

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет инженерно-физический

Кафедра физики

Направление подготовки 03.03.02 – Физика

Направленность (профиль) программы – Физика конденсированного состояния

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

_____ Е.В. Стукова

«___» _____ 201_ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Твердофазный рост толстых пленок BaSi_2 на $\text{Si}(111)$ и исследование их
методом ЭОС

Исполнитель

студент 311об группы

_____ Д.С. Новожилов
подпись, дата

Руководитель

доцент, канд. физ.-мат. наук

_____ Д.В. Фомин
подпись, дата

Нормоконтроль

доцент, канд. физ.-мат. наук

_____ О.А. Агапьятова
подпись, дата

Благовещенск 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра физики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
_____ Е.В. Стукова
« ___ » _____ 201_ г.

ЗАДАНИЕ

К бакалаврской работе Новожилова Даниила Сергеевича

1. Тема бакалаврской работы: Твердофазный рост толстых пленок $BaSi_2$ на $Si(111)$ и исследование их методом ЭОС

(утверждена приказом от 25.04.2017 №1189-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 24 июня 2017 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: научные статьи, справочная литература, технические руководства, публикации из зарубежных журналов.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих к разработке вопросов): показать результат автоматизации процесса обработки спектров оже-электронов, показать результаты формирования методом твердофазной эпитаксии пленок дисилицида бария толщиной 100 нм при температуре рекристаллизации $T = 600^\circ C$ и временах рекристаллизации $t = 1$ ч (образец 33Л) и $t = 10$ мин (образец 34Ц); описать результаты элементного анализа толстых плёнок $BaSi_2$ с помощью ЭОС метода; описать результаты расчета соотношения атомов Ba к атомам Si в образцах 33Л и 34Ц.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, графиков, таблиц, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.д): спектры оже-электронов чистого Si и Va из атласа ЭОС, листинг идущей к разработанному программно-аппаратному комплексу программы

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): Нет

7. Дата выдачи задания: 8.05.2017

Руководитель выпускной квалификационной работы: Фомин Дмитрий Владимирович доцент, канд. физ.-мат. наук

Задание принял к исполнению (дата): 8.05.2017 _____
(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 43 с., 16 рисунков, 2 таблицы, 3 приложения, 27 источников.

СИЛИЦИДЫ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ, ТВЕРДОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ, НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ, ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ, КРЕМНИЕВАЯ ПОДЛОЖКА

В выпускной квалификационной работе представлена информация о структуре и предполагаемых свойствах $BaSi_2$ на основе экспериментальных и теоретических работ. Описаны методика проведения эксперимента и *in situ* исследования сформированных наноразмерных пленок $BaSi_2$. На основе полученных данных проведены расчеты количественных соотношений элементов, присутствующих в пленке.

Цель работы – исследование методом ЭОС пленок $BaSi_2$ на $Si(111)$ сформированных методом ТФЭ.

В данной работе в качестве метода исследования полученной пленки использовалась электронная оже-спектроскопия, а для расчетов – метод коэффициентов элементной чувствительности.

Актуальность формирования и исследования наноразмерных пленок $BaSi_2$ связана с перспективностью данного материала как основы построения новых эффективных солнечных элементов, относящихся к самым распространенным источникам возобновляемой энергии.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Дисилицид бария	10
2 Методика проведения экспериментов в сверхвысоком вакууме	14
2.1 Оборудование	15
2.2 Подготовка атомарно чистой поверхности	18
2.3 Эпитаксия	19
3 Методы исследования	22
3.1 Электронная оже-спектроскопия	22
3.2 Метод коэффициентов элементной чувствительности	25
4 Экспериментальная часть	28
4.1 Автоматизация процесса обработки спектров оже-электронов	28
4.2 Проведение исследования методом электронной оже-спектроскопии и расчет методом коэффициентов элементной чувствительности	33
Заключение	37
Библиографический список	38
Приложение А Оже-спектры чистого Si и Ba из атласа спектров оже-электронов	41
Приложение Б Листинг программы	42
Приложение В Апробация выпускной квалификационной работы	43

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ФЭП – Фотоэлектронный преобразователь;

ЭОС – Электронная оже-спектроскопия;

ТФЭ – Твердофазная эпитаксия;

СВВ – Сверхвысокий вакуум;

МЛЭ – Молекулярно-лучевая эпитаксия;

АЦП – Аналого-цифровой преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 21-го века, быстрый рост энергопотребления – это одна из наиболее характерных особенностей технической деятельности человечества. В 20-м веке производство энергии увеличивалось в основном из-за роста добычи нефти и газа, так как это наиболее удобный способ для производства электроэнергии. Несмотря на это, именно энергетика стала первой крупной отраслью мировой экономики, что ощутила на себе проблему истощения своей традиционной сырьевой базы. В начале 70-х годов 20-го века энергетический кризис разразился во многих странах. И именно ограниченность в ископаемых энергетических ресурсах является одной из причин этого. Кроме этого, нефть, газ и уголь являются крайне ценным сырьем для быстро развивающейся химической промышленности. Вследствие этого, на текущий момент, трудность сохранения высокого темпа развития энергетики только использованием ископаемых источников энергии становится всё выше.

Кроме этой проблемы, необходимо помнить и о загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемых источников, что является причиной ухудшения экологической обстановки на всей нашей планете. Важным примером этого необходимо указать «тепловое загрязнение» планеты, которое происходит при сжигании любого вида топлива. Из-за стремительного роста энергопотребления температура на поверхности Земли может в ближайшие десятилетия привести к увеличению температуры на поверхности Земли примерно на один градус. Если это произойдет, то по энергобалансу планеты будет нанесен сильный удар, который может дать необратимые опасные изменения климата.

Как было сказано выше, современный мир сильно зависим от ископаемого топлива и с каждым годом его становится всё меньше, а потребности в нём, как в источнике энергии неизменно возрастает. Одновременно, всё большее использование ископаемого топлива вредит экологическому состоянию планеты. Из-за этих проблем, на сегодняшний день всё популярнее становятся так называемые природные или возобновляемые источники энергии. Не так давно, раз-

вития данной области стало активно финансироваться такими известными людьми как Билл Гейтс, Марк Цукерберг, Джефф Безос и Джек Ма в рамках фонда Breakthrough Energy Coalition, что инвестирует исследования и разработки в сфере чистой энергетике. Но что более важно, недавний уход Рокфеллеров из нефтяного бизнеса ещё более подстегнул бизнес сообщество вкладываться в возобновляемые источники энергии. В пример, можно привести Global Divest-Invest coalition (движение по изъятию инвестиций) с помощью которого, любой может отказаться от своих инвестиций в бизнес по добыче полезных ископаемых, часть из которых пойдет на поддержку экологической сферы.

Использование солнечной энергии посредством солнечных батарей – экологически чисто. Равновесие энергопотоков в биосфере при этом сохранимо [1]. По оценкам специалистов в 2060 году преобразователи солнечной энергии будут вырабатывать 15 - 20 % от общего количества электроэнергии. Однако для достижения таких показателей необходимо в первую очередь повысить рентабельность фотовольтаических преобразователей. Именно поэтому в “земных” применениях, когда не накладываются ограничения на площадь и массу солнечной батареи, все более притягивающим становится использование тонкопленочных солнечных элементов на основе аморфных полупроводников, свойства которых незначительно уступают своим кристаллическим аналогам при значительно меньшей стоимости. Вообще, повышение интереса к аморфному кремнию и сплавам на его основе вызвано его перспективностью для создания целого ряда электронных приборов больших площадей. Кроме солнечных элементов, это тонкопленочные транзисторы, фотоприемники, светоизлучающие приборы и другие [2].

На сегодняшний день, материалом для изготовления ФЭП с самым высоким КПД (21,5 %) является $GaInAs-GaAs-Ge$, но он дорог и в природе встречается не так часто, поэтому экономичнее изготавливать ФЭП из кремния, который распространен повсеместно, но КПД которого составляет всего 14,8 %. Пока нет точных решений для материала на основе Si с высоким КПД. Но из обзора статей [3, 4, 5, 6, 7] показано что пленки $VaSi_2$ являются перспективным

материалом для солнечных элементов, КПД которых может достигнуть значений арсенидогалиевых ФЭП, при более низкой стоимости. Поэтому данная работа является актуальной.

Целью данной работы является исследование методом ЭОС пленок $BaSi_2$ на $Si(111)$ сформированных методом ТФЭ.

Необходимо было решить следующие задачи:

- 1) сформировать методом ТФЭ пленки $BaSi_2$ толщиной 100 нм;
- 2) исследовать сформированные пленки методом ЭОС;
- 3) методом коэффициентов элементной чувствительности выполнить расчет соотношения атомов Si и Ba в сформированных пленках.

1 ДИСИЛИЦИД БАРИЯ

Последние годы наблюдалось становление кристаллического кремния (с-Si) как доминирующей технологии на рынке фотоэлектроники. Тонкие пленки, например, $CdTe$, $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) и тонкопленочный кремний до сих пор не в состоянии превзойти устройства на с-Si. По этой причине, большое внимание привлекают материалы на основе кремния, имеющие большое распространение и не высокую стоимость получения. Одним из таких материалов является дисилицид бария ($BaSi_2$) орторомбической структуры, элементарная решетка которого изображена на рисунке 1. Данный материал обладает такими свойствами, как высокая поглощательная способность, высокое число подвижных носителей заряда и ширина запрещенной зоны (от 1,1 до 1,3 эВ) [8]. Из чего мы можем заключить, что данный дисилицид оптимально подходит для изготовления фотоэлектрических преобразователей.

