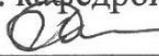


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра физики  
Направление подготовки 03.03.02 – Физика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ Е.В. Стукова  
подпись

«14» 06 2024 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Формирование тонких пленок силицида магния на кремнии и исследование их методами атомно-силовой и инфракрасной спектроскопии

Исполнитель

студент группы 0102-об

 - 12.06.2024  
\_\_\_\_\_

Д.А. Шеметов

(подпись, дата)

Руководитель

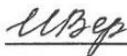
доцент, канд. физ.-мат. наук

 12.06.2024  
\_\_\_\_\_

Д.В. Фомин

(подпись, дата)

Нормоконтроль

 13.06.2024  
\_\_\_\_\_

И.В. Верхотурова

(подпись, дата)

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

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой



Е.В. Стукова

подпись

« 03 » 05 2024 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Шеметова Даниила Андреевича

1. Тема бакалаврской работы: Формирование тонких пленок силицида магния на кремний и исследование их методами атомно-силовой и инфракрасной спектроскопии

(утверждено приказом от 03.05.2024 №1140-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 14.06.2024 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: научные статьи, справочная литература, технические руководства к лабораторным приборам

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): формирование методом реактивной эпитаксии тонких плёнок  $Mg_2Si$  на Si (111) с контролем их роста методами электронной оже-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами; исследование сформированных пленок методом ИК-спектроскопии; исследование сформированных пленок методом атомно-силовой микроскопии

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) графики из атласа оже-спектров

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

7. Дата выдачи задания 03.05.2024 г.

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

Задание принял к исполнению (дата): 03.05.2024 г.



(подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 70 с., 37 рисунков, 4 таблицы, 1 приложение, 57 источников.

СИЛИЦИД МАГНИЯ, РЕАКТИВНАЯ ЭПИТАКСИЯ, ТОНКИЕ ПЛЕНКИ, ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ, СПЕКТР ПРОПУСКАНИЯ, СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ, 2D и 3D-АСМ ИЗОБРАЖЕНИЯ, РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ

Целью работы – определение методом ИК-спектроскопии наличия  $Mg_2Si$  в составе сформированных пленок и установление типа их роста методом АСМ.

Сформированы тонкие пленки  $Mg_2Si$  при температуре прогрева подложек до 250 °С – для обоих образцов. Итоговые расчетные толщины составили 400 нм и 300 нм для первого и второго образца соответственно. Методом электронной оже-спектроскопии определено наличие атомов Mg и Si в сформированных методом РЭ пленках. Методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронами установлено силицидообразование в этих пленках.

Методом ИК-УФ спектроскопии в составе сформированных при температуре 250 °С пленок для обоих образцов определено наличие силицида магния по пикам с энергиями 2,0 и 2,2 эВ.

Методом АСМ установлено, что формирование обеих пленок осуществлялось по типу Вольмера-Вебера. Определены средние размеры островков (для первого образца составили от 0,1 до 0,3 мкм, для второго образца – от 0,2 до 0,4 мкм). Для второго образца наблюдается коалесценция островков со средней площадью зерен 0,70 мкм<sup>2</sup>.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Теоретическая часть	9
1.1 Объект исследования	9
1.1.1 Свойства $Mg_2Si$ в объемном состоянии	9
1.1.2 Свойства $Mg_2Si$ в низкоразмерном состоянии	10
1.1.3 Результаты экспериментов по формированию $Mg_2Si$ выполненных внешними исследователями	13
1.2 Методы формирования силицида магния на кремнии	16
1.2.1 Поверхность подложки Si (111) и ее реконструкция	16
1.2.2 Механизмы роста тонких пленок	18
1.2.3 Методы формирования тонких пленок $Mg_2Si$	19
1.3 Методы исследования	21
1.3.1 Электронная Оже-спектроскопия	23
1.3.2 Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами	24
1.3.3 Инфракрасная спектроскопия	27
1.3.4 Атомно-силовая микроскопия	30
2 Практическая часть	35
2.1 Состав оборудования для проведения экспериментов	35
2.1.1 Сверхвысоковакуумная камера Varian	35
2.1.2 Оже-анализатор РНИ-model 15-255g	40
2.1.3 Прибор для измерения толщины пленок Sycon Instruments	41
2.1.4 Разработка высокостабильного генератора синусоидального сигнала	43
2.2 Ростовые эксперименты по формированию пленок $Mg_2Si$ методом реактивной эпитаксии	48
2.3 Результаты исследования in-situ тонких пленок $Mg_2Si$	53
2.3.1 Анализ спектров оже-электронов	53
2.3.2 Анализ спектров характеристических потерь энергии электронов	55

2.4 Результаты исследования ex-situ тонких пленок Mg <sub>2</sub> Si	56
2.4.1 Анализ ИК-спектров	56
2.4.2 Анализ картин атомно-силовой микроскопии	58
Заключение	60
Библиографический список	62
Приложение А – Атлас Оже-спектров	70

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АСМ – атомно-силовая микроскопия;

АЦЗ – анализатор типа цилиндрическое зеркало;

МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия;

РЭ – реактивная эпитаксия;

ТФЭ – твердофазная эпитаксия;

СОС – система обратной связи;

СВВ – сверхвысоковакуумная камера;

СХПЭЭ – спектроскопия характеристических потерь энергии электронами

ЭОС – электронная оже-спектроскопия.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день несмотря на развитие альтернативных источников энергии, по-прежнему основная часть электричества в России во многом зависит именно от теплоэлектростанции (ТЭЦ). Тепловые станции оказывают на окружающую среду наиболее сильное влияние, так как содержат такие загрязняющие вещества как: сажа,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  (в частности, угарный газ), соединения тяжелых металлов и т.д. – это наносит вред здоровью человека и экологии. Поэтому и экологи, и предприятия заинтересованы в том, чтобы четко контролировать выброс вредных веществ, который осуществляется через трубы ТЭЦ. Как выясняется учет загрязняющих веществ на заданную площадь. Далее определяется на сколько они отличаются от нормативных показателей. Для того, чтобы провести точные измерения используют оптические датчики на просвет, которые позволяют проанализировать состав дыма, вырабатываемого ТЭЦ. Обычно таких датчиков используется несколько, поскольку каждый из них работает в своем диапазоне спектра. Среди этих датчиков найдут применения датчики на основе соединения кремния с металлом, поскольку силициды представляют из себя перспективный материал для микро и нано электроники. Для оптодатчиков одним из перспективных является  $\text{Mg}_2\text{Si}$  в тонкопленочном виде, так как обладает такими свойствами как: узкая ширина запрещенной зоны от 0,6 до 0,8 эВ, высокая способность поглощения света (достигает 96 %), широкий диапазон фоточувствительности от 200 до 2100 нм [1 – 3].

В связи с вышесказанным, формирование тонких пленок  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и исследование их свойств является актуальным, поскольку позволят создать на их основе новые высокоточные датчики для газоанализаторов.

Целью бакалаврской работы является определение методом ИК-спектроскопии наличия  $\text{Mg}_2\text{Si}$  в составе сформированных пленок и установление типа их роста методом АСМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) сформировать методом реактивной эпитаксии тонкие плёнки  $Mg_2Si$  на Si (111) с контролем их роста методами электронной оже-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами;
- 2) исследовать сформированные пленки методом ИК-спектроскопии;
- 3) исследовать сформированные пленки методом атомно-силовой микроскопии.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Объект исследования

Объектом исследования является силицид магния ( $Mg_2Si$ ), который может быть представлен в объемном или в низкоразмерном состоянии. Их свойства существенно отличаются друг от друга, в зависимости от того в каком состоянии представлен  $Mg_2Si$ .

### 1.1.1 Свойства $Mg_2Si$ в объемном состоянии

Из анализа статей [4 – 10], посвященных объемному силициду магния можно заключить, что данный объект исследования имеет гранецентрированную решетку (ГЦК), такую же как у оксидов и сульфидов щелочных металлов, и пространственную группу  $Fm\bar{3}m$ . Модель ГЦК решетки представлена на рисунке 1, а. При комнатной температуре, величина постоянной решетки составляет 6,338 Å. Атом Mg тетраэдрически координирован четырьмя соседними атомами Si (рисунок 1, б), в свою очередь Si, кубически координирован восемью соседними атомами Mg (рисунок 1, в).

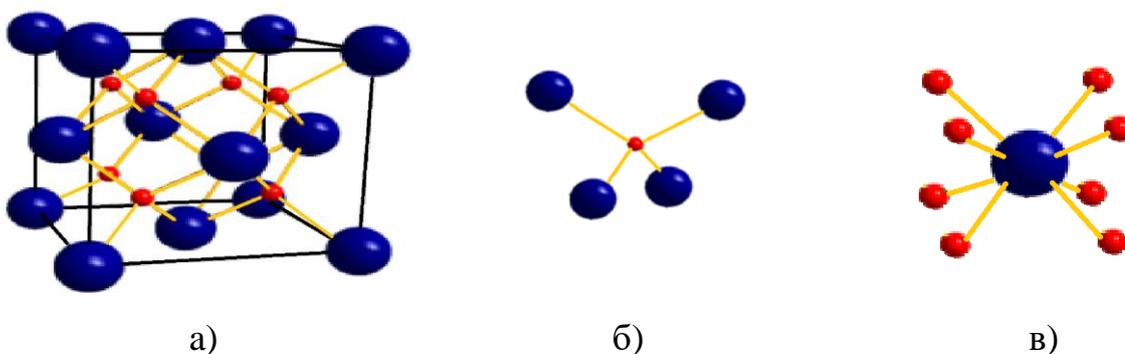


Рисунок 1 – Связь атомов Mg с Si и модель ГЦК решетки  $Mg_2Si$

Результат экспериментальных исследований  $Mg_2Si$  показывает, что ширина запрещенной зоны 0,77 эВ для поликристаллического  $Mg_2Si$  n-типа. Для монокристаллического силицида магния n-типа (по данным ИК-спектра поглощения), наблюдается непрямая ширина запрещенной зоны 0,4 эВ. Разница между этими значениями, хотя они в целом согласуются, вызвана длинными хвостами спектров поглощения, что приводит к значительным неопределенностям при

определении ширины запрещенной зоны. В итоге, общепринятая экспериментальная ширина запрещенной зоны для  $Mg_2Si$  составляет от 0,65 до 0,80 эВ. Объемный силицид магния обладает высоким коэффициентом поглощения  $3 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  при 2,5 эВ, и высокой подвижностью носителей заряда [6].

### 1.1.2 Свойства $Mg_2Si$ в низкоразмерном состоянии

Тонкопленочный  $Mg_2Si$  в условиях термодинамического равновесия по данным работ [11; 12] имеет кристаллическую структуру (рисунок 2), которая представляет  $\frac{2}{3}\sqrt{3}$ -R30°.

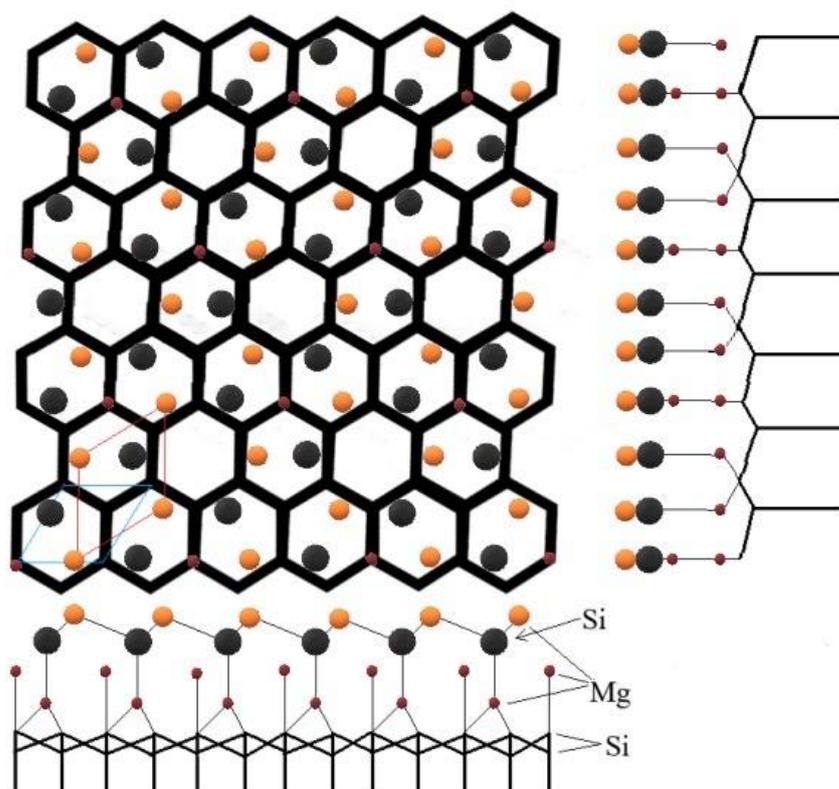


Рисунок 2 – Модель атомной решётки плёнки  $Mg_2Si$

По литературным данным работы [11] следует, что  $Mg_2Si$  является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,76 эВ. Монокристаллы силицида магния по своим термоэлектрическим свойствам значительно лучше получаемых пленок силицида магния, это связано с их поликристаллической структурой. Система Mg/Si (100) изучена в отношении формирования

различных поверхностных реконструкций. Наблюдаются следующие реконструкции:  $(1 \times 1)$ ,  $(2 \times 2)$  и две реконструкции  $(2 \times 3)$  с различными покрытиями адсорбата ( $1/3$  и  $1/6$  монослоёв). Теперь обратимся к системе Mg/Si (111). Здесь наблюдаются следующие реконструкции:  $(3 \times 3)$ -R30°,  $(3 \times 3)$ ,  $(3 \times 1)$  и  $(3 \times 3)$ -R30°. Интересно отметить, что только последняя реконструкция –  $(3 \times 3)$ -R30° – обладает полупроводниковыми свойствами. Все остальные реконструкции являются результатом упорядоченной физической адсорбции атомов магния на поверхности кремния. Поверхностная реконструкция  $(3 \times 3)$ -R30° характеризуется плоскостью  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (111), которая связана с решеткой Si (111). Интересно отметить, что при этом деформация решетки силицида составляет порядка 1,9 %. Однако, несмотря на наличие этих данных, литературных исследований по модели этой фазы, ее термической стабильности и встраиванию в кремний, пока нет [12].

В работе [13] представлены результаты исследования оптических свойств поликристаллических тонких пленок силицида магния на Si выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Недостатком данного метода является получение только поликристаллической тонкой пленки  $\text{Mg}_2\text{Si}$  стехиометрического состава, где ограничена температура осаждения до 200 °С, что не позволяет улучшать морфологию поверхности и качество пленок. Также есть условие, что поток Si должен быть меньше потока Mg в 4 – 10 раз, тогда кремниевый поток может преодолеть низкий коэффициент прилипания магния. Также в данной статье для монокристалла  $\text{Mg}_2\text{Si}$  выделены: электронная структура, оптические и транспортные свойства. Нелегированный монокристалл силицида магния имеет n-тип проводимости, для получения p-типа его легируют Ag и Cu, при комнатной температуре сопротивление для первого составляет 0,08 – 0,2 Ом·см, а для второго 0,2 – 0,7 Ом·см. Подвижность для n-типа проводимости силицида магния 200 – 550  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , концентрация  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , для p-типа соответственно подвижность 55 – 70  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , концентрация  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Благодаря теоретическим расчетам была определена ширина запрещенной зоны  $\text{Mg}_2\text{Si}$  при прямом переходе от 0,37 до 1,3 эВ, при первом прямом переходе от 1,8 до 2,8 эВ. По данным оптических измерений установили, что прямой переход протекает

при энергиях 0,83 – 2,17 эВ, а из температурной зависимости сопротивления определена ширина запрещенной зоны от 0,65 до 0,78 эВ.

На сегодняшний день в низкоразмерном состоянии  $Mg_2Si$  представляет больший интерес, поскольку в отличие от объемного силицида коэффициент поглощения падающего света выше и составляет 96 % [1]. Объемный силицид имеет неоднородную структуру с различными фазами, а структура тонких пленок чаще однородна, что обеспечивает стабильность и повторяемость свойств [4]. В дальнейшем изучаться и исследоваться силицид магния будет только в низкоразмерном состоянии. Поэтому рассмотрим его в сравнении с другими материалами именно в низкоразмерном состоянии, например, для использования в качестве исходного сырья для оптических датчиков.

В [14; 15] представлены результаты сравнения низкоразмерного  $Mg_2Si$  с полупроводниками такими как: арсенид галлия (GaAs), кремний (Si) и германий (Ge). Сравнение диапазона спектральной фоточувствительности показало, что у  $Mg_2Si$  диапазон составляет от 200 до 2100 нм, это шире, чем у других полупроводников упомянутых выше. Для примера диапазон фоточувствительности Ge от 400 до 1700 нм, это уже, чем у  $Mg_2Si$ , но шире чем у GaAs и Si. Ширина запрещенной зоны, у силицида магния уже, чем у всех остальных. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптические и электронные свойства  $Mg_2Si$ , GaAs, Si и Ge [15].

Материал	Диапазон фоточувствительности, нм	Ширина запрещенной зоны, эВ
$Mg_2Si$	200 – 2100	0,60 – 0,80
Ge	400 – 1700	0,67
Si	190 – 1100	1,12
GaAs	100 – 1000	1,43

Увеличение количества рекомбинаций неравновесных носителей заряда связано с уменьшением ширины запрещенной зоны и это способствует быстродействию оптических датчиков на основе  $Mg_2Si$  [15].

