

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Скоробогатова Анастасия Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Влияние ионного тока из электронно-лучевого испарителя кремния на  
формирование nanoостровков Ge, Sn**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

к.ф.-м.н.

Тимофеев Вячеслав Алексеевич  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

Сорокин Алексей Валерьевич  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н.

Астрелин Виталий Тимофеевич  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **Влияние ионного тока из электронно-лучевого испарителя кремния на формирование nanoостровков Ge, Sn**

**Скоробогатова Анастасия Сергеевна**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 19309 3 семестр, 2020 год.

Научный руководитель:

**к.ф.-м.н. Тимофеев Вячеслав Алексеевич**

### **Аннотация:**

Целью данной работы являлось изучение влияния ионного тока на формирование nanoостровков Ge, Sn. Для исследования был освоен метод молекулярно-лучевой эпитаксии, который позволяет получать многокомпонентные структуры заданного профиля состава и совершенной структуры. В ходе экспериментов были получены графики основных зависимостей, которые могут повлиять на рост структур GeSi. Установлена зависимость ионного тока от тока эмиссии при различном напряжении смещения. При помощи метода дифракции быстрых электронов получена зависимость 2D-3D перехода при разных температурах подложки с напряжением смещения и без него.

**Аннотация:**

Целью данной работы являлось изучение влияния ионного тока на формирование наностроек Ge, Sn. Для исследования был освоен метод молекулярно-лучевой эпитаксии, который позволяет получать многокомпонентные структуры заданного профиля состава и совершенной структуры. В ходе экспериментов были получены графики основных зависимостей, которые могут повлиять на рост структур GeSi. Установлена зависимость ионного тока от тока эмиссии при различном напряжении смещения. При помощи метода дифракции быстрых электронов получена зависимость 2D-3D перехода при разных температурах подложки с напряжением смещения и без него.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, ионный ток, наностройки Ge, Sn

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| 1. Введение .....  | 5  |
| 2. Теоретическая часть. ....   | 6  |
| 2.1. Электронно-лучевой испаритель и его принцип действия.....   | 6  |
| 2.2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии в создании кремниевых структур  | 7  |
| 2.3. Использование ионов, генерированных при электронно-лучевом испарении, в качестве инструмента для активации поверхностных ростовых процессов ..... | 9  |
| 2.4. Формирование наностроек Ge на поверхности Si.....   | 10 |
| 3. Экспериментальная часть .....   | 11 |
| 3.1. Схема эксперимента и используемое оборудование .....  | 11 |
| 3.2. Методика измерения.....   | 11 |
| 3.3. Результаты экспериментов .....  | 12 |
| 3.3.1. Зависимость тока на подложке при разном смещении напряжение и фиксированном токе эмиссии .....  | 12 |
| 3.3.2. Зависимость полного тока на подложке от тока эмиссии при разном смещении.....   | 13 |
| 3.3.3. Температурная зависимость 2D-3D перехода при росте Ge с подачей разного смещения напряжения и без него .....                                    | 14 |
| 4. Выводы.....   | 16 |
| 5. Литература.....   | 17 |

## 1. Введение

В современном мире большой интерес возникает к полупроводниковым гетероструктурам, выращенным на специально подготовленных подложках, имеющих центры в виде ямок для зарождения трехмерных наноструктур. Рост на подложках является одним из способов контроля мест зарождения нанобъектов и их упорядочения в пространстве. Упорядочение наноструктур в свою очередь является ключевым фактором для их практического применения в микро- и нанoeлектронных устройствах, которые включают в себя запоминающие устройства, лазеры и транзисторы. Существуют различные способы создания структурированной поверхности полупроводниковых подложек. Одним из них является метод молекулярно-лучевой эпитаксии.

### **Цель работы:**

1. Освоить метод молекулярно-лучевой эпитаксии.
2. Получить основные зависимости, которые могут повлиять на формирование поверхности GeSi-структур

## 2. Теоретическая часть.

### 2.1. Электронно-лучевой испаритель и его принцип действия

Электронный луч по удельной энергетической мощности, простоте управления, эффективности и локальности нагрева превосходит многие доступные источники. Также он может иметь произвольную форму и, в отличие от других способов, не вносит примесей в обрабатываемый материал.