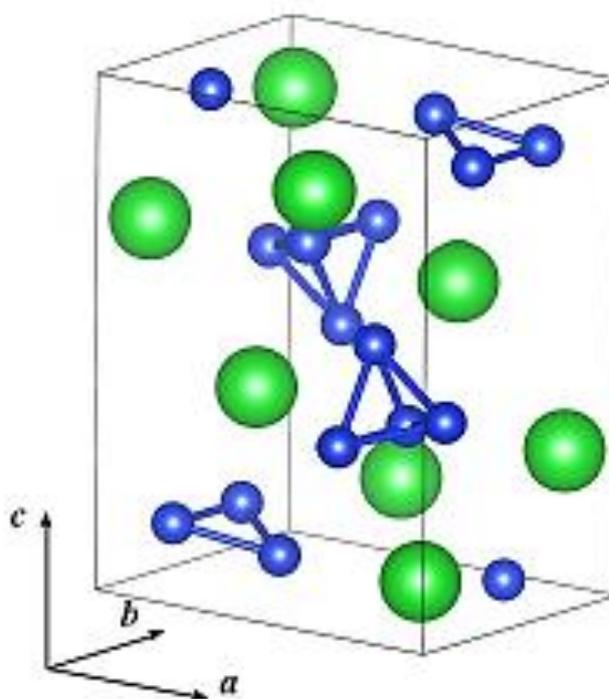


Рисунок 1 – Элементарная ячейка $BaSi_2$ простой орторомбической структуры. Крупными сферами показаны атомы Ba , менее крупными – атомы Si [9]

Данная решетка имеет следующие параметры: $a = 8,942 \text{ \AA}$, $b = 6,733 \text{ \AA}$, $c = 11,555 \text{ \AA}$. Количество атомов бария, изображенных крупными сферами составляет 8 штук, атомов кремния – 16. Где последние имеют форму искаженного и изолированного Si_4 тетраэдра, в то время как атомы Ва помогают придерживать ориентации тетраэдра. Кроме того, и атомы кремния, и атомы бария в элементарной ячейке сгруппированы в два или три набора химически эквивалентных соединений, соответственно [9].

Рассмотрим зонную структуру дисилицида бария, изображенную на рисунке 2, рассчитанную полнопотенциальным линейным методом присоединенных плоских волн с обобщенной градиентной аппроксимацией (FLAPW-GGA).

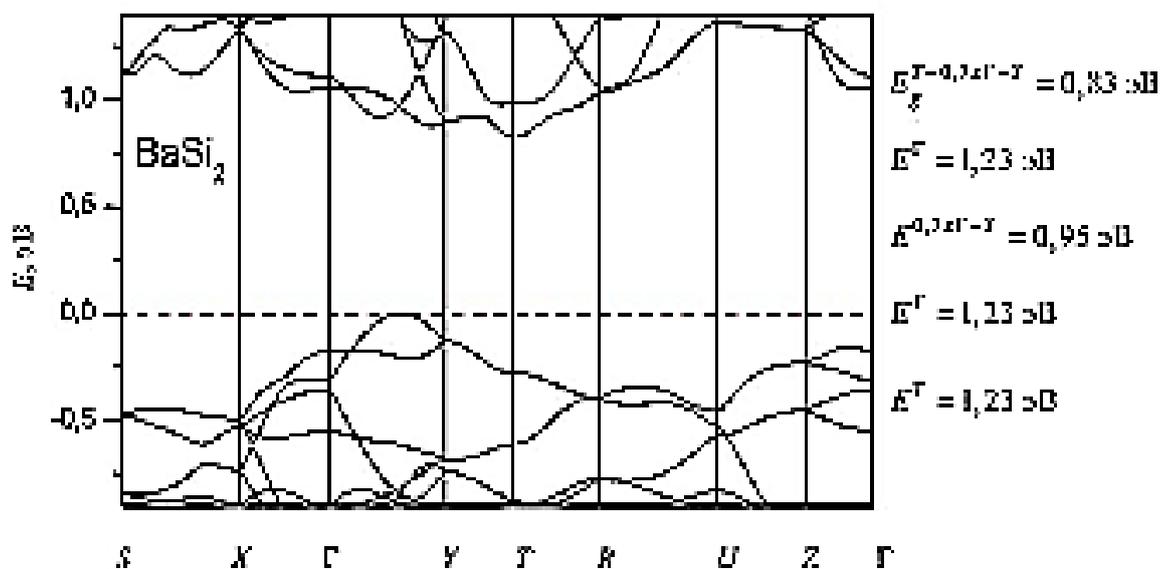


Рисунок 2 – Зонная структура BaSi₂, рассчитанная методом линейный метод присоединенных плоских волн с обобщенной градиентной аппроксимацией, ноль на шкале энергии E соответствует энергии Ферми [10]

Как видно, первому непрямоуго переходу соответствует энергия 0,83 эВ, а прямому 1,23 эВ [10]. Ширина же запрещенной зоны у BaSi₂, как видно из рисунка 3, составляет 1,3 эВ.

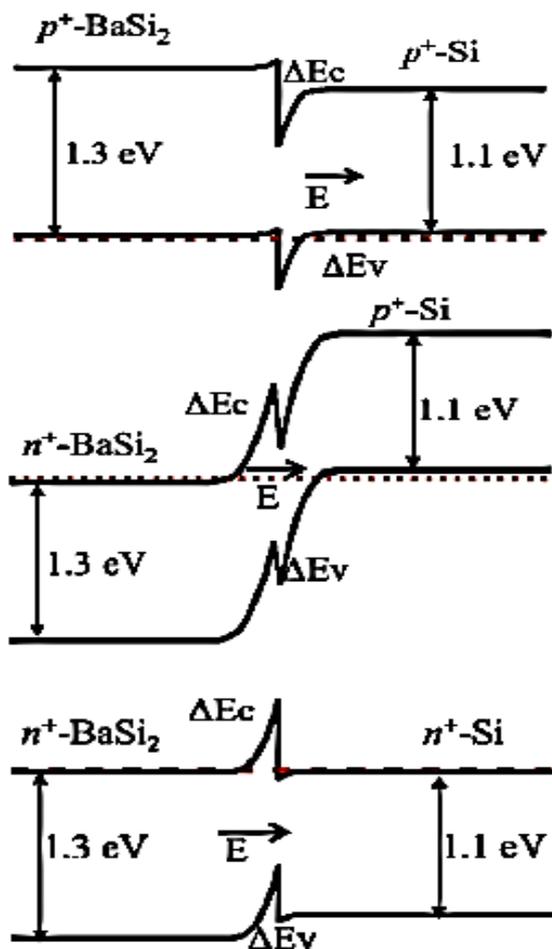


Рисунок 3 – Ширина запрещенной зоны у p- и n- $BaSi_2$ [7]

Поэтому можно сделать заключение, что рассматриваемый полупроводниковый дисилицид бария оптически значительно более активный, чем кремний [10].

Пленка $BaSi_2$ формируется в результате эпитаксиального роста на кремниевой подложке. Наиболее часто используемой исследователями ориентацией кристалла является (111), так как различия в кристаллических решетках $BaSi_2$ и $Si(111)$ составляет менее 1 %. Это крайне важно, так как чем меньше это различие, тем меньше образуется дефектов, которые ухудшают характеристики получаемой пленки. На рисунке 4 показана поверхность $BaSi_2(111)$, как видно, расположение атомов соответствует необходимой нам орторомбической структуре [10].

$BaSi_2(111)$

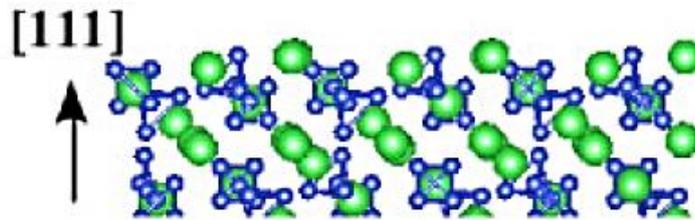
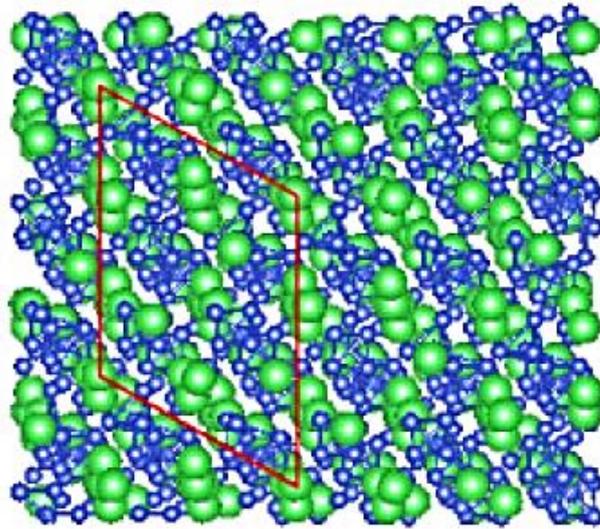


Рисунок 4 – Несколько слоёв поверхности $BaSi_2$ [9]

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В СВЕРХВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

Для исследования поверхности твёрдого вещества на атомарном уровне, необходимо чтобы при проведении всего эксперимента, его состав оставался неизменным. То есть, необходима среда, в которой приток молекул из окружающей среды был бы сведён к минимуму. Вакуум является лучшей средой, которая удовлетворяет данному условию. Чтобы представить концепцию вакуума используют следующие термины: концентрация молекул, средняя длина пробега и время образования монослоя. Эти величины выражаются формулами (1), (2) и (3) [10]:

$$n = \frac{p}{Tk_B}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{f}{n\sigma^2}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{2\pi m T k_B n_0}}{p}, \quad (3)$$

где n – концентрация молекул;
 λ – длина свободного пробега;
 τ – время образования монослоя;
 p – давление;
 T – температура;
 k_B – константа Больцмана;
 σ^2 – сечение молекулы;
 n_0 – число молекул.

