

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

Факультет инженерно-физический

Кафедра физики

Направление подготовки 03.03.02 – Физика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова


«16» июня 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Формирование тонких пленок силицида магния на кремнии методом реактивной эпитаксии и исследование их оптическими методами


Исполнитель

студент группы 911-об

 23.06.2023 И.О. Шолыгин  
(подпись, дата)


Руководитель

доцент, канд. физ.-мат. наук

 24.06.2023 Д.В. Фомин  
(подпись, дата)

Нормоконтроль

доцент, канд. физ.-мат. наук

 26.06.2023 О.В. Зотова  
(подпись, дата)

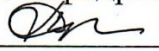
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова  
«20» апреля 2023 г.

### З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Шолыгина Ильи Олеговича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Формирование тонких пленок силицида магния на кремнии методом реактивной эпитаксии и исследование их оптическими методами

(утверждена приказом от 20.04.2023 № 951-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 23.06.2023

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): результаты формирования тонких пленок  $Mg_2Si$  на кремнии методом РЭ, представленные на основе исследований методами ЭОС и СХПЭЭ, ИК, и рамановской спектроскопии

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

6. Консультанты: нет

7. Дата выдачи задания: 20.04.2023

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

Задание принял к исполнению (дата): 20.04.2023

  
(подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 58 с., 37 рисунков, 3 таблицы, 2 приложения, 29 источников.

СИЛИЦИД МАГНИЯ, РЕАКТИВНАЯ ЭПИТАКСИЯ, СВЕРХВЫСОКО-  
ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, ОЖЕ–ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, СПЕК-  
ТРОСКОПИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРО-  
НАМИ, ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРО-  
СКОПИЯ

Цель выпускной квалификационной работы: формирование тонких пленок силицида магния на кремнии методом реактивной эпитаксии и исследование их оптическими методами.

В данной работе представлены результаты формирования тонких пленок силицида магния на двух образцах. Пленки формировались методом реактивной эпитаксии. Процесс роста пленок контролировался *in situ* методами ЭОС и СХПЭЭ. Исследование тонких пленок проводилось *ex situ* методами инфракрасной и рамановской спектроскопии, которые показали наличие  $Mg_2Si$  в составе пленки одного из образцов.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Теоретическая часть	8
1.1 Объект исследования	8
1.2 Методы формирования тонких пленок	14
1.3 Методы исследования	19
1.3.1 Электронная оже-спектроскопия	19
1.3.2 Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами	23
1.3.3 Инфракрасная спектроскопия	25
1.3.4 Рамановская спектроскопия	27
2 Экспериментальная часть	30
2.1 Оборудование, использованное в эксперименте	30
2.1.1 СВВ камера Varian и прибор РНІ 590	30
2.1.2 Система откачки	32
2.1.3 Измеритель толщины пленок	33
2.1.4 Фурье-спектрометр и автоматизированная АСМ – Раман система	34
2.1.5 Лабораторный речевой информатор	35
2.2 Формирование тонких пленок $Mg_2Si$ методом РЭ на кремнии	38
2.2.1 Подготовка образцов и источников	38
2.2.2 Этапы формирования образцов	39
2.3 Результаты исследования сформированных пленок	41
2.3.1 Метод электронной оже-спектроскопии	41
2.3.2 Метод спектроскопии ХПЭЭ	43
2.3.3 Метод инфракрасной спектроскопии	44
2.3.4 Метод рамановской спектроскопии	47
Заключение	50
Библиографический список	52
Приложение А Эталоны спектров оже-электронов для Mg, Si, O и C	55
Приложение Б Апробация результатов исследований	57

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- АСМ – атомно-силовой микроскоп;
- ДБЭ – дифракция быстрых электронов;
- ИК – инфракрасный;
- КРС – комбинационное рассеяние света;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- РЭ – реактивная эпитаксия;
- РФА – рентгенофазовый анализ;
- СХПЭЭ – спектроскопия характеристических потерь энергии электронами;
- СВВ камера – сверхвысоковакуумная камера;
- ТФЭ – твердофазная эпитаксия;
- ХЛЭ – химическая лучевая эпитаксия;
- ЭОС – электронная оже-спектроскопия.

## ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления современных радиоэлектронных компонентов необходимо проводить поиск и исследование новых полупроводниковых материалов, обладающих лучшими свойствами по сравнению с уже используемыми.

Большие возможности для получения полупроводниковых материалов открылись благодаря развитию нанотехнологий, позволяющих задействовать квантовые эффекты. К наноматериалам относят материалы, геометрические размеры которых не превышают 100 нм хотя бы в одном измерении. С этой точки зрения тонкие пленки полупроводниковых соединений, полученных на кремниевых подложках, можно рассматривать как источник нового материала.

Радиоэлектронные полупроводниковые компоненты нашли широкое применение в промышленности и в приборах массового потребления. Одним из таких компонентов являются оптроны. Данные оптоэлектронные приборы повсеместно используются для гальванической развязки, защиты цепи от скачков напряжения и передачи сигнала. Также оптоэлектронные приборы нашли свое применение в датчиках света, инфракрасных датчиках движения и оптических методах контроля качества продукции на производствах. Последнее активно применяется в металлургическом производстве для контроля качества листового металлопроката. Оптоэлектронные компоненты для конкретной области применения требуют использования в своем составе полупроводниковых соединений, обладающих нужной шириной запрещенной зоны и спектральной областью поглощения излучения в конкретном диапазоне.

По литературным данным, одним из соединений, пригодных для изготовления оптических приборов, является низкоразмерный силицид магния. Материал обладает малой шириной запрещенной зоны 0,7 эВ и высокой подвижностью переносчиков зарядов. Соединение является перспективным для создания на его основе оптоэлектронных приборов, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне, и высокоэффективных термоэлектрических преобразователей.

Главной проблемой создания подобных приборов является сложность

технологии массового производства и дороговизна исходных материалов. Преимущество использования  $Mg_2Si$  для этих целей заключается в относительно легкой технологии формирования силицида магния в виде тонких пленок, которая не требует создания специфичных условий, использования редкоземельных элементов или токсичных веществ. Также силицид магния может быть использован для модификации уже существующих оптических преобразователей, таких как солнечные батареи из монокристаллического кремния, что улучшит светопоглощающие свойства, а следовательно, и КПД солнечных батарей. При этом предполагается, что будет сохраняться низкая стоимость таких приборов.

Таким образом, поиск условий для формирования силицида магния в низкоразмерном состоянии и исследование его свойств является актуальной научной задачей.

Целью выпускной квалификационной работы являлось: формирование тонких пленок силицида магния на кремнии методом реактивной эпитаксии и исследование их оптическими методами.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) сформировать методом реактивной эпитаксии две тонкие пленки силицида магния с толщинами 150 и 120 нм, при температуре прогрева кремниевых подложек 190 °С и 250 °С соответственно;

- 2) исследовать пленки методами ЭОС и СХПЭЭ на каждом этапе формирования;

- 3) провести исследование сформированных пленок методами инфракрасной и рамановской спектроскопии.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Объект исследования

Силицид магния  $Mg_2Si$  представляет собой полупроводниковый силицид, демонстрирующий широкий диапазон поглощения в видимой и ближней инфракрасной области. В объемном состоянии имеет гранецентрированную кубическую решетку с периодом  $a = 6,33 \cdot 10^{-10}$  м. Температура плавления 1375 К и ширина запрещенной зоны со значением 0,77 эВ типичны для так называемых термоэлектриков среднего температурного диапазона от 600 до 1200 К. Высокая термоэлектрическая эффективность связана с высокой подвижностью электронов  $\mu_n=405$  В·с/см<sup>2</sup> и малой подвижностью дырок  $\mu_p=65$  В·с/см<sup>2</sup> (при комнатной температуре) [1; 2].

$Mg_2Si$  обладает невысокой плотностью 1988 кг/м<sup>3</sup>, и имеет наибольшее соотношение термоэлектрической эффективности к плотности среди коммерческих термоэлектриков. В своем объемном состоянии кристаллическая решетка  $Mg_2Si$  показана на рисунке 1.

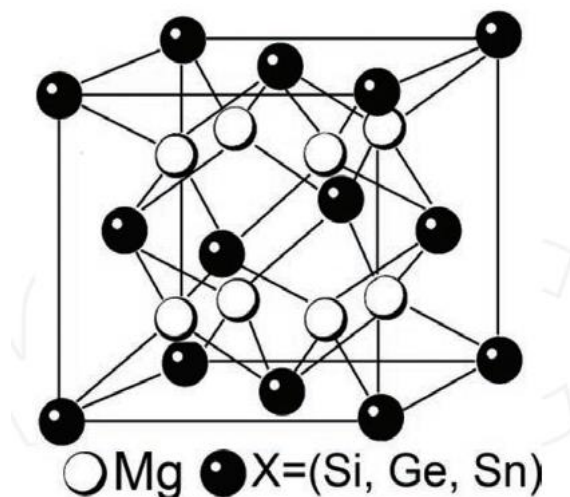


Рисунок 1 – Схема Кристаллической решетки  $Mg_2Si$  [2]

Каждый атом группы X окружен восемью атомами магния в правильном кубе. Связь во всех соединениях ковалентная. Силицид магния образует черные кристаллы с n – типом проводимости, нерастворим в воде и обладает таким свойством как хрупкость [1; 3].

В



первую очередь силицид магния представляет интерес в виде наноструктур для изготовления детекторов, работающих в инфракрасном диапазоне и термоэлектрических устройств, которые предназначены для работы при температурах до 800 К вместе с эти силицид магния обладает максимальный термоэлектрический показатель качества 1,5 [4].

Тонкие пленки, сформированные на различных подложках, включая кремниевые, обладают люминесценцией в видимой от 580 до 630 нм и инфракрасной от 1100 до 1500 нм частях спектра, при комнатной температуре [5].

Силицид магния обладает высоким коэффициентом поглощения 95 % в спектральном диапазоне от 200 до 1800 нм, что в пять раз превышает коэффициент поглощения чистого кремния 17,6 % [5].

Исследование спектров отражения тонкой пленки  $Mg_2Si(111) / Si(111)$  позволило получить энергии прямых переходов при 9 К, которые составили 2,38, 2,58, 2,69 и 2,82 эВ [6].

Кристаллическая решетка пленки  $Mg_2Si$  на Si (111) представлена на рисунке 2.

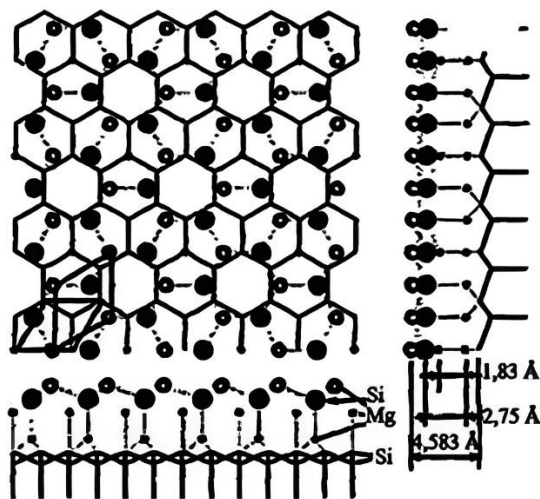


Рисунок 2 – Схема кристаллической решетки пленки  $Mg_2Si / Si(111)$  [4]

В такой модели атомы кремния образуют 3 связи с атомами кремния и 1 связь с атомами магния, поэтому первый слой двумерного силицида магния будет являться последним слоем решетки кремния. При сопряжении решеток Si (111) и  $Mg_2Si(111)$  треть атомов кристаллической решетки находится в

положении  $T_1$  и образуют структуру  $2 \times 2$ , другая треть находится в положении  $T_4$ , и оставшаяся треть в положении  $H_3$ . Атомы составляющие первый слой магния смещены относительно положения  $T_1$  на  $1/3 a_{Si(111)}$ . Атомы, составляющие второй слой магния, занимают позиции в точности над атомами первого слоя кремния, т.е. тоже образуют структуру  $2 \times 2$ . Атомы, составляющие второй слой кремния, располагаются в точности над атомами первого слоя магния. Третий слой магния, как и первый слой, смещен относительно  $T_1$  на  $1/3 a_{Si(111)}$  в другую сторону. В предложенной модели связи Mg - Si фиксированы [7; 8].

Исследование низкоразмерных структур с оптимальной толщиной и легированием силицида магния на кремниевых подложках показало, что эффективность фотоэлектрического преобразования может достигать от 10 % до 12 % для p - n и n - p (Si / Mg<sub>2</sub>Si) и 22 % для n - p - n (Si / Mg<sub>2</sub>Si / Si). Фоточувствительность наблюдается до 2100 нм, а светочувствительность при 1310 нм может достигать нескольких десятков мА/Вт при небольшом обратном напряжении смещения [4].

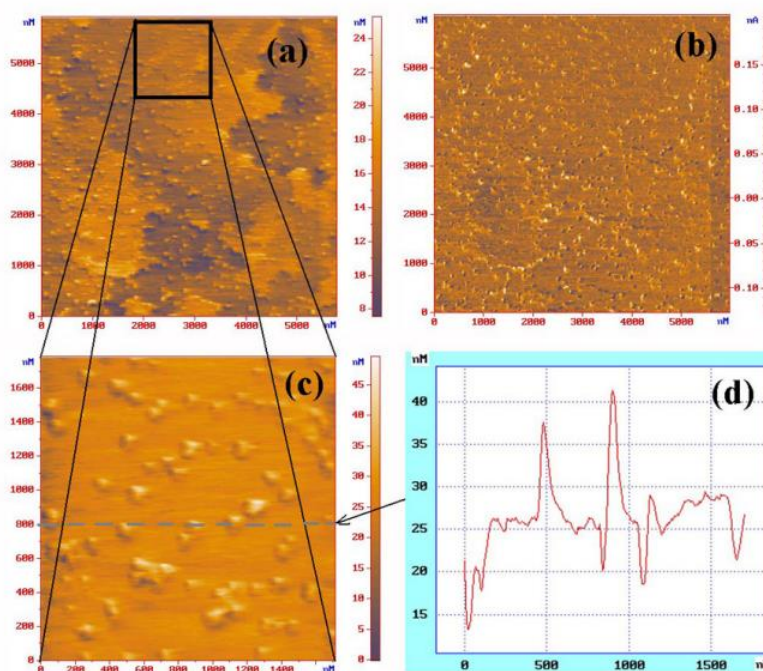
В работе [9] описываются результаты эксперимента по выращиванию на подложке Si (111) захороненных наноразмерных островков силицида магния. Ростовые эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной камере с базовым давлением  $2 \cdot 10^{-10}$  торр, в качестве подложек для пленок использовались пластины Si (111) p - типа, с сопротивлением 10 Ом·см, размерами 5 x 18 x 0,35 мм. Чистота поверхности в ходе эксперимента контролировалась методом Оже-электронной спектроскопии. Испарение магния чистотой 99,999 % проводилось порциями из танталовой трубки, нагреваемой путем пропускания через нее постоянного тока, скорость осаждения составляла  $(0,5 \pm 0,05)$  нм/мин. Кремний осаждался с кремниевой пластины, нагретой переменным током до температуры сублимации.

Слои магния наносились на атомарно чистую поверхность Si (111) с заданной толщиной в один нанометр, при комнатной температуре, после чего проводился отжиг при температуре 380 °С. В ходе этого процесса некоторая часть атомов неизбежно десорбировалась с поверхности подложки [9].

Иная часть атомов вступила в реакцию с атомами подложки, образовав

наноразмерные островки силицида магния. В части образцов островки были покрыты от 20 до 50 нм кремния и обработаны при 650 °С и 750 °С. Аналогичным образом были изготовлены пленки с тремя заглабленными слоями островков с толщиной кремния между ними по 10 нм.

Исследование топографии поверхности проводилось с помощью АСМ в контактном и полуконтактном режиме АСМ изображение островков силицида магния показано на рисунке 3.



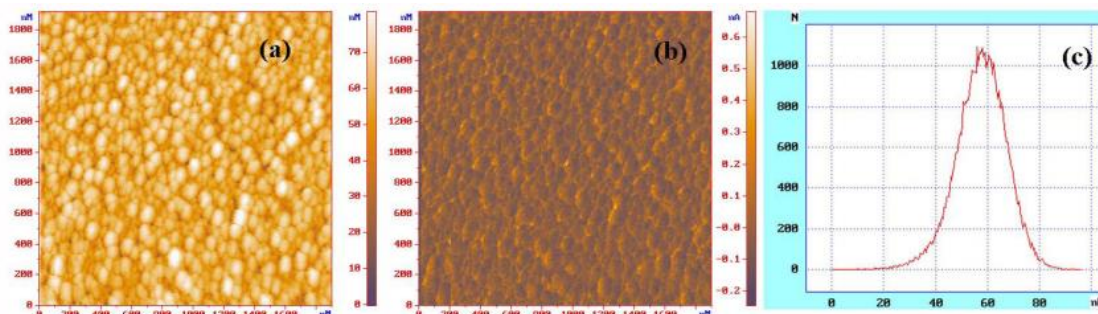
а) и с) – режим контакта; б) – режим бокового усилия; д) – линия рельефа с островками

Рисунок 3 – АСМ изображения островков  $Mg_2Si$  на Si (111) [9]

Из рисунка 4б видно, что поверхность однородна и состоит из одного вещества, но на ней присутствуют наноразмерные островки силицида магния, причем в реакцию с атомами Mg вступили атомы подложки, вследствие чего в области, прилегающие к островкам, были подвержены эрозии, что видно из рисунков 3с и 3д. Полость глубиной до 5 нм и шириной до 50 нм присутствуют вокруг каждого островка.