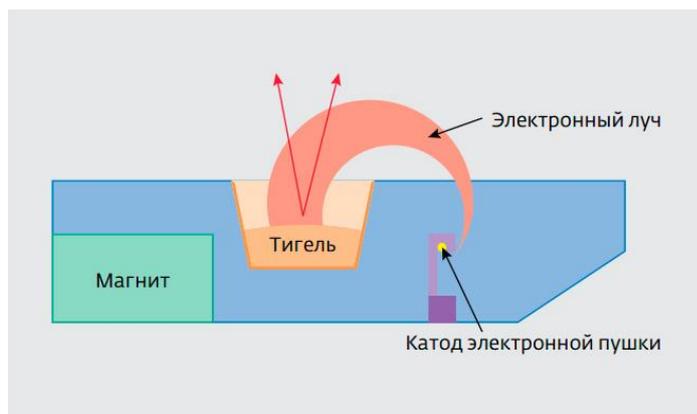


Рис. 1. Схематичное устройство ЭЛИ

Электронно-лучевые испарители (ЭЛИ) широко используются в производстве и научных исследованиях. Они дают возможность получения тонких пленок из различных материалов. Фокусировка электронного пучка позволяет получать большую концентрацию мощности (до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и высокую температуру нагрева, обеспечивая возможность испарения с большой скоростью даже самых тугоплавких материалов. В методе эффективно реализуется автотигельное испарение материала, что обеспечивает высокую чистоту и однородность осаждения.

В электронной пушке с поверхности катода происходит термоэлектронная эмиссия. Под действием электростатических и магнитных полей электроны формируются в пучок, который подводится к тиглю с испаряемым материалом. Прохождение такого пучка до объекта возможно только в высоком вакууме. При попадании на поверхность электронного пучка, материал нагревается до температуры, при которой происходит его испарение с требуемой скоростью. В образующийся поток помещается подложка, на которую осаждается испаряемое вещество.



Рис. 2. Внутренне устройство ЭЛИ

Электронно-лучевой испаритель состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого медного тигля. Он помещается в камеру, где поддерживается уровень вакуума  $10^{-4}$  Па, необходимый для беспрепятственного прохождения электронного луча, и исключение загрязнений другими материалами структуры получаемой пленки.

## 2.2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии в создании кремниевых структур

В настоящее время всё более актуально становится использование многослойных композиций, состоящих из чередующихся слоев полупроводников, металлов и диэлектриков нанометровой толщины. С помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии можно получить гетероструктуры подобного типа. Он является одним из наилучших методов выращивания многокомпонентных систем заданного профиля состава и совершенной структуры. Однако дефекты при формировании пленок сильно влияют на их механизм роста, особенно при большом несоответствии параметров решетки пленки и подложки. Это осложняет реализацию преимуществ МЛЭ в применении к получению тонких, однородных по толщине гетероэпитаксиальных пленок. Использование ионных пучков в комбинации с молекулярными пучками может существенно изменить ситуацию, так как ионы могут передавать атомам энергию и импульс непосредственно на поверхности подложки во время роста. С помощью ионов можно создать или уничтожить структурные дефекты, воздействовать на механизм зарождения и роста

гетероэпитаксиальных пленок. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии даёт множество вариантов механизмов стимулированного роста.

Установки для молекулярно-лучевой эпитаксии имеют электронно-лучевой испаритель. Около 30–40% мощности электронного луча расходуется на плавление и испарение материала. Остальная мощность идет на теплообмен посредством теплопроводности, излучения и уносится вылетающими из зоны