Для проведения экспериментов, лучше всего брать вакуум с давлением в 10^{-7} Па или меньше, так как необходимо, чтобы число атомов или молекул, ад-

сорбированных на поверхности за час не должно превышать нескольких процентов от монослоя [11].

2.1 Оборудование

Рассмотрим откачную систему СВВ-камеры прибора РНІ-590, изображенную на рисунке 5. Проанализируем ту ее часть, которая представлена камерой и ионным насосом, соединенным между собой трубой цилиндрической формы.

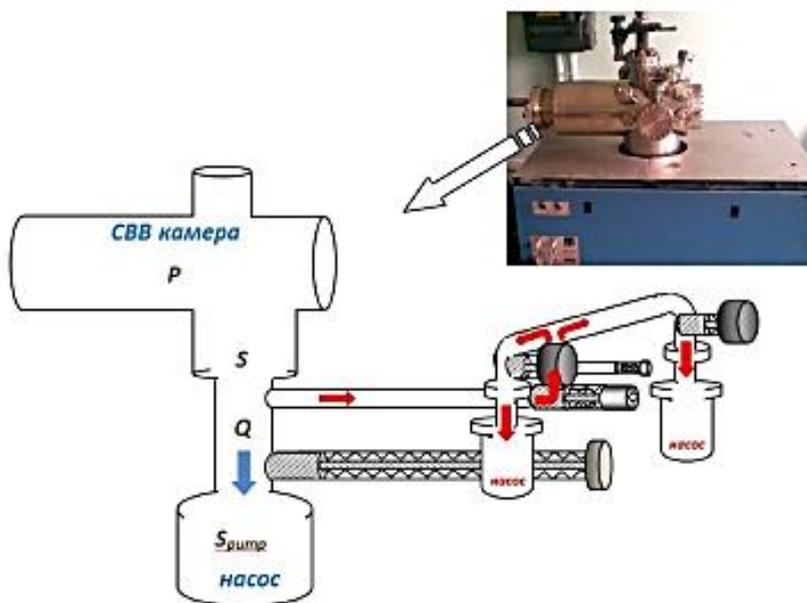


Рисунок 5 – Откачная система СВВ-камеры прибора РНІ-590 [12]

При откачке, перетекание газа из камеры в насос происходит из-за разницы давлений на концах трубы. Введём понятия производительность или пропускная способность Q и скорость откачки S , которые определяются по формулам (4) и (5) [11]:

$$Q = p \frac{dV}{dt}, \quad (4)$$

$$S = \frac{Q}{p}. \quad (5)$$

Так же следует ввести проводимость вакуумного элемента, который вычисляется по формуле (6) [11]:

$$C = \frac{Q}{\Delta p}, \quad (6)$$

где Δp —разность давлений на входе и выходе элемента.

Итак, чтобы проводить эксперименты с сверхвысоким вакуумом требуется наличие специального оборудования. Установка должна включать в себя камеру, систему откачки, вентили, оборудование для работы с образцом, вспомогательное оборудование, и оборудование для анализа поверхности [11].

Для формирования пленок $BaSi_2$ в данной работе была использована СВВ-камера представленная на рисунке 6. Она изготовлена из нержавеющей стали и имеет несколько портов разных размеров, которые использованы либо под тоководы, либо под смотровые окна, которые позволяют видеть, что происходит внутри вакуумной камеры. Для уплотнения соединений фланцев с портами используют прокладки из мягкого металла. Так, стандартные прокладки создают из бескислородной меди высокой частоты и, как правило они одноразовые. Используемый с представленной камерой тип фланцев имеет название conflat (CF) [11].

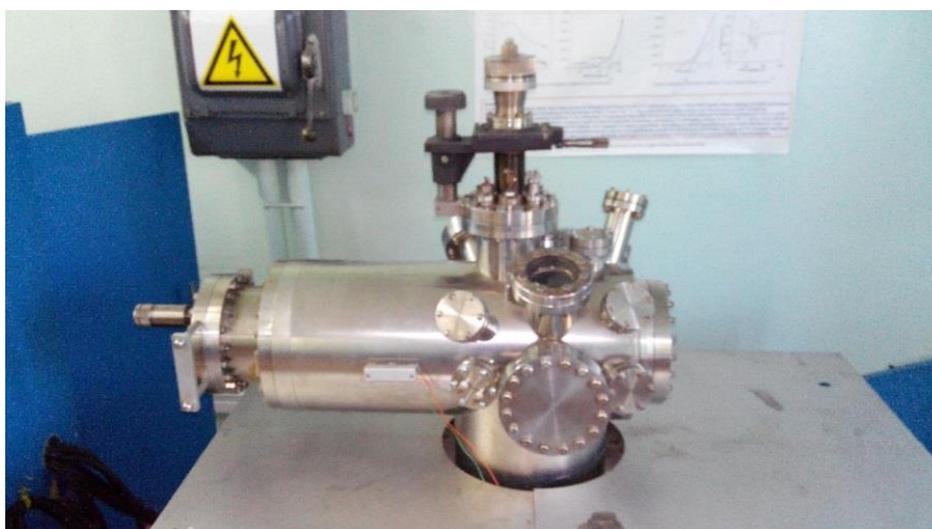


Рисунок 6 – СВВ-камера с базовым давлением 10^{-7} Па [12]

СВВ-камера, применявшаяся в данной работе, имеет двухуровневую систему откачки. На первом уровне используются криогенные цеолитовые насосы, который позволяет производить откачку системы примерно до $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па. Насос содержит в себе гранулы цеолита в замкнутом объеме. Откачка заключается в том, что при охлаждении стенок насоса жидким азотом происходит значительное увеличение сорбционной способности цеолита. При завершении цикла откачки, цеолит восстанавливается прогревом, а абсорбированные газы выпускаются в атмосферу через выпускной клапан. На втором уровне используется магнитоэридный ионный насос с помощью которого достигается вакуум в $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па. Насос состоит из двух титановых пластин, расположенных близко от открытых концов коротких трубок из нержавеющей стали и параллельно осям этих трубок прикладывается сильное магнитное поле. При испускании электронов с катодных пластин они движутся по винтовым траекториям внутри анодных трубок и вызывают ионизацию газа. Ионизированные молекулы газа ускоряются и распыляют титан при столкновении с катодом и в результате химической реакции молекулы газа связываются поверхностью [11]. Фотографии данных насосов находятся на рисунке 7.

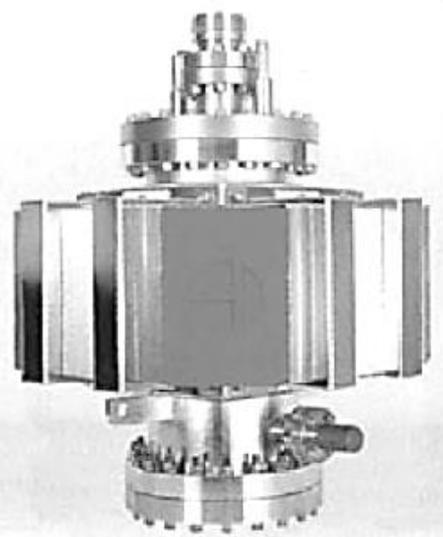


Рисунок 7 – Криогенный цеолитовый и магнитоэридный ионный насосы

[12]

Для того, чтобы передавать внутрь камеры электрическую энергию для нагревания источников и образца, используют гермоводы. Каждый гермовод или токовод изолирован от фланца спаем металл-керамика. Данная конструкция позволяет передавать в камеру большой спектр токов и напряжений. Кроме этого, важной частью СВВ-камеры является манипулятор образца, с помощью которого можно перенести образец из загрузочной камеры (если она существует) в аналитическую, переместить образец на нужную для исследования позицию и прочее. Манипулятор, который используется в лабораторной установке при проведении описанных в данной работе экспериментов, является трехкоординатным [9, 13, 14, 15].

2.2 Подготовка атомарно чистой поверхности

При формировании и исследовании наноразмерных материалов большую важность играет уровень чистоты исследуемых материалов и образца. Высокая степень чистоты материалов предопределяет повышение экономической эффективности их использования, так как происходит расширение функциональных возможностей и улучшение эксплуатационных характеристик [16].

Перед тем, как поместить образец в камеру, он подвергается нескольким стадиям очистки: химическому травлению, кипячению в органических растворителях, полосканию в деионизированной воде и прочее. Но данные процедуры могут обеспечить лишь предварительную очистку, потому что полная очистка может быть проведена только сверхвысоковакуумной камере. Есть несколько способов очистки:

- 1) скол;
- 2) прогрев;
- 3) химическая обработка;
- 4) ионное распыление.

В данной работе очистка образца проводилась прогревом.

В процессе очистки образца, для его прогрева, через образец пропускают электрический ток, либо используют, электронную бомбардировку, либо проводят лазерный отжиг. Главное требование — это испарение примесей и по-

верхностных оксидов при температуре ниже температуры плавления образца, что подходит для исследуемого кремния. Но есть и недостатки, например перераспределение примесей в объёме образца или сегрегации их на поверхность, а также соединение примеси с материалом образца, которое трудноудаляемо [11].

2.3 Эпитаксия

Большое распространение получили методы эпитаксиального выращивания монокристаллических пленок, которые заключаются в возможности формировать пленки заданного состава с необходимыми свойствами [17].