Из рисунка 4а видно, что после нанесения слоя кремния рельеф образца стал более выраженным, отсутствие граней на зернах Si говорит о том, что

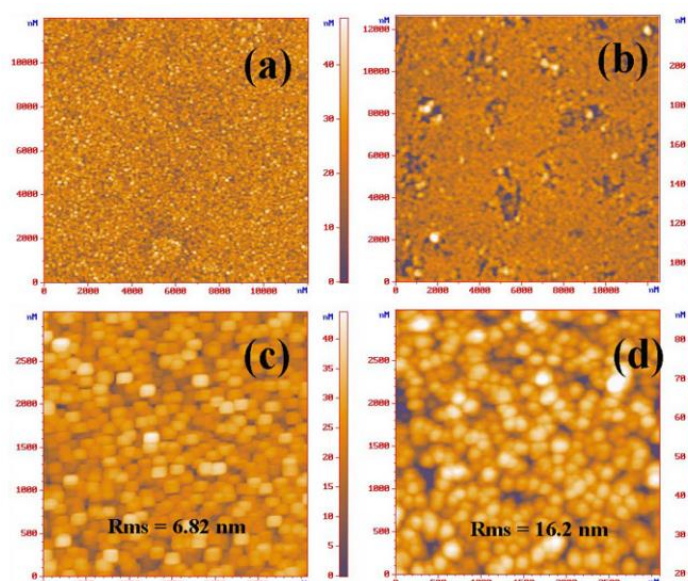
пленка Si образовалась при осаждении и отжиге Si. АСМ изображение 4b показало, что кластеры покрыты пленкой с однородной структурой, на поверхности не наблюдается выделение силицида магния из объема пленки.



a) – режим контакта; b) – режим бокового усилия; c) – статическое распределение шероховатости

Рисунок 4 – АСМ изображение однослойной структуры [9]

Изучение морфологии пленок с тремя скрытыми слоями, показанных на рисунке 5с показало, что рельеф представляет собой зерна 150 на 200 нм прямоугольной формы и имеют направления роста перпендикулярные друг другу, для температуры отжига 650 °С. Отжиг при температуре 750 °С, рисунок 5d, повлиял на размеры, которые уже составили 120 на 120 нм, форма зерен близка к сферическим.



a) и c) – 650 °С; d) и b) – 750 °С

Рисунок 5 – АСМ изображение для трехслойной структуры [9]

Высокая температура подложки приводит к увеличению шероховатости и более резкому рельефу поверхности и не обеспечивает кристаллизацию слоев Si. Увеличение температуры приводит к росту объемной диффузии атомов Si и может стать причиной разрушения кластеров силицида магния в объеме пленки.

В работе [6] методом твердофазной эпитаксии формировались высоко ориентированные тонкие пленки  $Mg_2Si$  (111) на подложке Si (111) толщиной 90 нм. В работе изучались спектры оптического отражения, которые регистрировали двухлучевым спектрометром, источником накачки выступал лазер с длиной волны 780 нм, сигнал отражения  $\Delta R/R$  регистрировался кремниевым фотодиодом. На рисунках 6а и 6б показаны спектры отражения и комбинационного рассеяния соответственно.

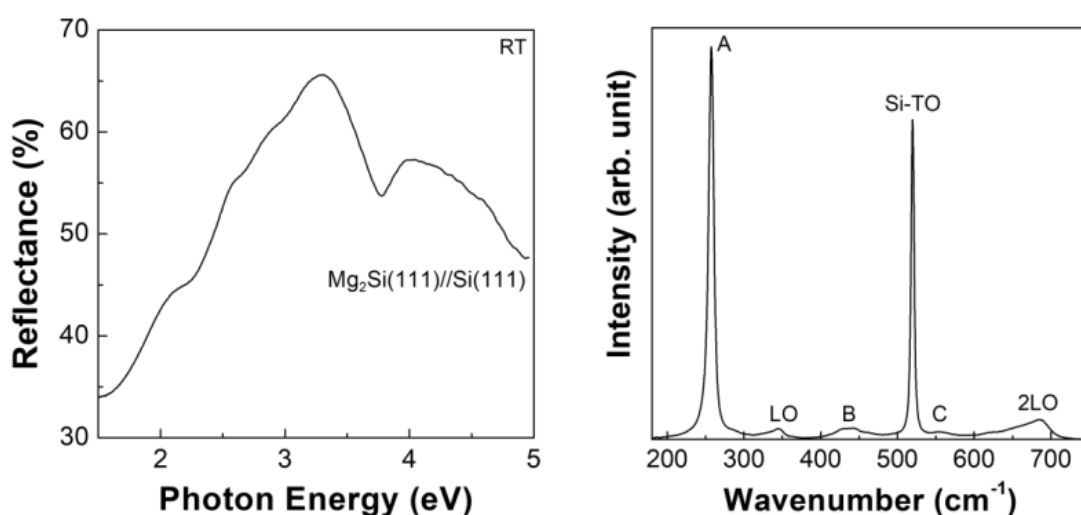


Рисунок 6 – Спектр отражения пленки  $Mg_2Si$  (а); спектр комбинационного рассеяния пленки  $Mg_2Si$  (б) [6]

Спектры полученные для  $Mg_2Si$  в низкоразмерном состоянии почти соответствуют спектрам монокристалла. В спектрах комбинационного рассеяния сдвинуты на меньшее волновое число в сравнении с монокристаллом, что говорит о деформации сжатия вследствие несоответствия решеток Si и  $Mg_2Si$  [6].

На рисунке 7 показаны PR спектр, сняты й при 9 К, четкий сигнал модуляции наблюдался в районе от 2,2 до 3,0 эВ [6].

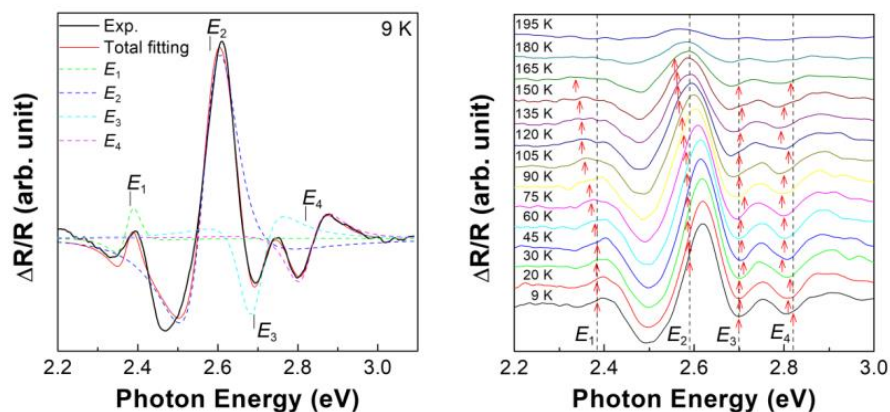


Рисунок 7 – PR спектр пленки Mg<sub>2</sub>Si при 9 К (а); температурная зависимость PR спектра (b) [6]

В данной работе были получены четыре энергии прямых межзонных переходов  $E_1 = 2,38$  эВ,  $E_2 = 2,58$  эВ,  $E_3 = 2,69$  эВ и  $E_4 = 2,82$  эВ. На 8б отражена температурная зависимость PR спектров в диапазоне температур от 9 до 195 К, красными стрелками указаны прямые энергии перехода [6].

## 1.2 Методы формирования тонких пленок

Существует разнообразные химические и физические методы формирования тонких пленок на подложках из различных материалов. Далее будут рассмотрены методы в эпитаксиального роста тонких пленок в условиях вакуума. Такие методы применяются для массового производства и в исследовательских целях в тех случаях, когда необходимо, чтобы полученные пленки имели заданную толщину, высокий уровень структурного качества, минимально возможное количество примесей или резкий профиль легирования. Для осаждения тонких пленок в условиях вакуума требуется специальное оборудование, для минимизации взаимодействия наращиваемых пленок с атмосферой остаточных газов, как правило в большинстве случаев применяются СВВ камеры. Степень чистоты тонкопленочных структур, полученных в результате ростовых экспериментов, напрямую зависит от степени вакуума. Практика показывает, что получение идеально чистых, лишенных примесей пленок невозможно даже в условиях сверхвысокого вакуума, т.к. атомы остаточной атмосферы так или иначе будут оказывать незначительное влияние на поверхность пленок [10].

В условиях среднего вакуума атомы напыляемого вещества двигаясь по к

подложке претерпевают множественные столкновения с атомами остаточной атмосферы, атомы отклоняются от своих первоначальных траекторий, вследствие этого первоначально узкий пучок частиц наносимого вещества может попадать не только на фронтальную сторону подложки, но и на обратную ее сторону, а также на стенки камеры [11].

В условиях сверхвысокого вакуума атомы летят по прямой линии, не взаимодействуя с атомами остаточной атмосферы, конденсируясь только на фронтальной поверхности подложки и стенках камеры [11].

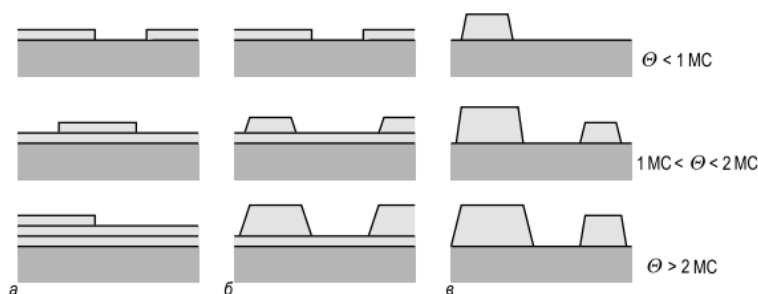
Из литературных данных известно три механизма роста пленок на поверхности подложки.

Послойный рост пленки по механизму Франка-ван дер Мерве - в этом случае связь атомов наносимого вещества с атомами подложки больше, чем связь наносимых атомов друг с другом, формирование нового молекулярного слоя невозможно до момента пока не завершено формирование предыдущего.

Островковый рост по механизму Вольмера-Вебера – такой механизм роста наблюдается в том случае, если атомы пленки имеют более сильные связи друг с другом чем с атомами подложки, результатом этого является зарождение трехмерных островков на поверхности подложки.

Послойный-плюс-островковый рост по механизму Странского-Крыстанова – механизм заключается в том, что после образования двумерного слоя будет идти рост трехмерных островков.

На рисунке 8 приведено схематическое представление механизмов роста.



а) – послойный рост Франка-ван дер Мерве; б) – послойный-плюс-островковый рост Странского-Крыстанова; в) – островковый рост Вольмера-Вебера

Рисунок 8 – Схематическое представление механизмов роста [10]

На практике же рост пленок можно условно разделить на четыре стадии:

- первая стадия – появления на поверхности подложки зародышей и образование островков наносимого вещества;
- вторая стадия – процесс укрупнения и срастания островков с образованием нового большего островка;
- третья стадия – срастание больших островков и образование пустых пространств между ними;
- четвертая стадия – заполнение полостей между островками и формирование непрерывной пленки [11].

В случае если слой наносимого вещества превышает монослойный диапазон, то говорят о процессе роста тонких пленок. Режим роста пленки, когда кристаллическая решетка наращиваемого слоя полностью повторяет кристаллическую решетку подложки получил название эпитаксии. Из литературных данных известно, что эпитаксия делится на гетероэпитаксию и гомоэпитаксию, в первом случае вещества наращиваемой кристаллической решетки и подложки различны, во втором случае происходит рост пленки на подложку из того же материала, для гетероэпитаксии крайне важно, чтобы постоянные кристаллических решеток А наращиваемых веществ не отличались более чем на 10 % [10 – 13].

Так как разнообразие методов термического испарения довольно велико, далее будут рассмотрены наиболее общие и распространенные методы молекулярно-лучевой эпитаксии, твердофазной эпитаксии и химической лучевой эпитаксии.

В методе молекулярно-лучевой эпитаксии рост пленки происходит посредством сублимации твердых веществ, материал доставляется на поверхность затравочного кристалла с помощью направленных пучков атомов или молекул. Подложка при напылении пленки поддерживается при температурах достаточных для того, чтобы адсорбирующиеся атомы могли мигрировать по поверхности и встраиваться в кристаллическую решетку, но при этом не настолько высоких, чтобы происходил процесс диффузионного перемешивания внутри объема кристалла сформированной пленки [10; 12; 13].



В качестве источника паров вещества используется ячейка Кнудсена или термический источник. В одну СВВ камеру можно поместить множество источников для получения сложных веществ, каждый источник снабжается заслонкой, управление которыми осуществляется снаружи сверхвысоковакуумной камеры, такая конструкция источника позволяет мгновенно начинать и останавливать процесс напыления. Главная особенность ячейки Кнудсена состоит в том, что время необходимое для изменения потока, сильно меньше времени роста моно-слоя вещества, что позволяет изменять состав пленки по глубине с атомным разрешением. Ячейки Кнудсена и термические источники применяются в случае, если напыляемые вещества имеют достаточно высокое давление паров и не очень высокую температуру плавления. Подложка закреплена в держателе с нагревателем напротив источников напыления [10; 11; 14].

На рисунке 9 показана схема метода молекулярно-лучевой эпитаксии.

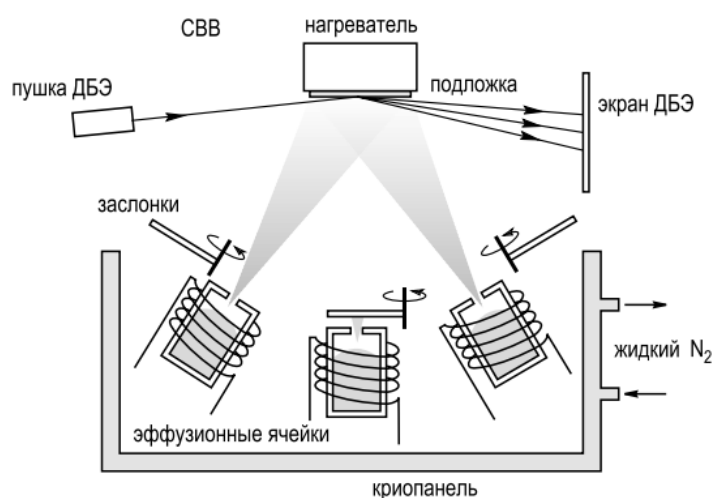


Рисунок 9 – Схематичное изображение основных устройств, используемых в методе молекулярно-лучевой эпитаксии [10]

В СВВ камере установлены образец с нагревателем, источники с сублимируемым элементами, заслонки источников. Процесс роста пленок часто контролируют оже-электронной спектроскопией или СХПЭЭ, для этих целей в камере помимо источников устанавливается система дифракции электронов и анализатор отраженных или вторичных оже-электронов. В случае послойного роста

наблюдаются осцилляции интенсивности пучка ДБЭ с периодом пропорциональным времени формирования слоя атомов. МЛЭ универсальный метод формирования пленок и гетероструктур, нашел применение как в исследовательских СВВ камерах, так и в производстве полупроводниковых приборов [10].

Твердофазная эпитаксия представляет собой режим молекулярно-лучевой эпитаксии, когда вначале при пониженных (комнатных) температурах происходит формирование аморфной тонкой пленки, кристаллизация полученной пленки проводится путем отжига при более высоких температурах, типичные температуры отжига находятся в пределах от 500 °С до 700 °С. Структурное качество тонких пленок сформированных данным методом обычно ниже, однако метод нашел широкое распространение в исследовательских СВВ камерах, так как имеет преимущество в получении резких профилей распределения легирующей смеси по глубине полупроводниковых пленок [10 – 12].

Схема метода твердофазной эпитаксии принципиально ничем не отличается от метода молекулярно-лучевой эпитаксии, за тем исключением, что в роли источников преимущественно выступают простые термические источники.

В методе молекулярно-лучевой эпитаксии невозможно применение многих легирующих элементов вследствие высокой поверхностной сегрегации, в то время как в твердофазной эпитаксии размытие острого профиля определяется объемной диффузией. В методе ТФЭ типичны длительности и температуры отжига, при которых диффузионная длина примерно равна одному межатомному расстоянию, что дает возможность получить в сформированной тонкопленочной структуре крайне острый профиль легирования, имеется возможность формирования слоев толщиной в пределах нескольких атомарных слоев в объеме чистого полупроводника легированных необходимой примесью [10 – 13].

