кореляція отриманих результатів з літературними даними.

## ADDITION RESEARCH SIZED QUANTUM DOTS on the TECHNOLOGICAL PARAMETERS of THEIR GROWING LPE

**S. Bondarec, S. Bykovskiy, V. Dovgalenko, I. Maronchuk**

Spent on the original technology held open processes of obtaining open germanium quantum dots on silicon buffer layers on the original silicon substrate at different technological conditions. Grown on different substrates, quantum dots of 1, 3, 5, 7 and 10 pulses of cold phase epitaxy with pulsed cooling substrate. Surface morphology of the structures studied by scanning multimicroscop SMM-2000. The sizes of the quantum dots in the formation of various technological conditions. Shows a good correlation of the results with published data.

### Список использованных источников

1. *Jeger-Waldau A.* PV Status Report 2012 / A. Jeger-Waldau. – Luxembourg: Publications Office of the European Union. – 2012. – 45 p. EUR – Scientific and Policy Report series. – ISSN 1018-5593.
2. *Jeger-Waldau A.* PV Status Report 2013 / A. Jeger-Waldau. – Luxembourg: Publications Office of the European Union. – 2013. – 58 p. EUR – Scientific and Technical Research series. – ISSN 1831-4155
3. *Леденцов Н.Н.* Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры: обзор / Н.Н. Леденцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. – С. 385 – 410.
4. Пат. UA 94699 Україна, Кл. С 30В 19/00, С 30В 29/00, Н 01L 21/20. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок / І.Є. Марончук, Т.Ф. Кулюткіна, І.І. Марончук; замовник та правовласник І.Є. Марончук, Т.Ф. Кулюткіна, І.І. Марончук.; замов. 20.09.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 5.
5. *Пчеляков О.П.* Наногетероструктуры Si-Ge-GaAs для фотоэлектрических преобразователей / Пчеляков О.П. [и др.] // Физика твердого тела. - 2005. – Т. 47. – № 1. – С. 63 - 66.
6. *Марончук И.И.* Подготовка исходных пластин кремния для процессов жидкофазной эпитаксии / И.И. Марончук [и др.] // Материалы XVI Міжнар. науч.-техн. конф. «Прогрессивная техника и технология–2013», Севастополь, 25 - 28 июня 2013 г. – Севастополь, 2013. – С. 140 - 141.
7. *Бондарец С.В.* Оценивание качества морфологии поверхности эпитаксиальных структур методом атомно-силовой микроскопии / С.В. Бондарец [и др.] // Зб. тез. та доповідей // IV Наук.-практ. конф. молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», Івано-Франківськ, 28 окт. - 4 нояб. 2013 г. - Івано-Франківськ, 2013. – С. 18 - 19.

8. Быковский С.Ю. Исследование морфологии поверхности структур с открытыми квантовыми точками, полученных методом жидкофазной эпитаксии / С.Ю. Быковский [и др.] // Матер. XIV Міжнар. конф. МКФТТПН-ХІV «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем», Івано-Франківськ, 20 - 25 травня 2013 г. – Івано-Франківськ: ПНУ ім. Стефаника, 2013. – С. 209.

9. Kuhlner U. Strained-layer growth and islanding of germanium on Si(111) studied with STM / U. Kuhlner [and oth.] // Surf. Sci. – 1991. – Vol. 248. – P. 321 – 331.

Надійшла до редакції 04.12.2013 р.

УДК 629.12.06:626.83

## АНАЛИЗ ИСТЕЧЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАННОГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ДОВОДОЧНО-РАЗДАТОЧНОЕ УСТРОЙСТВО В СУДОВОЕ ПОМЕЩЕНИЕ

С.Н. Ефремов<sup>1</sup>, к.т.н., доц., А.И. Мальчиков<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
В.А. Тимофеев<sup>1</sup>, ст. препод., А.Б. Гончар<sup>2</sup>, маг.

<sup>1</sup>Севастопольский национальный технический университет;

<sup>2</sup>Военно-морские силы Украины, г. Севастополь

В ряде работ были рассмотрены и проанализированы энергетические характеристики и работоспособность сопловых агрегатов судовых СКВ до этапа выпуска кондиционированного воздуха в судовые помещения. В данной работе рассмотрена оценка работоспособности доводочно-раздаточного устройства с помощью эксергетического метода.

### Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется анализу качества использования систем и механизмов судовых энергетических установок. Судовое кондиционирование воздуха является сложным энергетическим устройством, обеспечивающим комфортный микроклимат в судовых помещениях. Эксплуатация этих систем как в летнем, так и зимнем режимах требует значительных затрат энергии [1].

При создании судовых систем кондиционирования воздуха (СКВ) очень важно проанализировать энергетические затраты, потери и работоспособность всей системы и отдельных ее узлов и агрегатов. Наличие подобных анализов позволяет выбрать оптимальные решения при создании СКВ, рациональные пути эксплуатации.

### Постановка цели и задач научной работы

Целью данной научной работы является анализ термодинамических и тепловлажных характеристик конечного этапа СКВ - доводочно-раздаточного устройства (ДРУ), определяющего состав и качество воздушной среды в помещении. Задачи следующие: рассмотреть тепловлажностные режимы эксплуатации СКВ на конкретном судне, определить термодинамические характеристики ДРУ на исследуемых режимах и, используя эксергетический метод, определить работоспособность устройства.