

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Иванов Руслан Бэлигтуевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Изучение влияния нагрева магниевой мишени на прохождение ионов в
ускорительном масс-спектрометре ИЯФ»

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18306

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Оглавление

Аннотация	3
Введение.....	4
Теоретическая часть.....	5
1.1 Ионное распыление	5
1.2 Движение заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле	5
1.3 Селекция ионов при движении в электромагнитных полях	6
1.4 Перезарядка ионов.....	7
Экспериментальная часть.....	8
1.1 Описание установки	8
1.2 Проведение эксперимента	9
1.3 Результаты измерений.....	10
Анализ данных.....	13
Заключение	16
Список литературы	17

Изучение влияния нагрева магниевой мишени на прохождение ионов в ускорительном масс-спектрометре ИЯФ

Иванов Руслан Бэлигтуевич

Физический факультет, 2 курс, 3 семестр, 2019 год

18306 группа

Научный руководитель:

Растигеев Сергей Анатольевич

Аннотация

Целью исследования являлось изучение влияния нагрева магниевой мишени на прохождение ионов в ускорительном масс-спектрометре (УМС). Было теоретически изучено прохождение и селекция ионов в УМС. Приведено краткое описание УМС и условий проведенного эксперимента. Была получена экспериментальная зависимость количества прошедших через УМС ионов $^{13}\text{C}^{3+}$ от температуры нагрева корпуса магниевой мишени.

Введение

Ускорительная масс-спектрометрия – сверхчувствительный метод изотопного анализа вещества, который основан на “извлечении” из образца отдельных атомов и подсчете интересующих атомов, причем для УМС-анализа необходимо 0,001 грамм вещества. Данный метод широко применяется в археологии для радиоуглеродного датирования, а также в других областях науки, таких как медицина, биология, астрофизика, криминалистика и др. Метод основан на “извлечении” из образца атомов и подсчете интересующих атомов с предварительной селекцией с помощью электромагнитных полей.

Теоретическая часть

1.1 Ионное распыление

В УМС атомы из пластины с образцом “извлекают” ионным распылением. Ионное распыление – эмиссия атомов с поверхности твердого тела при его бомбардировке тяжелыми частицами. Налетающие тяжелые частицы передают энергию многим атомам мишени, которые в свою очередь сталкиваются с другими атомами. Происходит распределение энергии и некоторые атомы, имеющие энергию равной или больше работы выхода могут покинуть поверхность.

1.2 Движение заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле

На движущуюся в вакууме частицу с зарядом q со скоростью $\mathbf{v}$ во внешнем постоянном электромагнитном поле действует сила Лоренца со стороны поля [1]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E}q + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (1)$$

Так как в стационарном случае электрическое поле потенциально, то работа, совершаемая полем при перемещении частицы с зарядом q , не зависит от траектории пути и равна [2]:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2)$$

где φ_1 и φ_2 – значения скалярного потенциала электрического поля в начальной и конечной точках пути соответственно. Это позволяет с помощью электрического потенциала контролировать энергию частиц в УМС.

Используя второй закон Ньютона и уравнение (1) получим уравнение движения частицы:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{E}q}{m} + \frac{q[\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}]}{m} \quad (3)$$

Из уравнения (2) видно, что в одном и том же электромагнитном поле частицы с различными значениями заряда, массы и скорости будут двигаться

по различным траекториям, что позволяет проводить селекцию по данным признакам.

1.3 Селекция ионов при движении в электромагнитных полях

В УМС селекция ионов происходит при повороте ускоренного ионного пучка по дуге окружности в электромагнитном поле. Селекция происходит в следующих полях:

1. Электрическое поле равно нулю, магнитное поле ненулевое, однородное и перпендикулярное скорости движения частицы. Из уравнения (1) сила, действующая на частицу, перпендикулярна скорости и имеет постоянную величину. Такое движение является движением по окружности, радиус R которой равен:

$$R = \frac{v^2}{a} \quad (4)$$

Пользуясь вторым законом Ньютона получим:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{\sqrt{2m\varepsilon}}{qB} \quad (5)$$

где $\varepsilon = \frac{mv^2}{2}$ - энергия поступательного движения частицы.

Из формулы (5) видно, что при фиксированных значениях магнитного поля B и энергии ионов ε через трубку с радиусом поворота R пролетят только ионы с определенным значением величины $\frac{\sqrt{m}}{q}$ равным:

$$\frac{\sqrt{m}}{q} = \frac{RB}{\sqrt{2\varepsilon}} \quad (6)$$

Остальные ионы упадут на стенку трубки.