Информация о характеристиках приборных структур  $Mg_2Si$  содержится в статьях [16; 17]. Таким образом, легирование от 10 % до 12 % для p-n и n-p

(Si/Mg<sub>2</sub>Si) и 22 % для p-n-p (Si/Mg<sub>2</sub>Si/Si), получают наибольшую по эффективности фотоэлектрического преобразования прибор.

В работе [18] представлен механизм роста Si методом МЛЭ при T=200 °C, поверх Mg<sub>2</sub>Si со структурой  $\frac{2}{3}\sqrt{3}$ -R30°. Рассматриваются стадии роста пленки при толщинах от 0 до 0,5 нм, на начальном этапе происходит образование одинаково ориентированных 2D-зародышей Si, но их рост осуществляется по 3D-механизму, далее получается сплошная кремниевая пленка. Для слоев кремния толщиной 20 нм и более, также сформированных этим методом дополнительно проводят отжиг при T=550 °C, для повышения кристаллического качества пленки.

Были проанализированы свойства объемного и тонкопленочного Mg<sub>2</sub>Si. В результате было установлено, что для производства оптодатчиков тонкопленочный силицид магния обладает рядом свойств отличительных в лучшую сторону от объемного. Низкоразмерный силицид является узкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны от 0,6 до 0,8 эВ и диапазоном фоточувствительности от 200 до 2100 нм. Анализ статей показал, что на основе тонкопленочных силицидов магния уже изготавливаются приборы, не уступающие по своим характеристикам, а где-то превосходящие приборы, выпускаемые на других распространенных материалах [16; 17].

### **1.1.3 Результаты экспериментов по формированию Mg<sub>2</sub>Si выполненных внешними исследователями**

Исходя из вышепредставленного литературного обзора силицид магния представляет большой интерес для электроники, то необходимо рассмотреть методы его получения.

В настоящее время методы получения тонких пленок Mg<sub>2</sub>Si различны. Основных способов формирования силицидных пленок в условиях сверхвысокого вакуума три, к ним относят: твердофазную эпитаксию (ТФЭ), реактивную эпитаксию (РЭ), молекулярно-лучевую эпитаксию. Отличие заключается в стоимости реализации метода. С использованием простых термоисточников реализу-

ется метод РЭ и ТФЭ, для большей точности формирования толщины слоя используют более дорогостоящее оборудование, которое используется в методе молекулярно-лучевой эпитаксии [19; 20].

Эксперименты с тонкопленочным  $Mg_2Si$  проводились в лаборатории физики поверхности Научно-образовательного центра (НОЦ) им. К.Э. Циолковского АмГУ [21; 22], где для формирования образца использовались методы РЭ и ТФЭ. При РЭ напыление происходило на разогретую подложку, в то время как при ТФЭ, аморфная пленка осаждалась на подложку при комнатной температуре, а затем кристаллизовалась при более высоких температурах. Из анализа результатов исследований, представленных в упомянутых статьях [19 – 22], можно заключить, что выбор метода формирования зависит от поставленных задач.

Целью работы в статье [23] было получить пленку силицида магния на атомарно-чистой подложке кремния с ориентацией (111), а также выяснить в каком интервале температур она стабильна. Методом ТФЭ, то есть при комнатной температуре, на подложку Si в течении часа осаждали атомы Mg, чтобы получить образец, содержащий толстую пленку  $Mg_2Si$ , скорость осаждения магния составила 0,21 нм/мин. После этого, производили термический отжиг полученного образца в интервале температур от 40 °С до 380 °С. Параллельно в процессе формирования пленки производилось исследование её оптических свойств, использовался метод дифференциальной отражательной спектроскопии в диапазоне энергий от 1,2 до 3,2 эВ. В работе был сделан вывод, если экспериментальная величина энергий первого прямого перехода ( $E_d$ ), полученная из спектров мнимой части диэлектрической функции этой пленки отлична от рассчитанной по формуле, представленной на рисунке 3, то полученная пленка не является сплошной, тем самым можно судить о качестве пленки.

В результате было установлено, что стабильность сформированного силицида наблюдается при отжиге пленки в диапазоне температур от 90 °С до 200 °С, так как при больших температурах Mg десорбируется с поверхности  $Mg_2Si$  [23].

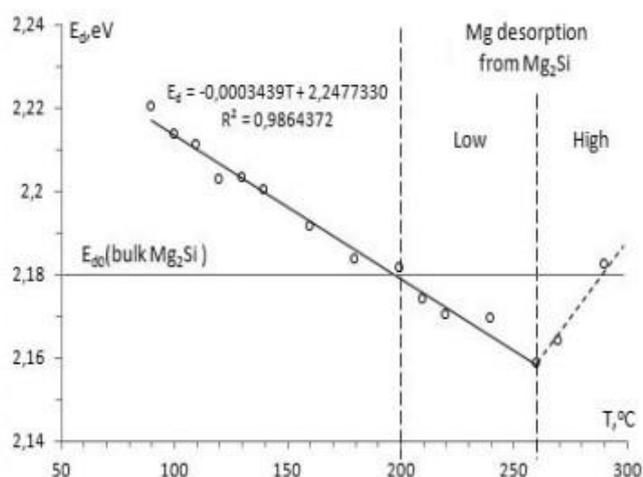


Рисунок 3 – Зависимость  $E_d$  в  $Mg_2Si$  от температуры отжига [23]

Тонкие пленки силицида магния можно сформировать и на пористом кремнии как указано в статье [24], где они были получены с разными толщинами, при разных температурах (методами ТФЭ и РЭ), как представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры дегазации пористого Si и эпитаксиального роста  $Mg_2Si$  [24]

Sample	Degassing			$v_{Mg}$ , nm/min		Growth modes							
	T, min	P, Top	T, °C	before	after	РЭ Reactive deposition epitaxy				ТФЭ Solid phase epitaxy			
						-	-	-	-	-	-	-	-
18-1	10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	450	12,5	13,9	-	-	-	-	420	8	100-110	$4,0 \cdot 10^{-6}$
18-2	10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	450	28,0	28,8	290	6	168-173	$4 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-
19-1	10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	450	27,0	29,0	-	-	-	-	350	10	290	$1,2 \cdot 10^{-5}$
19-2	10	$8,6 \cdot 10^{-5}$	450	27,9	28,0	-	-	-	-	350	10	280	$1,2 \cdot 10^{-5}$

В пленке полученной методом РЭ при  $T_{Si} = 290$  °C (таблица 2) наличие силицида магния было выявлено (методом комбинационного рассеяния света (КРС)). В процессе эпитаксии те атомы Mg, которые смогли разрушить оксид кремния образовали силицид, остальные же десорбировались с поверхности пористого кремния. Для пленок, образованных ТФЭ проходили те же процессы, что и в РЭ (атомы магния также взаимодействовали с оксидом кремния, часть десорбировалась, а часть атомов образовали  $Mg_2Si$ ), однако при разных температурах прогрева подложки ( $T_a$ ) (таблица 2). За равные интервалы времени, но не равные скорости формировались пленки с разными толщинами. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) было установлено, что для образца № 18-2 с

$T_a = 420$  °С и средней скоростью осаждения  $v_{Mg} \approx 13,2$  нм/мин (таблица 2) пленка силицида магния островковая, состоящая из ограниченных кристаллитов размерами 100 – 200 нм. У образцов с  $T_a = 350$  °С увеличивалась скорость осаждения магния ( $v_{Mg} = 28 - 29$  нм/мин) и пленки силицида, исследованные СЭМ, получились сплошными с хаотически расположенными зернами [24].

## **1.2 Методы формирования силицида магния на кремнии**

Для формирования силицида магния используется кремниевая подложка. При этом на подложке Si можно сформировать как тонкую пленку, так и объемный  $Mg_2Si$ .

### **1.2.1 Поверхность подложки Si (111) и его реконструкция**

Для того чтобы рассмотреть методы исследования  $Mg_2Si$ , хочется упомянуть и о поверхности элементарных полупроводников. Наиболее распространенными являются кремний и германий, которые имеют одну и ту же структуру алмаза. В структуре алмазного типа каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями (тетраэдрическая координация), а постоянная решетки для Si и Ge равна 5,43 Å и 5,65 Å соответственно [25].

Рассматривая атомарно чистую модель поверхности Si (111) можно наблюдать следующие реконструкции:  $2 \times 1$  и  $7 \times 7$ . Данные реконструкции – основные, другие можно получить при определенных условиях, и они как правило связаны с реконструкцией  $7 \times 7$ . Поверхность со структурой  $2 \times 1$  получают путем скола кристалла кремния вдоль грани (111). При прогреве до  $T=400$ °С метастабильная структура  $2 \times 1$  необратимо перейдет в реконструкцию  $7 \times 7$ , которая стабильна до  $T=850$ °С. После переходит в структуру  $1 \times 1$ , которая является обратимым в отличие от  $2 \times 1$  и реконструкция  $7 \times 7$  восстанавливается при медленном охлаждении [25].

Наибольший интерес в данной работе представляет Si (111) с реконструкцией  $7 \times 7$ . В 1985 г. свою знаменитую модель с реконструкцией  $7 \times 7$  «димеров-адатомов-дефектов упаковки» (DAS-модель) предложил Такаянаги с сотрудниками. Подтверждение данная модель получила благодаря просвечивающей электронной дифракции, представленной на рисунке 6 [25].

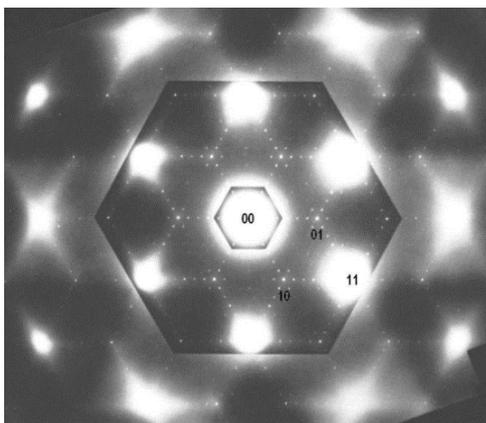


Рисунок 6 – Картина электронной дифракции на просвет от реконструированной поверхности Si (111)  $7 \times 7$  [25]

DAS-модель поверхности Si (111)  $7 \times 7$  представлена на рисунке 7. Элементарная ячейка с такой структурой содержит следующие элементы: 12 адатомов, две треугольные подъячейки (одна с дефектом упаковки), 9 димеров, ограничивающие треугольные подъячейки и одна глубокая угловая ямка. Сорок девять ненасыщенных связей содержит ячейка с идеальной поверхностью [25].

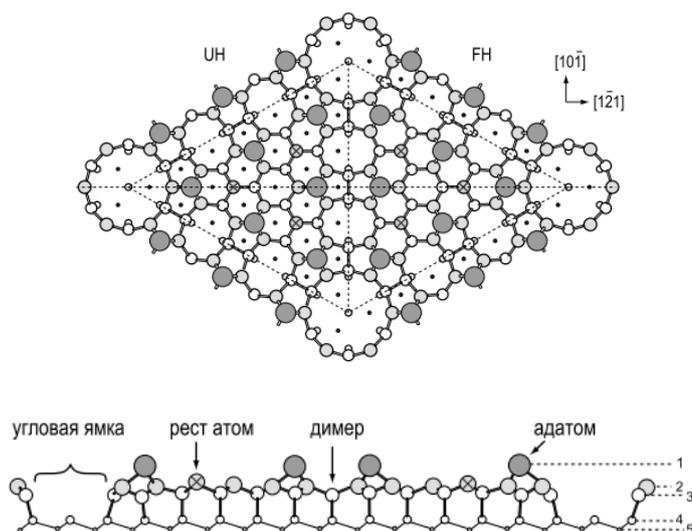


Рисунок 7 – Диаграмма, показывающая вид сверху и сбоку DAS-модели поверхности Si (111)  $7 \times 7$  [25]

В случае идеальной объемоподобной поверхности элементарная ячейка  $7 \times 7$  содержит 49 ненасыщенных связей.

Поскольку в данной ВКР основной задачей является формирование тонких пленок, то далее рассмотрим механизмы роста этих пленок и те методы, которые позволяют получать такие пленки.

### **1.2.2 Механизмы роста тонких пленок**

Процесс формирования тонких пленок на подложках разделяют на следующие этапы.

#### **1. Образование зародышей и островковой структуры.**

Появление адсорбированных атомов. Образование субкритических кластеров разного размера, наименьшим размером  $20 \text{ \AA}$ . Далее образование зародышей критического размера (этап зародышеобразования), где рост происходит во всех трех измерениях, однако вдоль поверхности значительно быстрее. В процессе роста адсорбированные атомы доминируют над атомами, приходящими на зародыш из паровой фазы. На этом этапе кристаллики имеют треугольную форму [26].

#### **2. Срастание (коалесценция) островков.**

Как только между двумя зародышами произойдет соприкосновение, и они смогут интенсивно обмениваться атомами, произойдет срастание (нарушится конфигурация). Образовавшийся островок продолжит менять свою форму еще длительное время. Также изменяется площадь островка. В начальный момент срастания площадь значительно уменьшается, а высота наоборот растет, тем самым понижается полная поверхностная энергия. После коалесценции зародыши приобретают форму шестиугольника, часто с дефектами. На освободившихся участках атомы адсорбируются и образуются вторичные зародыши [26].

#### **3. Образование каналов.**

На этом этапе степень округления срастания островков уменьшается. Островки затем вытягиваются, образуя сетчатую структуру с узкими каналами неправильной формы. Вторичные зародыши за короткое время объединяются с более массивными областями пленки оставляя каналы и мелкие дырки, расположенные хаотично [26].

#### 4. Формирование непрерывной пленки.

Внутри дырок образуются вторичные зародыши, которые впоследствии срастаются, образуя островки, достигающие краев дырки. Процесс повторяют пока не заполнится дырка и не образуется сплошная пленка. Ориентация островков заметно меняется, как и размер зерен в сформированной пленке. С каждым последующим этапом роста пленки толщина пленки увеличивается, достигая максимума на последнем этапе.

Основные этапы схематически показаны на рисунке 8 [26].

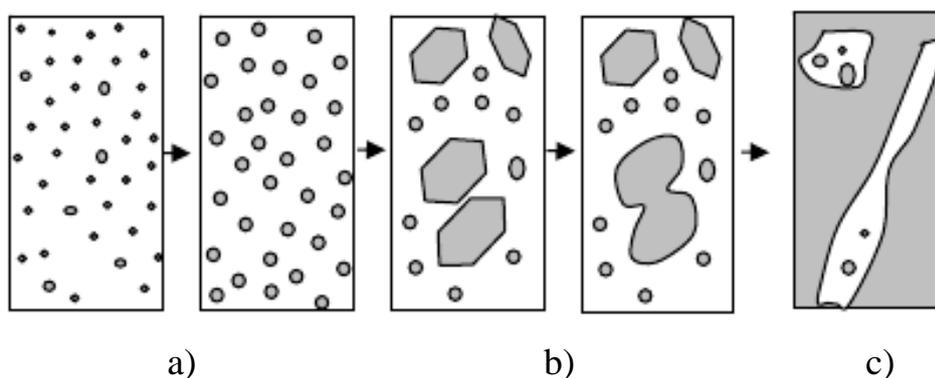


Рисунок 8 – Этапы формирования пленки [26]

### 1.2.3 Методы формирования тонких пленок $Mg_2Si$

Существуют различные методы формирования тонких пленок силицидов и в частности силицида магния. Как правило это методы, связанные с эпитаксиальным ростом силицида поверх кремниевой подложки.

Эпитаксия – это ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Такой рост еще называют автоэпитаксиальным, так как ориентировка слоев одинаковая (у последующего слоя такая же как у предыдущего). На эпитаксию существенно влияет структурно-геометрическое соответствие между кристаллической решеткой нарастающего кристалла и подложкой. Одинаковые или близкие структурные типы кристаллизующихся веществ легче координируются. Механизм нарастания происходит по-разному, поэтому указываются плоскости срастания решеток и направления в них. В эпитаксиальном росте важно, чтобы разность параметров обеих решеток не превышала 10 %, в противном случае сопрягаются наиболее плотноупакованные плоскости и направления.

Помимо вышеперечисленного соответствия кристаллической решетки и подложки, на эпитаксию также влияет: температура, степень переохлаждения кристаллизующегося вещества в среде, идеальность подложки, чистота её поверхности и другие условия. Неориентированная пленка нарастает тогда, когда температура эпитаксиального роста ниже установленной (для разных веществ и условий своя температура). Начинается эпитаксия с образования на подложке отдельных кристалликов, которые срастаются (коалесцируют), образуя сплошную плёнку [27].

Изучая эпитаксиальный рост пленок поверх подложек, ученые заметили, существенные отличия. Основных механизмов роста пленок, где нет требования образования зародыша на начальной стадии, выделяют три: послойный (Франка – ван-дер-Мерве), островковый (Вольмера – Вебера), послойный + островковый рост (Странского-Крастанова) [28].

Послойный механизм роста (Франка – ван-дер-Мерве) (рисунок 9) реализуется, когда в процессе формирования на поверхности подложки образуется слой пленки такой, что кристаллографические параметры подложки и её ориентированный рост встраивается в параметры пленки. Последующий слой не может образоваться, пока не сформировался предыдущий, по-другому еще называют двумерный рост пленок. Объясняется это высокой адгезией и малым коэффициентом поверхностного натяжения на границе между формируемой пленкой и подложкой, то есть атомы пленки в слое менее связаны друг с другом, чем с подложкой [27; 29].