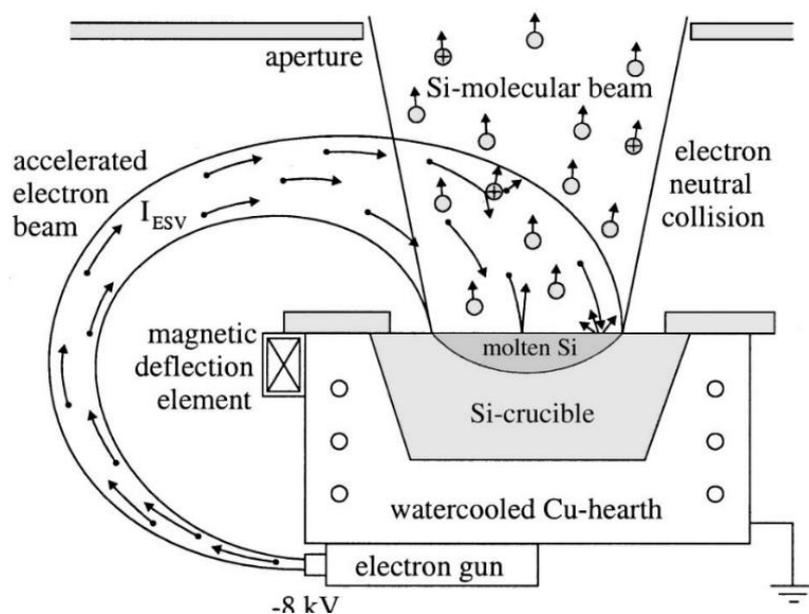


Рис.1. Ионизация в электронно-лучевом испарителе кремния

нагрева электронами, что уменьшает КПД ЭЛИ. При электронно-лучевом испарении поток электронов с энергией ускоряющего напряжения, проходя через испаряемый поток атомов, частично ионизирует его. Эти ионы будут ускоряться к подложке приложением к ней отрицательного смещения. Этот поток ионов имеет при традиционном расположении испарителя и подложки в камере такое же пространственное распределение, как и основной поток материала.

нагрева электронами, что уменьшает КПД ЭЛИ. При электронно-лучевом испарении поток электронов с энергией ускоряющего напряжения, проходя через испаряемый поток атомов, частично ионизирует его. Эти ионы будут ускоряться к подложке приложением к ней отрицательного

### 2.3. Использование ионов, генерированных при электронно-лучевом испарении, в качестве инструмента для активации поверхностных ростовых процессов

В качестве источника ионов кремния используется электронная пушка. В области выше расплава кремния поток испаряемых атомов частично ионизируется взаимодействием с электронным пучком.

Вероятность того, что атом кремния будет ионизирован электронным ударом:

$g_{\text{ион}} = F_e \cdot a \cdot n_{\text{Si}}$ , где  $F_e$ -плотность потока пучка электронов,  $a$  – сечение ионизации,  $n_{\text{Si}}$ -плотность атомов кремния.

Плотность ионного потока, падающего на поверхность, зависит от трех факторов: числа генерируемых ионов в электронной пушке, от вероятности иона покинуть зону ионизации и от вероятности поражения ионом центра подложки. Все эти параметры могут быть существенно изменены путем подачи на подложку отрицательного смещения  $U_{\text{смещения}}$ . Суммарный ток  $I_{\text{полн}}$  на подложке будет вызывать поток ионов, смешанный с электронами от электронной пушки. Однако электронный ток вносит небольшой вклад, т.к. при подаче отрицательного напряжения до подложки могут долететь только высокоэнергичные электроны. Ток может быть измерен через контакт с подложкой во время роста. Плотность ионного потока зависит от интенсивности ионов, генерируемых в пучке электронов испарителя и от фокусировки пучка ионов, извлеченного приложенным потенциалом  $U_{\text{смещения}}$ .

Зона генерации ионов ограничивается сравнительно небольшим объемом над расплавленным Si, где испаряющиеся атомы Si могут столкнуться электронами из пушки. Согласно формуле, генерация ионов пропорциональна  $F_e$  и  $n_{\text{Si}}$ . Генерирование ионов может быть описано в простой модели, предполагающей однородность в объеме расплавленного Si с базовой площадью  $A$  и высотой  $H$ . С учетом соотношения для тока эмиссии  $I_{\text{эм}}$ :  $I_{\text{эм}} = A \cdot F_e \cdot q$ . Ток  $I_{\text{полн}}$

измеряется через контакт с подложкой и дает среднюю плотность заряда потока частиц на всей площади подложки, где основную часть составляют ионы.

Использование ионов, генерированных при электронно-лучевом испарении, для управления процессами роста гетероструктур позволяет обходиться в установках молекулярно-лучевых установках без дополнительных источников ионов. Кроме того, применение ионов из электронно-лучевых испарителей для создания многоцелевых защитных покрытий значительно расширяет функциональные возможности электронно-лучевых испарителей и соответствующих установок.