Методы, в которых материал для пленки поступает на подложку в виде газообразных соединений объединяются под общим названием химическое осаждение из пара. Молекула газа разлагается на поверхности горячей подложки, а необходимое вещество остается на поверхности подложки, ненужные же фрагменты молекулы десорбируются с поверхности подложки и удаляются из камеры

или же осаждаются на ее стенки. Компоненты IV и V групп как правило подаются в виде гидридов, в то время как компоненты III группы в виде металл органических соединений. Металл-органическое осаждение из пара происходит при давлениях порядка 760 торр, в том случае, если для осаждения используется среда высокого или сверхвысокого вакуума, то метод носит название металл – органической МЛЭ [10].

СВВ камеры для МЛЭ и для ХЛЭ не имеют значимых различий, компоненты для реакции подаются на подложку через капилляр с регулируемым давлением впрыска газовой смеси. В некоторых случаях диссоциация молекул газа может проводиться непосредственно в капилляре для этого используются спирали из металла или фольги, нагреваемые до высоких температур

В сравнении с МЛЭ метод ХЛЭ требует поддержание значительно более высоких температур, а процесс роста пленки более сложный и затратный, однако его преимуществом являются высокие скорости роста с сохранением высокого структурного качества. ХЛЭ позволяет наносить материалы не пригодные для испарения из термических источников, вследствие чрезвычайно низкого давления их паров, даже при больших температурах, и наоборот для веществ имеющих большое давление паров в условиях сверхвысокого вакуума.

### **1.3 Методы исследования**

#### **1.3.1 Электронная оже-спектроскопия**

Атомы, возбужденные в ходе взаимодействия с электромагнитным или электронным излучением, могут переходить в основное состояние излучая рентгеновское излучение в ходе излучательных переходов или испуская электрон при неизлучательных переходах. Процесс испускания электронов используется в электронной оже-спектроскопии, метод основан на анализе энергий оже-электронов, которые зависят от разности энергий связей. Метод оже-электронной спектроскопии оказался полезным для качественного и количественного изучения свойств поверхностей, так как глубина выхода оже-электронов составляет до 5 нм и первичное электронное излучение практически никак не влияет на свойства исследуемой поверхности [10; 13].

Электрон из первичного пучка монохроматических электронов с некоторой вероятностью может ионизировать атом, выбив электрон с его внутренней оболочки, после ионизации оба электрона покидают атом. Образовавшаяся вакансия закрывается электроном с вышестоящего уровня, так как между двумя уровнями существует разница в энергиях, то атом переходит в возбужденное состояние, из которого он может релаксировать в ходе излучательного перехода - рентгеновской флюоресценции или безызлучательного перехода - оже-эмиссии. На рисунке 10 представлены схематические диаграммы процессов релаксации возбужденного атома, в качестве примера взят кремний. Энергия оже-электронов  $KL_1L_{2,3}$  составляет около 1591 эВ, энергия рентгеновских фотонов 1690 эВ.

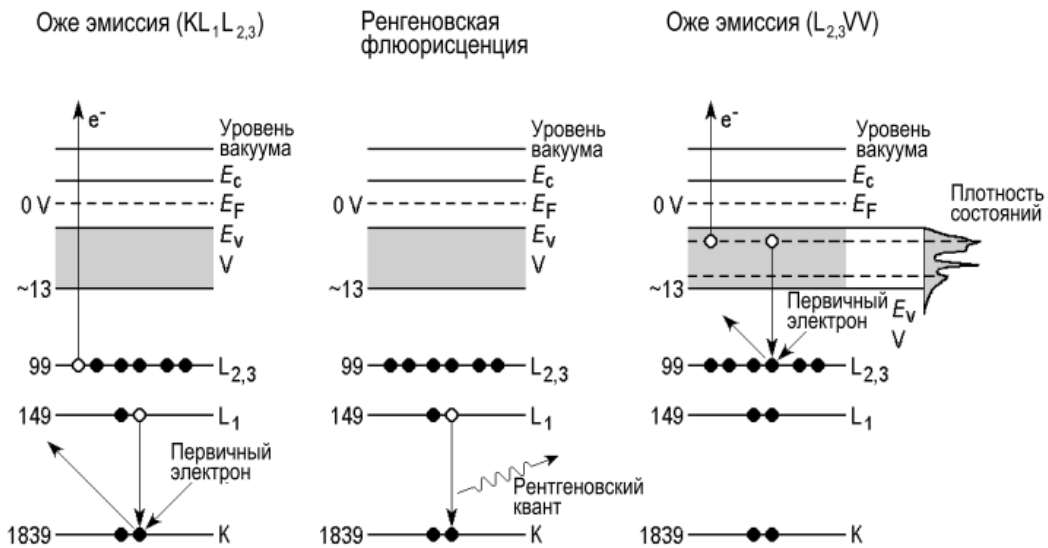


Рисунок 10 – Схематические диаграммы процессов релаксации возбужденного атома [10]

Энергия высвободившаяся при заполнении вакансии может быть передана в виде кинетической энергии электрону на уровне L<sub>1</sub> или L<sub>3</sub>, энергии которого хватит, чтобы покинуть атом, энергия электрона покидающего атом может быть посчитана как  $E_K - E_{L1} - E_{L1}$ , такой переход носит название KLL, возможен вариант когда электрон с M оболочки заполняет вакансию на L уровне, другой электрон с M оболочки при этом будет выброшен, такой переход называется LMM.

Электрон-электронные взаимодействия наиболее сильны между электронными орбиталями, близко расположенными друг к другу, поэтому переходы KLL

и LMM являются наиболее сильными. Переходы задевающие дальние орбитали, имеют энергетическую ширину в два раза превышающую ширину валентной зоны, такими переходами являются  $KL_1L_{23}$  и  $L_{23}V_1V_2$  [10; 13].

Главная характеристика оже-электрона - положение первоначальной вакансии и положение двух электронных вакансий в конце процесса. Энергия излученного электрона в процессе  $KL_1L_1$  оценивается из энергии связи уровней электронных оболочек участвующих в процессе, и может быть выражена формулой (1):

$$E(KL_1L_{23}) = E(K) - E(L_1) - E(L_{23}) - \phi, \quad (1)$$

где  $\phi$  – работа выхода материала.

Оже-спектры снимаются в виде производной  $dN(E)/dE$ , делается это в целях подавления уровня фонового шума и увеличения интенсивности пиков, так как полезный сигнал накладывается на интенсивный фон, создаваемый электронами, претерпевшими многократные потери энергии [10; 13; 15].

Вид спектров оже-электронов от образца Si (100) в различных видах представлен на рисунке 11.

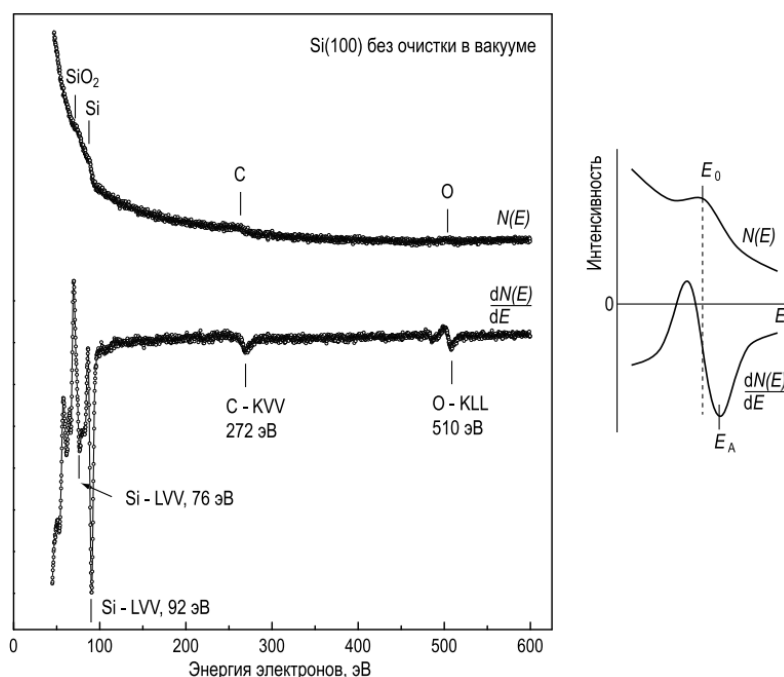


Рисунок 11 – Оже-спектры в виде  $N(E)$  и  $dN(E)/dE$  образца Si (100) [10]

Энергетическая характеристика оже-электронов позволяет идентифицировать сорт атома, энергии оже-электронов прямо связаны с положением уровней. Энергии известны для всех элементов, имеющих больше 3 электронов в основном состоянии. Спектры также содержат информацию о химических связях атома, которые вызывают химические сдвиги. На рисунке 12 представлены энергии оже-электронов трех основных серий KLL, LMM, MNN для различных элементов [16].

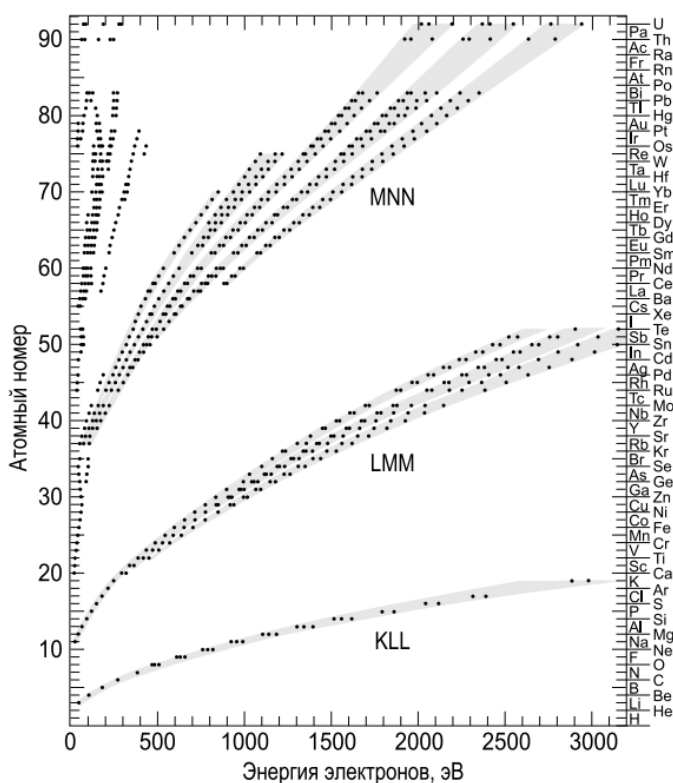


Рисунок 12 – Энергии оже-электронов трех основных серий KLL, LMM, MNN для различных элементов [16]

Химическое окружение атома напрямую влияет на энергию связи электронов атомного остова и атомный потенциал, энергии связи К и L оболочек сдвигаются с изменением окружения атома. В KLL линии оже-электронов принимают участие и К и L уровни, причем L оболочки дважды участвуют в переходе, по этой причине энергии оже-электронов KLL серии могут быть использованы для интерпретации химического окружения атома.

Оже-электронная спектроскопия подходит для количественного определения концентрации атомов одного сорта по отношению к атомам другого путем

измерения интенсивностей оже-пиков. Зная амплитуду оже-пика и коэффициенты чувствительности искомого элемента (таблица 1), по формуле (2) можно определить концентрацию искомого элемента в приповерхностном объеме образца [13; 14].

$$X_i = \frac{I_i}{S_i \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{S_i}}, \quad (2)$$

где  $I_i$  – амплитуда оже-пика элемента по спектрам оже-электронов;

$S_i$  – коэффициенты элементной чувствительности.

Таблица 1 – Коэффициенты элементной чувствительности  $S_i$  для некоторых элементов [16]

Элемент	$E_i$ , эВ	$S_i$
C	272	0,18
N	379	0,11
O	503	0,51
Si	92	0,35

Из опыта исследователей известно, что воздействие первичного электронного пучка на образец не приводит к изменениям в поверхностной фазе, но в некоторых случаях может происходить процесс электронно-стимулированной десорбции или нагрев исследуемого образца. Метод является наиболее щадящим в сравнении другими методами, например РФА, и применяется для контроля роста пленок.

### **1.3.2 Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами**

СХПЭЭ – один из методов электронной спектроскопии, в основе которого лежит неупругое рассеяние электронов на поверхностной фазе и приповерхностном объеме твердых тел. Одним из процессов вносящим наибольший вклад в потери энергии падающих первичных электронов является рассеяние на плазмонах кристаллической решетки.

Плазмоны представляют собой возбуждение электронов проводимости. Теоретический расчет одночастичных возбуждений и рассеяния на плазмонах является сложной задачей и выполнен только для идеализированных материалов, имеющих электроны проводимости, что сильно усложняет интерпретацию получаемого спектра потерь энергии [10; 17].

Потери энергии электронами на поверхности твердого тела имеют весьма широкий диапазон в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^4$  эВ, эти потери могут быть результатом таких процессов как:

- возбуждение атомов адсорбата и поверхности твердого тела, потери энергий этой группы лежат в диапазоне от  $10^{-3}$  до 1 эВ;
- возбуждение межзонных переходов и плазмонов, потери энергий лежат в диапазоне от 1 до 100 эВ;
- возбуждение глубоких уровней, потери энергий от 100 до  $10^4$  эВ.

Обычная спектроскопия потерь энергии электронами связана с возбуждением плазмонов и межзонных переходов. В целях исследования этого рода потерь энергий используют монохроматический пучок электронов с энергией от 100 до  $10^3$  эВ [10; 17].

Наличие поверхностной фазы дает свой вклад в проявлении поверхностного плазмона, колебания электронного газа которого локализованы на поверхности, амплитуда этих колебаний стремительно угасает с глубиной, таким образом на спектрах потерь энергии проявляются пики многократных плазменных потерь, пики потерь на объемных и поверхностных плазмонах [10; 17].

Спектры характеристических потерь энергии электронами представляют в виде  $d^2N(E)/dE^2$ . Интерес представляют именно энергетические положения пиков потерь. Вид спектров ХПЭЭ, полученных от пленки  $\text{SiO}_2$  представлен на рисунке 13.

Метод спектроскопии ХПЭЭ применяется для трех основных задач:

- 1) Определение плотности электронов, участвующих в плазменных колебаниях.
- 2) Химический анализ – плотность электронов является уникальной



характеристикой каждого элемента, следовательно измеренная энергия плазмона может быть применена для идентификации сорта вещества, на рисунке 13 хорошо различимы пик объемного плазмона кремния с энергией 17 эВ и оксида кремния с энергией объемного плазмона 22 эВ.

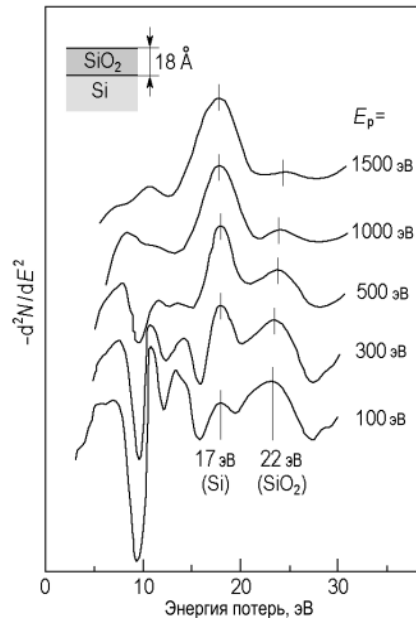


Рисунок 13 – Спектры ХПЭЭ пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 1,8 нм на подложке  $\text{Si}(111)$ , записанные при различных энергиях первичного электронного пучка (100, 300, 500, 1000, 1500 эВ) [10]

3) Анализ распределения элементов по глубине – глубина прохождения первичного пучка электронов определяется главным образом его энергией, изменяя энергию первичного пучка можно получить информацию об изменении состава пленки в зависимости от глубины, из рисунка 13 видно, что при увеличении энергии первичного пучка вклад подложки  $\text{Si}$  растет, в то время как вклад пленки  $\text{SiO}_2$  падает, на основе количественного анализа возможно узнать толщину исследуемой пленки.

### 1.3.3 Инфракрасная спектроскопия

Инфракрасное излучение лежит в диапазоне длин волн от 1 мкм до 1 мм, эта область может быть условно разделена на ближнюю ИК область в диапазоне длин волн от 800 до 2500 нм, среднюю ИК область в диапазоне длин волн от 2,5 до 50 мкм, и дальнюю с длиной волны более 50 мкм. Для среднего и дальнего

ИК диапазона наблюдаются колебательные и вращательные спектры атомов или молекул [18].

Методика колебательной ИК спектроскопии основана на возбуждении в диапазоне средней ИК области колебательных или вращательных движений атома или молекулы. В составе молекулы каждый атом находится в состоянии движения, они колеблются с резонансными частотами, величина таких движений составляет порядка  $10^{13} \text{ с}^{-1}$ , и может зависеть от силы связи и от массы атома. Частота молекулярных колебаний по величине сопоставима с частотами ИК излучения, так как обмен энергиями между падающей электромагнитной волной и молекулой возможен только в том случае, когда частота излучения сопоставима частоте колебаний молекулы, то молекула, поглощая фотон начинает колебаться с частотой падающей электромагнитной волны [18].