Эпитаксия — это наращивание кристаллографически ориентированных монокристаллических слоев на монокристаллические подложки или друг на друга. Монокристаллическая подложка в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла. Существует два вида эпитаксии:

- 1) гомоэпитаксия — это наращивание монокристаллической пленки на подложку из того же вещества, что и пленка;
- 2) гетероэпитаксия — это наращивание пленки на инородную подложку.

В данной работе, эпитаксиальный рост пленок дисилицида бария на кремниевой подложке осуществляется в виде гетероэпитаксии методом твердофазной эпитаксии, который будет рассмотрен ниже.

Базовым методом ТФЭ, с точки зрения технической реализации, служит метод молекулярно-лучевой эпитаксии, и твердофазную эпитаксию можно рассматривать как специфический режим эпитаксии из молекулярных пучков. Различие заключается в том, что в режиме обычной молекулярно-лучевой эпитаксии осаждение и кристаллизация пленки происходит одновременно в ходе напыления на "горячую" подложку, а в случае ТФЭ процесс формирования эпитаксиальной пленки разбивается на два этапа: напыление аморфной пленки на "холодную" подложку и её кристаллизация при последующем отжиге при температурах ниже температуры плавления кремния. Было установлено, что твердофазная эпитаксия идет путем перемещения границы раздела "кристалл аморфная фаза" от подложки к поверхности аморфного слоя. Скорость движения границы раздела определяется такими параметрами, как температура отжи-

га, ориентация подложки, тип и концентрация присутствующих в пленке примесей [18].

Исследования показали, что твердофазная эпитаксия имеет ряд преимуществ по сравнению с более традиционной молекулярно-лучевой эпитаксией. Из-за ограничения на встраивание примесей в кристаллическую структуру в обычной МЛЭ нельзя получить в эпитаксиальных пленках уровни легирования выше предела равновесной растворимости примеси в Si . По мере приближения концентрации примеси к пределу растворимости пленки становятся все более дефектными, а доля электрически активных примесей резко уменьшается. В случае же твердофазного режима эпитаксии встраивание примеси в кристаллическую структуру происходит в неравновесных условиях, что позволяет получать уровни легирования выше предела равновесной растворимости. Так как для полной кристаллизации пленок достаточны невысокие температуры отжига, ТФЭ позволяет получать сверхрезкие профили легирования с шириной переходной области атомного масштаба. Учитывая всё это, можно сделать вывод, что твердофазная эпитаксия представляет собой перспективный метод получения тонких эпитаксиальных пленок и различных многослойных структур на их основе [18].

Методы твердофазной эпитаксии основаны на процессах ориентированного роста при изотермическом отжиге [12].

Использование эпитаксиальных пленок в электронной промышленности позволило существенно улучшить характеристики туннельных и лазерных диодов, разработать технологию получения транзисторов с высоким коэффициентом усиления на высоких частотах, мощных и высоковольтных транзисторов [12].

Эпитаксия дает возможность получения многослойных структур со свойствами каждого слоя, практически не зависящими от свойств предыдущего слоя. Это открывает широкие возможности для разработки качественно новых типов электронных приборов [12].

Идеальными условиями роста эпитаксиальной пленки являются такие условия, при которых осаждение происходит на достаточно прогретую подложку. В этом случае подвижность падающих атомов или молекул обеспечивает формирование упорядоченной структуры [12].

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОК

При исследовании полученных пленок в данной работе использовался метод ЭОС и, в дополнение к нему, метод коэффициентов элементной чувствительности. Рассмотрим их.

3.1 Электронная оже-спектроскопия

ЭОС применяется для получения качественного и количественного анализа состава поверхности, получения химических профилей по толщине образца, исследования процессов адсорбции, десорбции, эпитаксиального роста тонких пленок, диффузии примесей из объема к поверхности, для исследования зонной структуры твердого тела и т.д [16].

Метод ЭОС является одним из наиболее распространенных методов изучения поверхности. В этом методе, образец подвергается бомбардировке электронами с энергиями в диапазоне 2 - 10 кэВ. Атом образца, который имеет вакансию на внутреннем уровне, может перейти в невозбужденное состояние или с испусканием рентгеновского кванта, или безрадиационным путем - с испусканием электрона. Термин «оже-процесс» связывается с любым возбуждением электрона, при котором возбуждающий электрон передает свою энергию вторичному электрону, так называемому оже-электрону. Этот метод основан на изучении распределения оже-электронов по энергиям. Так как большая часть электронных уровней носит дискретный характер, этот метод дает информацию об энергетическом расположении уровней, значит мы можем узнать химический состав вещества. Схематически, данный метод представлен на рисунке 8. Измерение величины тока испускаемых оже-электронов позволяет производить как качественные, так и количественные исследования, поэтому метод ЭОС является пригодным для анализа элементного состава. Из-за того, что низкоэнергетические оже-электроны сильно поглощаются уже в одном монослое вещества и могут испускаться только из нескольких поверхностных слоев, данный метод является методом анализа элементного состава тонкой приповерхностной области, имеющей толщину 0,5 - 10 нм [20].

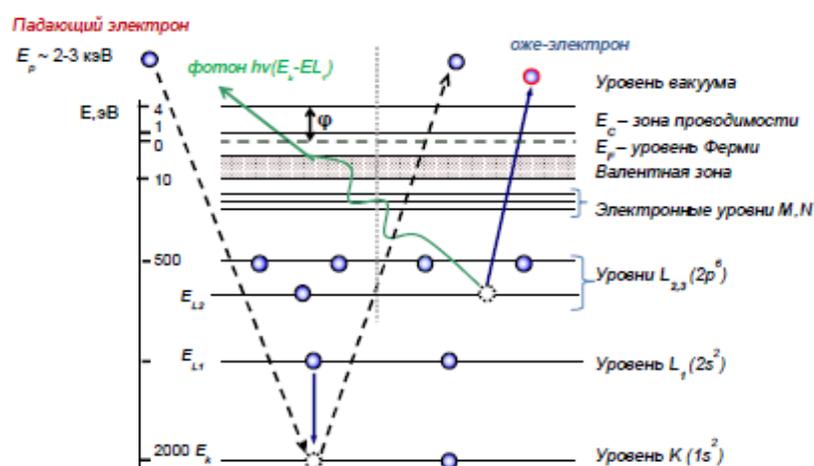


Рисунок 8 – Процесс ионизация атомов внешним излучением в результате которого может: а - испущен рентгеновский фотон; б - образован оже-электрон [20]

К, L_1 , $L_{2,3}$ – электронные уровни, которые заняты электронами частично или полностью. Так как такое состояние энергетически невыгодно для атома, то через некоторое время вакансия заполняется за счет перехода электрона с вышележащего уровня, к примеру, L_1 . При этом выделяется энергия, равная разности энергий связи электрона на уровнях К и L_1 . Далее, процесс может идти двумя путями: либо будет испущен рентгеновский фотон, либо эта энергия безызлучательным способом передастся другому электрону, находящемуся, например, на уровне $L_{2,3}$. Если этой энергии будет достаточно, то произойдет ионизация уровня $L_{2,3}$, в результате чего будет испущен электрон. Реализация второй возможности – это собственно оже-процесс, а эмитируемый электрон – оже-электрон [20].

В области энергий, в которой находятся оже-электроны, существует большое количество неупругорассеянных первичных электронов, образующие сплошной спектр, который является фоном, на котором приходится выделять оже-электроны. Ток неупругорассеянных электронов на несколько порядков выше чем ток оже-электронов, из-за чего возникает обычная трудно решаемая

задача выделения полезного сигнала на уровне большого фона. Эта задача впервые была решена в 1962 году Л.А. Харрисом, что дало толчок к бурному развитию оже-электронной спектроскопии. Харрис предложил продифференцировать спектр $N(E)$, превратить его в dN/dE , после чего фон практически исчезает, и на месте слабого оже-сигнала колоколообразной формы появляется интенсивный двухполярный пик с некоторой амплитудой, что изображено на рисунке 9. При этом дифференцирование осуществляется электрическими методами непосредственно в процессе записи спектра [20].

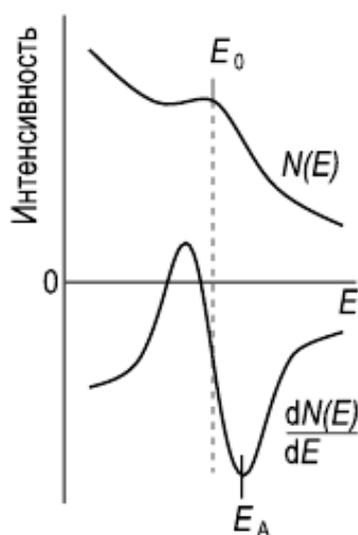


Рисунок 9 – Оже-спектры от образца Si(100) в виде $N(E)$ и $dN(E)/dE$ [11]

Главное преимущество ЭОС над многими другими методами это очень малая глубина анализа, что делает эту методику пригодной для исследования поверхности. Обычно исследуются оже-электроны с энергиями от нескольких десятков электрон-вольт до нескольких килоэлектрон-вольт [20].

Во всех материалах длина свободного пробега таких электронов не превышает 2 - 3 нм, то есть величины, сопоставимой с периодом кристаллической решетки твердого тела. При этом львиная доля информации поступает с глубины 0,5 - 1,0 нм, что и делает ЭОС уникальным методом исследования поверхности [20].

Так как кинетическая энергия испускаемых оже-электронов хорошо определена и она прямо связана с положением уровней в атоме, то по энергетическому положению оже-пика можно идентифицировать этот атом [20].