#### **2.4. Формирование nanoостровков Ge на поверхности Si**

Создание nanoостровков Ge на поверхности Si вызывает большой интерес. Он объясняется уникальными физическими свойствами квантовых точек (КТ). На их основе возможно создать оптоэлектронных приборов нового поколения. С приборной точки зрения, создание таких структур дает возможность устранить проблемы современной микро- и оптоэлектроники, приводящее к деградации свойств приборов при повышении рабочей температуры. Облучение поверхности потоком низкоэнергетических ионов во время роста является перспективным способом управления плотностью формирующихся островков и распределением островков по размерам. Однако механизмы влияния ионов на процессы зарождения и роста остаются во многом ещё не изучены.

### **3. Экспериментальная часть**

#### **3.1. Схема эксперимента и используемое оборудование**

Электронно-лучевой испаритель подключен к внешнему источнику напряжения, который создает напряжение смещения на подложке. При регулировании этого напряжения, изменятся ионный ток, летящий к подложке.

Полный ток на подложке измеряется мультиметром.

Для снятия температурной зависимости 2D-3D перехода используется камера, записывающая дифракционную картину в реальном времени.

#### **3.2. Методика выращивания nanoостровков**

В экспериментах по выращиванию nanoостровков проводилось осаждение Ge на подложку Si(100) в установке молекулярно-лучевой эпитаксии. В начале эксперимента подложки загружались в камеру установки. Очистка поверхности подложки состояла проводилась при температуре  $T=700^{\circ}\text{C}$  в слабом потоке Si. Затем выращивался буферный слой кремния толщиной 20 нм при постепенном повышении температуры роста от 250 до  $500^{\circ}\text{C}$ . После осаждения Ge и формирования nanoостровков подложку отжигали при  $700^{\circ}\text{C}$  в течение 5 мин и эксперимент проводился заново.

Данная процедура позволяет получить атомарно-чистую поверхность кремния, на которой можно было проводить осаждения Ge. На буферный слой Si осаждался слой Ge толщиной, достаточной для начала формирования трехмерных островков. Морфология поверхности образца исследуется с помощью дифракции быстрых электронов.

### 3.3. Результаты экспериментов

#### 3.3.1. Зависимость тока на подложке при разном смещении напряжение и фиксированном токе эмиссии

Чистка подложки производится при следующих параметрах:  $T=840^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\text{эм}}=90\text{mA}$ ,  $t=2$  мин. 30 сек. Структура  $(1\times 1)$  + фон переходит в  $(2\times 1)$ .

Для проведения измерений выращивается буферный слой Si (100), толщиной 20 нм.

Фиксируется напряжение на блоке питания ЭЛИ,  $I_{\text{эм}}=140\text{mA}$ : измеряется ток на подложке  $I_{\text{полн}}$  при разном напряжении смещения  $U_{\text{смещения}}$