2. Магнитное поле равно нулю, электрическое поле осесимметрично, причем в каждой точке оно направлено по расстоянию от точки до оси симметрии. В пространстве можно выделить область между двумя концентрическими цилиндрами с осями совпадающими с осью симметрии электрического поля и небольшой разницей радиусов, такой, что внутри области которого величину электрического поля можно считать постоянной. Пользуясь вторым законом Ньютона получим:

$$R = \frac{mv^2}{Eq} = \frac{2\varepsilon}{Eq} \quad (7)$$

В данном случае при фиксированных значениях электрического поля E и энергии ионов ε через трубку с радиусом поворота R пролетят только ионы с определенным значением q , равным:

$$q = \frac{2\varepsilon}{ER} \quad (8)$$

Остальные ионы упадут на стенку трубки.

1.4 Перезарядка ионов

Так как кроме атомарных ионов из образца выбиваются также молекулярные ионы, среди которых присутствуют молекулярные ионы, изобарные интересующим нас ионам, что затрудняет селекцию. В отличие от атомарных ионов молекулярные ионы имеют максимальное зарядовое число равное +2, после отрыва дополнительного электрона молекула разваливается. С помощью перезарядки можно получить пучок ионов всех размерностей, из которых зарядовое число +3 будут иметь только атомарные ионы.

Перезарядка ионов – процесс взаимодействия ионов с нейтральными атомами, молекулами или поверхностью твердого тела, в ходе которого происходит обмен электронами. Если мишенью является трубка, заполненная парами, вероятность перезарядки ионов при пролете ионов через мишень зависит от толщины мишени и давления паров в трубке. Ниже приведена таблица зависимости давления паров магния от их температуры.

Таблица 1. Зависимость давления насыщенных паров магния от температуры[3]

T, K	T, °C	p, Па
700,00	426,90	0,97
750,00	476,90	5,06
800,00	526,90	21,50
850,00	576,90	76,80
900,00	626,90	237,00
950,00	676,90	705,00

1000,00	726,90	1600,00
---------	--------	---------

Экспериментальная часть

1.1 Описание установки

Данная работа проводилась на ускорительном масс-спектрометре ИЯФ СО РАН [4].