Изменение химического окружения атома меняет энергии связи электронов, вызывая химические сдвиги, и приводит к перераспределению электронной плотности состояний в валентной зоне. Кроме того, ЭОС может использоваться для определения распределений данного элемента на поверхности и в глубине образца, для этого, по поверхности снимается интенсивность оже-пика данного элемента как функция положения электронного пучка, который сканирует поверхность исследуемой поверхности. Пучок позволяет получать разрешение до 10 нм [20].

Так же, используя ЭОС можно контролировать чистоту поверхности при её термической обработке, как, например, было рассмотрено в экспериментальной работе [19].

3.2 Метод коэффициентов элементной чувствительности

Наличие пиков оже-электронов с ярко выраженной интенсивностью позволяет проводить количественный анализ элементного состава сформированной пленки. Обоснованием возможности количественного анализа методом ЭОС служит тот факт, что выход оже-электронов, а, следовательно, и интенсивность соответствующего оже-пика, пропорциональны атомной концентрации данного элемента на поверхности. Исходя из первых принципов, рассматривая суммарный вклад, вносимый различными механизмами в образование сигнала оже-электронов, можно записать в общем виде следующее выражение для тока оже-электронов данного атома i . Это выражение представлено в виде формулы (7) [21]:

$$I_i = I_p(E_p) \cdot X_i \cdot \sigma_{Ai}(E_p) \cdot [1 + r_i(E_p)] \cdot \gamma_i(E_p, X_i) \cdot w_i \cdot R \cdot T \quad (7)$$

где $I_p(E_p)$ – ток первичных электронов с энергией E_p ;

X_i – концентрация элемента i в анализируемой точке;

$\sigma_{Ai}(E_p)$ – сечение ионизации уровня A элемента i при энергии E_p ;

$[1 + r_i(E_p)]$ – фактор обратного рассеяния, характеризующий дополнительную ионизацию уровня данного атома вторичными (рассеянными назад) электронами;

$\gamma_i(E_p, X_i)$ – длина свободного пробега электрона (глубина выхода);

w_i – вероятность соответствующего оже-перехода и неизлучательного выхода оже-электронов;

R – фактор шероховатости поверхности;

T – регистрационная эффективность энергоанализатора.

Отправной точкой метода коэффициентов элементной чувствительности является допущение, что интенсивность оже-сигнала I_i элемента i просто пропорциональна его концентрации на поверхности X_i . Это соответствует замене всех сомножителей в формуле (7), кроме X_i , константой S_i , как изображено в формуле (8) [21]:

$$I_i = S_i \cdot X_i \quad (8)$$

где X_i – концентрация элемента i в анализируемой точке;

S_i – коэффициент элементной чувствительности.

Коэффициенты элементной чувствительности можно определить из атласов эталонных спектров чистых элементов. Все спектры в таком атласе сняты в идентичных условиях и перед записью каждого спектра производилась калибровка по сигналу серебра с энергией 351 эВ. Для каждого спектра указана чувствительность спектрометра. В этом случае коэффициент элементной чувствительности определяется по формуле (9) [21]:

$$S_i = \frac{I_i^A}{k_i \cdot I_{Ag}^A} \quad (9)$$

где I_i^A – амплитуда оже-пика элемента i в атласе;

I_{Ag}^A – амплитуда оже-пика Ag в этом же атласе;

k_i – чувствительность спектрометра, указанная в атласе.

Учитывая, что в исследуемой системе может быть n элементов, получим итоговую рабочую формулу (10) [21]:

$$X_i = \frac{I_i}{S_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{S_j}} \quad (10)$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 Автоматизация процесса обработки спектров оже-электронов

Перед проведением исследования, сформированных методом ТФЭ пленок $BaSi_2$, была проведена работа по автоматизации обработки результатов эксперимента ЭОС. Результат исследований методом ЭОС представляется в виде графиков, полученных на самописце Hewlett-Packard модели 7010A. Запечатленные на бумаге спектры требуют оцифровки для того, чтобы в дальнейшем их можно было использовать при анализе экспериментальных данных на персональном компьютере. Данный процесс трудоёмок и отнимает много времени у исследователей. Для решения данной проблемы мы предлагаем разработанный нами программно-аппаратный комплекс [22].

Для формирования графиков на самописце HP-7010A из прибора РНІ-590 (модуль ESCA/AUER System Control) через разъем CENC-24M [23] подаются парные аналоговые электрические сигналы, соответствующие координатам «X», «Y» и команде «Start», как это показано на рисунке 10 [22].

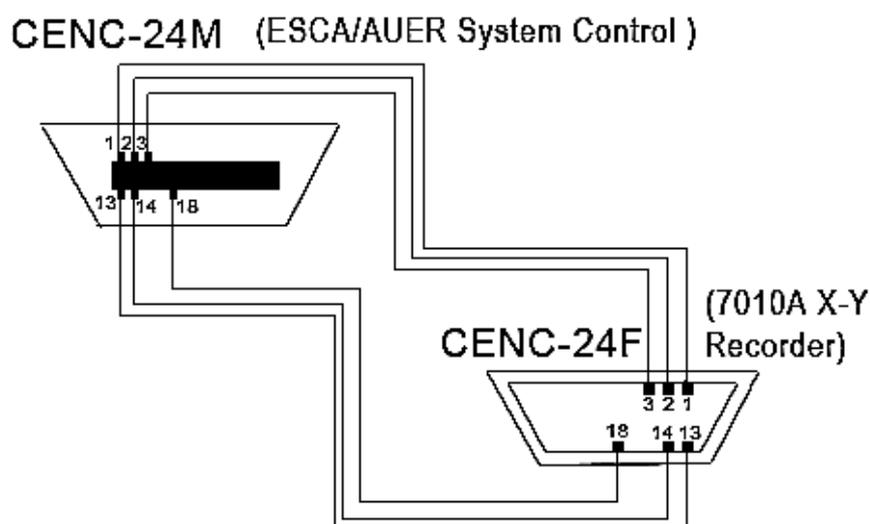


Рисунок 10 – Схематическое изображение разъёмов, обеспечивающих подключение самописца HP-7010A к прибору РНІ-590 [22]

В качестве устройства для оцифровки аналоговых сигналов, мы выбрали микроконтроллер ATmega 328 (имеющий в своем составе 10-разрядный АЦП) на платформе Arduino UNO.

Существует множество разных микропроцессорных платформ, для осуществления управления физическими процессами, но Arduino имеет перед ними ряд преимуществ, а именно низкую цену, простую среду программирования, в комплекте с вшитым по умолчанию загрузчиком, а также множество плат расширения [24].

Платформа Arduino предназначена для управления физическими процессами с использованием электронно-вычислительной машины с открытым программным кодом и построена на простой печатной плате с современной средой для написания программного обеспечения. Платы Arduino строятся на основе микроконтроллеров фирмы Atmel, а также элементов обвязки для программирования и интеграции с другими схемами. На платах присутствует линейный стабилизатор напряжения 5 В или 3,3 В. Тактирование осуществляется на частотах 8, 16 или 87 МГц кварцевым резонатором. В микроконтроллер предварительно прошивается загрузчик, поэтому внешний программатор не нужен [24].

Выполнение команды «Старт», для запуска самописца, осуществляется путем релейного замыкания пары контактов. Измерение уровней сигналов координат, поступающих из прибора РНІ-590, показало, что сигнал для координаты «Х» линейно возрастает от минус 10 В до 0 В, а сигнал для координаты «У» изменяется в пределах от минус 5 В до минус 3 В. В то же время рабочее напряжение по аналоговым входам платформы Arduino, по требованию разработчиков, не должно превышать 5 В. Поэтому следующим шагом нашей работы стало создание подсистемы сопряжения разрабатываемого устройства с прибором РНІ-590. На рисунке 11 показана принципиальная электрическая схема конвертера сигналов. На входе устройства для каждого сигнала был использован делитель напряжения на основе переменного резистора 100 кОм. Для того,

чтобы инвертировать сигналы, а также исключить взаимное влияние приборов друг на друга, нами были использованы транзисторные оптопары [22].

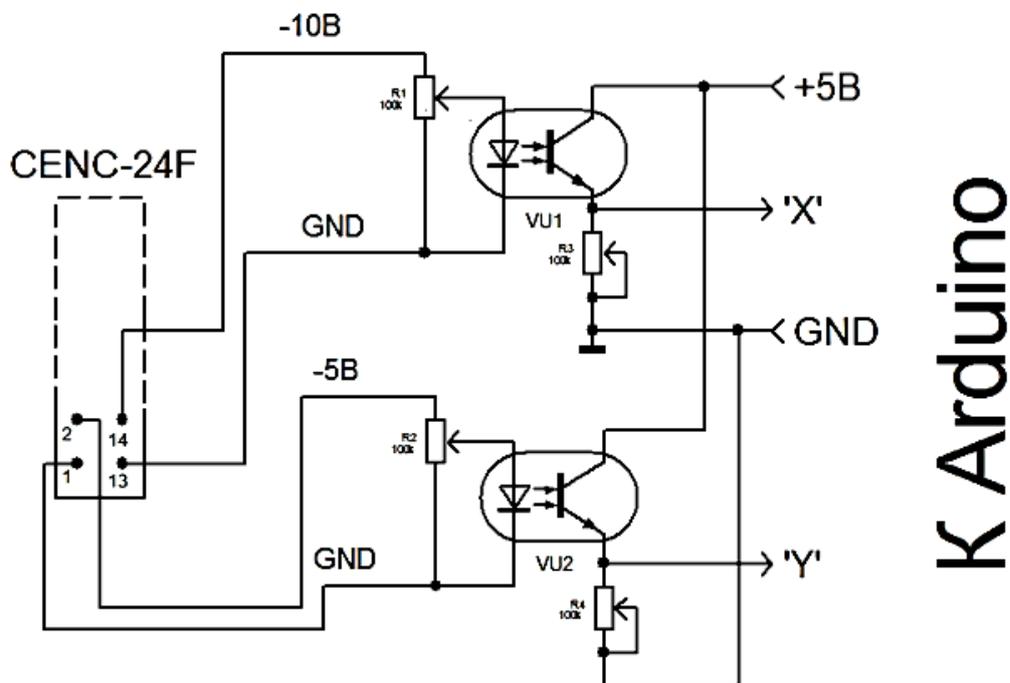


Рисунок 11 – Принципиальная электрическая схема конвертера сигналов [22]