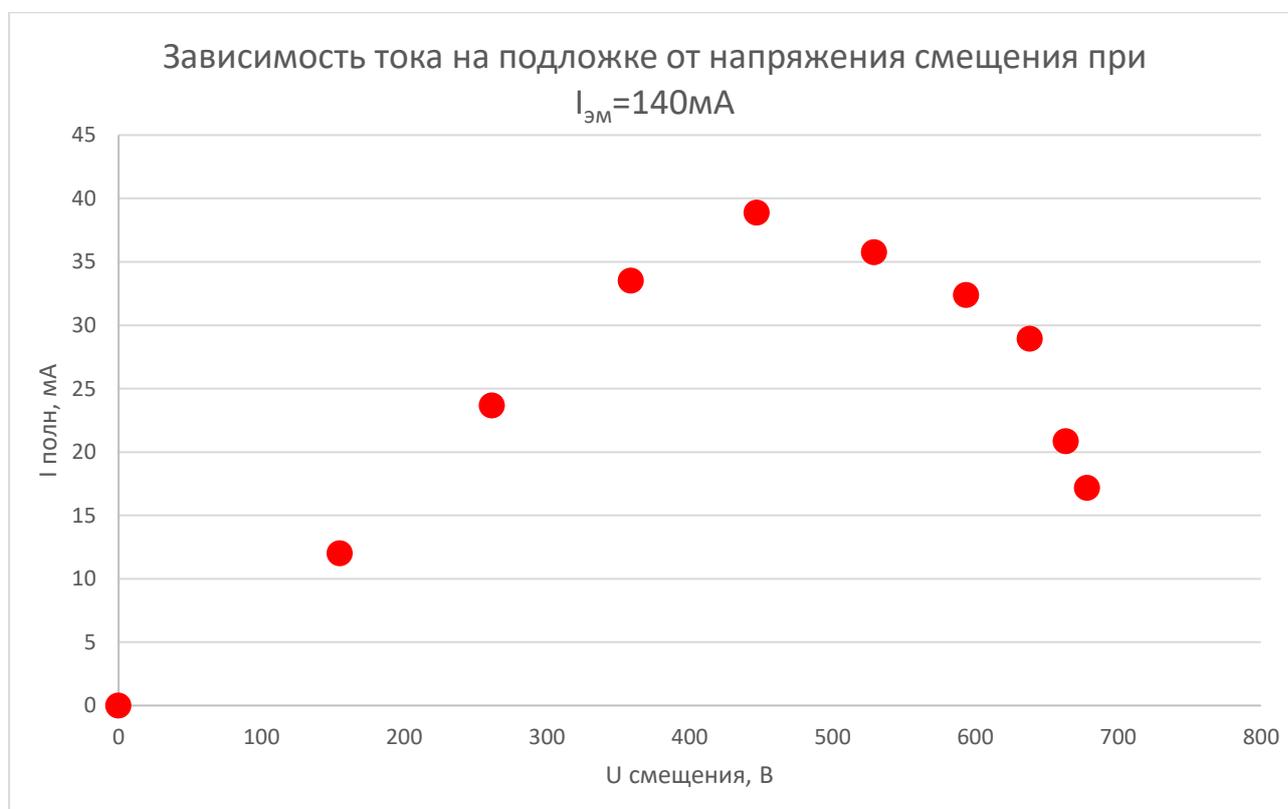


Рис. 3. График зависимости тока на подложке от напряжения смещения при токе эмиссии  $I_{\text{эм}}=140\text{mA}$

В данном эксперименте видно, что при увеличении напряжения смещения ток на подложке постепенно возрастает, но при определенном напряжении смещения начинает падать. Возможно, это связано с тем, что полный ток, летящий на подложку, состоит из ионов и электронов. При большом напряжении смещения полный ток на подложке начинает падать, т.к. электроны отталкиваются от подложки при большом напряжении смещения и тогда основную часть тока будут составлять ионы.

### 3.3.2. Зависимость полного тока на подложке от тока эмиссии при разном смещении

При увеличении отрицательного напряжения смещения, полный ток на подложке возрастает, т.к. основную его часть составляют ионы.

Можно увидеть зависимость полного тока от тока эмиссии. Большое количество электронов приводит к большей генерации ионов в потоке испаряемого материала.

В данном эксперименте чистки подложки не проводилось, поэтому полный ток на подложке уменьшился из-за увеличения сопротивления. Однако были получены явные зависимости ионного тока на подложке от тока эмиссии при разном напряжении смещения. Они хорошо согласуются с качественным объяснением эксперимента.