Пропуская излучение сплошного ИК диапазона через некоторый образец, то на спектрах пропускания будут наблюдаться полосы поглощения некоторых частот, которые соответствуют резонансным частотам молекулы. Колебательные спектры возникают при переходах между дискретными энергетическими состояниями колеблющихся и излучающих молекул. Молекула вскоре после взаимодействия переходит в свое основное состояние отдавая энергию соседним атомам и молекулам в виде кинетической энергии, тем самым повышая температуру образца [18].

По расположению полос поглощения можно однозначно охарактеризовать состав образца сверяясь с эталонами спектров различных веществ. ИК спектры представляют в виде шкалы волновых чисел, в  $\text{см}^{-1}$ . Такое представление прямо пропорционально энергии колебания молекулы. Условно такой спектр можно разделить на две области выше и ниже  $1500 \text{ см}^{-1}$ . Выше  $1500 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются полосы поглощения, которые могут быть причислены к функциональным группам. В области ниже  $1500 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются полосы, по которым можно охарактеризовать молекулы, именно эта область нашла применение в сравнении с эталонными спектрами элементов и веществ, пример ИК спектра пропускания показан на рисунке 14.

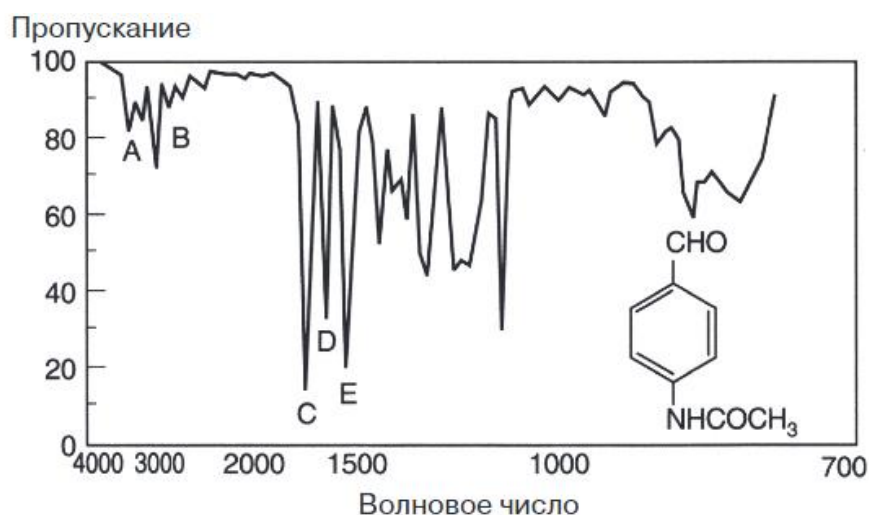


Рисунок 14 – Пример ИК спектра пропускания [18]

Также для ИК спектроскопии возможен метод регистрации отраженного от поверхности образца ИК излучения, в этом режиме можно получить спектры непрозрачных для ИК излучения веществ [18].

### 1.3.4 Рамановская спектроскопия

Метод спектроскопии КРС, как и метод ИК спектроскопии, позволяет определять частоты вращения и колебания молекул и атомов, метод считается дополнением к ИК спектроскопии [18].

В основе спектроскопии КРС лежит эффект Рамана, комбинационное рассеяние (неупругое рассеяние) света наблюдается при воздействии монохроматического излучения с образцом. Рассеянное излучение собирается оптической системой и представляется в виде спектров КРС, по которым можно определить колебания молекул и в зависимости от частоты и формы спектра сделать анализ структуры образца [18].

Наблюдение света претерпевшего КРС возможно только в случае, когда ‘наблюдатель’ находит перпендикулярно направлению падения излучения на образец. Излучение видимого диапазона взаимодействует с пробой путем смещения электронных орбиталей атомов из положения равновесия, электроны колеблются с частотой равно частоте падающего излучения, в следствие чего электроны сами становятся источниками вторичного излучения. В процессе взаимодействия света с атомом не происходит изменения количества энергии, так как

вся энергия первичного излучения полностью передается вторичному, подобное явление является следствием того, что полосы поглощения достаточно удалены от длины волны оптического или ультрафиолетового диапазона [18].

Так как необходимые для возбуждения молекулы или атома энергия отбираются и у падающего излучения, то в спектре наблюдается некоторое количество линий, сдвинутых относительно линии возбуждения на определенные значения частоты, значение такого сдвига совершенно не зависит от энергии первичного излучения, поэтому сдвиги частот несут в себе информацию о колебательно-вращательных частотах атомов или молекул. Пример спектра комбинационного рассеяния света показан на рисунке 15.

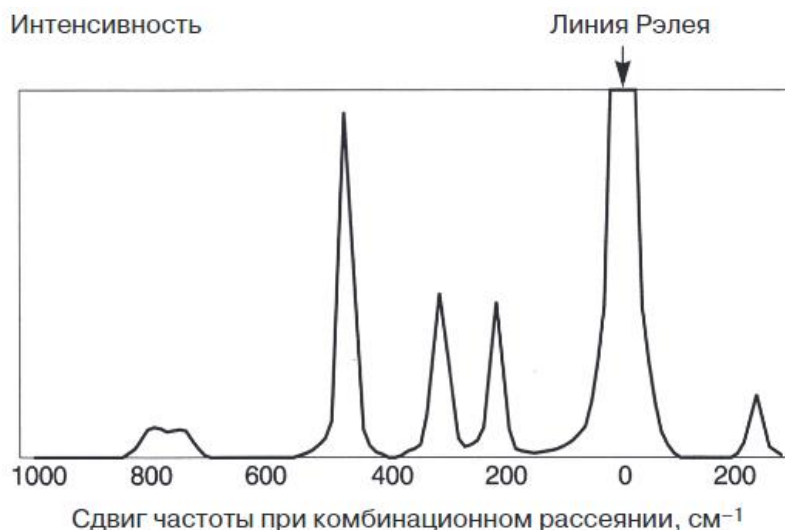


Рисунок 15 – Спектр комбинационного рассеяния света [18]

Спектр КРС состоит из линий, которые относятся к более низкой или высокой энергии относительно энергии первичного пучка, такие линии носят название линий стокса и антистоксовых линий. Случай стоксовых линий происходит при неупругом рассеянии, когда атом поглощает энергию фотона в размере одного колебательного кванта, фотон теряет энергию, в случае антистоксовых линий атом уже находится в возбужденном колебательном состоянии и фотон при взаимодействии поглощает этот квант, что увеличивает частоту рассеянного излучения [18].

Возможны как колебательно-вращательные, так и комбинированные переходы, спектр КРС в этом случае распадается на линии колебательного спектра и

линию Рэля. Схема энергетических уровней стоксовых и антистоксовых линий показана на рисунке 16.

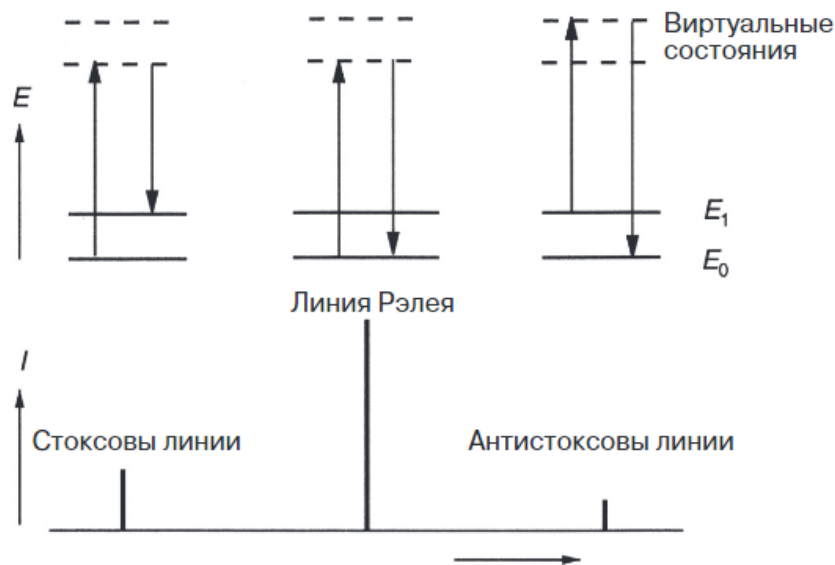


Рисунок 16 – Энергетические уровни стоксовых и антистоксовых линий [18]

Таким образом в данной главе был приведен анализ свойств и характеристик силицида магния, проведен литературный обзор современных статей по формированию силицида магния в низкоразмерном состоянии различными методами. Также были рассмотрены существующие методы формирования тонких пленок в условиях сверхвысокого вакуума, рассмотрены механизмы эпитаксиального роста тонких пленок. Были изучены примененные в практической части методы оже-электронной спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронами, инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Оборудование, использованное в эксперименте

В данной главе рассмотрено оборудование лаборатории физики поверхности Научно-образовательного центра имени К.Э. Циолковского, АмГУ (г. Благовещенск), которое применялось в ходе экспериментов. Также рассмотрено оборудование лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток), где проводилось исследование образцов оптическими методами.

#### 2.1.1 СВВ камера Varian и прибор РНІ 590

Эксперименты по формированию силицида магния проводились в условиях сверхвысокого вакуума при давлении  $10^{-7}$  Па. Для этих целей использовалась сверхвысоковакуумная камера VARIAN (рисунок 17). СВВ камера снабжена фланцами с тоководами, для установки термического источника магния и источника кремния, двумя смотровыми окнами и трехкоординатным манипулятором, который позволяет скорректировать положение образцов для формирования и исследования пленок. Манипулятор снабжен держателем для трех образцов и кварцевым датчиком [10; 17].



Рисунок 17 – Фотография СВВ камеры VARIAN прибора РНІ 590

Контроль процесса формирования пленок внутри камеры проводился с применением метода электронной оже-спектроскопии. Спектры оже-электронов были сняты при помощи двухпролетного электронного энергетического анализатора типа “цилиндрическое зеркало” РНІ 15-255g. Фотография прибора и его положение в камере показано на рисунке 18.

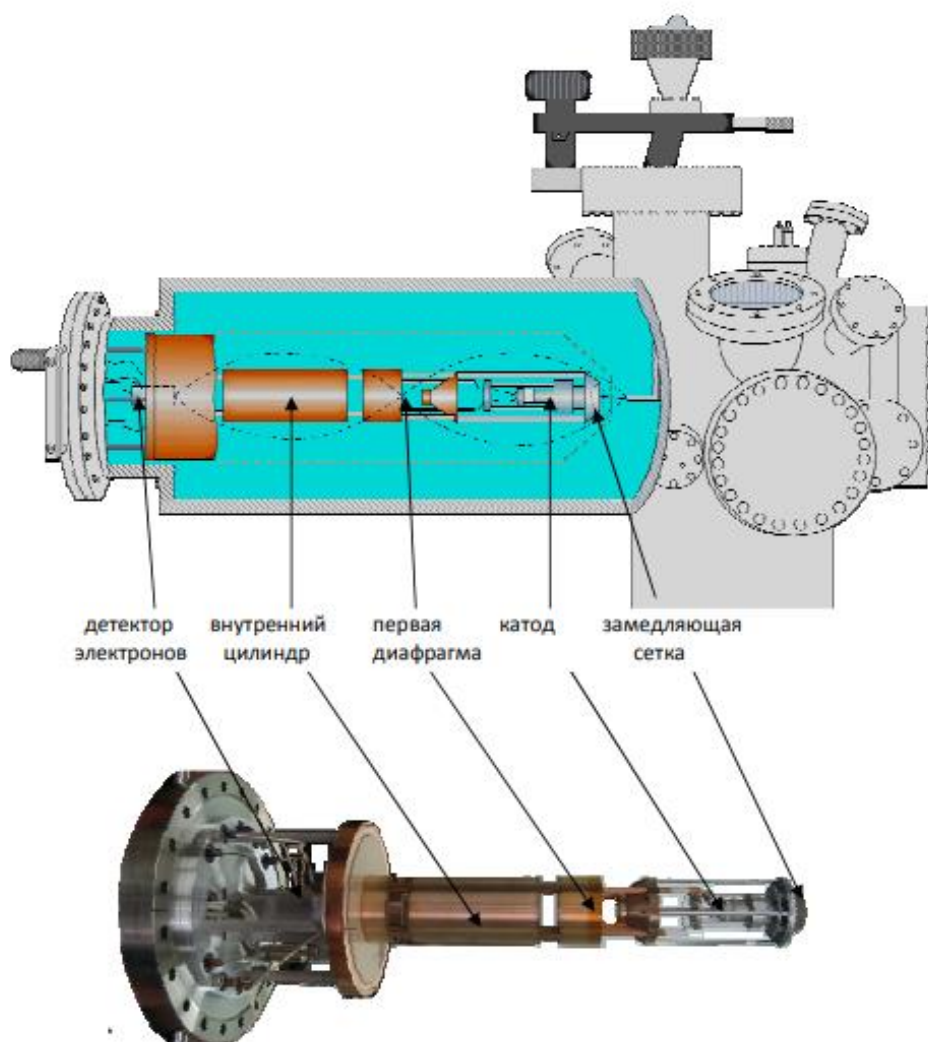


Рисунок 18 – Схема расположения и фотография электронного энергетического анализатора РНІ модели 15-255g [17]

Анализатор типа цилиндрическое зеркало, установленный внутри СВВ камеры, состоит из пары коаксиальных цилиндров, во внутреннем цилиндре которого имеются отверстия для пролета выходящих и входящих электронов. Внешний цилиндр приложен к отрицательному потенциалу по отношению к внутреннему. Электроны, попадающие в пространство между цилиндрами, отклоняются

электрическим полем и фокусируются в некоторой точке, в которой размещен коллектор и электронный умножитель. Электронный энергетический анализатор РНІ модели 15-255g обладает разрешением от 0,15 % до 0,5 % [10; 17].

Управление анализатором, выбор режима обработки поступающего сигнала и настройка энергии первичного электронного пучка выполнялось на приборе РНІ 590. Фотография прибора показана на рисунке 19.



Рисунок 19 – Фотография прибора РНІ 590

Прибор содержит модуль РНІ модели 11-055 для электронной спектроскопии химического анализа и оже-электронной спектроскопии, модуль РНІ 11-010 для управления электронной пушкой, модуль РНІ 20-805 для управления анализатором и модуль питания электронного умножителя модели РНІ 20-075.

### 2.1.2 Система откачки

Для первичной откачки был использован вакуумный откачной пост PFEIFFER VACUUM Hi CUBE (рисунок 20). Откачной пост представляет собой турбомолекулярный насос со скоростью вращения лопастей 90000 оборотов в минуту. С помощью этого насоса проходила откачка газа из СВВ камеры до



давления от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  Па.

Турбомолекулярный насос не способен осуществить откачку газа при атмосферном давлении, поэтому в его состав входит форвакуумный насос [10; 17].



Рисунок 20 – Фотография вакуумного откачного поста VACUUM Hi CUBE

При достижении давления в интервале от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  Па, в ходе выполнения подготовки к эксперименту, проводилось медленное открытие клапана ионного насоса и перекрытие откачного поста. С помощью ионного насоса была произведена откачка СВВ камеры до давления  $10^{-7}$  Па.

### 2.1.3 Измеритель толщины пленок

До формирования тонких пленок была проведена калибровка источников магния и кремния с применением прибора Sycon Instruments (рисунок 21) и подключенного к нему кварцевого датчика, расположенного внутри СВВ камеры. Прибор позволяет проводить измерения с разрешением до 0,1 нм [17].



Рисунок 21 – Фотография прибора Sycon Instruments

Измерение толщины осажденного на кварцевый датчик вещества проводилось с использованием программного обеспечения (рисунок 22), в котором перед калибровкой из библиотеки выбирался осаждаемый элемент.

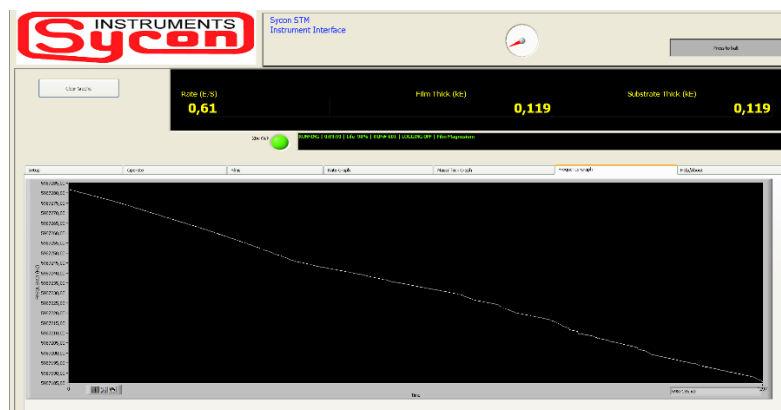


Рисунок 22 – Скриншот программы для определения толщины пленок

#### 2.1.4 Фурье-спектрометр и автоматизированная АСМ – Раман система

Для исследования методом ИК спектроскопии сформированных пленок применялся фурье-спектрометр Bruker Vertex 80v (рисунок 23). Основой данного прибора является двухлучевой интерферометр при перемещении одного из зеркал которого изменяется разность хода интерферирующих лучей. Сам интерферометр построен по схеме уголкового светотражателя.