Традиционно оптопары широко используются для защитной гальванической развязки маломощных, чувствительных и дорогостоящих электронных компонентов от мощных цепей. Вдобавок оптроны великолепно подходят для сопряжения цепей с высокой разностью потенциалов общего провода, защиты цепей от высоких синфазных напряжений и подавления шумов и помех, вызванных протеканием нежелательных токов через паразитные контуры с замыканием на «землю». Оптроны также применяются для усиления сигналов, включения/выключения различных цепей и изоляции людей от потенциально опасных источников питания и токоведущих частей высокого напряжения, например, пациентов от высоковольтных медицинских приборов. Прогресс в области технологий конструирования и изготовления оптронов открыл возможности для разработки новых специализированных типов этих устройств,

расширения их функциональности и совершенствования их технических характеристик [25].

Транзисторная оптопара выполняется с фотоприемным элементом на основе фототранзистора. Как правило, в оптопарах используются фототранзисторы со структурой n-p-n на основе кремния, чувствительные к излучению с длиной волны около 1 мкм. Излучателями служат обычно арсенидогаллиевые диоды или диоды на тройном соединении, максимум спектрального излучения которых лежит вблизи области наибольшей чувствительности фототранзистора. Излучательный диод конструктивно расположен так, что большая часть света направляется на базовую область фототранзистора. Также, как и в других оптопарах, излучатель и приемник изолированы друг от друга оптически прозрачной средой [26].

Мы использовали подключение транзистора оптрона по схеме с общим коллектором. Коэффициент усиления по напряжению этой схемы меньше 1. Данная схема используется для согласования каскадов, либо в случае использования источника входного сигнала с высоким входным сопротивлением. Для подключения конвертера сигналов к Arduino UNO, были использованы однотипные с входными делители напряжения [22].

Окончательный вид устройства представлен на рисунке 12.

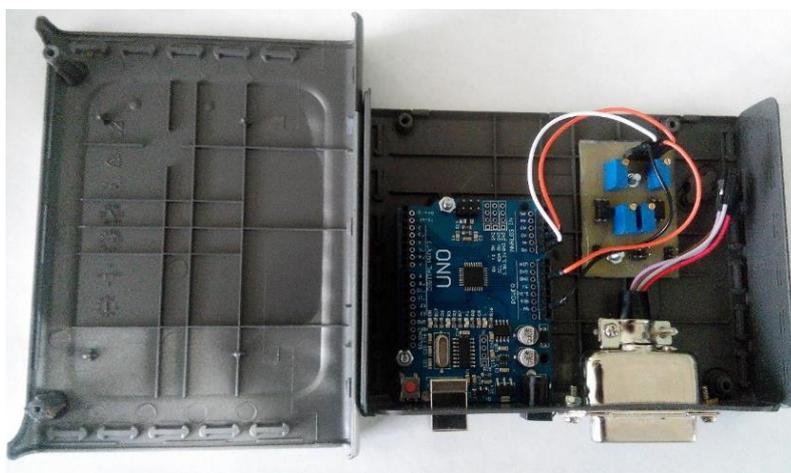


Рисунок 12 – Фотография устройства в корпусе [22]

Для тестирования устройства была использована программа, листинг которой представлен в приложении Б.

Апробацию прибор прошел на этапе оценки степени высокотемпературной очистки кремниевой подложки в СВВ камере прибора РНІ-590 [20]. На рисунке 13 представлены оже-спектры полученные на самописце НР-7010А и с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса. При сравнении графиков, после оцифровки, было установлено их очевидное сходство. На обоих графиках присутствуют два обратных пика полученные при одинаковых энергиях. Первый соответствует кремнию (87 эВ), а второй – углероду (264 эВ). Анализ полученных графиков говорит о том, что образец требует дополнительного высокотемпературного прогрева для полной очистки [22].

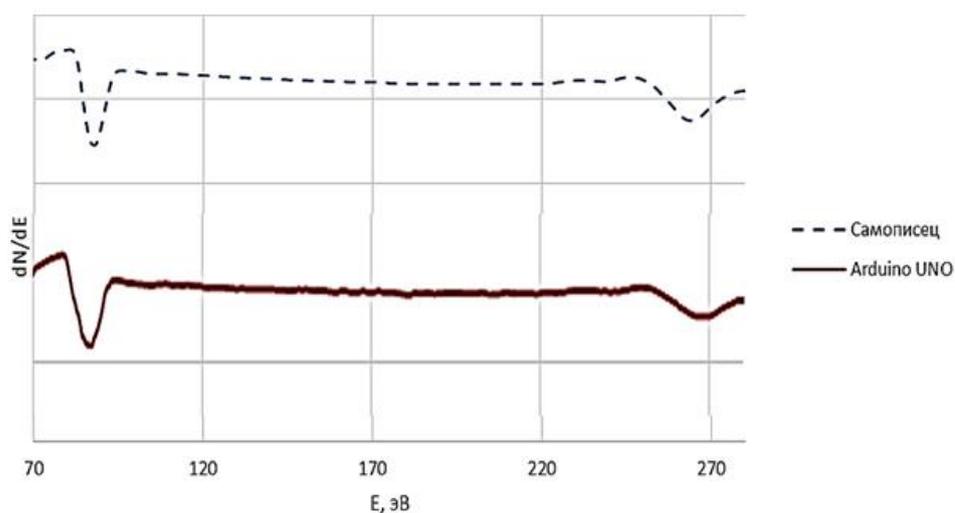


Рисунок 13 – Оже-спектры полученные на самописце и с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса на базе Arduino UNO [22]

В результате проделанной работы нам удалось разработать программно-аппаратный комплекс для автоматизированной обработки спектров оже-электронов. При этом были использованы решения, позволившие осуществить надежную гальваническую развязку научного оборудования с платой микроконтроллера и согласовать уровни их сигналов. Был осуществлен выбор недорогой платформы - Arduino UNO, позволившей в полной мере реализовать про-

цесс оцифровки оже-спектров. Было установлено, что разработанное устройство позволяет получить графики идентичные графикам, построенным с помощью самописца. Дальнейшее работа будет вестись в области совершенствования программного обеспечения комплекса [22].

Данный программно-аппаратный комплекс может быть взят за основу при модернизации любого научного оборудования, где используются самописцы [22].

4.2 Проведение исследования методом электронной оже-спектроскопии и расчет методом коэффициентов элементной чувствительности

Пленки $BaSi_2$ на $Si(111)$ были сформированы методом твердофазной эпитаксии в сверхвысоковакуумной (СВВ) камере прибора РНИ model 590 с базовым давлением $1.3 \cdot 10^{-7}$ Па. Осаждение велось: барий – из источника, выполненного из танталовой фольги в виде трубочки с проколом, а кремний – с пластины, вырезанной из шайбы FZN100 $Si(111)$. Подложка вырезалась из промышленной шайбы FZN100 $Si(111)$ с удельным сопротивлением 50-75 Ом·см и подвергалась стандартным процедурам очистки: в ацетоне, изопропиле, а также высокотемпературному прогреву в течении 6 часов при температуре 873 К. Дополнительно для получения атомарно-чистой поверхности трижды повторялся высокотемпературный прогрев при $T = 1523$ К в течение 6 секунд каждый. Проведя соосаждение и рекристаллизацию пленок мы получили два образца: 33Л и 34Ц. Причём для 33Л, время рекристаллизации пленки составило 1 час, а для 34Ц – 30 минут. Данные пленки имеют толщину равную 100 нм, которая фиксировалась при помощи устройства Sycon Instruments, позволяющего измерять толщину пленки с точностью до 0,1 нм. В качестве датчика использовалась кварцевая пластина, помещенная в аналитическую камеру и включенная при помощи электрических контактов в электронную схему генератора. При приложении переменного электрического поля, возникают колебания кварцевой пластины по толщине, резонансная частота которых обратно пропорциональна толщине пластины. Эта частота изменяется, когда пластину помещают перед

термоисточником. Изменения частоты малы, устройство Sycon Instruments, позволяет проводить измерения с большой точностью – в 5 знаков после запятой. Для этого, в этот прибор встроен эталонный генератор для сравнения частоты сигнала генерируемой им, с частотой генератора, работающего с кварцевым датчиком. Оба генератора изначально настроены на одну частоту 6 МГц, она фиксирована на протяжении всего эксперимента только для эталонного генератора. В итоге сравнения определяется разница частот сигналов, которая по известной формуле [27] позволяет определить толщину осажденного слоя. Результат выводится на компьютер через соответствующий интерфейс.

Сформированные образцы исследовались *in situ* методом ЭОС. Для получения и цифровой обработки оже-спектров был использован разработанный авторами программно-аппаратный комплекс на основе микроконтроллера ATmega 328 [22]. На рисунке 14 представлены спектры оже-электронов толстых пленок $BaSi_2$, сформированные методом твердофазной эпитаксии: образцы 33Л и 34Ц.