Островковый механизм роста (Вольмера – Вебера) (рисунок 9) характеризуется трехмерным ростом пленок, в отличии от предыдущего метода. В целом является противоположным методу с послойным механизмом роста (связь атомов между собой больше, чем с подложкой, слабая адгезия, большой коэффициент поверхностного натяжения и т.д.), то есть параметров рассогласования больше. Возникновение зародышей, которые разрастаются и образуют пленку [25; 28; 29].

Послойный + островковый механизм роста (Странского-Крастанова) (рисунок 9) является промежуточным методом между описанными ранее механизмами роста. Сначала происходит двумерный рост пленки, образуется смачивающий слой, на который в дальнейшем формируются островки. Такой метод реализуется, когда происходит рассогласование постоянных решетки осаждаемого материала и материала подложки [28; 29].

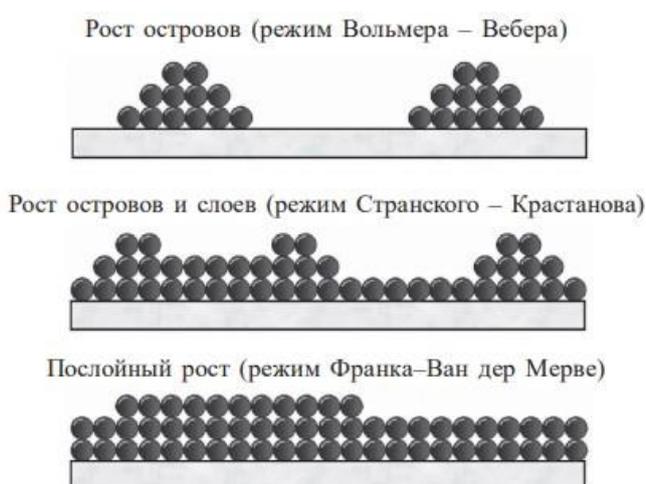


Рисунок 9 – Основные механизмы роста пленок [29]

Таким образом для каждого механизма роста необходимо учитывать, как кристаллические параметры решетки пленки и подложки согласуются между собой, от этого зависит величина коэффициента поверхностного натяжения на границе раздела [28 – 30].

### 1.3 Методы исследования

Методов исследования тонких пленок существует большое количество и каждый метод в отдельности дает только часть информации о свойствах исследуемого объекта. Для анализа структуры и свойств образцов используются такие методы как: просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (РЭДС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ), вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС), ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ), нано электронная спектроскопия для химического анализа (нано ЭСХА), скани-

рующая оже-микроскопия (СОМ) и электронная оже-спектроскопия (ЭОС), сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и т.д. (рисунок 10) [31].

Таблица 3 – Характеристики некоторых методов исследования и возможности их применения.

Метод	Латеральное разрешение	Преимущества	Недостатки
ПЭМ РЭДС СХПЭЭ	1-5 нм	1. Высокое разрешение; 2. Атомная структура; 3. Элементный анализ	1. Трудоемкость пробоподготовки; 2. Сложность проведения количественного анализа; 3. Сложность интерпретации спектров в СХПЭЭ
ЭОС	10 нм	1. Состав; 2. Анализ поверхности; 3. Профилирование по глубине	1. Сверхвысокий вакуум; 2. Специальные требования к образцам; 3. Сложность юстировки

Возможности различных методик упомянутых выше представлены на рисунке 10.

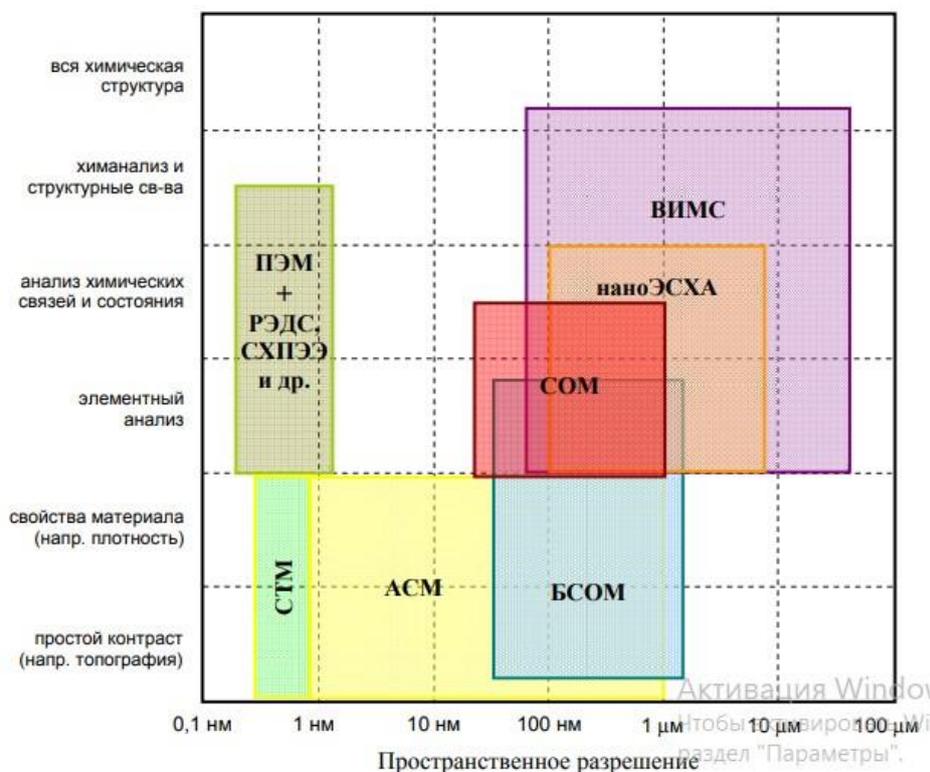


Рисунок 10 – Сравнительная диаграмма некоторых методов анализа поверхности и тонких пленок [31]

В данной работе были взяты следующие методы исследования: ЭОС, СХПЭЭ, ИК-спектроскопия, АСМ.

### **1.3.1 Электронная Оже-спектроскопия**

Электронная Оже-спектроскопия – это метод, в котором под действием возбуждающих факторов (источники возбуждения – электроны) испускаемых с поверхности твердого тела изменяется энергетический спектр электронов (информацию об элементном составе дают характеристичные электроны) [31; 32].

Оже-процесс состоит в нескольких этапах (рисунок 11). На первом этапе атом ионизируют внешним излучением (первичными электронами с энергией порядка от 1 до 30 кэВ), так что на одной из внутренних оболочек образуется вакансия. Состояние атома энергетически не выгодное и следующим этапом вакансия заполняется электроном, который перешел с вышележащего уровня. После выделяется энергия и может быть два варианта событий – или эта энергия может выделиться в виде фотона (рентгеновская флюоресценция), или же безызлучательно передаться электрону, который покидает атом (оже-электрон) и в результате наблюдается оже-эффект [31; 33].

Рассмотрим данный процесс акцентируя внимание на изменении энергии на каждом этапе (рисунок 11). В ЭОС энергию отсчитывают от уровня Ферми ( $E_F$ ). Первичный пучок электронов с энергией  $E$  служит для ионизации атома взаимодействуя с электроном расположенном на  $K$  уровне имеющим энергию связи  $E_K$  ( $E > E_K$ ). Далее процесс передачи энергии первичными электронами может протекать двумя путями – упругое рассеяние, неупругое рассеяние. При упругом рассеянии покинувшие поверхность твердого тела электроны будут обладать такой же энергией, что и первичные электроны. При неупругом часть энергии передается электронам на внутренних оболочках атома, которые могут покидать образец (вторичные электроны), увеличивая энергию их количество падает. На место образовавшейся вакансии в результате неупругого столкновения из вышележащих уровней переходит электрон. Возникающий избыток энергии может быть испущен в виде рентгеновского фотона, либо передан электрону находя-

щемся на вышележащем уровне  $L_{2,3}$  [32 – 35]. Кинетическая энергия такого электрона зависит от разности потенциальных энергий начального, промежуточного и конечного состояния – уровней  $K$ ,  $L_1$ ,  $L_{2,3}^*$ , соответственно, поэтому можно определить какому элементу соответствуют атомы, которые бомбардируют ускоренными электронами.

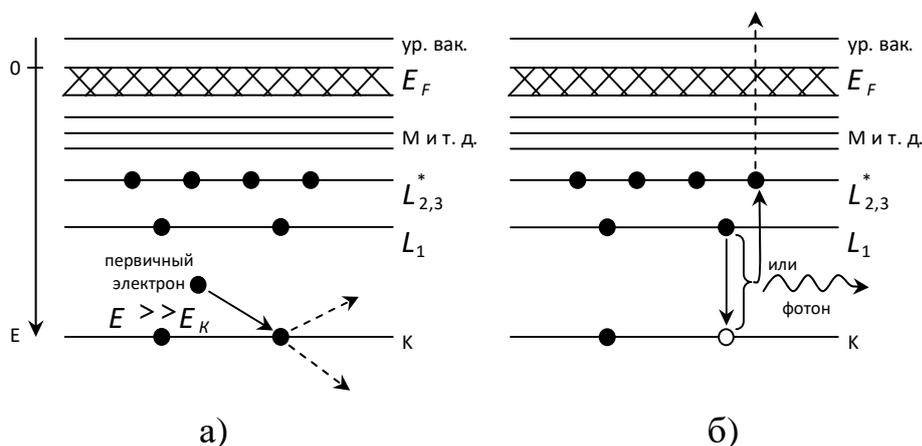


Рисунок 11 – Схема возбуждения атома внешним излучением (а), испускание оже-электрона или рентгеновского фотона (б) [31]

На энергию оже-электронов влияет хорошо известная электронная структура атомов, которая занесена в атлас оже спектров. Преимуществом метода ЭОС является малая глубина анализа поверхности образца (не превышает 3 нм). Метод ЭОС позволяет установить наличие отдельных атомов в составе пленки, но обладает недостатками: не даёт никакой количественной характеристики и не позволяет определить тип силицида, который получен в этой пленке [31].

### 1.3.2 Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами

Метод СХПЭЭ даёт представление о таких процессах как наличие силицидообразования при осаждении металлов на кремний, позволяет предварительно установить какой характер носит сформированная пленка и является важным для формирования тонких пленок силицида магния на кремнии. Метод СХПЭЭ основан на использовании неупругих рассеянных электронов (объект исследования), которые испытали дискретные потери энергии при отражении от поверхности твер-

дого тела или после прохождения через тонкую пленку вещества. Данный вид потерь происходит по разным причинам рассеяния имея большой диапазон энергий от  $10^{-3}$  до  $10^4$  эВ [25; 33; 36].

Методики ХПЭЭ различны, но обычно исследование проводят в диапазоне потерь нескольких эВ до десятков эВ, причинами потерь зачастую являются возбужденные плазмоны и фононы (поверхностные и объемные), а также возбуждением валентных электронов [33; 36].

При отражении от поверхности падающего пучка электронов можно наблюдать два случая: когда отражение произошло без потерь (упругое) и когда потеря энергии произошла (неупругое). Для второго случая (неупругого) есть формула для потери энергии [33]:

$$\Delta E = E_p - E, \quad (1)$$

где  $\Delta E$ ,  $E_p$ ,  $E$  – энергия потерь, энергия падающих и рассеянных электронов соответственно.

Анализатором энергии электронов в СХПЭЭ служат как правило АЦЗ (анализатор типа «цилиндрическое зеркало») или сферические анализаторы [33]

Схема эксперимента ХПЭЭ представлена на рисунке 12.

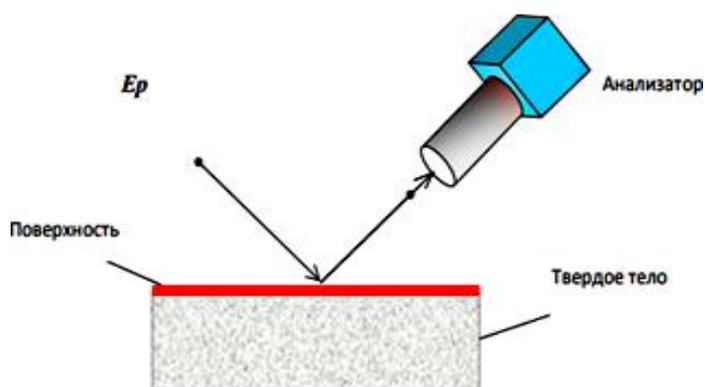


Рисунок 12 – Схема эксперимента ХПЭЭ [33]

Во многом развитию прогресса в области СХПЭЭ поспособствовали электронные плазменные колебания, которые позволили объяснить потерю энергии при падении электрона на поверхность твердого тела. Этот самый квант потерь

энергию на возбуждение колебаний электронной плотности принято называть «плазмон». По причине малого импульса может происходить возбуждение плазмона, то есть «межэлектронное расстояние» много меньше длины волны плазменных осцилляций. Одночастичные возбуждения плазмона также могут происходить. Самыми распространенными процессами в данном методе являются возбуждения объемного и поверхностного плазмонов. Для объемного характерно колебание продольных плазменных волн по всему объему кристалла, для поверхностного амплитуда колебаний уменьшается по мере глубины анализа, а локализуется на поверхности [25; 33; 36].

Собственная частота объемного плазмона  $\omega_p$  определяется по формуле Лэнгмюра [25]:

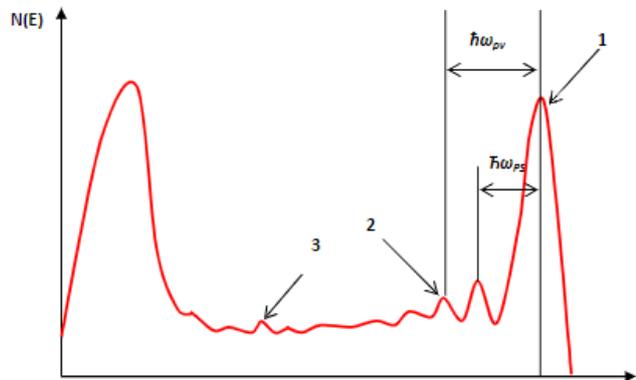
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}, \quad (2)$$

где  $n$  – плотность электронов,

$m$  – масса электрона,

$e$  – заряд электрона.

Потеря энергии или абсорбция плазмонов обозначается  $\Delta E = \hbar\omega_{pv}$  – объемный и  $\Delta E = \hbar\omega_{ps}$  – поверхностный. Если построить число электронов, потерявших энергию  $\Delta E$ , как функцию энергии потерь, то получим спектр ХПЭЭ (рисунок 13) [33]



1 – упругий пик; 2 – пики ХПЭЭ; 3 – пики, соответствующие оже-электронам;

Рисунок 13 – Распределения по энергиям вторичных электронов [33]

Соотношение по собственной частоте поверхностного плазмона  $\omega_{sp}$  с объемным представлено в формуле:

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

В методе СХПЭЭ глубина анализа определяется энергией первичных электронов. Изменяя эту энергию можно получить информацию об элементном составе как поверхности, так и приповерхностной области (глубина не более 5 нм). Плотность электронов для каждого материала образца отлична друг от друга, тем самым позволяет судить о характере проводимости [25].

Так как метод ЭОС и СХПЭЭ не дают нам ответ, какая все-таки аллотропная форма и в нужном ли соотношении произошло силицидообразование, используется метод ИК-спектроскопии, который точно даст ответ. А метод АСМ используется, чтобы иметь представление какая пленка получилась по её рельефу [25; 33].

### **1.3.3 Инфракрасная спектроскопия**

Метод ИК-спектроскопии основан на колебаниях атомов и молекул. Через образец пропускают ИК-излучение и при определенной энергии некоторая часть поглощается, в результате на ИК-спектре наблюдаются функция зависимости интенсивности излучения от частоты. Появления пиков (полосы поглощения) в данных спектрах с определенной квантованной энергией соответствует частоте, с которой связь молекул в образце колеблется [37].

Выделяют следующие области ИК-спектра: ближний, средний и дальний (рисунок 14). На практике чаще проводят исследования в средней ИК-области длин волн в интервале от 3 до 30 мкм. Волновое число среднего инфракрасного диапазона лежит в пределах от 4000 до 400 см<sup>-1</sup>. Отношение волнового числа является обратной величиной длины волны, а отсюда следует прямая зависимость волнового числа от энергии, то есть наблюдается флуктуация молекулы вследствие поглощения излучения. Причем поглощение происходит в случае,

когда две энергии (излучения и колебания молекул) соответствуют. Стоит отметить, что помимо поглощения ИК-излучения существуют такие взаимодействия как пропускание, так и отражение от поверхности [38].