Рисунок 23 – Фотография Фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v

Перемещение зеркала осуществляется линейно при помощи прецизионного механизма, а с помощью референтного канала с лазером контролируется

точное его положение. Особенностью данного прибора является система защиты от влияния внешних воздействий, которая основана на создании вакуума, при помощи высокопроизводительного безмасляного насоса, в отсеке для образца. Управление спектрометром и вывод сигнала осуществляется на внешний компьютер, на котором при помощи программного обеспечения производится Фурье-преобразование интерферограммы.

Для исследования образцов методом рамановской спектроскопии применялась автоматизированная АСМ – Раман система INTERGA Spectra II, универсальная платформа с совместным использованием АСМ и конфокальной рамановской, флуоресцентной и релеевской спектроскопии, предназначенная для проведения полного физико-химического анализа поверхностных свойств исследуемого вещества. Фотография платформы INTEGRA spectra II представлена на рисунке 24.

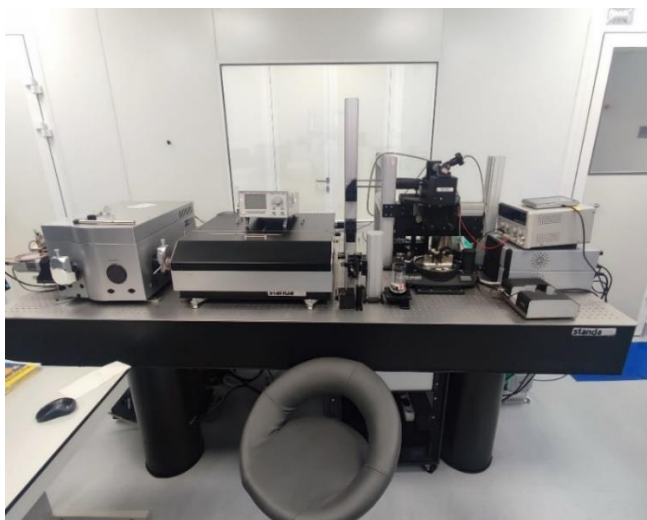


Рисунок 24 – Фотография установки INTEGRA Spectra II NT MDT

Диапазон длин волн возбуждающего луча может быть выбран в диапазоне от 325 до 1064 нм.

### **2.1.5 Лабораторный речевой информатор**

Для выполнения работ в рамках данной выпускной квалификационной работы при формировании тонких пленок силицида магния, автором ВКР в соавторстве, был разработан речевой информатор, который затем был изготовлен и применялся в ходе проведения эксперимента. Изготовленный прибор позволил

скоординировать работу сотрудников лаборатории при выполнении технологических процессов, требующих точного контроля времени, таких как калибровка источников, дегазация подложек или процесс формирования пленки.

В качестве управляющего элемента для речевого информатора был выбран микроконтроллер Atmega 328p, входящий в состав платы Arduino Nano v3. Плата позволяет реализовать управление несколькими узлами, а также ввод и вывод информации. За преобразование аналогового сигнала в цифровой и его хранение отвечает чип ISD 1820PY, который входит в состав звукозаписывающего модуля ISD 1820. Вывод графической информации производится на экран LCD 1602, посредством интерфейса передачи данных I2C, поддерживаемого чипом Atmega 328p на аппаратном уровне. Воспроизведение записанной звуковой информации осуществляется электродинамическим громкоговорителем с импедансом 8 Ом. Управление таймером, записью и проигрыванием голоса было реализовано с помощью кнопок, источником питания была выбрана батарея с напряжением 9 В. На рисунке 25 представлена принципиальная схема речевого информатора.

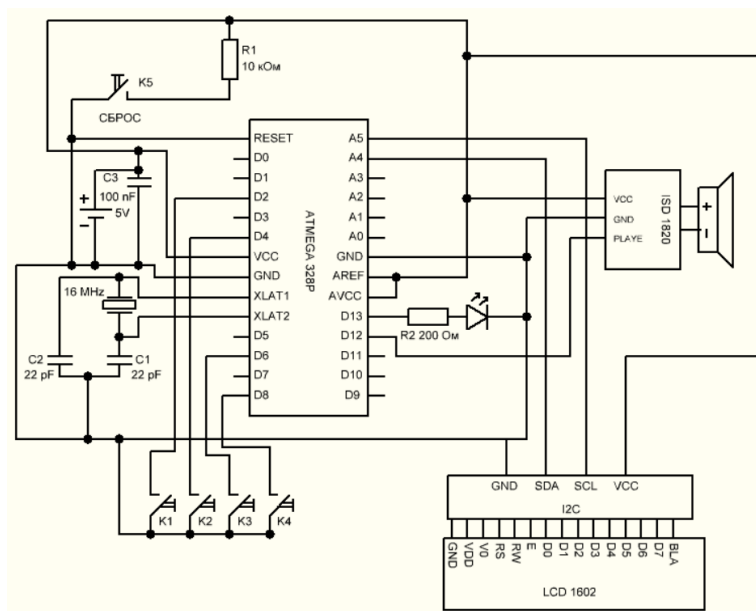


Рисунок 25 – Принципиальная электрическая схема речевого информатора

Схема печатной платы была изготовлена в бесплатно распространяемой программе Splan 7.0. Для платы был использован односторонний стеклотекстолит. Дорожки на плате были размечены маркером для рисования печатных плат,

после чего было произведено травление стеклотекстолитовой платы в концентрированном растворе хлорного железа для удаления непомяченных медных участков. Изготовленная печатная плата представлена на рисунке 26.

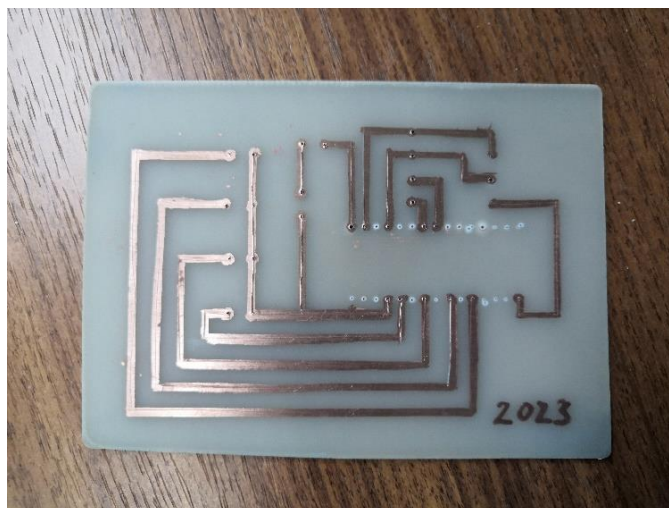


Рисунок 26 – Фотография печатной платы

После распайки всех электронных компонентов устройства, плата была помещена в корпус, специально изготовленный для нее на 3D принтере. Фотография речевого информатора представлена на рисунке 27.



Рисунок 27 – Фотография речевого информатора

Речевой информатор позволяет записывать голосовое сообщение длиной до 8 секунд и задать время таймера в диапазоне от 1 минуты до 8 часов.

Устройство применялось во время проведения экспериментов по формированию тонких пленок на этапе дегазации СВВ камеры.

## **2.2 Формирование тонких пленок $Mg_2Si$ методом РЭ на кремнии**

### **2.2.1 Подготовка образцов и источников**

Для ростовых экспериментов тонких пленок были использованы следующие материалы:

1) источник магния - магниевый порошок высокой степени чистоты, порошок изготавливался из фабричного бруска магния чистотой 99,999 %;

2) источник кремния - пластинка кремния 5 на 15 мм, вырезанная из промышленной кремниевой шайбы марки FZN-100, с кристаллографической ориентацией 111, n - тип проводимости, удельное сопротивление от 50 до 85 Ом·см;

3) кремниевая подложка - пластинка кремния 5 на 15 мм, вырезанная из промышленной шайбы КЭФ 100, с кристаллографической ориентацией 111, n - тип проводимости, удельное сопротивление от 2 до 15 Ом·см.

Термический источник для магния был изготовлен из танталовой фольги. Фольга при помощи заготовки сворачивалась в трубку длиной 45 мм и диаметром 3 мм, швы трубки были сварены с использованием импульсной сварки. Ключевым инструментом в термическом источнике было проделано отверстие диаметром 1 мм. Перед очисткой трубка проходила контроль прочности шва в ультразвуковой ванночке в течение 10 минут.

Источник и подложки кремния вырезались из промышленных шайб с использованием стеклореза, для разметки использовались точные измерительные приборы.

Подложки и источник кремния прошли химическую очистку перед установкой их в СВВ камеру. Танталовый термический источник прошел очистку в изопропиловом спирте в ультразвуковой ванночке мощностью 50 Вт. Для очистки кремниевых подложек и источников была применена методика RCA очистки, разработанной компанией Radio Corporation of America. Очистка включает в себя три основных этапа:

1) для удаления органических загрязнений кремниевые пластинки

помещались в раствор дистиллированной воды, перекиси водорода и аммиачной воды в соотношении 5:1:1, раствор прогревался до температуре 80 °С, температура контролировалась ИК пирометром, очистка проходила в течение 20 минут;

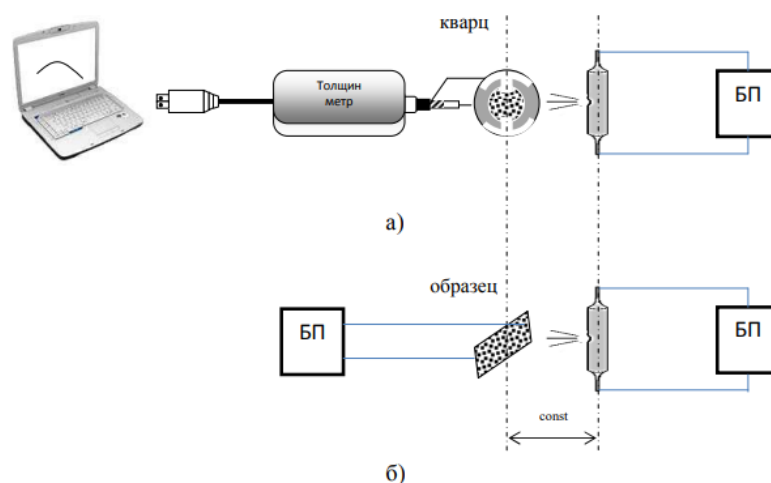
2) для удаления ионных загрязнений кремниевые подложки после первого этапа очистки помещались в раствор дистиллированной воды, соляной кислоты и перекиси водорода в соотношении 6:1:1, смесь также нагревали до 80 °С, второй этап очистки проводился в течение 20 минут. На данном этапе помимо очистки, также формируется защитный слой, который защищает поверхность подложки от реакции с газами атмосферы, при этом этот слой не вступает в реакцию с кремнием и легко удаляется внутри СВВ камеры путем прогрева;

3) сушка – просушенные подложки выкладываются на чистую посуду для хранения до загрузки в СВВ камеру [19 – 21].

Все образцы проходили очистку внутри вакуумной камеры путем их прогрева при высоких температурах, прогрев проводился пропусканием через кремниевые пластинки и танталовый термический источник электрического тока. Кремниевые пластинки прогревались при температуре 600 °С в течение 50 минут, далее три раза проводился прогрев при температуре 1100 °С в течение 10 минут. На последнем этапе термической очистки был применен отжиг длительностью три секунды при температуре близкой к температуре плавления кремния 1250 °С. Согласно [9; 19] на этом этапе происходил процесс рекристаллизации в результате чего была получена поверхностная фаза кремния 7 x 7.

### **2.2.2 Этапы формирования образцов**

На первой стадии для формирования тонких пленок было необходимо провести калибровку источников магния и кремния. Калибровка проводилась отдельно для магния и кремния. На кварцевый датчик проводилось осаждение вещества, толщина осажденного слоя контролировалась специальным программным обеспечением, в котором из базы данных выбирался требуемый элемент. Скорость осаждения определялась отношением значения толщины пленки, сформированной на кварцевом датчике ко времени ее формирования. Схема калибровки и формирования пленки показана на рисунке 28.



а) – калибровка источника; б) – формирование пленки заданной толщины

Рисунок 28 – Схема проведения эксперимента [18]

Поскольку для термических источников существуют различные факторы, которые с течением времени влияют на скорости осаждения вещества, то после формирования каждого образца необходимо было проводить перекалибровку источников кремния и магния. В число таких факторов входит: изменение количества вещества в термическом источнике, колебания в выходной цепи источника постоянного тока и подгорание контактов источников, что может приводить к их неравномерному прогреву.

На второй стадии формирования проводилось послойное осаждение на подложку трех слоев Mg и трех слоев кремния. Первый образец формировался при температуре в 190 °С, толщина слоев Mg составляла 40 нм, а скорость осаждения 3,1 нм/мин. Для второго образца температура составляла 250 °С с толщиной слоев Mg 30 нм, скорость осаждения Mg составляла 10,9 нм/мин. Для обоих образцов толщина слоев Mg составляла 10 нм. В итоге были сформированы два образца с пленками силицида магния толщинами 120 и 150 нм. Этапы формирования показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Этапы формирования образцов с пленками силицида магния

Образец	Т подложки	h <sub>пленки</sub> , нм	V <sub>осажденияMg</sub> , нм/мин	h <sub>слоевMg</sub> , нм	n слоев Mg	h <sub>слоевSi</sub> , нм	n слоев Si
№1	190 °С	150	3,1	40	3	10	3
№2	250 °С	120	10,9	30	3	10	3



## 2.3 Результаты исследования сформированных пленок

Исследование методами электронной оже-спектроскопии и спектроскопии ХПЭЭ проводилось *in situ* для каждого сформированного слоя пленки. Исследование оптическими методами проводилось ИК и раманосвкой спектроскопией *ex situ*.

### 2.3.1 Метод электронной оже-спектроскопии

Исследование образцов проводилось при энергии первичного пучка электронов 2000 эВ. Спектры оже-электронов, каждого этапа формирования обоих образцов представлены на рисунках 29 и 30.

На спектрах, буферных слоев Si 60 нм, для каждого образца, наблюдаются обратные пики большой интенсивности при энергии 92 эВ, которые по атласу спектров оже-электронов относятся к кремнию [16; 22 – 24].

На спектрах оже-электронов слоев Mg, для обоих образцов, наблюдаются обратные пики меньшей амплитуды чем обратные пики, принадлежащие Si, при энергиях 1186 эВ, которые по атласу спектров оже-электронов принадлежат магнию [16; 22 – 24].