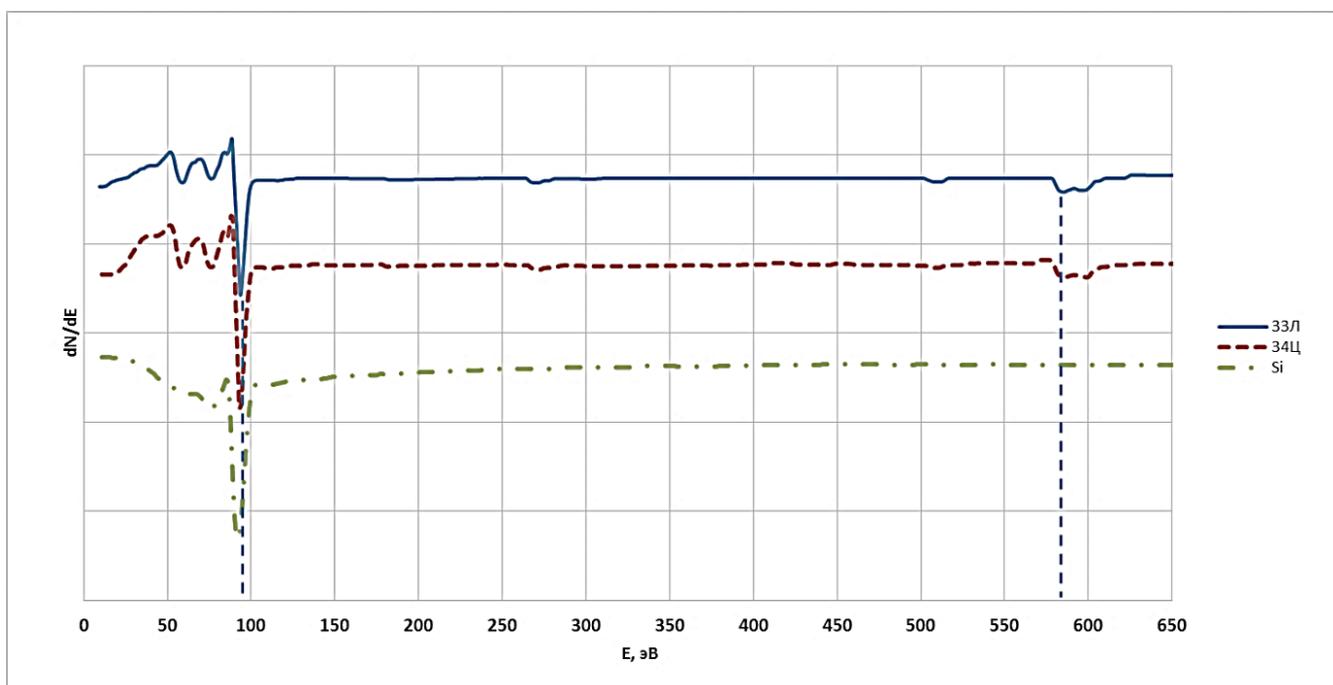


Рисунок 14 – Спектры оже-электронов сформированных пленок $BaSi_2$ и кремниевой подложки

На всех графиках присутствует обратный пик большой интенсивности с энергией 91 эВ. По атласу спектров оже-электронов, в приложении А, он соответствует энергии кремния (92 эВ). На графиках образцов присутствуют двойные обратные пики, с энергией первого из них, равной 585 эВ, что указывает на наличие в составе пленки бария (584 эВ – по атласу спектров оже-электронов). Кроме этого, на графиках можно наблюдать обратные пики малой интенсивности при энергиях 272 и 509 эВ соответственно. Они принадлежат углероду (272 эВ) и близки по значению к кислороду (504 эВ). Интенсивность этих пиков низка, поэтому мы считаем, что их влияние на структуру сформированной пленки незначительно.

Следующим шагом проделанной работы стал расчет коэффициентов элементной чувствительности для сформированных пленок. Для этого графики спектров и графики спектров из атласа оже-электронов были приведены к одному масштабу. Далее были измерены амплитуды обратных пиков элементов, они измерялись попиксельно. Всё это проводилось при помощи графического редактора Photoshop. В таблице 1 приведены значения измеренных амплитуд переведённые в миллиметры, а в таблице 2 коэффициенты элементной чувствительности, рассчитанные по формуле (9), в безразмерных единицах.

Таблица 1 – Значения амплитуд обратных пиков элементов

в миллиметрах

	Si (атлас)	Ba (атлас)	Si (33Л)	Si (34Ц)	Ba (33Л)	Ba (34Ц)
I	84	194	165	200	17	23

Таблица 2 – Значения коэффициентов элементной чувствительности

	Si	Ba
S, табличная	0,35	0,12
S, расчетная	0,46	0,11

После этого, нам нужно было найти относительную концентрацию элементов. Используя формулу (10) и учитывая, что в данной пленке находится Ba и Si , мы получили расчетные формулы (11) и (12).

$$X_{Ba} = (I_{Ba}/S_{Ba}) / (I_{Si}/S_{Si}) \quad (11)$$

$$X_{Si} = (I_{Si}/S_{Si}) / (I_{Ba}/S_{Ba}) \quad (12)$$

В итоге, подставляя в данные формулы значения амплитуд и рассчитанных коэффициентов элементной чувствительности мы рассчитали относительную концентрацию Si и Ba в обеих пленках. Далее, найдя их отношение, было установлено, что соотношение атомов Ba к атомам Si в образце 33Л составляет 1:5, в 34Ц 1:4. Указанные соотношения близки к соотношениям атомов Ba и Si в составе пленки $BaSi_2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведён литературный обзор российских и зарубежных научных работ посвященных дисилициду бария. Были определены и изучены методы формирования и исследования низкоразмерных структур. Также, были даны основные характеристики использованных при эксперименте научных приборов.

В результате проведенной работы методом твердофазной эпитаксии были сформированы две пленки $BaSi_2$ толщиной 100 нм. Первая (образец 33Л) при времени рекристаллизации $t = 1$ ч, а вторая (образец 34Ц) при $t = 30$ мин. Было проведено их исследование методом ЭОС, причем спектры оже-электронов были обработаны при помощи разработанного в лаборатории физики поверхности НОЦ АмГУ программно-аппаратного комплекса. Также, в дополнение к методу ЭОС, был проведён расчет по методу коэффициентов элементной чувствительности соотношения атомов Ba к атомам Si в сформированных пленках.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- 1) Экспериментально установлено, что были сформированы две плёнки толщиной 100 нм;
- 2) Показано, что разработанный программно-аппаратный комплекс для снятия и оцифровки спектров оже-электронов позволил повысить точность обработки данных и сократить время проведения исследования;
- 3) Расчёт методом элементной чувствительности, по результатам исследований методом ЭОС, показал, что были сформированы пленки $BaSi_2$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Чечулин, В.Л. О долгосрочном экологическом равновесии при использовании солнечных батарей / В.Л. Чечулин. // Вестник Пермского университета. – 2013. № 1. – С. 49-51.
- 2) Гордиенко, Ю.Е. Тонкопленочные фотовольтаические элементы на основе аморфных кремниевых сплавов / Ю.Е. Гордиенко, А.С. Мазинов, Д.Р. Яковлев. // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. № 2. – С. 22-27.
- 3) Morita, K. Optical and electrical properties of semiconducting BaSi₂ thin films on Si substrates grown by molecular beam epitaxy / K. Morita, Y. Inomata, T. Suemasu // Thin Solid Films. – 2006. – № 508. – P. 363-366.
- 4) Migas, D. B. Isostructural BaSi₂, BaGe₂ and SrGe₂: electronic and optical properties / D.B Migas, V.L. Shaposhnicov, V.E Borisenko. // Phis. Stat. sol. – 2007. № 7. – P. 2611-2618.
- 5) Suemasu, T. Exploring the potential of semiconducting BaSi₂ for thin-film solar cell applications / T. Suemasu, N. Usami. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. № 50. – P. 1-18.
- 6) O. Hara, K. Simple vacuum evaporation route to BaSi₂ thin films for solar cell applications / K. O. Hara, Y. Nakagawa, T. Suemasu, N. Usami. // Procedia Engineering. – 2016. № 141. – P. 27-31.
- 7) Du, W. Investigation of the tunneling properties and surface morphologies of BaSi₂/Si tunnel junctions for BaSi₂ solar cell applications / M. Baba, R. Takabi, N. Zhang, K. Toko, N. Usami, T. Suemasu. // Phys. Status Solidi. – 2013. № 12. – P. 1765–1768.
- 8) Vismara, R. Back-contacted BaSi₂ solar cells: an optical study / R. Vismara, I. Olindo, M. Zeman. // Optics express. – 2017. № 8. – P. 2-8.
- 9) Migas, D.B. Electronic properties of thin BaSi₂ films with different orientations / D.B. Migas, V.O. Bogorodz, A.V. Krivosheeva, V.L. Shaposhnikov, A.B. Filonov, V.E. Borisenko. // Japanese Journal of Applied Physics. – 2017. № 56. – P. 1-7.

10) Дубов, В.Л. BaSi_2 — перспективный материал для фотоэлектрических преобразователей (обзор) / В.Л. Дубов, Д.В. Фомин. // Успехи прикладной физики. – 2016. № 6. – С. 599-605.

11) Оура, К. Введение в физику поверхности : учеб. для вузов / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. – М. : Наука, 2005. – 499 с.