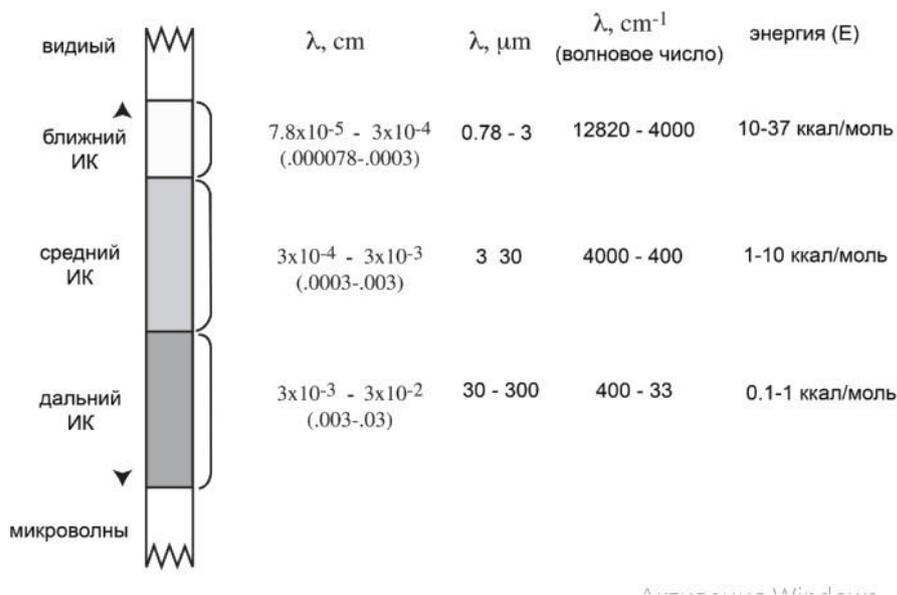


Рисунок 14 – ИК-диапазон электромагнитного спектра [38]

Колебательный (инфракрасный) спектр получают при эксперименте методом ИК-спектроскопии. Волновым числом на ИК-спектре обозначают ось абсцисс. Как уже ранее было упомянуто о зависимости волнового числа от энергии, откуда по полученному спектру можно судить об энергетических колебаниях молекул (чем левее на ИК-спектре, тем выше колебания). Осью ординат обозначают процентную долю вклада в ИК-спектр того или иного коэффициента (пропускания, отражения, поглощения). Десятичный логарифм коэффициента пропускания в минус первой степени это и есть поглощение. Далее сопоставляя полученные спектры и спектры из справочных данных можно выявить вещество. Вывод о строении образца делается по положению и относительной интенсивности полос поглощения [37; 38].

Оборудование, которое используют в ИК-спектроскопии – это Фурье-спектрометры, в основе которых лежит явление интерференции. Самыми распространенными типами интерферометров в данном методе являются интерферометры Майкельсона, Фабри-Перо и ламеллярный [38].

В Фурье-спектроскопии перед обычными спектрометрами перечисленные выше интерферометры имеют существенные достоинства:

1) выигрыш в энергии, так как в течении всего времени сканирования на приемник попадает излучение не узкого участка спектрального диапазона длин волн, а всего участка;

2) возможность повышения разрешающей силы интерферометра без уменьшения потока лучистой энергии [38].

Благодаря этим достоинствам Фурье-спектроскопия при сканировании, особенно многократном, обладает высокой чувствительностью и точностью измерения интенсивности. Проводят сканирование исследуемого объекта с малым шагом в широком диапазоне частот. Точность определения волновых чисел и параметр разрешения (до  $10^{-2} \text{ см}^{-1}$ ) очень высокие. Данная спектроскопия имеет преимущество во времени, так как за короткий промежуток времени можно провести исследование широкой спектральной области (время сканирования для интервала в сотни  $\text{см}^{-1}$  составляет меньше одной секунды) [38; 39].

Интенсивность падающего света обозначим  $I_0$ . Попадая на образец и взаимодействуя с ним может получиться следующая картина (рисунок 15). Часть света отразится на оптических границах раздела с интенсивностью ( $I_R$ ), может рассеяться ( $I_S$ ) и поглотиться ( $I_A$ ) в образе, некоторая часть света будет пропускаться ( $I_T$ ). Баланс энергии падающего света представлен в формуле [38; 40]:

$$I_0 = I_A + I_T + I_R + I_S . \quad (4)$$

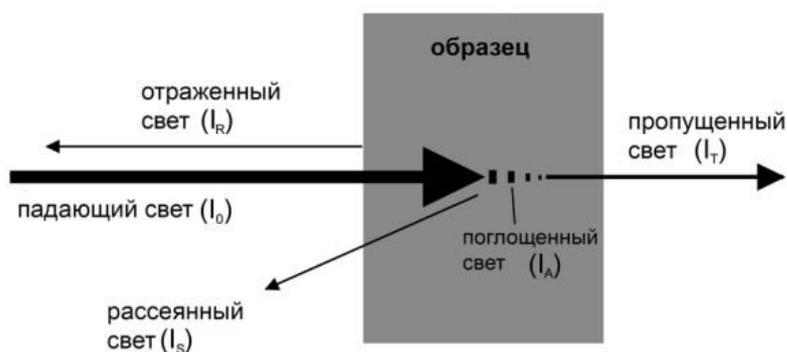


Рисунок 15 – Схема процессов взаимодействия падающего света с образцом [38]

### 1.3.4 Атомно-силовая микроскопия

Атомно-силовая микроскопия очень перспективный метод исследования, который дает информацию о рельефе образца, а также позволяет рассматривать локальные свойства поверхности с латеральным разрешением менее 10 нм. Сравнивая АСМ с другими методами микроскопии можно выделить плюсы данного метода – простота подготовки образцов, возможность исследования в режиме реального времени, в различных условиях (атмосфера, вакуум и т.д.) [41].

Для получения АСМ изображений используют специальные зондовые датчики (кантилеверы), состоящие из упругой консоли на конце которой располагается зонд в виде острия (рисунок 16). Данный метод основан на измерении силового взаимодействия между зондом и поверхностью образца. Малый изгиб консоли регистрируется и дает информацию о рельефе поверхности [42].

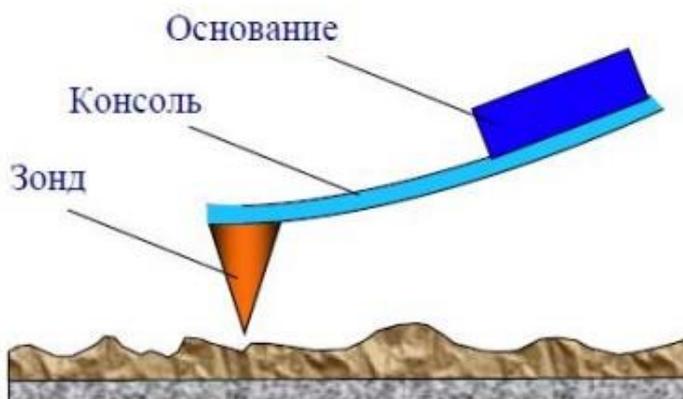


Рисунок 16 – Изображение кантилевера АСМ [42]

Зонд является одним из основных элементов атомно силового микроскопа, однако ни один атомно силовой микроскоп не обходится без системы регистрации отклонения зонда, пьезосканера и системы обратной связи (СОС), которая присуща всему семейству сканирующих зондовых микроскопов. Рассмотрим схему взаимодействия основных элементов атомно силового микроскопа, представленную на рисунке 17 [41; 42].

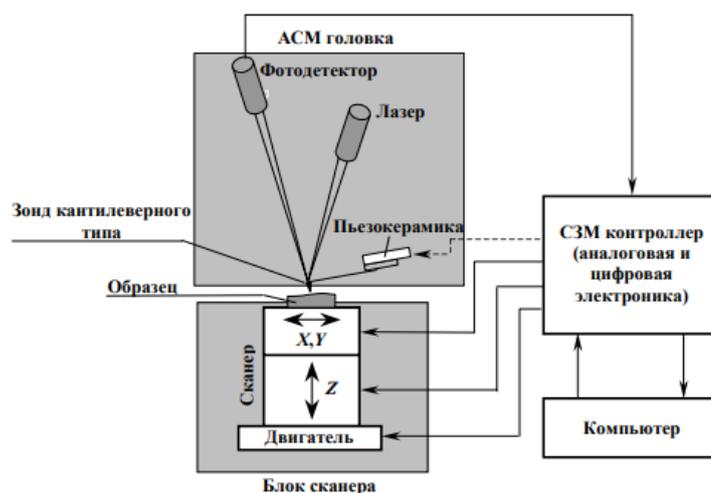


Рисунок 17 – Схема взаимодействия основных элементов атомно силового микроскопа [41]

В качестве исполнительного элемента используют пьезосканер, который перемещает образец относительно зонда вдоль определенной линии – строчная развертка в плоскости (X, Y) для сканирования поверхности образца. Взаимодействие зонда с поверхностью приводит к изгибу кантилевера. Благодаря системе регистрации измеряется разностный сигнал реального мгновенного напряжения от величины заданной оператором. По оси Z положение пьезосканера контролируется СОС, где он всегда пропорционален рельефу поверхности. Измерительная головка содержит держатель зонда и оптическую систему АСМ, которая служит для регистрации отклонений консоли [41].

Регистрирующая система (рисунок 18) состоит из: источника излучения (полупроводниковый лазер), позиционно-чувствительного фотоприемника (четырёхсекционный фотодиод) и оптической системы (фокусирующий объектив

и зеркальная поверхность кантилевера) [43].

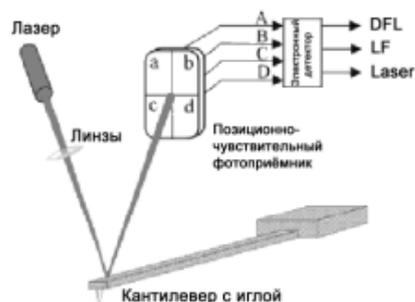


Рисунок 18 – Схема регистрирующей системы отклонения кантилевера [41]

Лазерный луч проходя через объектив фокусируется, попадая на обратную сторону кантилевера, где расположено острие зонда, образует эллиптическое пятно (размером около 50 мкм). Затем свет отражается от зеркальной поверхности зондового датчика, попадая на фотоприемник. Когда происходит отклонение кантилевера под действием составляющих сил нормальной или латеральной, лазерное пятно смещается относительно сегментов (a, b, c, d) четырехсекционного фотодиода (рисунок 19) с которых поступают электрические сигналы (A, B, C, D), отличные от начальных. Далее полученные сигналы обрабатываются, давая нам на выходе три сигнала несущих информацию [43].



Рисунок 19 – Смещение лазерного пятна при отклонении зондового датчика [41]

Первый сигнал несет информацию об отклонении зондового датчика в вертикальном направлении  $DFL = (A + B) - (C + D)$ . Второй сигнал свидетельствует

о боковом отклонении луча под действием латеральных компонент сил деформации кручения консоли  $LF = (A + C) - (B + D)$ . Третий сигнал особенно важен при юстировке оптической системы АСМ и позволяет узнать об интенсивности света, отраженного от кантилевера  $LASER = A + B + C + D$  [41; 43].

Узнать о рельефе образца и свойствах его поверхности можно благодаря методу АСМ работающему в определенном режиме, которые классифицируют на две группы – контактные квазистатические и бесконтактные колебательные. Существует также полуконтактный или динамический режим, который находится между двумя ранее перечисленными [42].

Для данной работы интересен полуконтактный режим, который чаще применяют на практике, несмотря на очевидные достоинства контактной и бесконтактной методик, из-за универсальности метода. Пьезовибратор возбуждает колебания зондового датчика на частоте, близкой к резонансной, с амплитудой модуляции порядка десятков милливольт. Между зондом и образцом расстояние соответствует касанию в нижнем полупериоде колебаний кантилевера. Сила Ван-дер-Ваальса и упругости (в момент соприкосновения) определяет суммарное взаимодействие. Во время сканирования СОС регистрирует изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера, которые формируют АСМ-изображение и распределение фазового контраста соответственно [41; 42].

Преимущества динамических методов по сравнению с контактными:

- 1) силы взаимодействия зонда с поверхностью уменьшаются, примером тому служат боковые силы;
- 2) повышение чувствительности в разы, то есть вместо простого статического измерения используют резонансные свойства системы;
- 3) есть возможность регистрации дифференциальных характеристик, если брать во внимание усредненные значения величин, которые необходимо поддерживать постоянными;
- 4) величина шума уменьшилась по причине переноса спектра сигнала в область высоких частот, где величина шума имеет обратную зависимость от частоты [41].

Таким образом в данной главе был рассмотрен  $Mg_2Si$  в объемном и низкоразмерном состоянии. Сравнение характеристик силицида магния в разных состояниях показало, что наиболее существенным для использования данного материала для оптических датчиков является низкоразмерный  $Mg_2Si$ , поскольку обладает высокой способностью поглощения света 96 %, узкой шириной запрещенной зоны  $\sim 0,7$  эВ [1 – 3]. Далее было проведено сравнение уже низкоразмерного силицида магния с другими материалами, используемым при производстве, которое показало, что силицид магния обладает рядом преимуществ перед этими материалами (диапазоном фоточувствительности от 200 до 2100 нм [15]), которые ставят его в ряд с ними как перспективный материал для нанoeлектроники. Однако было установлено, что существуют определенные трудности в формировании тонкопленочного  $Mg_2Si$  (низкий коэффициент прилипания Mg к Si) и поэтому были рассмотрены методы его получения. В результате было установлено, что силицид магния можно формировать методом РЭ при температуре 250 °С на кремнии. Для контроля за формированием тонких пленок  $Mg_2Si$  предлагается использовать следующие методы: метод оже-электронной спектроскопии, который позволяет определить элементный состав для каждого слоя формируемой пленки; метод СХПЭЭ, позволяющий установить процесс силицидообразования. Для изучения ex-situ морфологии поверхности – метод АСМ, а также оптических свойств пленки  $Mg_2Si$  – метод ИК-спектроскопии.

## 2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе представлено описание этапов получения тонких пленок  $Mg_2Si$  и их исследования, представлен перечень основного оборудования, которое было использовано при проведении экспериментов. Также в практическую часть в раздел «Состав оборудования для проведения экспериментов» включено описание разработанного цифрового высокостабильного генератора синусоидального сигнала, позволившего повысить точность получения данных при проведении ЭОС и СХПЭЭ.

### 2.1 Состав оборудования для проведения экспериментов

#### 2.1.1 Сверхвысоковакуумная камера Varian

В лаборатории физики поверхности НОЦ им. К.Э.Циолковского выполняются работы по формированию низкоразмерных структур на кремнии с использованием прибора РНІ-590 в состав которого входит сверхвысокая вакуумная (СВВ) камера Varian представленная на рисунке 20.



Рисунок 20 – СВВ камера прибора РНІ – 590

СВВ камера выполнена из нержавеющей стали, который позволил в ходе проведения эксперимента поддерживать низкое давление ( $10^{-9}$  Торр или  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Па). И от того на сколько в камере не возникнет натекание газов из атмосферы или данное натекание компенсируется наличием насоса в СВВ системе,

будет зависеть необходимое условие для проведения эксперимента in-situ – поддержание стабильного давления в камере. Откуда можно утверждать, что все эксперименты проходили при точно равных условиях.

При выполнении ВКР были задействованы порты, которые содержат смотровые окна для наблюдения: за поворотом крепления с образцами, осуществляемого с помощью трехкоординатного манипулятора образцов; за кварцевым датчиком при его позиционировании относительно источников. Были использованы фланцы с гермоводами, на которых были установлены держатели источников Si и Mg. С помощью проводов большого сечения подключались источники питания и для разогрева кремниевой пластины (источник Si) или танталовой трубки с магнием (источник Mg) через эти гермоводы пропускаться ток. Наблюдать за процессом нагрева кремниевой пластины можно было через смотровое окно, установленное на фланце и по свечению определять температуру, если она порядка 600 – 800 °С – бордовый свет свечения источника, а если 1300 °С – яркий свет [33].

Для обеспечения плотного соединения между фланцем и портом в работе используют сменные прокладки, которые изготавливаются путем вырезания из листа меди толщиной 3 мм, далее проходят обработку шлифованием, а затем термический отжиг. Такая прокладка помещается между фланцами после чего плотно протягиваются болты, схематично это представлено на рисунке 21. OD и ID на схеме – наиболее часто встречающиеся диаметры внешнего и внутреннего фланцев соответственно [25].

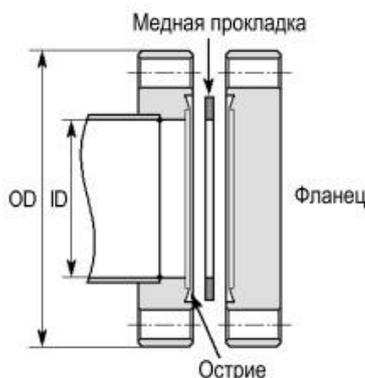


Рисунок 21 – Схематичное соединение двух фланцев, используемых в СВВ оборудовании [25]

В верхней части камеры располагается трехкоординатный манипулятор. На этом (XYZ) манипуляторе закрепляются образцы в специальном держателе и кварцевый датчик для определения скорости осаждения вещества, что можно наблюдать на рисунке 22. При повороте образцов важно – по завершению процедуры осаждения раскручивать рукоятку манипулятора в обратную сторону. В противном случае возможно закручивание проводов, соединённых с образцами в камере. Различие образцов размещенных на манипуляторе (XYZ) проходит по определенной классификации. Нетрудно догадаться, что центральный образец находится посередине. На рисунке 22, а согласно классификации установленной в данной лаборатории, образец расположенный на рисунке левее центрального – это правый, а расположенный правее – левый.