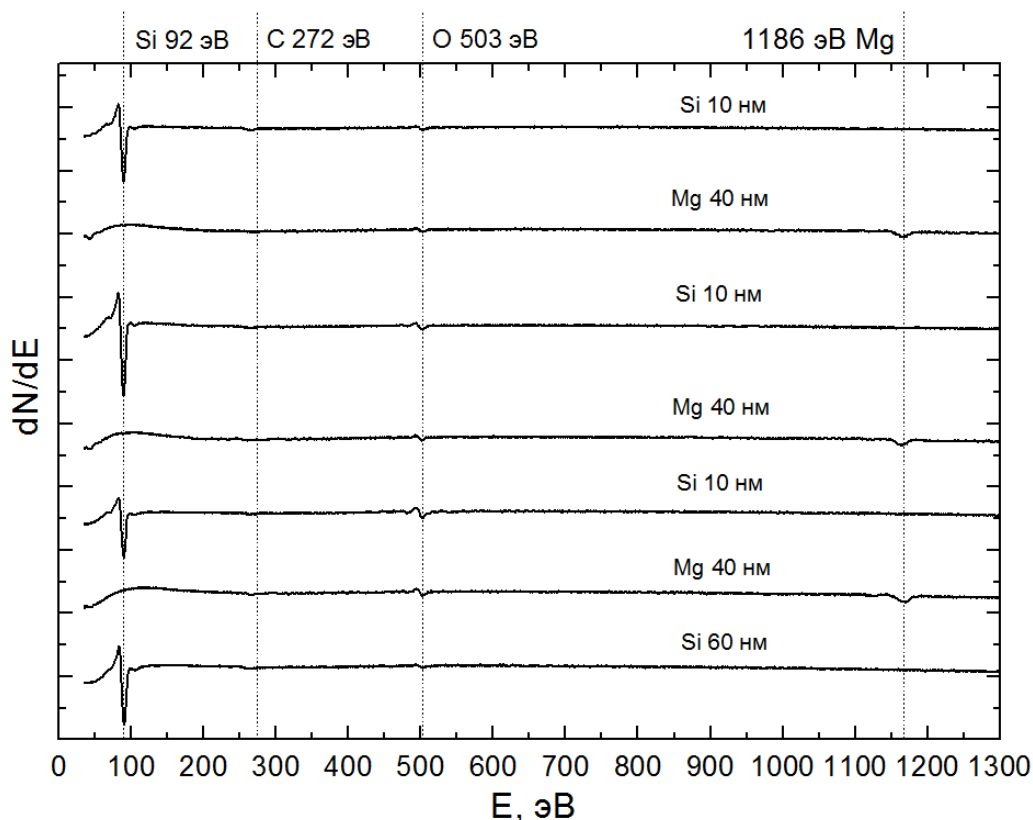


Рисунок 29 – Спектры оже электронов первого образца ( $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

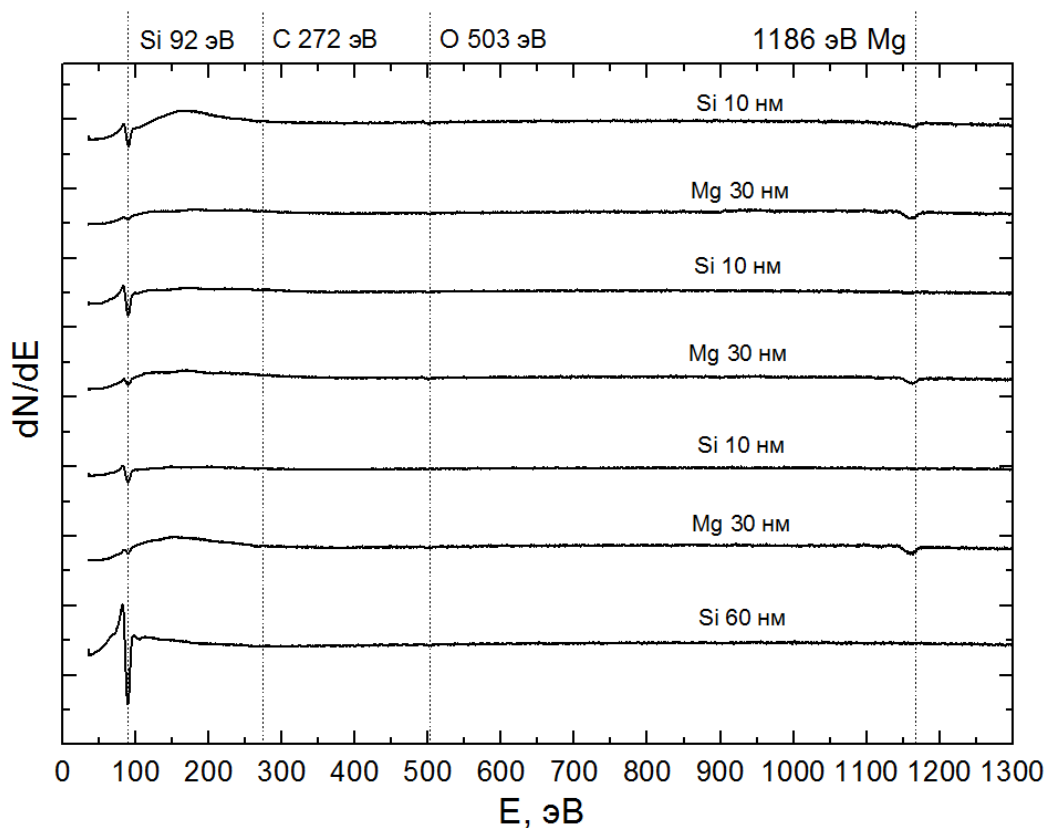


Рисунок 30 – Спектры оже-электронов второго образца ( $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Для слоев Si 10 нм, осажденных поверх слоев магния, на спектрах оже-электронов, для обоих образцов, наблюдаются обратные пики с энергиями 92 эВ. На спектрах энергий оже-электронов второго образца наблюдаются обратные пики Si малой интенсивности, можно предположить, что при температуре 250 °C происходит активное перемешивание осажденных слоев магния и кремния. Также можно предположить, что при температуре 250 °C процесс адсорбции атомов магния проходил более активно, чем для образца, сформированного при температуре 190 °C. Из анализа других образцов, сформированных в лаборатории физики поверхности, установлено, что скорость осаждения влияет на количество сформированного  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , но данный фактор не является определяющим для самого формирования  $\text{Mg}_2\text{Si}$  [16; 22 – 24].

Для первого образца дополнительно наблюдаются рефлекссы малой интенсивности при энергии 503 эВ, которые, по атласу спектров оже-электронов, вызваны наличием незначительной примеси кислорода. Наличие примеси связано с недостаточной очисткой образцов, путем их дегазации, между этапами

формирования [16; 22 – 24].

Эталоны спектров оже-электронов приведены в приложении А Эталоны спектров оже-электронов для Mg, Si, O и C.

По спектрам энергий оже-электронов, методом коэффициентов элементной чувствительности, был проведен количественный анализ по формуле (2), представленной в теоретической части. Результаты расчета отношения количества атомов Si к атомам Mg показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета соотношения количества атомов Mg к атомам Si методом коэффициентов элементной чувствительности

Образец	Mg	Si
№1	1,0	7,9
№2	1,7	1,0

### 2.3.2 Метод спектроскопии ХПЭЭ

При проведении исследования образцов методом ХПЭЭ задавалась энергия электронов первичного пучка величиной 300 эВ. В результате эксперимента были получены спектры ХПЭЭ, для обоих образцов. Спектры характеристических потерь энергии электронами, для каждого этапа формирования, обоих образцов представлены на рисунке 31.

На спектрах ХПЭЭ буферных слоях кремния, толщиной 60 нм, для первого образца наблюдаются пики потерь энергиях в районе 10,5 и 17 эВ. Для второго образца пики потерь наблюдаются в районе энергий 12 и 17 эВ. Описанные пики потерь и для первого, и для второго образца относятся к поверхностным и объемным плазмонам соответственно. При температурах от 200 °С до 400 °С энергия поверхностного плазмона для поверхностной фазы кремния 7 x 7 может варьироваться в диапазоне от 10 до 12,5 эВ [25]. Пики потерь при энергиях в районе 10 и 17 эВ характерны для всех реконструкций кристаллической решетки кремния. Различное положение энергий поверхностных плазмонов в данном случае не связано со структурными различиями сформированных слоев [24; 25].

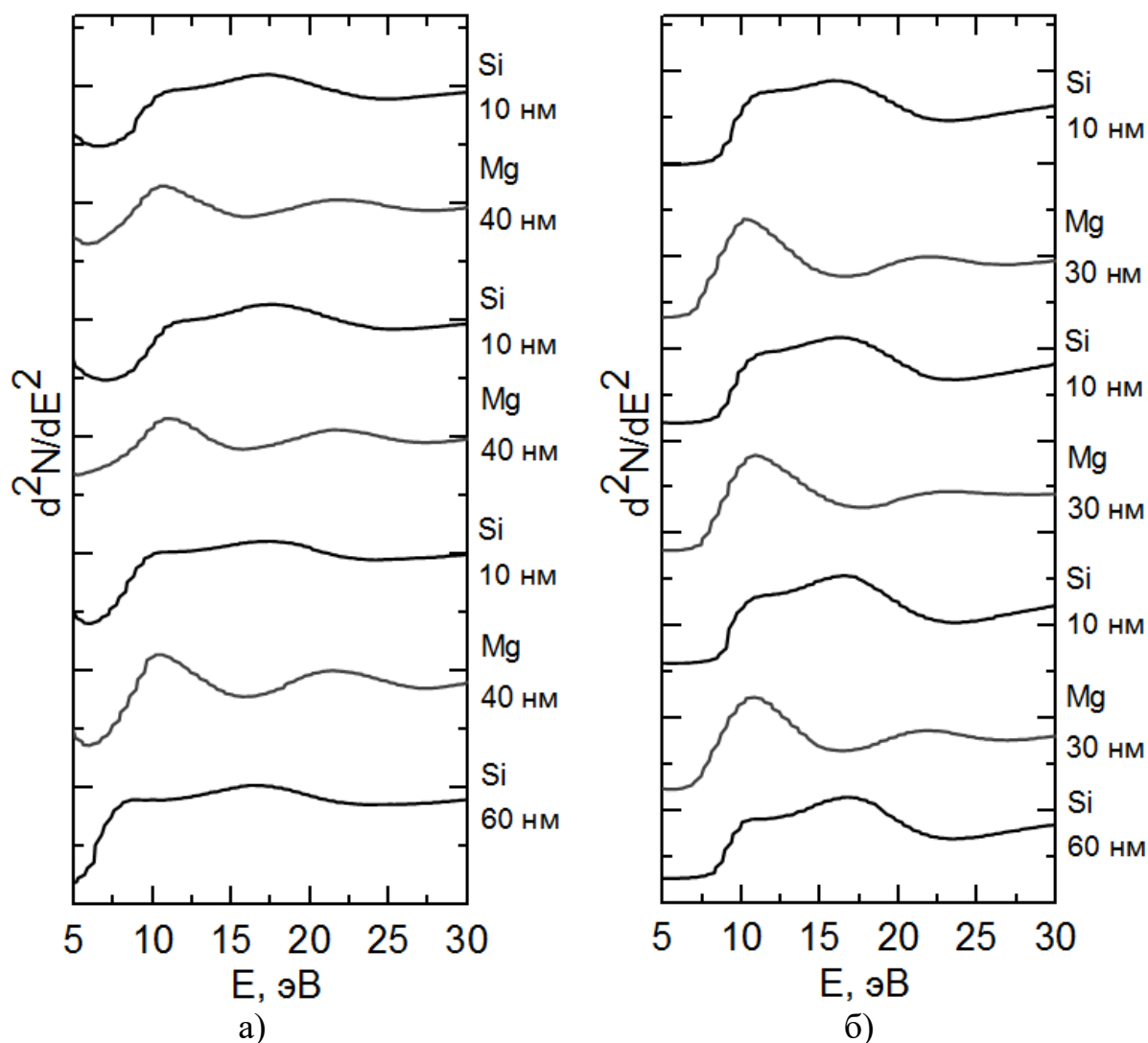


Рисунок 31 – Спектры ХПЭЭ первого образца (а) и второго образца (б)

На спектрах Si 10 нм, сформированных поверх слоев магния, для первого образца, наблюдаются пики потерь в районе 10 и 16,5 эВ. Для второго образца, наблюдаются пики потерь в районе энергий 12,5 и 17,5 эВ. Пики потерь энергии электронами для обоих образцов соответствуют поверхностным и объемным плазмонам Si соответственно. На спектрах слоев магния, первого образца, наблюдаются поверхностные и объемные плазмоны при энергиях порядка 10 и 22 эВ. Для второго образца пики потерь наблюдаются при энергиях порядка 11 и 22 эВ. Сдвиг энергий поверхностных плазмонов на слоях магния в сторону больших энергий, наблюдаемый для второго образца, из анализа литературных источников, может свидетельствовать о процессе силицидообразования [24; 25].

### 2.3.3 Метод инфракрасной спектроскопии

Тонкие пленки силицида магния исследовались методами оптической и

ИК колебательной спектроскопии. Оптическая спектроскопия проводилась в диапазоне энергий фотонов до 6,5 эВ.

Спектры отражения и пропускания представлены на рисунках 32 и 33. На спектрах отражения, для второго образца наблюдается спектральная полоса при значении энергии 2,6 эВ, которая соответствует кристаллическому  $Mg_2Si$ . Для первого образца наблюдается спектральная полоса при энергии 2 эВ, характерная для  $Mg_2Si$ . Сильно размытый пик малой интенсивности, у первого образца, при энергии 3,25 эВ соответствует кристаллическому Si [6; 9; 26].

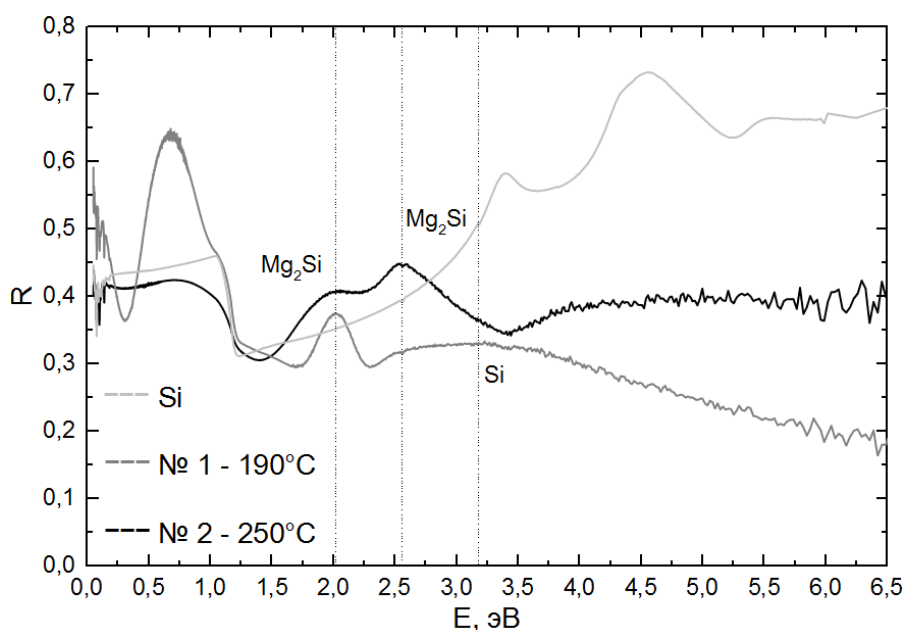


Рисунок 32 – Спектры отражения ИК излучения

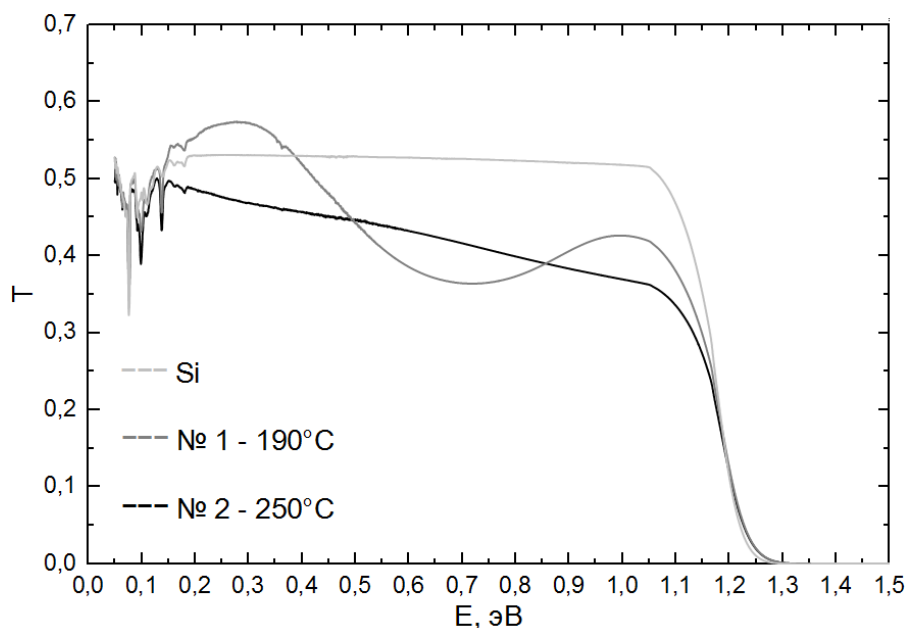


Рисунок 33 – Спектры пропускания ИК излучения

На спектрах пропускания ИК излучения наблюдается уменьшение коэффициента пропускания для второго образца с ростом энергии фотонов, относительно спектра чистого кремния, что характерно для  $Mg_2Si$  [6; 8; 9; 26]. Для первого образца значение коэффициентов пропускания, по максимумам кривой, близко к значению коэффициента пропускания чистого кремния, из чего можно сделать вывод, что для первого образца силицидообразование не наблюдается.

Исследование образцов колебательной ИК спектроскопией проводилось в диапазоне от 50 до 700  $cm^{-1}$ . Спектры пропускания и отражения показаны на рисунках 34 и 35.