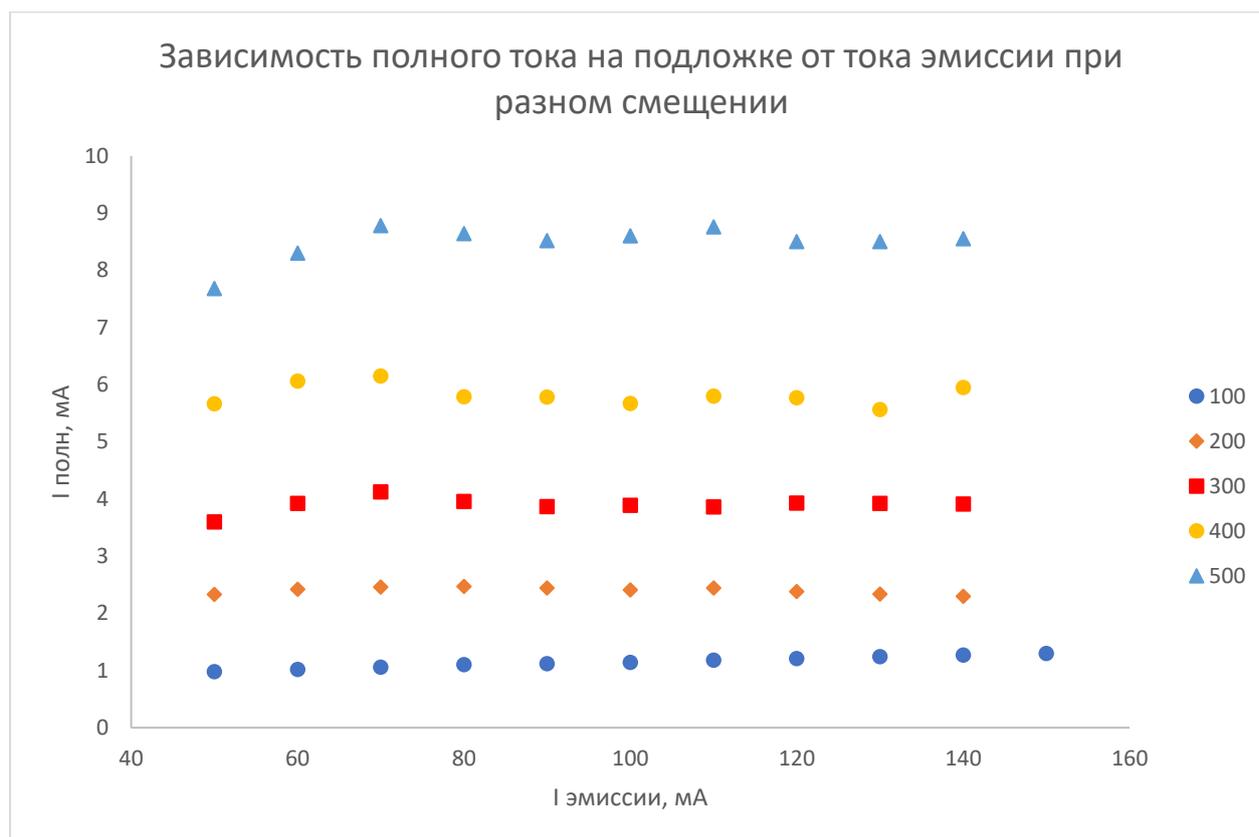


Рис. 4. График зависимости полного тока на подложке от тока эмиссии при разном смещении напряжения (100В, 200В, 300В, 400В, 500В)

### 3.3.3. Температурная зависимость 2D-3D перехода при росте Ge с подачей разного смещения напряжения и без него

До ПЭП: Структура  $(1 \times 1)$  + фон.

ПЭП:  $T=840^\circ\text{C}$ ,  $I_{\text{эм}}=90$  мА,  $t=2$  мин. 30 сек., переход в структура  $(2 \times 1)$ .

Рост буфера Si:  $T=700^\circ\text{C}$ ; 20 нм, 0,41А/с;  $I_{\text{эм}}=150$  мА,  $U=4,8$  кВ, структура  $(2 \times 1)$ .

Рост Ge:  $U=4,8$  кВ,  $T_{\text{Ge}}=1268^\circ\text{C}$ ,  $I_{\text{эм}}=80$  мА,  $v=0,044$  А/с

Ход эксперимента:

Для получения 2D-3D зависимости изменяется температура на подложке. В данном эксперименте диапазон температур составляет  $300^\circ\text{C}$ - $500^\circ\text{C}$  с шагом  $50^\circ\text{C}$ , напряжение смещения 500В. С помощью метода дифракции быстрых электронов видно изменение структуры и формирование на ней островков.