12) Фомин, Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела : учебное пособие / Д.В. Фомин. – М. : Директ-Медиа, 2014. – 186 с.

13) Мысягин, В.В. Исследование электрического нагревателя подложен для вакуумных камер / В.В. Мысягин, С.Г. Овчинников. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. № 8. – С. 167-168.

14) Нихочин, И.В. Разработка штока манипулятора для сверхвысоковакуумной установки / И.В. Нихочин, С.Г. Овчинников. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. № 8. – С. 168-169.

15) Мысягин, В.В. Исследование проблемы создания системы нагрева кремниевых подложен в условиях высокого вакуума / В.В. Мысягин, С.Г. Овчинников. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. № 9. – С. 183-184.

16) Порядина, А.Н. К вопросу о получении особо чистых металлов нанокристаллического уровня / А.Н. Порядина, А.М. Апасов. // Известия Томского политехнического университета. – 2012. № 2. – С. 114-119.

17) A.V. Zotov, V.V. Korobtsov. // Journal of Crystal Growth. – 1989. № 98. – P. 519-530.

18) Зотов, А.В. Формирование микроструктур с "захороненными" поверхностными фазами на кремнии / А.В. Зотов, В.В. Коробцов, В.Г. Лифшиц. // Нано- и микросистемная техника. – 2000. № 3. – С. 1-3.

19) Тачеева, Н.Н. Исследование методом электронной оже-спектроскопии кремниевых пластин в процессе термической очистки / Н.Н. Тачеева, А.С. Паршин. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. № 9. – С. 143-144.

20) Фомин, Д.В. Учебно-методическое пособие по выполнению расчетно-графической работы по теме: электронная оже-спектроскопия / Д.В. Фомин, В.Л. Дубов. – М. : Директ-Медиа, 2015. – 40 с.

21) Бриггс, Д. Анализ поверхности методами оже - и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Д. Бриггс, М.П. Сих. – М. : Мир, 1987. – 600 с.

22) Новожилов, Д.С. Разработка программно-аппаратного комплекса для автоматизированной обработки спектров оже-электронов / Д.С. Новожилов, Д.О. Струков, В.Л. Дубов, Д.В. Фомин. // Вестник Амурского государственного университета. – 2017. № 77. – С. 49-54.

23) HP 7015B Operating Service – 1979. – 103 с.

24) Омельченко, Е. Я. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino / Е. Я. Омельченко, В. О. Танич, А. С. Макалов, Е. А. Карякина // ЭС и К. – 2013. № 21. – С. 28–33.

25) Хан Джамшед, Н. Применение герметичных оптронов в военной и космической электронике / Н. Хан Джамшед // Компоненты и Технологии. – 2010. – №107. – С. 82-86.

26) Иванов, В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 448 с.

27) Майселла, Л. Технология тонких плёнок: справочник / Л. Майселла, Р. Глэнга. – М. : Советское радио, 1977. – 664 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Спектры оже-электронов чистого Si и Ba из атласа ЭОС

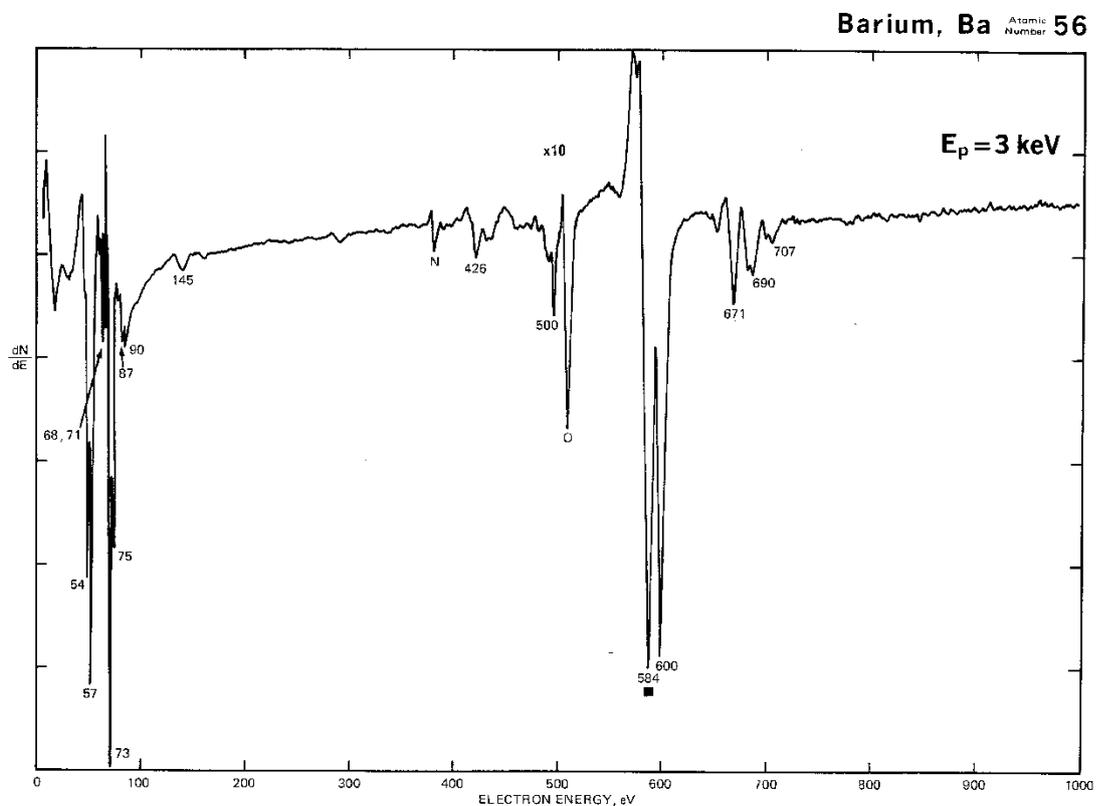


Рисунок А.1 - Оже-спектр чистого Ba

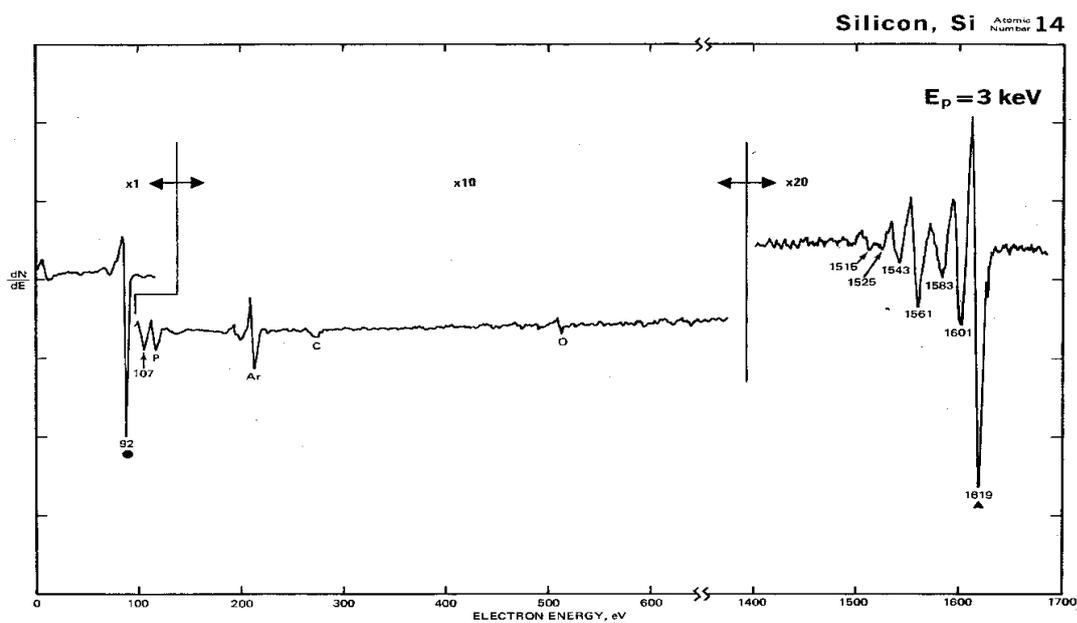


Рисунок А.2 – Оже-спектр чистого Si

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы

```
int analogPinX = A0;
int analogPinY = A1;
int uX, uY;
int i = 0;
float voltX, voltY;

void setup() {
  Serial.begin(9600); // скорость передачи данных
  Serial.println("CLEARDATA"); // очистка листа excel
  Serial.println("LABEL, X, Y, Num Rows"); // заголовки столбцов
}

void loop() {
  i++;
  uX = analogRead(analogPinX);
  uY = analogRead(analogPinY);
  voltX = (float)uX * 5. / 1024.;
  voltY = (float)uY * 5. / 1024.;
  Serial.print(voltX);
  Serial.print(",");
  Serial.print(voltY);
  Serial.print(",");
  Serial.println(i);
}

  delay(200); // задержка
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Апробация выпускной квалификационной работы

1) Новожилов, Д.С. Разработка программно-аппаратного комплекса для автоматизированной обработки спектров оже-электронов / Д.С. Новожилов, Д.О. Струков, В.Л. Дубов, Д.В. Фомин. // Вестник Амурского государственного университета. – 2017. № 77. – С. 49-54.

2) Новожилов, Д.С. Твердофазный рост толстых пленок BaSi_2 на $\text{Si}(111)$ и исследование их методом ЭОС / Д.С. Новожилов, Д.О. Струков, В.Л. Дубов, Д.В. Фомин. // Молодёжь XXI века: шаг в будущее: материалы XVIII региональной научно-практической конференции (18 мая 2017 года). – 2017. – С. 1042-1044.