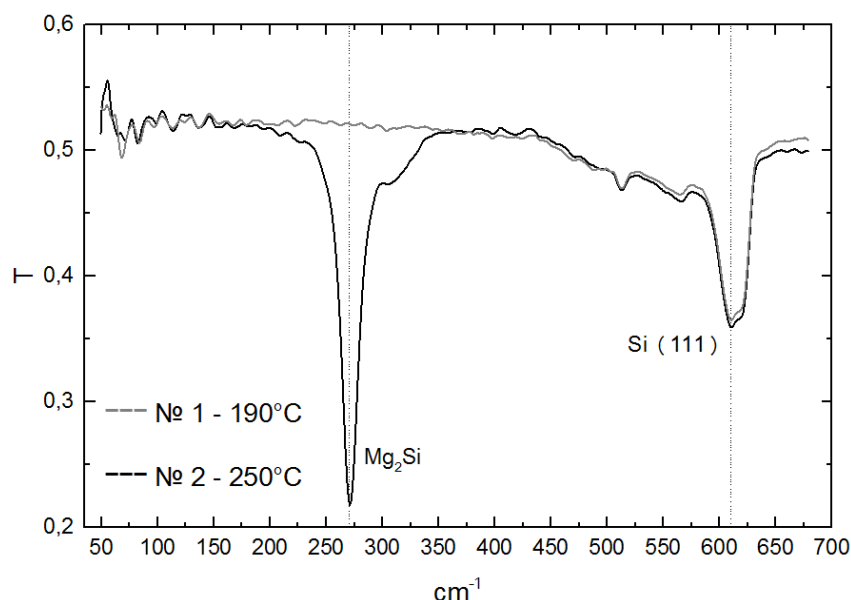


Рисунок 34 – Спектры пропускания ИК излучения

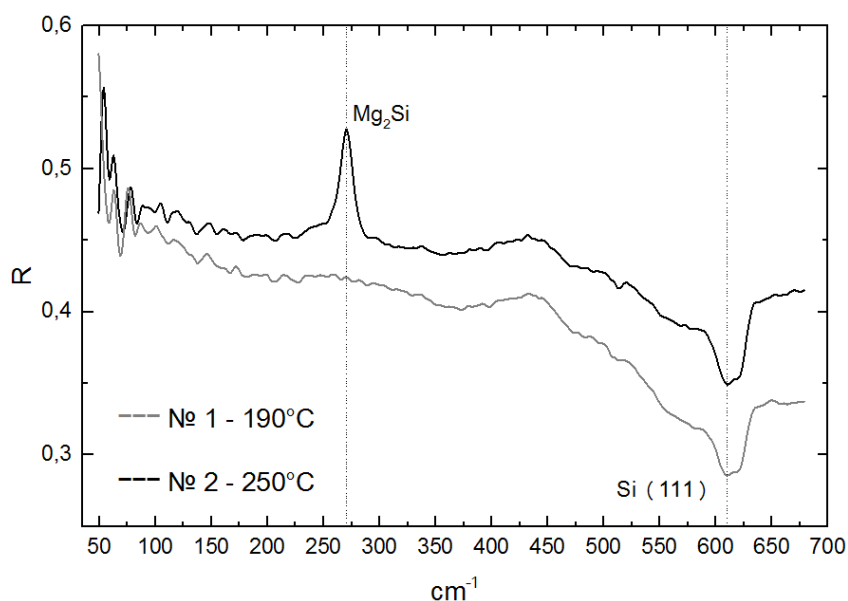


Рисунок 35 – Спектры отражения ИК излучения

На спектрах обоих образцов наблюдается резкое уменьшение коэффициентов пропускания и отражения в районе  $610\text{ см}^{-1}$ . Данный обратный пик является вкладом монокристаллического Si (111) подложки и вызван вследствие большой глубины проникновения инфракрасного излучения [6; 9; 26].

Для второго образца наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания и резкое увеличение коэффициента отражения при  $272\text{ см}^{-1}$ , что, согласно статьям [6; 9; 26] говорит о наличии в составе пленки второго образца кристаллического  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Для первого образца рефлексов при  $272\text{ см}^{-1}$  не наблюдается.

### 2.3.4 Метод рамановской спектроскопии

Исследование методом комбинационного рассеяния света проводилось при длинах волн лазерного излучения 473 и 633 нм, спектры показаны на рисунках 36 и 37.

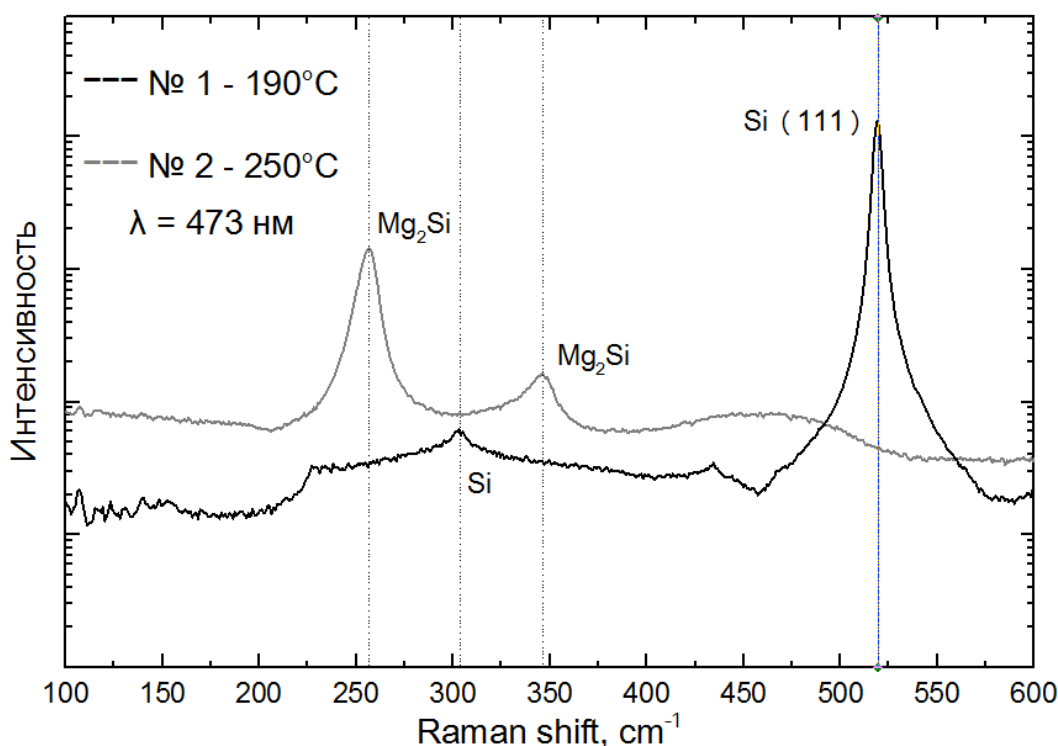


Рисунок 36 – Спектры комбинационного рассеяния света при  $\lambda = 473\text{ нм}$

На спектрах, снятых при длине волны лазерного излучения 473 нм, для первого образца наблюдается рамановский сдвиг при  $520\text{ см}^{-1}$ , который соответствует монокристаллическому Si (111) подложки. Пик обусловлен большой

глубиной проникновения излучения оптического диапазона. Для второго образца наблюдается широкий пик малой интенсивности в районе  $470\text{ см}^{-1}$ , максимум которого сдвигнут на  $50\text{ см}^{-1}$  относительно положения пик монокристаллического Si (111) подложки. Положение и форма свидетельствует о сильной аморфизации пленки второго образца, так как для аморфных структур глубина выхода света, претерпевшего комбинационное рассеяние не превышает  $20\text{ нм}$ , согласно статьям [7; 8; 26 – 29].

Для второго образца наблюдается два сдвига при  $258$  и  $348\text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют вкладу кристаллического  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Для первого образца сдвигов характерных для силицида магния не наблюдается.

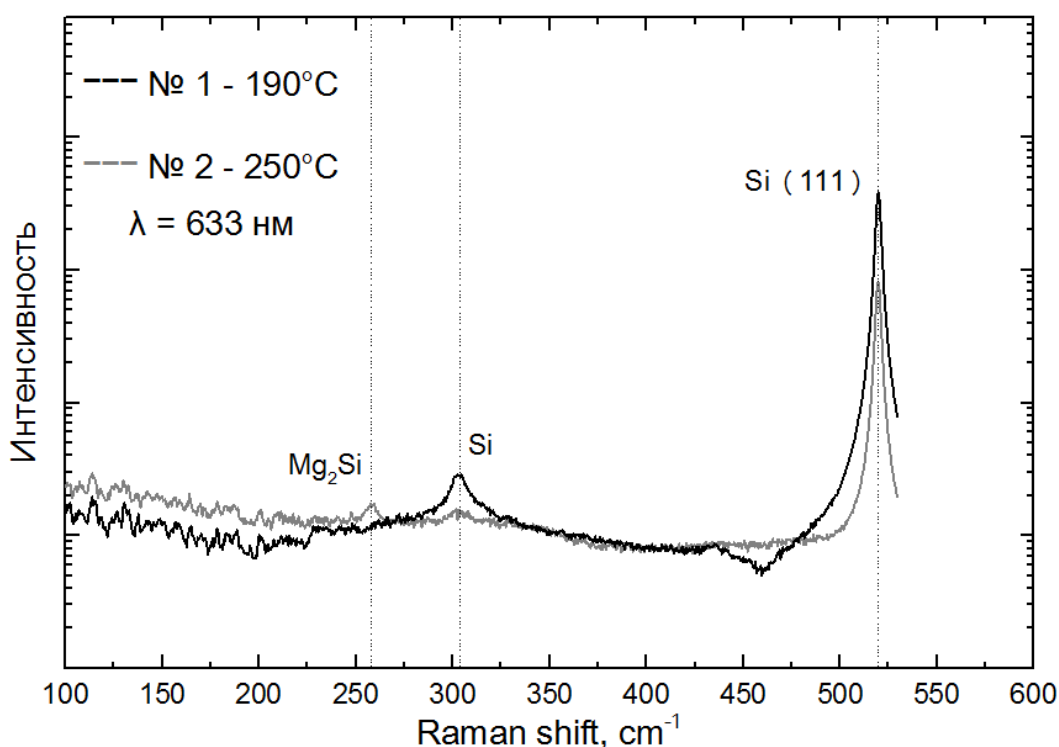


Рисунок 37 – Спектры комбинационного рассеяния света при  $\lambda = 633\text{ нм}$

На спектрах, снятых при длине волны лазерного излучения  $633\text{ нм}$ , видно, что сдвиги для второго образца при  $258$  и  $348\text{ см}^{-1}$  практически исчезли, на спектрах обоих образцов наблюдается только один основной рефлекс при  $520\text{ см}^{-1}$ , который соответствует вкладу монокристаллической кремниевой подложки. Изменение формы спектров связано с тем, что глубина проникновения излучения с  $\lambda = 633\text{ нм}$  больше, чем для излучения с  $\lambda = 473\text{ нм}$ . Так как толщина пленок не



превышает 150 нм то основной вклад на данных спектрах дает монокристаллическая кремниевая подложка, согласно статьям [7; 8; 26 – 29].

Таким образом в данной главе методом электронной оже-спектроскопии установлено, что процесс силицидообразования предположительно наблюдается у второго образца ( $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). На основе спектров энергий оже-электронов методом коэффициентов элементной чувствительности определено, что для первого образца соотношение количества атомов Si к атомам Mg составляет 8,0 : 1,0. Для второго образца соотношение атомов Si к атомам Mg составляет 1,0 : 1,7.

Методом СХПЭЭ установлено, что у второго образца наблюдается сдвиг поверхностных плазмонов Mg в сторону больших энергий, что свидетельствует о процессе, который может относиться к силицидообразованию

По данным ИК спектроскопии из спектров отражения установлено наличие спектральной полосы при энергии 2,5 эВ, которая характерна для  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Из спектров колебательной ИК спектроскопии отражения и пропускания, установлено наличие спектральных полос при  $272\text{ см}^{-1}$ , прямо связанных с наличием в составе пленки второго образца  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Анализ спектров комбинационного рассеяния света показал, рамановские сдвиги при  $258$  и  $348\text{ см}^{-1}$ , вызванные наличием в составе пленки силицида магния, наблюдаются только у второго образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы был проведен анализ свойств силицида магния, представлен обзор современных статей и экспериментов, в которых проводилось формирование  $Mg_2Si$  в низкоразмерном состоянии. Были изучены существующие методы формирования тонких пленок в условиях сверхвысокого вакуума. Проведен обзор оборудования лаборатории физики поверхности НОЦ АмГУ имени К.Э. Циалковского и лаборатории оптики и электрофизики Института автоматики и процессов управления ДВО РАН. Были изучены методы исследования *in situ*: оже-спектроскопия и спектроскопия характеристических потерь энергии электронами, а также оптические методы исследования *ex situ*: инфракрасная и рамановская спектроскопия.

В ходе выполнения работы были сформированы два образца с тонкими пленками силицида магния. Первый образец был сформирован при температуре в  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для второго образца температура подложки составляла  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По результатам исследования тонких пленок можно сделать следующие выводы:

1) Анализ спектров оже-электронов показал, что у обоих образцов наблюдаются обратные пики при энергиях 92 и 1186 эВ, которые соответствуют кремнию и магнию соответственно. Установлено, что предположительно процесс силицидообразования наблюдается у второго образца, сформированного при температуре прогрева подложки  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Методом коэффициентов элементной чувствительности, по спектрам энергий оже-электронов, определено, что для первого образца соотношение количества атомов Si к атомам Mg составляет 8,0 : 1,0, а для второго образца соотношение Si к Mg составляет 1,0:1,7;

2) Методом спектроскопии ХПЭЭ установлено, что у второго образца наблюдается сдвиг энергий поверхностных плазмонов Mg до 12 эВ. Для первого образца энергия поверхностных плазмонов Mg находится в районе 10 эВ. Данный сдвиг энергий поверхностных плазмонов в большую сторону может свидетельствовать о процессе силицидообразования;

3) Методом инфракрасной спектроскопии, по спектрам отражения, установлено, что для второго образца наблюдаются спектральная полоса при энергии 2,5 эВ, характерная для  $Mg_2Si$ . Методом колебательной инфракрасной спектроскопии, по спектрам отражения и пропускания установлено наличие спектральных полос при  $272\text{ см}^{-1}$ , что подтверждает наличие кристаллического  $Mg_2Si$  в составе пленки второго образца;

4) Методом рамановской спектроскопии, по спектрам комбинационного рассеяния света, установлено наличие рамановских сдвигов, при  $258$  и  $348\text{ см}^{-1}$ , характеризующих наличие в составе пленки второго образца  $Mg_2Si$ . В пленке первого образца таких сдвигов не наблюдается.

Результаты исследований проходили апробацию в рамках конференций и публикаций, приведенных в приложении Б.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Large scale solid state synthetic technique for high performance thermoelectric materials: magnesium-silicide-stannide / D.C. Ramirez [et al.] / ACS Applied Energy Materials, 2020.

2 Vladimir K. Zaitsev “Efficient Thermoelectric Materials Based on Solid Solutions of  $Mg_2X$  Compounds ( $X = Si, Ge, Sn$ )” Grigoriy N. Isachenko, Alexander T. Burkov, December, 2016.

3 Kinetic properties of p- $Mg_2Si_xSn_{1-x}$  solid solutions for  $x < 0.4$  / G.N. Isachenko [и др.] / XXVI IEEE International conference on thermoelectrics , Corvallis 2008.

4 Solid phase growth and properties of  $Mg_2Si$  films on Si (111) / N.G. Galkin [et al.] / Thin Solid Films 515, 2007.

5 Probing the  $Mg_2Si$  / Si (111) heterojunction for photovoltaic applications / A. Shevelyagin [et al.] / Solar Energy 211, – p. 383-395, 2020.

6 Photoreflectance spectra of highly-oriented  $Mg_2Si$  (111) / Si (111) films / Y. Terai [и др.] / The 5th Asia Pacific conference on semiconducting silicides and related materials, 2019.

7  $Mg_2Si$  is the new black: introducing a black silicide with 95 % average absorption at 200 – 1800 nm wavelengths / A. Shevelagin [и др.] / Applied surface science 2022.

8 Галкин, К.Н. Формирование низкоразмерного полупроводникового силицида магния и наногетероструктур на его основе: автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / К.Н. Галкин – Владивосток: Изд-во ИАПУ ДВО РАН, 2009. – 16 с.

9 Galkin, N.G. "Multilayer Si (111) /  $Mg_2Si$  clusters / Si heterostructures: formation, optical and thermoelectric properties" / N.G. Galkin, K.N. Galkin, S.V. Vavanova // e-journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 3, p. 12 – 20, 2005.

10 Оура, К. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. – М.: Наука, 2005. – 499 с.

11 Минайчев, Е.В Технология полупроводниковых приборов и изделий

микроэлектроники: учеб. пособие / Е.В Минайчев. – М.: Изд-во «Высшая школа», кн.6: Нанесение пленок в вакууме, 1989. – 109 с.

12 Технология тонких пленок (справочник): пер. с англ. / под ред. Л. Майсселла, Р. Глэнга – М.: Сов. радио, Т.2, 1977. – 768 с.

13 Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар – Пер. с англ. – М., Мир, 1989. – 564 с.

14 Handbook of thin film technology / Leon I. Maissel, Reinhard Glang – New York, McGraw-Hill, 1970. – 610 с.

15 Фелдман, Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок: пер. с англ./ Л. Фелдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989. – 344 с.

16 Handbook of auger electron spectroscopy / Lawrence E. Davis, Noel C. MacDonald, Paul W. Palmberg, Gerald E. Riach, Roland E. Weber // Physical Electronics Industries, Inc. February, 1976.

17 Фомин, Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела / сост. Д.В. Фомин, Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 200 с.