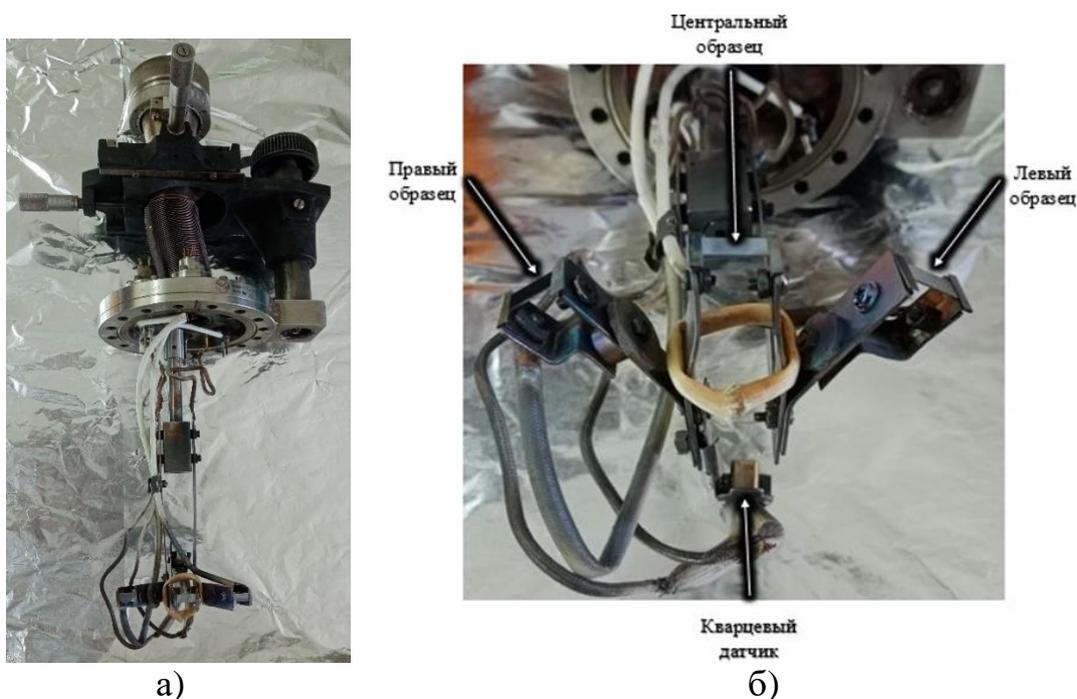


Рисунок 22 – Трехкоординатный манипулятор (а); (б) – размещения образцов и кварцевого датчика на манипуляторе (XYZ)

Низкое давление, соответствующее вакууму высокого порядка согласно теории Кнудсена, поддерживается с использованием откачной системы, в состав которой входит несколько насосов: стационарный насос (ионный) и насос входящий в состав откачного поста HiCUBE, показанного на рисунке 23. На первом

этапе насос откачивает до давления порядка  $10^{-5}$  Торр, на следующем этапе откачки достигается сверхвысокий вакуум ( $10^{-9}$  Торр). Поскольку насос способен изменить давление на 12 порядков величины, если и существует, то является дорогостоящим и состоящим из нескольких насосов.



а)



б)

Рисунок 23 – Откачной пост HiCUBE (а); откачной пост, присоединенный к СВВ камере (б)

Для подключения откачного поста используется гофра и быстросъемные фланцы ISO-KF, которые позволяют переключиться с одного насоса на другой за короткий промежуток времени.

Представленное оборудование имеет систему управления благодаря которой можно контролировать и задавать параметры работы насосов (высоковакуумного турбомолекулярного гибридного и форвакуумного мембранного насосов). Форвакуумный насос, можно сказать, обеспечивает начальную откачку удаляя тяжелые молекулы создавая начальное вакуумное состояние. Быстро вращающиеся роторы характерны для турбомолекулярного насоса, где газ при столкновении с лопастями изменяет направление движения (принцип турбулентности) перемещаясь вдоль оси насоса. В совокупности обоюдное взаимодействие этих насосов откачного поста позволяют создать давление внутри камеры Varian до  $10^{-5}$  Торр [25; 33].

На следующем этапе достигается сверхвысокий вакуум ( $10^{-9}$  Торр) благодаря ионному насосу входящему в СВВ систему прибора РНІ-590. Элементами

насоса служат: катод, анод и магнит. В качестве катода выступают титановые пластины, в качестве анода – трубки из нержавеющей стали и параллельно к ним расположен магнит. Схема такого насоса представлена на рисунке 24 [25; 33].

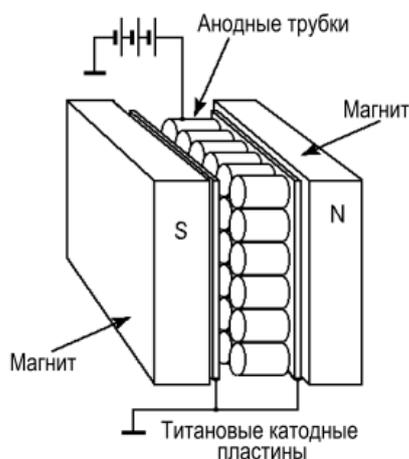


Рисунок 24 – Схема ионного насоса [25]

В насосе создается разряд, ионизирующий молекулы газа в камере. Ионы приобретают положительный заряд и движутся к катоду, сделанному из титана, который поглощает ионы. Положительные ионизированные молекулы достигая катода передают ему свой импульс, а отрицательные удаляются от него. Переданный импульс создает давление, позволяющее насосу эффективно удалять газ из системы создавая вакуум [25].

Во всей сверхвысоковакуумной системе по различным причинам существует необходимость перекрывать клапан при помощи вентиля, расположенных под СВВ камерой. Примером может быть напуск воздуха в камеру для осуществления выгрузки образцов, а также переключение камеры с откачного поста на ионный насос.

На практике для переключения с откачного поста на ионный насос приходится выполнять постепенное открывание шиберов с контролем давления по датчику давления таким образом, чтобы в камере магниторазрядного насоса давление не упало ниже  $10^{-5}$  Торр. В противном случае магниторазрядный насос может остановиться, перестав выполнять функции откачки, поэтому такой процесс может занять до полутора часов, а может занять 15 мин, все зависит от качества

выполненной откачки на первом этапе.

### 2.1.2 Оже-анализатор РНI-model 15-255g

Важной составляющей в камере Varian, для непосредственного проведения контроля формирования пленок силицида магния методами ЭОС и СХПЭЭ, является двухпролетный анализатор типа «цилиндрическое зеркало» (АЦЗ) РНI-model 15-255g. В данных анализаторах отклоняющего типа регистрируются электроны с определенной энергией, которые попадают на выходное отверстие анализатора под разными углами. Схема такого двухпролетного анализатора в составе СВВ камеры отражена на рисунке 25. Это применялось на практике, потому что это важно для контроля роста пленок.

Основная задача анализатора заключается в выделении энергии пропускаемых вторичных электронов из всего спектра. Чтобы такой спектр записать, необходим прибор – энергоанализатор. В зависимости от поставленной задачи запись спектра можно производить в виде числа электронов как функции энергии или его производной (первой, второй) [33].

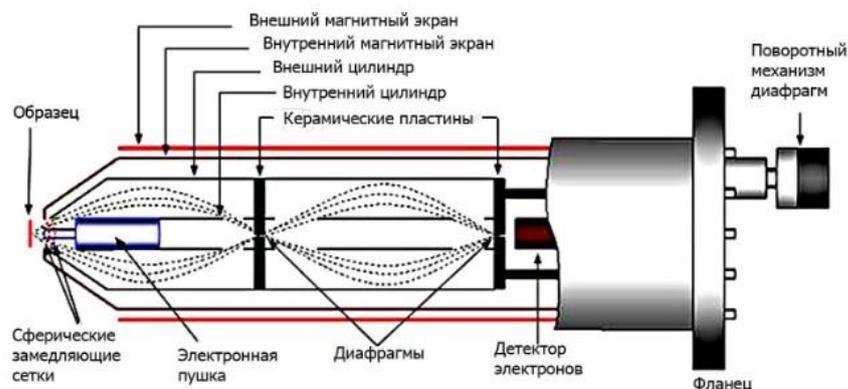


Рисунок 25 – Схема двухпролетного АЦЗ [33]

Рассмотрим работу, использовавшуюся при проведении экспериментов в ходе выполнения ВКР, двухпролетного АЦЗ в состав которого помимо цилиндров, детектора и т.д. включается и образец. В лаборатории физики поверхности НОЦ им. К.Э. Циолковского таких образцов три, которые размещены на трехкоординатном манипуляторе и поворотом манипулятора достигается выставление

одного из трех образцов напротив пушки. Благодаря такой системе манипулятора можно было исследовать все три образца с помощью двухпролетного АЦЗ в одно время не вскрывая камеру. В сравнении с установкой на рисунке 25, можно заключить, что на схеме исследовать можно только один образец, а в данной работе сразу три, благодаря своему конструктиву держателей. Поэтому производительность в три раза выше, чем у стандартной модели.

Для анализатора типа «цилиндрическое зеркало» принцип действия заключен в том, что отрицательный потенциал подается на внешний цилиндр. Частицы с различной энергией двигаются по разным траекториям радиального поля цилиндрического зеркала. Большой радиус кривизны имеют частицы с меньшей энергией, а меньший радиус кривизны – с большей, тем самым по внешним радиусам цилиндра двигаются частицы с меньшей энергией, а по внутренним – с большей. Пройдя через цилиндрическое зеркало частицы детектируются, образуя энергетический спектр. В зависимости от ширины щелей (входной и выходной) можно судить о разрешающей способности АЦЗ, т.е. электронах, достигших детектора. Уменьшая ширину щели возрастает разрешающая способность, но снижается чувствительность прибора [33].

Преимуществом АЦЗ, который использовался в ВКР, является то, что он двухпролетный. Двухпролетный в отличие от однопролетного имеет более высокую разрешающую способность и это позволило провести эксперименты с высокой точностью по определению элементного состава формируемых пленок.

### **2.1.3 Прибор для измерения толщины пленок Sycon Instruments**

С помощью прибора Sycon Instruments и компьютерной программы, в лаборатории НОЦ им. К.Э. Циолковского, рассчитывались толщины пленок.

В основе определения толщины пленок лежит кварцевый датчик (резонатор), состоящий из тонкой пластины. Благодаря своим пьезоэлектрическим свойствам и подведенным электрическим контактам, под действием электрического поля возникают колебания этой пластины по толщине. Чтобы датчик работал необходимо дорогостоящее оборудование для точности измерений такое как

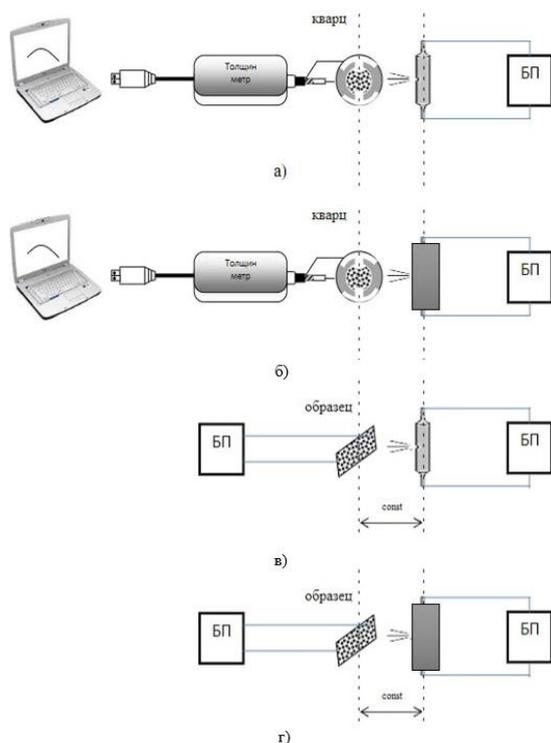
Sycon Instruments. Основные приборы необходимые для измерения толщины (частотомер, генератор и др.) представлены в блок-схеме на рисунке 26. Генератор с эталонной частотой и с частотой кварцевого датчика – это верх схемы (рисунок 26), сигнал от них поступает на первый смеситель, а от него промежуточный сигнал и сигнал с генератора регулируемой частоты идет на второй смеситель. Далее процесс оцифровки и на экране компьютера благодаря программному интерфейсу получаем нужную нам информацию о скорости осаждения, а после рассчитываем толщину пленки [33].



Рисунок 26 – Блок-схема измерителя толщин пленок [33]

В процессе эксперимента по формированию пленок, использование прибора Sycon Instruments можно описать четырьмя этапами (рисунок 27):

- а) определение скорости осаждения источника Mg (БП- блок питания, источник Mg, кварцевый датчик, толщин метр – Sycon Instruments и ПК);
- б) определение скорости осаждения источника Si (БП- блок питания, источник Si, кварцевый датчик, толщин метр – Sycon Instruments и ПК);
- в) формирование пленки (осаждение вещества) с расчетной толщиной (БП, источник Mg и образец);
- г) формирование пленки (осаждение вещества) с расчетной толщиной (БП, источник Si и образец).



а)

б)

Рисунок 27 – Схема четырех этапов проведения по формированию пленок (а); прибор Sycon Instruments (б)

После выполнения четырех этапов эти фазы повторяются нужное количество раз, то есть формируются би-слои.

#### 2.1.4 Разработка высокостабильного генератора синусоидального сигнала

Точность получения спектров во многом зависит от использования высокостабильного опорного генератора. Для этих целей в лаборатории физики поверхности до недавнего времени использовался внешний генератор ГЗ-111 [44]. Это аналоговый прибор, его точность зависит от настроек, проводимых с использованием переменных резисторов, у которых с течением времени могут окисляться контакты [45], что неизбежно приведет к уходу заданной частоты. Генератор не имеет собственного встроенного частотомера и, как следствие, дисплея, чтобы оценить текущее значение частоты выходного сигнала. Его частота задается по разметке на рукоятке управления, где точность шкалы соответствует

2 Гц. Прибор РНІ-590 уже не однократно модернизировался, и сотрудники, работающие с ним, имеют в этой области положительный опыт [46; 47]. В связи с этим, была поставлена задача разработать цифровой высокостабильный генератор синусоидального сигнала, управление которым осуществляется с помощью команд, передаваемых с компьютера, позволяющих задавать частоту с точностью до 1 Гц. Массогабаритные размеры прибора должны были отличаться в меньшую сторону по сравнению с ранее использовавшимся генератором ГЗ-111.

Для выполнения поставленной задачи была разработана структурная схема устройства, представленная на рисунке 28, в его состав входят: преобразователь интерфейсов USB/UART (ПИ), гальваническая развязка (ГР), микроконтроллер (МК), система индикации (СИ), генератор синусоидального сигнала (ГСС) и выходной усилитель сигнала (ВУ). Устройство взаимодействует по входу, посредством ПИ, с персональным компьютером (ПК), а на выходе – с синхронным усилителем (СУ) и блоком анализатора энергии электронов (БАЭЭ) из состава прибора РНІ-590.

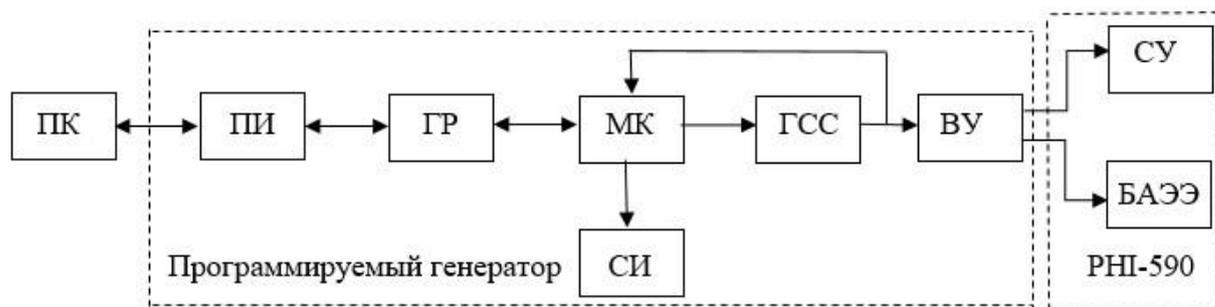


Рисунок 28 – Структурная схема устройства программируемого генератора синусоидального сигнала

Посредством программного обеспечения, установленного на ПК, оператор, задает частоту выходного сигнала генератора, отправляя данные через ПИ на узел ГР. Узел гальванической развязки обеспечивает совместимость входного сигнала микроконтроллера с управляющим модулем генератора, который формирует сигнал заданной частоты, поступающей затем в ВУ. Усиленный сигнал через коаксиальный разъем (BNC) по кабелю поступает в узлы прибора РНІ-590

требующие внешней синхронизации (СУ и БАЭЭ). Контроль частоты выходного сигнала осуществляется с помощью линии обратной связи от выхода генератора синусоидального сигнала к информационному входу микроконтроллера. В случае рассогласования заданного значения частоты и сформированного ГСС, срабатывает система индикации. Оператор имеет возможность также отследить значение частоты выходного сигнала на экране ПК.

Для реализации программируемого генератора, представленного на структурной схеме (рисунок 28), был осуществлен подбор радиокомпонентной базы. Так, для модуля ПИ было предложено использовать микросхему CH340E, для модуля ГР – микросхему ADUM120, в качестве микроконтроллера – ATmega328, для реализации модуля ГСС – микросхему AD9833. В качестве модуля выходного усилителя предложен сдвоенный ОУ LM358.

С учетом выбранной компонентной базы была разработана принципиальная электрическая схема программируемого генератора синусоидального сигнала, которая представлена на рисунке 29.