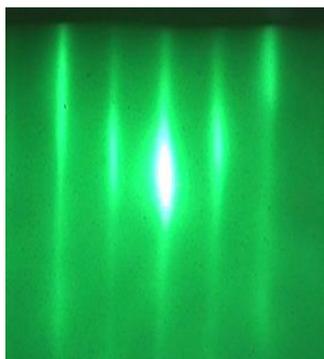


Рис.5. Структуры  $(2 \times 1)$

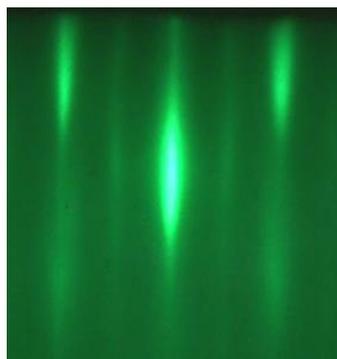


Рис.6. Формирование островков

По изменению интенсивности определяется точка 2D-3D перехода и рассчитывается толщина островков Ge.

По данным строится график толщины островков Ge в момент 2D-3D перехода при смещении 500 В (Рис.7). Далее, берется точка без подачи смещения на подложку, чтобы определить действие ионного тока на формирование поверхности.

Из эксперимента видно, что подача отрицательного напряжения смещения на подложку влияет на формирование nanoостровков.

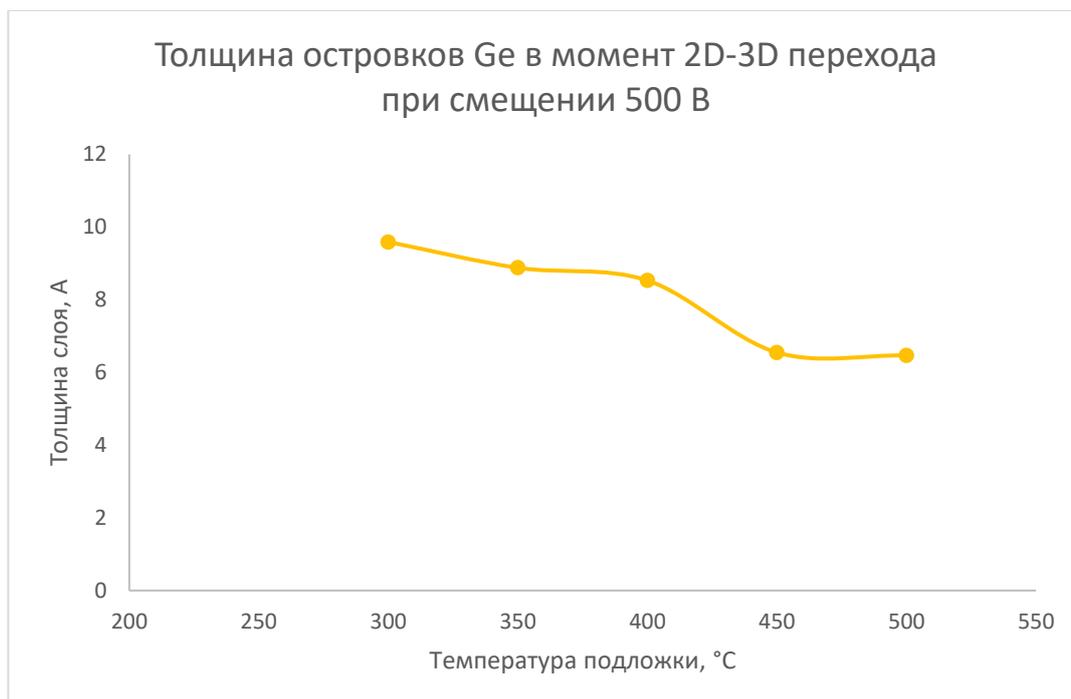


Рис.7 График температурной зависимости 2D-3D перехода

#### **4. Выводы**

В ходе работы был изучен метод молекулярно-лучевой эпитаксии.

Получены основные зависимости, которые могут повлиять на формирование наноструктур Ge на кремнии. Измерены зависимости ионного тока от тока эмиссии и напряжения смещения. Была установлена температурная зависимость 2D-3D перехода с подачей напряжения смещения на подложку.

Можно сделать вывод, что ионный ток влияет на толщину наноструктур Ge на Si в момент начала их формирования.

## 5. Литература

1. Ашуров Х.Б. Моносилановая технология получения поликристаллического кремния и ионно-стимулированные методы создания кремниевых структур //Ташкент, 2016. 52 с.
2. Будревич А.Г., Лютович А.С. Механизмы ионно-молекулярной эпитаксии// Ташкент, 1987. 21 с.