18 Spektroskopie / Jurgen Bocker – Vogel Industrie Medien GmbH and KG, Wurzburg, 1997. – 520 с.

19 Керн, У. Эволюция технологии очистки кремниевых пластин / У. Керн // Журнал электрохимического общества, 1990. – Том 137 Выпуск 6. – с 1887-1892.

20 Particle removal from silicon wafer surface in wet cleaning process / Itano, M.; Kern, F. W.; Miyashita / IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, volume 6 issue 3, pp 258, 1993.

21 Morphology and optical properties of Si (111) / CrSi<sub>2</sub> / Si and Si (111) / Mg<sub>2</sub>Si / Si systems with self-organized quantum dots / Galkin N.G [и др.]. - World Scientific Publishing Company, Singapore, 2001. P. 190-193.

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

23 Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. /под ред. Д. Бриггс и М.П. Сих. – М.: Мир, 1987. – 598 с.

24 Поляков, А.В. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев // Успехи прикладной физики – 2023 – Т.11 – № 1. – С. 52-60.

25 Лифшиц, В.Г. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии / Лифшиц В.Г., Луняков Ю.В. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 315 с.

26 Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.] / Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, журнал технической физики, 2013. Том 83, Выпуск 1.–С. 99 – 104.

27 Formation of  $Mg_2Si$  at high temperatures by fast deposition of Mg on Si (111) with wedge-shaped temperature distribution / A.S. Goualnik [и др.] / Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Applied Surface Science, 2017.

28 Textured stainless steel as a platform for black  $Mg_2Si/Si$  heterojunction solar cells with advanced photovoltaic performance / A.V. Shevelyagin [и др.] / Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, MDPI materials, 2022.

29 Synthesis of  $Mg_2Si$  precipitates in Mg-implanted silicon by pulsed ion-beam treatment / S.V. Vavanova [и др.] / Institute of Automation and Control Process of FEB RAS / ASCO-NANOMAT, 2011.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Эталонные спектры оже-электронов для Mg, Si, O и C

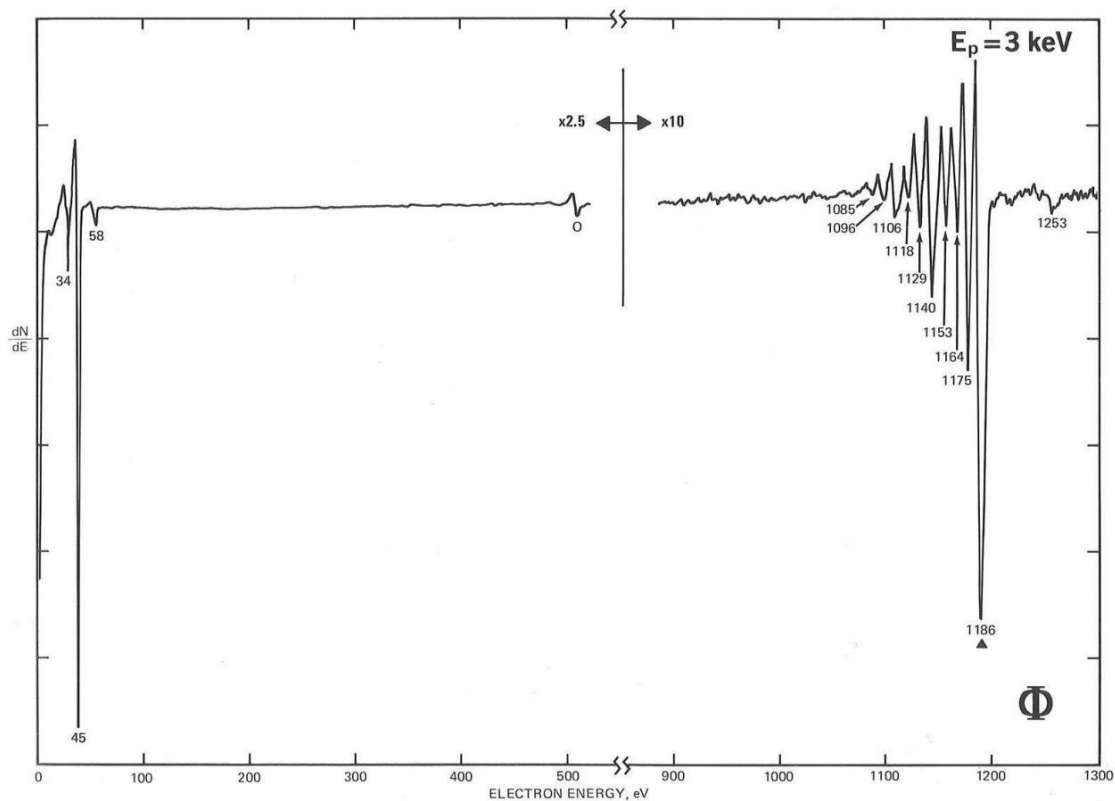


Рисунок А.1 – Эталон спектров оже-электронов магния [22]

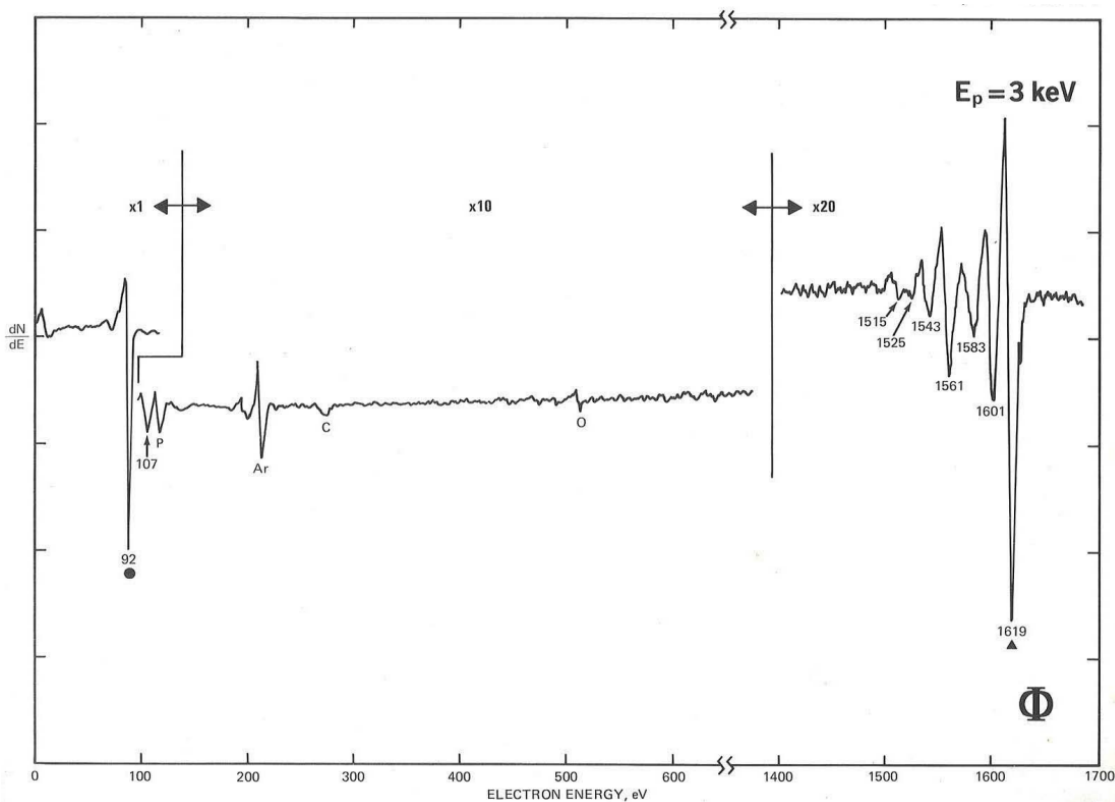


Рисунок А.2 – Эталон спектров оже-электронов кремния [22]

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

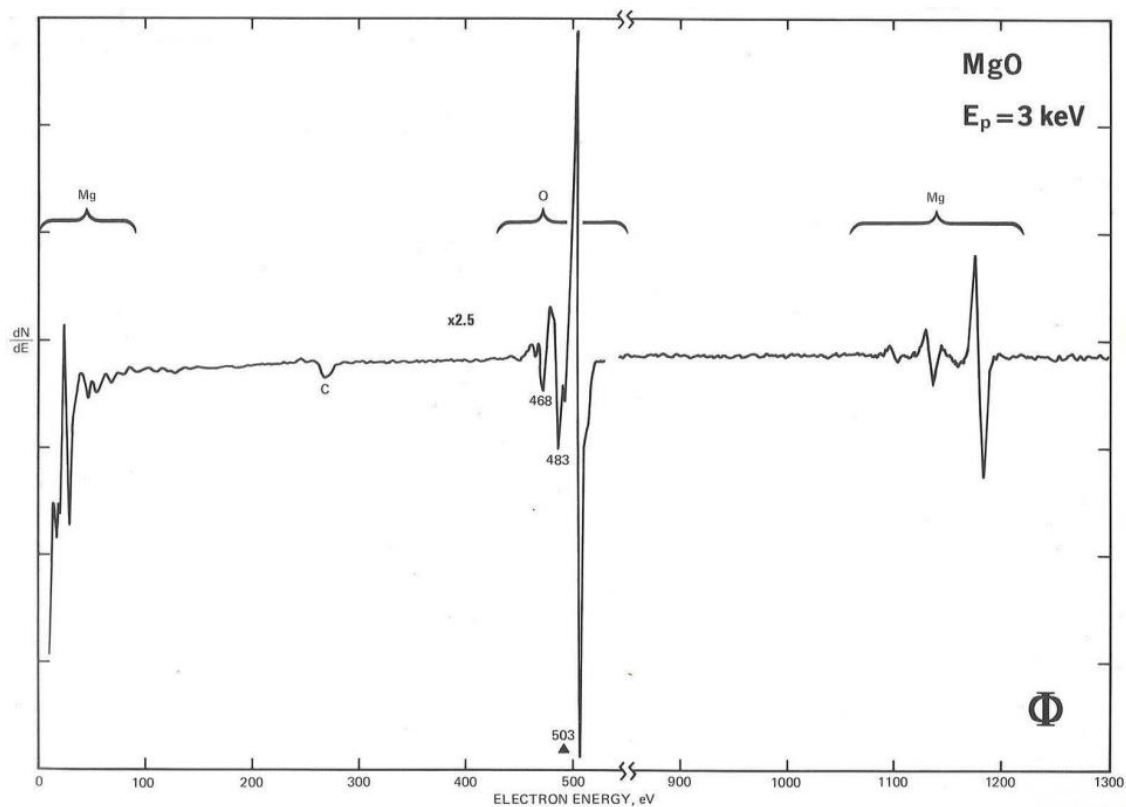


Рисунок А.3 – Эталон спектров оже-электронов кислорода [22]

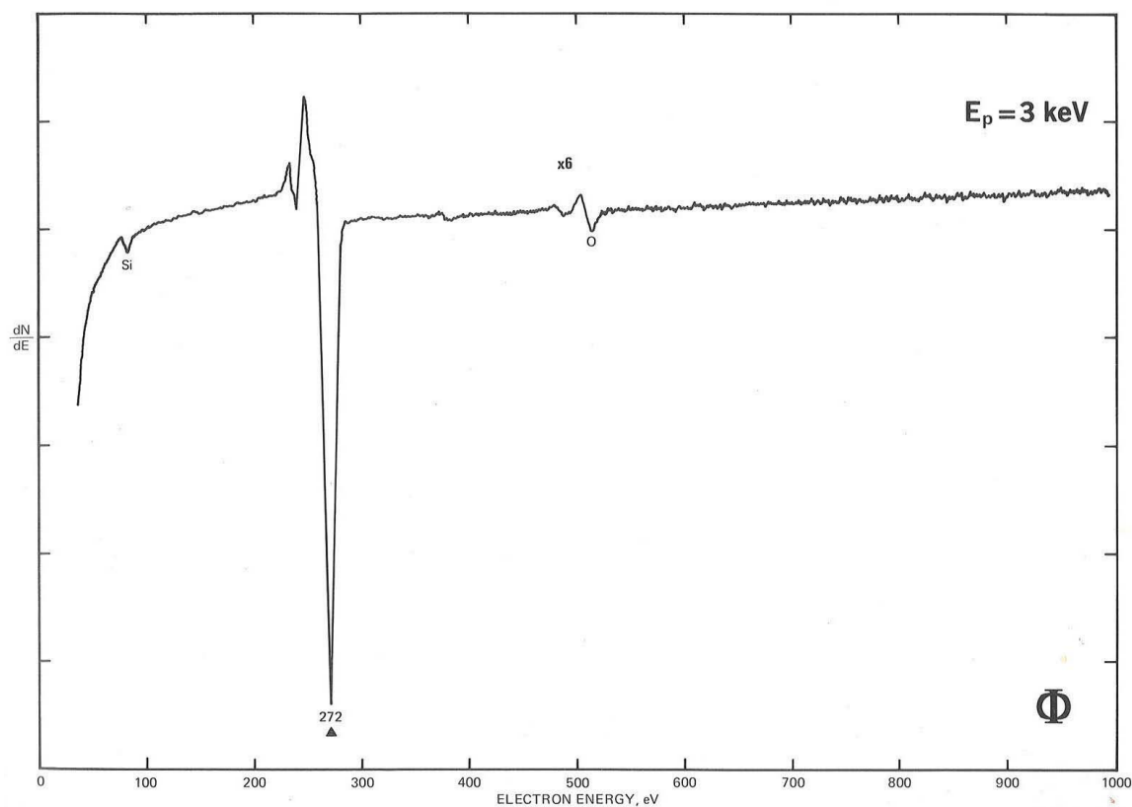


Рисунок А.4 – Эталон спектров оже-электронов углерода [22]



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Апробация результатов исследований

а) Участие в научных конференциях с докладом:

1) XXXI научная конференция АмГУ «День науки», секция «Физика», 21 апреля 2022;

2) XXXII научная конференция АмГУ «День науки», секция «Физика», 20 апреля 2023;

3) XXIII региональная научно-практическая конференция «Молодежь XXI века: шаг в будущее», секция «физико-математические науки», 24 мая 2022;

4) XX региональная научная конференция «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование», секция «Физика конденсированных сред», 3-7 октября 2022 года;

5) XXIV региональная-научно-практическая конференция «Молодежь XXI века: шаг в будущее», секция «физико-математические науки», 18 мая 2023.

б) Публикации:

1) Использование термопары при формировании пленок силицида магния на кремнии / А. В. Поляков, И.О. Шолыгин, Т.Ш. Султанов, Д.С. Гаврилина, Д.В. Фомин // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : Материалы XX региональной научной конференции, Хабаровск, 03–07 октября 2022 года / Под редакцией А.И. Мазура. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022.

2) Исследование методом электронной оже-спектроскопии тонких пленок силицида магния, сформированных на Si (111) / А. В. Поляков, И. О. Шолыгин, И. А. Рябов, Т.Ш. Султанов, Д.С. Гаврилина // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 24 мая 2022 года. Том 4. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. – С. 166-168.

3) Исследование методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронами тонких плёнок силицида магния, сформированных методом реактивной эпитаксии на Si (111) / И.О. Шолыгин, А.В. Поляков, И.А. Рябов, Т.Ш.

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Султанов, Д.С. Гаврилина // Молодёжь XXI века: шаг в будущее: Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 24 мая 2022 года. Том 4. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. – С. 178-180.

4) Исследование элементного состава плёнок силицида магния, сформированных послойным осаждением Mg и Si на Si (111)/Материалы Первого российско-китайского молодежного форума научно-технических и инновационных достижений – 2022/ И.О. Шолыгин / Хэйхэ, Изд-во ун-та Хэйхэ, 2022, С.166-168.

5) Формирование тонких пленок силицида магния на Si (111) и исследование их элементного состава / Шолыгин И.О., Поляков А.В., Фомин Д.В. / Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование / материалы XX региональной научной конференции, Хабаровск, Издательство ТОГУ, 2022., ст. 86.

6) Формирование тонких пленок  $Mg_2Si$  на кремнии и исследование их методом спектроскопии комбинационного рассеяния / И.О. Шолыгин, А.В. Поляков, И.А. Рябов / Молодежь XXI века: шаг в будущее: материалы XXIV региональной научно-практической конференции, Издательство АмГУ, г. Благовещенск, 2023.

7) Исследование методом рамановской спектроскопии тонких пленок  $Mg_2Si$ , сформированных на Si (111) / А.В. Поляков, И.О. Шолыгин / Молодежь XXI века: шаг в будущее: материалы XXIV региональной научно-практической конференции, Издательство АмГУ, г. Благовещенск, 2023.

в) Участие в выставках:

1) Выставка инновационных студенческих проектов в рамках проведения XXXII научной конференции АмГУ «День науки» с проектом «Разработка речевого информатора», 20 апреля 2023.

2) Выставка инновационных студенческих проектов в рамках проведения XXIV региональной научно-практической конференции «Молодежь XXI века: шаг в будущее» с проектом «Разработка речевого информатора», 18 мая 2023.