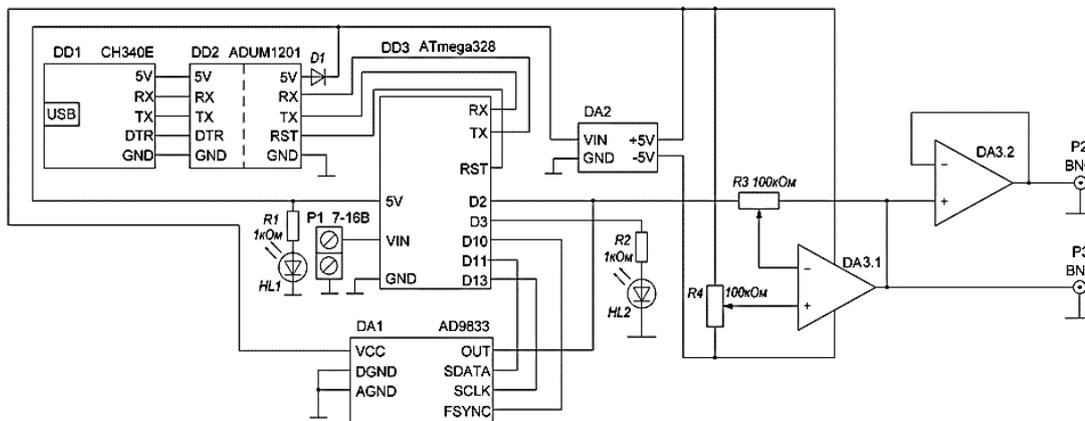


Рисунок 29 – Принципиальная схема программируемого генератора синусоидального сигнала

Преобразователь интерфейсов USB/UART, реализованный на микросхеме CH340E, имеет корпус MSOP-10, поддерживает как 3,3В, так и 5В логику и скорость передачи данных от 50 бит/с до 2 Мбит/с [48]. В качестве гальванической развязки используется двухканальный цифровой магнитный изолятор на микро-

схеме ADUM1201, превосходящий стандартную оптопару по устойчивости к высоким температурам, номинальным напряжениям изоляции в 2 раза и скорости передачи данных в 10 раз [49]. Управляющим элементом схемы является микроконтроллер ATmega328P имеющий 14 цифровых входов и выходов, работающий на частоте 16 МГц и обладающий встроенной оперативной памятью 2 Кб [50]. К нему, как видно из рисунка 29, подключены два светодиода использующиеся в качестве системы индикации: HL1 – отвечает за контроль наличия питающего напряжения, а HL2 – за соответствие текущей частоты выходного сигнала генератора установленной оператором. При наличии ошибки рассогласования светодиод HL2 начинает мигать. В качестве модуля ГСС используется микросхема AD9833, представляющая собой генератор сигналов, отличающийся низким энергопотреблением и способностью формирования сигналов различной формы. При тактовой частоте 25 МГц может быть достигнута дискретность установки частоты 0,1 Гц, а при диапазоне от 1 кГц до 1 МГц, используемых в приборе РНІ-590, дискретность – 0,004 Гц [51, 52]. Спроектированный генератор работает с точностью до 1 Гц, так как она обусловлена не только аппаратной частью, но и программной, которая была ограничена целыми числами, а для реализации поставленных задач больше не требуется. Общий диапазон частот выходного сигнала, спроектированного генератора, лежит в диапазоне от 5 до 6 кГц. В качестве выходного усилителя используется микросхема LM358 представляющая из себя удвоенный ОУ с высоким коэффициентом усиления и частотной компенсацией, а также низким потреблением тока [53]. Чтобы не возникло прямого объединения входов двух внешних устройств прибора РНІ-590 (СУ и БАЭЭ), выходной сигнал схемно дублирован с использованием буферизации реализованной операционным усилителем. Для текущего мониторинга частоты выходного сигнала генератора, предусмотрена возможность опроса микроконтроллера и вывод данных о частоте на экран ПК оператора.

На рисунке 30 представлена функциональная схема реализации электропитания разработанного устройства. На схеме показаны: внешний блок питания

(ВБП); линейный стабилизатор напряжения (ЛСН); преобразователь постоянного напряжения (ППН).

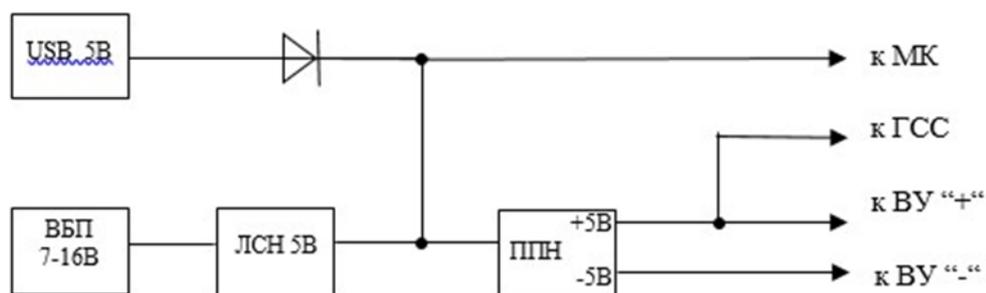


Рисунок 30 – Функциональная схема реализации электропитания программируемого генератора синусоидального сигнала

Питание устройства осуществляется двумя способами: через порт USB (5В) или через порт для внешнего блока питания в диапазоне напряжений от 7 до 16В.

В случае использования внешнего блока питания, задействуется линейный стабилизатор напряжения на 5В AMS1117 (интегрирован в модуль МК)

Импульсный преобразователь постоянного напряжения на базе микросхемы XL6007 (DA2 на рисунке 29), имеет корпус PLA, обеспечивает дополнительные стабилизированные линии питания +5В и минус 5В для операционного усилителя (DA3.1 на рисунке 29). Преобразователь имеет входное напряжение 3 – 4,5 В, коэффициент пульсации 80 мВ и точность вывода  $\pm 0,1$  В [54]. Линии питания не зависят от перепадов входного напряжения, таким образом, обеспечивается стабильность амплитуды выходного сигнала.

На основе разработанной принципиальной схемы был изготовлен лабораторный прототип программируемого генератора (рисунок 31). Габаритные размеры корпуса прибора составили: длина 107 мм, ширина 50 мм, высота 35 мм. В сравнении с ГЗ-111 размеры спроектированного генератора в 4 раза меньше, а корпус был выполнен при помощи 3D-печати.

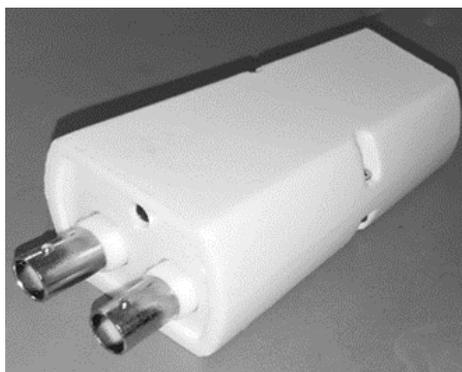


Рисунок 31 – Фотография лабораторного прототипа программируемого генератора

Для управления спроектированным генератором была разработана программа на языке C++, позволяющая задавать значение частоты выходного сигнала. Она же позволяет проанализировать значение этой частоты на выходе генератора с целью определения соответствия, заданного и полученного значений.

Таким образом в ходе выполнения ВКР был спроектирован программируемый генератор синусоидального сигнала, построенный на современной элементной базе. Управление генератором осуществляется с использованием разработанного программного обеспечения. Проведенные тестовые испытания лабораторного прототипа показали, что точность задаваемой частоты выходного сигнала соответствует 1 Гц, в диапазоне от 5 до 6 кГц. К генератору возможно подключать одновременно два устройства. Габаритные характеристики лабораторного образца в 4 раза ниже габаритных характеристик ранее использовавшегося генератора ГЗ-111. Разработанный генератор прошел успешные испытания в составе прибора РНІ-590.

## **2.2 Ростовые эксперименты по формированию пленок $Mg_2Si$ методом реактивной эпитаксии**

Прежде чем сформировать пленку магния на кремнии методом РЭ, нужно провести следующие этапы.

### **1. Подготовка материалов.**

Источник кремния и подложки для образцов вырезали из промышленных шайб КЭФ – 100 Si (111) (для подложки) и FZN – 100 Si (111) (для источника).

Удельное сопротивление для подложки ниже чем для источника и составляет от 2 до 15 Ом·см, а для FZN от 50 до 85 Ом·см. В среднем их размеры составляют 15×5 и оба имеют проводимость n-типа.

В качестве источника магния использовалась магниевая стружка, срезаемая с бруска Mg чистотой 99,999 %, которую в дальнейшем засыпают в танталовую трубку посередине с проколом.

2. Очистка поверхности образцов, источника кремния и танталовой трубки до загрузки.

Вначале обработка поверхности образца и источника кремния осуществлялась изопропиловым спиртом. Затем в химических растворах осуществлялась RCA-очистка, состоящая из стадий:

а) на этой стадии, которая длилась около 20 мин при температуре 80 °С происходила очистка подготовленных кремниевых пластин (образцов и источников) в соотношении смеси дистиллированной воды к аммиачной воде и к перекиси водорода, соответственно 5:1:1;

б) на данной стадии очистка упомянутых выше материалов продолжалась по аналогии с предыдущей, разница заключается в соотношении, теперь дистиллированной воды к соляной кислоте, а все остальное неизменно. Итоговое соотношение 6:1:1.

Танталовую трубку очистили в ванночке с мощностью источника ультразвуковых колебаний 50 Вт с раствором изопропилового спирта в течение 10 мин. После очистки, как ранее было упомянуто, эту трубку заполнили магниевой стружкой.

3. Перезагрузка сверхвысоковакуумной (СВВ) камеры.

Были установлены три образца на систему держателей, прикрепленных к трехкоординатному манипулятору СВВ камеры. Источники Mg и Si устанавливались на отдельный боковой фланец, предназначенный для соосаждения Mg и Si. Были заменены медные прокладки, отделяющие фланцы от портов СВВ ка-

меры. Проведена равномерная затяжка болтов фланцев с использованием измерительных щупов. Затем для достижения сверхвысокого вакуума использовали двухуровневую систему откачки.

#### 4. Дегазация СВВ камеры.

После помещения образцов на трехкоординатный манипулятор и после установки источников в СВВ камеру и откачки системы камеру накрыли термокоробом с воздушными тэнами, проиллюстрированными на рисунке 32.



Рисунок 32 – Термокороб для дегазации СВВ камеры

В процессе дегазации давление внутри камеры увеличивалось от  $1,33 \cdot 10^6$  до  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па. Это связано с десорбцией газов с внутренней поверхности вакуумной системы.

#### 5. Дегазация источников и образцов в СВВ камере.

Сначала осуществляли дегазацию магния. Добились этого прогревом, пропуская постоянный электрический ток через танталовую ячейку. Увеличение электрического тока происходило постепенно до 6 А. После этого проводили дегазацию источника кремния вначале источником переменного тока, а после электрического пробоя Si – источником постоянного тока. Важно проводить высокотемпературную вспышку очень быстро, так как при температуре от 1100 °С до 1250 °С происходит образование карбида кремния, а углерод с трудом полностью удаляется с кремния. Прежде чем проводить эксперименты с исследуемым

образцом, его очищали так же, как источник. Оценка велась по прибору для измерения давления в камере, относительно которого можно было зафиксировать процесс дегазации, в результате чего давление увеличивалось. Когда дегазация привела к тому, что все посторонние примеси десорбировались с образца, то наблюдали, как давление возвращается к норме, что видно по показанию прибора.

#### 6. Калибровка источников.

Калибровка источников Mg и Si заключалась в измерении скорости осаждения вещества с использованием кварцевого датчика, подключенного к прибору Sycon Instruments, обладающего разрешением 0,1 нм. Данные из прибора поступали в компьютер, где они обрабатывались с помощью специализированной программы Sycon STM Instruments Interface. График разностной частоты отображён в программе на рисунке 33.



Рисунок 33 – График разностной частоты двух генераторов (эталонного и с кварцевым датчиком) в программе

Кварцевый датчик устанавливается напротив источника и подается сила тока такая, чтобы на графике разностных частот появилась устойчивая линия вниз. Завершив калибровку источника, кварцевый датчик отворачивается от него и подаваемый ток снижается до нуля, давая остыть кварцевому датчику. Интервал времени остывания (от 5 до 30 мин) зависит от напыляемого вещества. Тол-

щина пленки будет отражена на экране, где ее нужно перевести в ангстремы. После этого процедура повторяется не менее трех раз для получения стабильной скорости и берется среднее значение.

Определение толщины формируемой пленки происходит на основе контроля изменения массы, осажденного на кварцевый датчик вещества. В результате скорость осаждения Mg составила 11 нм/мин, а для Si – 0,65 нм/мин.

Формирование образцов происходило при температуре прогрева подложки 250 °С. Для первого образца расчетная толщина пленки на основе данных калибровки источников составила 400 нм, а для второго 300 нм, отличие заключается в кратности осаждения би-слоёв (Mg+Si). Для обоих образцов на первом этапе был сформирован буферный слой Si толщиной 60 нм. Затем, для первого образца проведено четырехкратное поочередное осаждение слоев Mg и Si толщинами 75 и 25 нм соответственно. Для второго образца поочередное осаждение слоев проводилось трёхкратно, толщина слоёв магния и кремния такая же, как и у первого образца. После завершения формирования пленок силицида магния оба образца покрывались слоем Si для защиты от окисления после извлечения из СВВ камеры. Результаты этапов осаждения слоев и расчетные толщины сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Этапы формирования тонких пленок Mg<sub>2</sub>Si на Si (111)

Этап	Толщина слоя h <sub>1</sub> , нм	Толщина слоя h <sub>2</sub> , нм
1. Осаждение буферного слоя Si	60	60
2. Осаждение 1 слоя Mg	75	75
3. Осаждение 2 слоя Si	25	25
4. Осаждение 3 слоя Mg	75	75
5. Осаждение 4 слоя Si	25	25
6. Осаждение 5 слоя Mg	75	75
7. Осаждение 6 слоя Si	25	25
8. Осаждение 7 слоя Mg	75	–
9. Осаждение 8 слоя Si	25	–
10. Определение расчетной толщины	400	300

## 2.3 Результаты исследования in-situ тонких пленок Mg<sub>2</sub>Si

### 2.3.1 Анализ спектров оже-электронов

Контроль этапов формирования пленок Mg<sub>2</sub>Si методом ЭОС был проведен для каждого отдельного слоя. Полученные спектры оже-электронов каждого слоя пленки первого и второго образцов, представлены на рисунке 34.

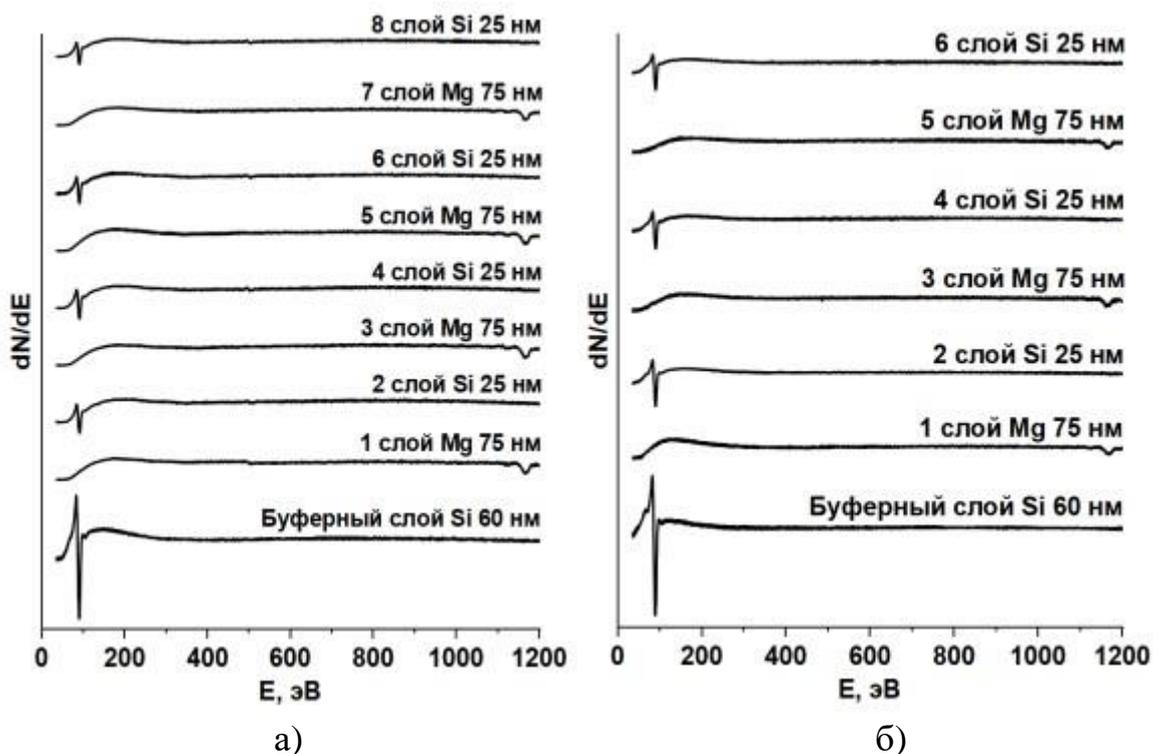


Рисунок 34 – Спектры энергии оже-электронов первого образца (а), второго образца (б)

Анализируя спектры первого и второго образца с буферного слоя Si (нижний слой на графиках), можно наблюдать характерный кремнию обратный интенсивный пик с энергией 92 эВ, что подтверждается по атласу спектров оже-электронов (Приложение А).

На рисунке 34, а графики слоев магния, лежащие выше буферного слоя (1, 3, 5 и 7 слой Mg толщиной 75 нм), имеют обратные рефлексии с энергией 1186 эВ, которые по тому же атласу оже-спектров указывают на присутствие атомов Mg в составе пленки образца 1.

При исследовании кривых 2, 4, 6 и 8 слоев Si толщиной 25 нм, заметны обратные пики с энергией 92 эВ, что как было доказано ранее соответствует кремнию, интенсивность пиков по сравнению с буферным слоем отличается в меньшую сторону.

Сравнивая интенсивности пиков соотносящихся слоев, то есть все слои Mg между собой и все слои кремния между собой в представленном спектре на рисунке 34, а, можно утверждать, что разница амплитуд незначительная.

По такому же принципу, что и с первым образцом, для образца 2 (рисунки 34, б) слои 1, 3 и 5 в своем составе имеют атомы магния, что подтверждается таким же источником.

Спектр оже-электронов второго образца для 2, 4 и 6 слоев Si, по описанию не отличается от соответствующих слоев толщиной 25 нм ранее проанализированного образца.

Проводя сравнение двух приведенных спектров, можно заключить, что интенсивность обратных рефлексов для слоев кремния больше у второго образца, чем у первого, а для слоев магния наоборот. Сравнивая буферные слои по интенсивности пиков больше наблюдается во втором спектре (рисунок 34, б).

Кроме пиков энергий, соответствующих атомам составляющим пленку силицида магния, наблюдается оже-пики малой амплитуды, по сравнению с рефлексами Mg и при том только в нечетных слоях первого образца. По уже ранее упоминавшемуся атласу оже-спектров (Приложение А) энергия пика 503 эВ соответствует атому кислорода ( $O_2$ ), который в данном эксперименте является примесью.

Таким образом по результатам анализа спектров оже-электронов каждого слоя пленки двух образцов, было установлено наличие атомов Mg (1186 эВ) и Si (92 эВ) наблюдается в соответствующих слоях обоих образцов. Для пленки силицида магния первого образца помимо атомов Mg и Si, присутствуют и атомы примеси ( $O_2$ ).

### 2.3.2 Анализ спектров характеристических потерь энергии электронами

Помимо метода ЭОС контроль ростового эксперимента по образованию пленок  $Mg_2Si$  проводился и методом СХПЭЭ. На рисунке 35 под буквами (а) и (б) представлены спектры характеристических потерь энергии электронами двух образцов.

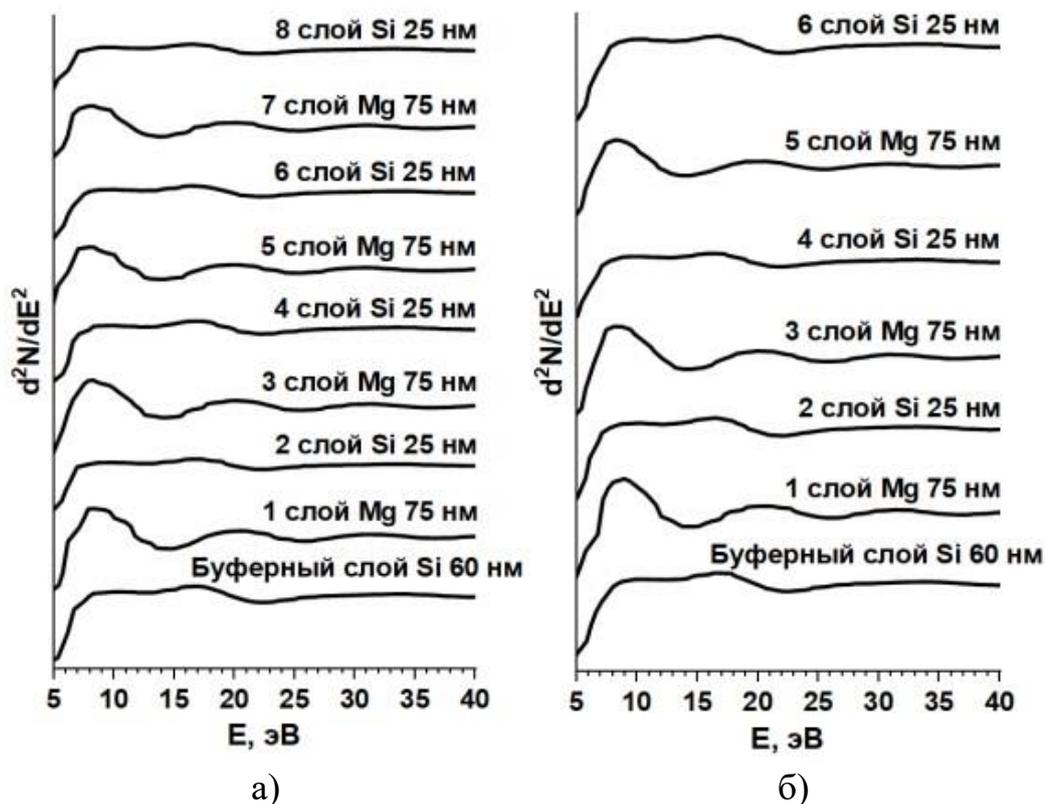


Рисунок 35 – Спектры ХПЭЭ первого образца (а), второго образца (б)

Анализ спектров ХПЭЭ, соответствующий буферному слою кремния, показал, что два пика потерь присутствуют на обоих спектрах с энергиями 8,2 и 17,5 эВ для образца 1, а для образца 2 пики с энергиями 8,5 и 17,1 эВ (рисунок 35). Эти пики свидетельствуют о возбуждении поверхностного и объемного плазмонов чистого Si, по данным из справочника [55] здесь и далее.

На рисунке 35 на графиках 1 слоя (Mg толщиной 75 нм), заметны интенсивные пики с энергией 8,0 эВ для первого образца и не менее заметный пик с энергией 8,1 эВ для второго образца. Широкий рефлекс с максимумом при 20,5 эВ наблюдаются на спектре под буквой (а), а под буквой (б) рефлекс с максимумом при 20,2 эВ. Эти пики указывают на возбуждение поверхностного и объемного

плазмонов Mg соответственно [55]. О двукратном возбуждении объемного плазмона  $Mg_2Si$  свидетельствует пик малой интенсивности при 31,0 и 31,2 эВ для первого и второго образца соответственно. Менее интенсивные рефлекссы ХПЭЭ несут информацию о многократном возбуждении плазмонов.

Сравнивая четные слои спектров (кремния толщиной 25 нм) относительно буферного слоя, заметим, что незначительное смещение поверхностных и объемных плазмонов по энергии в меньшую сторону наблюдается для обоих образцов, а также их уширение.

Анализируя нечетные слои спектров ХПЭЭ соответствующих магнию толщиной 75 нм (рисунок 35) и сравнивая их относительно первого слоя Mg, можно наблюдать, незначительный сдвиг поверхностных плазмонов магния в сторону увеличения энергии для первого и второго образца соответственно. Помимо этого, на спектрах видно уширение рефлекса при 20,5 и 31,0 эВ для первого образца (рисунок 35, а) и 20,2 и 31,2 эВ – для второго образца (рисунок 35, б). Это свидетельствует о том, что процесс силицидообразования у данных пленок произошел.

Таким образом, в результате контроля формирования пленок методом СХПЭЭ было установлено, что процесс силицидообразования для обеих пленок образцов произошел. Подтверждение тому согласно [55] является присутствие пика малой амплитуды с энергией 8,0 эВ у образца 1 и 8,1 эВ – у образца 2. Смещение пиков поверхностного и объемного плазмона магния в сторону увеличения энергии, а поверхностного плазмона кремния в сторону уменьшения энергии, может также подтверждать факт образования пленки силицида в обоих образцах.

## **2.4 Результаты исследования ex-situ тонких пленок $Mg_2Si$**

### **2.4.1 Анализ ИК-спектров**

В ходе выполнения ВКР помимо исследований тонких пленок силицида магния in-situ было проведено исследование оптических свойств образцов и ex-situ. С помощью прибора Bruker VERTEX 80v методом ИК-УФ спектроскопии были получены спектры, которые представлены на рисунке 36.

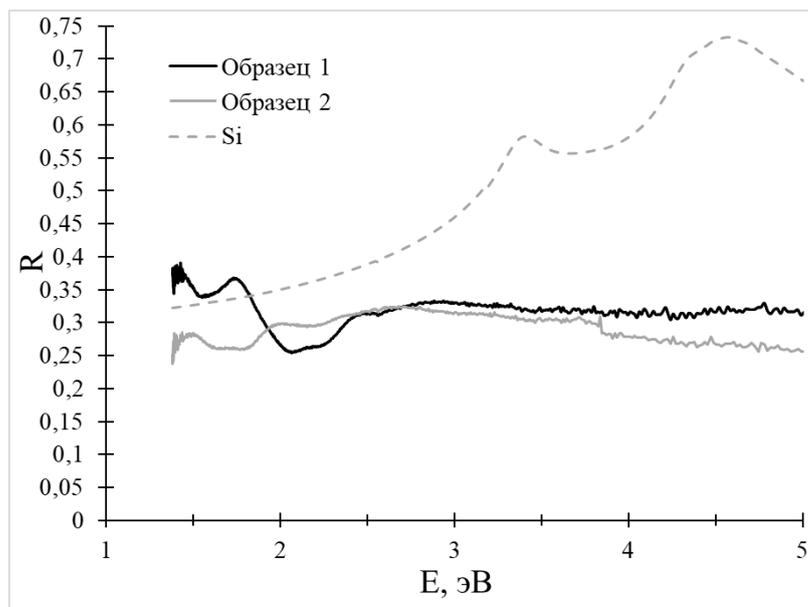


Рисунок 36 – Спектры отражения образцов ИК-УФ диапазона

Проводя анализ полученных спектров отражения в диапазоне ИК-УФ (рисунок 36), можно наблюдать на графике, соответствующем Si, максимумы свойственные для монокристаллического кремния (3,35 и 4,50 эВ) [56].

Сопоставив графики, первого и второго образца, со спектром чистого кремния, видно, что в ИК-области у них происходит монотонное уменьшение коэффициента отражения (на рисунке 36 – ось R) в интервалах энергий (ось E, эВ): от 1,5 до 1,6 эВ (образец 1), и от 1,45 до 1,55 эВ (образец 2). У монокристаллического Si в отличие образцов, данный график в этой области возрастает. Все ранее упомянутое обусловлено уменьшением вклада от многократного отражения света в подложке Si (111), а также уменьшением прозрачности пленок силицида магния. Для второго образца наблюдается пик присущий для  $Mg_2Si$  (энергия  $\sim 2,0$  эВ) [57]. Для первого образца пик характерный для  $Mg_2Si$  уширяется, сдвигаясь в область больших энергий  $\sim 2,2$  эВ и имеет меньшую амплитуду. Объяснение этому может быть связано с увеличением напряжений в его структуре.

Таким образом, методом ИК-УФ спектроскопии в составе сформированных при температуре 250 °C пленках для обоих образцов определено наличие силицида магния по пикам с энергиями 2,0 и 2,2 эВ, согласно [57].

## 2.4.2 Анализ картин атомно-силовой микроскопии

Для исследования ex-situ морфологии поверхности сформированных пленок, исследуемых образцов, использовался атомно-силовой микроскоп Solver P47. Методом АСМ были получены их изображения рисунок 37.

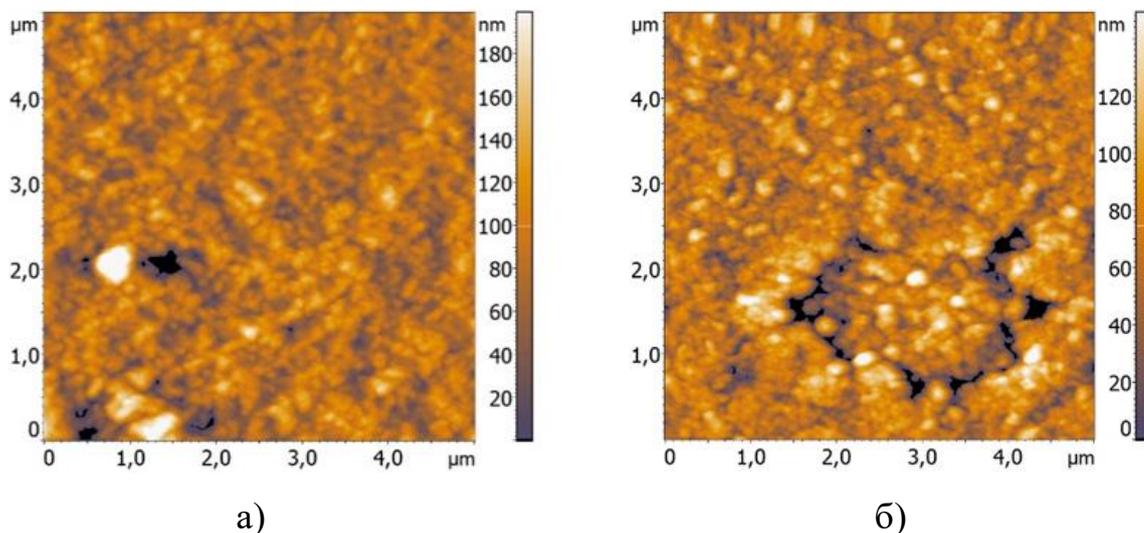


Рисунок 37 – 2D-АСМ изображение образца 1 (а), образца 2 (б)

Из анализа данных изображений установлено, что для обоих образцов рост пленки идет по типу Вольмера-Вебера (островковый тип). У первого образца, как и у второго видны островки, отличающиеся размером (для образца 1 размеры составляют от 0,1 до 0,3 мкм, для образца 2 – от 0,2 до 0,4 мкм). У второго образца (рисунок 37, б) отчетливо видны зерна, образовавшиеся вследствие коалесценции (срастания) островков между собой, чего не наблюдается у первого образца (рисунок 37, а). Длина зерен составляет от 0,5 до 1,5 мкм, ширина – от 0,5 до 1 мкм, средняя площадь 0,70 мкм<sup>2</sup>. Помимо островков и зерен, в рельефе образцов наблюдаются проколы. Для первого образца средняя площадь проколов – 0,10 мкм<sup>2</sup>, для второго – 0,12 мкм<sup>2</sup>. Во втором образце наблюдается значительно большее количество проколов по сравнению с первым. Наличие проколов у пленок может быть связано с десорбцией атомов Mg в данных областях. Расчет средней шероховатости плёнок составил для первого образца – 29,6 нм, а для второго – 26,2 нм.

Таким образом методом АСМ установлено, что формирование обеих пленок осуществлялось по типу Вольмера-Вебера. Были определены размеры островков, так для первого образца пленки составили от 0,1 до 0,3 мкм, для второго от 0,2 до 0,4 мкм. У образца 2 на АСМ-картине (рисунок 37, б) наблюдаются зерна, образовавшиеся вследствие коалесценции островков, в то время как у первого образца зерен не наблюдается. Средняя площадь зерен составляет 0,70 мкм<sup>2</sup>. Из расчета шероховатости пленок установлено, что для первого образца средняя шероховатость – 29,6 нм, а для второго – 26,2 нм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения свойств силицида магния в объемном и низкоразмерном состоянии следует, что  $Mg_2Si$  в низкоразмерном состоянии более подходит под использование в качестве материала для приборных структур по сравнению с другими материалами. Поскольку  $Mg_2Si$  обладает широким диапазоном fotocувствительности от 200 до 2100 нм и малой шириной запрещенной зоны.

Однако было отмечено, что существуют определенные трудности в формировании тонкопленочного  $Mg_2Si$  (низкий коэффициент прилипания Mg к Si) и поэтому были рассмотрены методы его получения. В результате было установлено, что силицид магния можно формировать методом РЭ при температуре 250 °С на кремнии. Для контроля за формированием тонких пленок  $Mg_2Si$  были предложены следующие методы: метод оже-электронной спектроскопии, который позволяет определить элементный состав для каждого слоя формируемой пленки; метод СХПЭЭ, позволяющий установить процесс силицидообразования. Для изучения ex-situ анализ морфологии поверхности – метод АСМ, а также оптических свойств пленки  $Mg_2Si$  – метод ИК-спектроскопии.

В ходе выполнения бакалаврской работы был спроектированный программируемый генератор синусоидального сигнала, построенный на современной элементной базе. Управление генератором осуществляется с использованием разработанного программного обеспечения. Проведенные тестовые испытания лабораторного прототипа показали, что точность задаваемой частоты выходного сигнала соответствует 1 Гц, в диапазоне от 5 до 6 кГц. К генератору возможно подключать одновременно два устройства. Габаритные характеристики лабораторного образца в четыре раза ниже габаритных характеристик ранее использовавшегося генератора ГЗ-111. Разработанный генератор прошел успешные испытания в составе прибора РНІ-590.

Сформированы методом РЭ на Si (111) тонкие пленки  $Mg_2Si$  с расчетными толщинами 400 нм и 300 нм для первого и второго образца соответственно при температуре прогрева подложек до 250 °С – для обоих образцов.

Таким образом по результатам экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Методом ЭОС определено наличие атомов Mg и Si в сформированных методом РЭ пленках. Методом СХПЭЭ установлено силицидообразование в этих пленках.

2. Методом ИК-УФ спектроскопии в составе сформированных при температуре 250 °С пленках для обоих образцов определено наличие силицида магния по пикам с энергиями 2,0 и 2,2 эВ.

3. Методом АСМ установлено, что формирование обеих пленок осуществлялось по типу Вольмера-Вебера. Определены средние размеры островков (для образца 1 составили от 0,1 до 0,3 мкм, для образца 2 – от 0,2 до 0,4 мкм). Для второго образца наблюдается коалесценция островков со средней площадью зерен 0,70 мкм<sup>2</sup>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Galkin, N.G. «Multilayer Si (111) / Mg<sub>2</sub>Si clusters / Si heterostructures: formation, optical and thermoelectric properties» [Электронный ресурс]: / N.G. Galkin, K.N. Galkin, S.V. Vavanova // e-journal of Surface Science and Nanotechnology. – 2005. – Vol. 3. – P. 12-20. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1380/ejssnt.2005.12>. – 19.01.2024.

2 Галкин, К.Н. Исследование начальных стадий роста Mg на Si (111) при комнатной температуре методами оптической и электронной спектроскопии [Электронный ресурс]: / К.Н. Галкин, С.А. Доценко, Н.Г. Галкин // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42. – Вып.4. – С. 485-490. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20317422>. – 22.01.2024.

3 Infrared photoresponse from p-n-junction Mg<sub>2</sub>Si diodes fabricated by thermal diffusion [Электронный ресурс]: / H. Uono [et al.] // J. Phys. Chem. Solids – 2013. – Vol.74. – P. 311-314. – Режим доступа: <https://www.sfu.ca/~kavanagh/Phys%20365/Reading/1-s2.0-S0022369712003228-main.pdf> – 23.01.2024.

4 Соболев, В. В. Свойства фундаментальных оптических функций силицида магния [Электронный ресурс]: / В. В. Соболев // Прикладная спектроскопия. – 2018. – Т. 85. – № 4. – С. 576-583. – Режим доступа: <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/283/283>. – 24.01.2024.

5 Луняков, Ю.В. Силицид Mg<sub>2</sub>Si под давлением: результаты эволюционного поиска из первых принципов [Электронный ресурс]: / Ю.В. Луняков // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – Вып. 5. – С. 783-787. – Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/49248>. – 27.01.2024.

6 Dioum, A. First-Principles Investigation of Electronic and Related Properties of Cubic Magnesium Silicide (Mg<sub>2</sub>Si) [Электронный ресурс]: / A. Dioum, Y.I. Diakite, Y. Malozovsky, B.A. Ayirizia, A.C. Beye, D. Bagayoko // Computation – 2023. – № 11(40). – P. 1-14. – <https://www.mdpi.com/2079-3197/11/2/40/htm>. – 30.01.2024.

7 Toriyama, M.Y. Chemical Interpretation of Charged Point Defects in Semiconductors: A Case Study of Mg<sub>2</sub>Si [Электронный ресурс]: / M.Y. Toriyama, M.K. Brod,

G.J. Snyder // ChemNanomat. – 2021. – V. 8. – № 9. – P. 1–10. – Режим доступа: <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/61215f8730688d2cee967305>. – 02.02.2024.

8 Stathokostopoulos, D. Synthesis and characterization of nanostructured Mg<sub>2</sub>Si by pack cementation process [Электронный ресурс]: / D. Stathokostopoulos, A. Teknetzi, E. Tarani, D. Karfaridis, K. Chrissafis, E. Hatzikraniotis, G. Vourlias // Results in Materials. – 2022. – Vol. 13. – № 1. – P. 100-252. – Режим доступа: <https://orcid.org/0000-0002-4252-5257>. – 06.02.2024.

9 Шапошников, В.Л. Effect of pressure on electronic and properties of magnesium silicide and germanide [Электронный ресурс]: / В.Л. Шапошников, А. В. Кривошеина, В.Е. Борисенко // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. – № 1. – С. 74–81. – Режим доступа <https://journals.bsu.by/index.php/physics/article/view/427>. – 09.02.2024.

10 Ramirez, D.C. Large Scale Solid State Synthetic Technique for High Performance Thermoelectric Materials: Magnesium-Silicide-Stannide [Электронный ресурс]: / D.C. Ramirez [et al.] // ACS Applied Energy Materials. – 2020. – Vol. 3. – № 3. – PP. 2130-2136. – Режим доступа: <https://www.researcher-app.com/paper/4207113>. – 20.02.2024.

11 Галкин, К.Н. Формирование низкоразмерного полупроводникового силицида магния и наногетероструктур на его основе [Электронный ресурс]: диссер. на соискание канд. физ.-мат наук: 01.04.10 / К.Н. Галкин. – Владивосток. – 2009. – 188 с. – Режим доступа: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01004422863.pdf](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004422863.pdf). – 22.02.2024.

12 Shevlyagin, A. Probing the Mg<sub>2</sub>Si/Si(111) heterojunction for photovoltaic applications [Электронный ресурс]: / A. Shevlyagin, I. Chernev, N.G. Galkin, A.V. Gerasimenko, Y. Terai, H. Hoshida, N. Nishikawa, K. Ohdaira, A. Gutakovskii // Solar Energy. – 2020. – Vol. 211. – P. 383–395. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20310318>. – 24.02.2024.

13 Ваванова, С.В. Формирование, структура и свойства тонких пленок силицида магния на Si (111) [Электронный ресурс]: диссер. на соискание канд. физ.-мат наук: 01.04.07 / С.В. Ваванова. – Владивосток. – 2007. – 152 с. – Режим доступа: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01003343046.pdf](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003343046.pdf). – 27.02.2024.

14 Санько, С.А. Электронные средства и системы управления [Электронный ресурс] / С.А. Санько, Д.Д. Каримбаев, Ю.С. Жидик // Материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2020. – С. 103–106. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002879144>. – 29.02.2024.

15 Поляков, А.В. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев [Электронный ресурс] // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т. 11. – № 1, – С. 52-60. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50329828>. – 01.03.2024.

16 Hong, Yu. Simulation Study on the Effect of Doping Concentrations on the Photodetection Properties of Mg<sub>2</sub>Si/Si Heterojunction Photodetector [Электронный ресурс] / Yu. Hong [et al.] // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – № 11, – P. 509. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2304-6732/8/11/509>. – 04.03.2024.

17 Shevlyagin, A. V. Textured Stainless Steel as a Platform for Black Mg<sub>2</sub>Si/Si Heterojunction Solar Cells with Advanced Photovoltaic Performance [Электронный ресурс] / A. V. Shevlyagin [et al.] // Materials, 2022. – Vol.15. – № 19, – P. 6637. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/19/6637>. – 07.03.2024.

18 Галкин, К.Н. «In situ дос и ХПЭЭ исследования десорбции и роста в системе Si (111)/2D Mg<sub>2</sub>Si/Si» [Электронный ресурс] / К.Н. Галкин, С.А. Доценко, Н.Г. Галкин // Химическая физика и мезоскопия. – 2009. – Vol. 11. – № 3. – P. 334-344. – Режим доступа: <https://iacp-web.dvo.ru/russian/results/2009.html>. – 08.03.2024.

19 Эгамбердиев, Б.Э. Получение пленок CoSi<sub>2</sub>/Si (100) и анализ их морфологии и стехиометрии методами молекулярно-лучевой, твердофазной и реактивной эпитаксии [Электронный ресурс] / Б.Э. Эгамбердиев,, Б.Ч. Холлиев,, А.С. Маллаев, М.Э. Зоирова, and А. Эшонхонов // ЭОМ. – 2007 № 1. – pp. 88-92. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-plenok-sosi2-si-100-i-analiz-ih-morfologii-i>

stehiometrii-metodami-molekulyarno-luchevoiy-tverdofaznoy-i-reaktivnoy-epitaksii-  
11.03.2024.

20 Гомоюнова, М.В. Реактивная эпитаксия дисилицида кобальта на Si (111) [Электронный ресурс]: / М.В. Гомоюнова, И.И. Пронин, Д.А. Валдайцев, Н.С. Фараджев // ФТТ. – 2001. – Т. 43. – Вып.3. – С. 549. – Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38105>. – 12.03.2024.

21 Поляков, А.В. Исследование методом электронной оже-спектроскопии тонких пленок силицида магния, сформированных на Si (111) / А.В. Поляков, И.О. Шолыгин, И.А. Рябов [и др.] // Молодёжь XXI века: шаг в будущее: Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск: ДальГАУ. – 2022. – Т. 4. – С. 166-168. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=slvxqm>. – 13.03.2024.

22 Фомин, Д.В. Формирование тонких пленок  $Mg_2Si$  на Si (111) и исследование их методом ЭОС и СХПЭЭ. [Электронный ресурс]: / Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев, Д.О. Струков, А.В. Поляков // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2021. – № 93. – С. 30-34. – Режим доступа: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01003343046.pdf](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003343046.pdf). – 15.03.2024.

23 Доценко, С.А. Оптические свойства пленки полупроводникового силицида  $Mg_2Si$  на Si(111) в области температурной стабильности [Электронный ресурс]: /С.А. Доценко, Д.В. Фомин, К.Н. Галкин, Н.Г. Галкин // Химическая физика и мезоскопия. – 2010. – Vol. 12. – № 3. – С. 376-381. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18254046>. – 16.03.2024.

24 Галкин, Н.Г. "Рост, структура и оптическое отражение пленок силицида магния, выращенных на пористом кремнии в условиях высокого вакуума" [Электронный ресурс]: / Н.Г. Галкин, А.В. Шевлягин, В.М. Ильященко, Д.Т. Ян, К.Н. Галкин // Химическая физика и мезоскопия. – 2023. – Vol. 25. – № 2. – С. 170-185. – Режим доступа: [https://udman.ru/ru/book/cpm/2023/2/4\\_Galkin\\_Shevlyagin\\_Pyashchenko\\_Yan\\_Galkin.pdf](https://udman.ru/ru/book/cpm/2023/2/4_Galkin_Shevlyagin_Pyashchenko_Yan_Galkin.pdf). – 17.03.2024.

25 Оура, К. Введение в физику поверхности [Электронный ресурс]: / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. – М.: Наука. – 2006. – 490 с. – Режим доступа: <https://djvu.online/file/rmyH8upxprRcVP>. – 19.03.2024.

26 Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета // Казань, – 2010. – 87 с. Издание 2-е, исправленное и дополненное. – Режим доступа: [http://www.ksu.ru/f6/k5/bin\\_files/petukhov\\_ibm!33.pdf](http://www.ksu.ru/f6/k5/bin_files/petukhov_ibm!33.pdf) – 20.03.2024.

27 Левичев, В.В. Электронные и фотонные устройства: принцип работы, технологии изготовления / В.В. Левичев. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.

28 Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей IX Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 27 июня 2017 года. Том Часть 2. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – 318 с. – ISBN 978-5-906973-56-6. – EDN YTIRLF.

29 Маскаева, Л. Н. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие [Электронный ресурс]: / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2019. – 236 с. – Режим доступа: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/73905>. – 22.03.2024.

30 Лобанов, Д.Н. Метод молекулярно- пучковой эпитаксии и его применение для формирования SiGe наноструктур: практикум / Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, З.Ф. Красильник. – ННГУ, 2010.

31 Николичев, Д.Е. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии: учеб.-метод. пособие / Д.Е. Николичев, А.В. Боряков. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2011. – 110 с.

32 Акулинин, С.А. Электрофизические методы контроля технологических процессов в микроэлектронике и нанoeлектронике: учеб. пособие / С.А. Акулинин, С.А. Минаков. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2006. – 133 с.

33 Фомин, Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела: учеб. пособие / Д.В. Фомин. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2014. – 184 с.

34 Углов, В. В. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев: пособие для студентов спец. 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)» и 1-31 04 02 «Радиофизика» / В. В. Углов, Н. Н. Черенда, В. М. Анищик. – Минск : БГУ, 2007. – 167 с. : ил. ISBN 978-985-485-813-5.

35 Еловигов, С.С. Оже-электронная спектроскопия: статья / С.С. Еловигов // Соровский образовательный журнал, Т.7, № 2, 2001 – С. 82-88.

36 Родзевич, А.П. Методы анализа и контроля веществ: учебное пособие / А.П. Родзевич, Е.Г. Газенаур; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 312 с.

37 Куражковская, В.С. Инфракрасная и мессбауэровская спектроскопия кристаллов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.С. Куражковская, Е.Ю. Боровикова – М.: Геологический факультет. – 2008. – 101 с. – Режим доступа: [http://cryst.geol.msu.ru/appliances/UR\\_sp.pdf](http://cryst.geol.msu.ru/appliances/UR_sp.pdf). – 27.03.2024.

38 Ситникова, В.Е. Практикум по колебательной спектроскопии [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.Н. Носенко, В.Е. Ситникова, И.Е. Стрельникова, М.И. Фокина – СПб: Университет ИТМО. – 2021. – 173 с. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2735.pdf>. – 28.03.2024.

39 Нечипоренко, А.П. Специализированный практикум по физикохимическим методам анализа: электронная и ИК-спектроскопия отражения, люминесцентная и рентгенофлуоресцентная спектроскопия, рефрактометрия, термометрия, кинетическая рН-метрия, индикаторный метод – РЦА. Теория и практика. Часть II: учеб.-метод. пособие / А.П. Нечипоренко, С.М. Орехова, Л.В. Плотникова, Е.Н. Глазачева, К.В. Волкова, М.В. Успенская. – СПб.: университет ИТМО, 2016. – 181с.

40 Haw, J.F. Handbook of Spectroscopy. Edited by G. Gauglitz and T. Vo-Dinh. [Электронный ресурс] / J.F. Haw // Weinheim: Verlag GmbH & Co. KGaA, – 2003.

– 538 с. – Режим доступа: <https://www.wiley.com/en-us/Handbook+of+Spectroscopy-p-9783527605026>. – 03.04.2024.

41 Дедкова, Е.Г. Приборы и методы зондовой микроскопии [Электронный ресурс]: учебное пособие / Е.Г. Дедкова, А.А. Чуприк, И.И. Бобринецкий, В.К. Неволин // М.: – 2011. – 159 с. – Режим доступа: <https://ru.z-library.se/book/3207322/39dd4c>. – 04.04.2024.

42 Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. [Электронный ресурс]: / В.Л. Миронов // М.: Техносфера. – 2005. – 144 с. – Режим доступа: <https://djvu.online/file/TQZs8zLCvIGCq>. – 10.04.2024.

43 Зондовая нанолaborатория ИНТЕГРА. Проведение измерений. АСМ и СТМ измерения, спектроскопия, многопроходные методы, литография. Руководство пользователя. Зеленоград: НТ-МДТ. – 2007. – 353 с.

44 Low-frequency signal generator GZ-111. Technical description and instructions for operation of SZHP 66 8613 OSH Approved: EX3.26K1Y8 TO—LU. – 1985. – pp. 4-47.

45 Grigoriev, A. A. Analysis of physical processes of wear of electrical contacts of switching low-voltage devices / A. A. Grigoriev, M. A. Vatkina // Bulletin of the I.Ya. Yakovlev ChSPU. – 2014. – №2 (82). – С.3-13.

46 Fomin, D.V. A device for automatic switching of load power sources / D. V. Fomin, D. O. Strukov, A.V. Pol-yakov // Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences. – 2022. – No. 97. – pp. 54-58. – DOI 10.22250/20730268\_2022\_97\_54. – EDN RTPAER.

47 Computer prototyping of a device for registering optical properties of thermoregulating coatings / D. V. Fomin, R. A. Buzikov, A. E. Voronkov [et al.] // Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences. - 2023. – No. 101. – pp. 50-59. – DOI 10.22250/20730268\_2023\_101\_50. – EDN CJOHOU.

48 CH340E datasheet [Электронный ресурс] / <http://wch.cn/> – 2017. – Режим доступа: <https://www.alldatasheetru.com/datasheet/pdf/pdf/1817212/WCH/CH340E.html> – 15.04.2024.

49 ADuM1200/ADuM1201 datasheet [Электронный ресурс] / [www.analog.com](http://www.analog.com) – 2021. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/721/DOC028721238.pdf> – Дата доступа: 18.04.2024.

50 Arduino Pro Mini [Электронный ресурс] / [arduino.cc](http://arduino.cc) – 2017. – Режим доступа: <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardProMini> – Дата доступа: 21.04.2024.

51 Shchepotyev, I. A. Laboratory stand for generating a frequency grid based on a microcontroller / I. A. Shchepotyev, G. S. Voronkov // Youth Bulletin of UGATU. – 2023. – № 2(28). – Pp. 153-157. – EDN VJUOWF.

52 AD9833 datasheet [Electronic resource] / [site:analog.com](http://site:analog.com) . – 2017. – Pre-stop mode: <https://download.mikroe.com/documents/datasheets/AD9833.pdf> . – Access date: 25.04.2024.

53 Lm358 datasheet [Electronic resource] / [alldatashit.com](http://alldatashit.com) . – 2017. – Access mode: <https://html.alldatasheet.com/htmlpdf/3067/MOTOROLA/LM358/256/1/LM358.html> . – Yes, that access: 29.04.2024.

54 XL6007 datasheet [Electronic resource] / [www.xlsemi.com](http://www.xlsemi.com) . – 2018. – Pre-stop mode: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132228/XLSEMI/XL6009.html> . – 06.05.2024.

55 Лифшиц, В.Г. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии / В.Г. Лифшиц, Ю.В. Луняков // Рос. акад. наук, Дальневост. отд-ние, Ин-т автоматике и процессов упр. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 314 с.

56 Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.] // Журнал технической физики. – Т.83. – вып.1, 2013. – С.99-104.

57 Borisenko, V.E. Semiconducting Silicide. / Ed. V.E. Borisenko. Berlin: SpringerVerlag. 2000. 394 p

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Атлас Оже-спектров