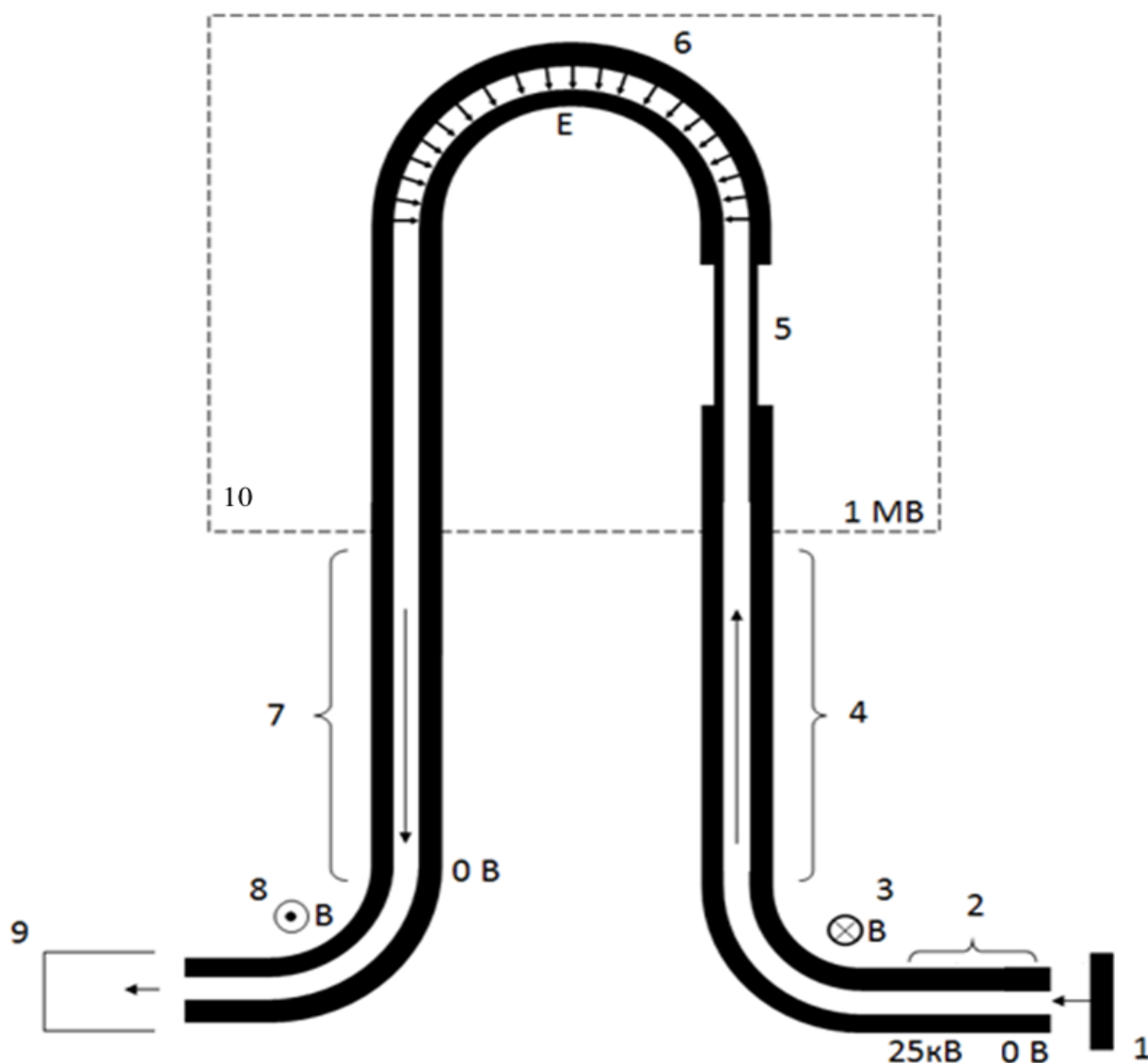


Рис 1. Схема установки. 1 – ионный источник; 2, 4, 7 – ускорительные трубки; 3, 6, 8 – системы селекции; 5 – перезарядная мишень; 9 – детектор ионного тока; 10 – высоковольтный терминал.

Назначение установки – рассчитать количество интересующих частиц в данном образце.

Ионы формируются в источнике 1 и положительным потенциалом вытягиваются в трубку 2, образуя отрицательный ионный пучок. Далее пучок проходит через систему селекции 3, которая существенно подавляет массы отличающиеся на от массы интересующего атома, и ускоряется к высоковольтному терминалу 10, в котором происходит перезарядка ионов в мишени 5 и селекция в системе 6, которая отсеивает молекулярные ионы. Затем пучок ускоряется в трубке 7, проходит систему селекции 8, подавляющая отличные от интересующей массы, и попадает в детектор ионного тока 9.

1.2 Проведение эксперимента

До начала регистрации ионного тока установка калибруется для прохождения через нее только ионов $^{13}\text{C}^{3+}$, используя формулы (8) и (6):

1. Значение потенциала, вытягивающего ионы в трубку 2, равно 25кВ.
2. Значение магнитного поля в системе селекции 3 равно 0,21 Тл
3. Потенциал высоковольтного терминала 10 равен 1 МВ.
4. Значение электрического поля в системе селекции 6 равно 1,67 МВ/м
5. Значение потенциала на входе в систему селекции 8 равно 0.
6. Значение магнитного поля в системе селекции 8 равно 0,86 Тл.
7. Радиусы поворота в системах селекции 3, 6, 8 равен 0,4 м.
8. Перезарядная мишень – трубка, заполненная парами магния, с внутренним диаметром 6 мм и длиной 30 см.

Давление паров магния в мишени контролируется с помощью нагрева корпуса мишени, температура которого измеряется термопарой.

Включается нагрев корпуса мишени. Когда температура корпуса достигает 570°C , нагрев выключается и начинается регистрация ионного тока. Мишень охлаждается, значение ионного тока падает. Нагрев снова включается, когда регистрируемый ионный ток практически прекращается. По мере нагрева корпуса мишени ионный ток возрастает. Скорость изменения ионного тока

уменьшается со временем. Регистрация прекращается, когда значение ионного тока прекращает значительно меняться со временем.

1.3 Результаты измерений

Ниже приведены графики зависимости температуры корпуса магниевой мишени и регистрируемого ионного тока от времени, а также зависимость регистрируемого ионного тока от температуры корпуса трубки.

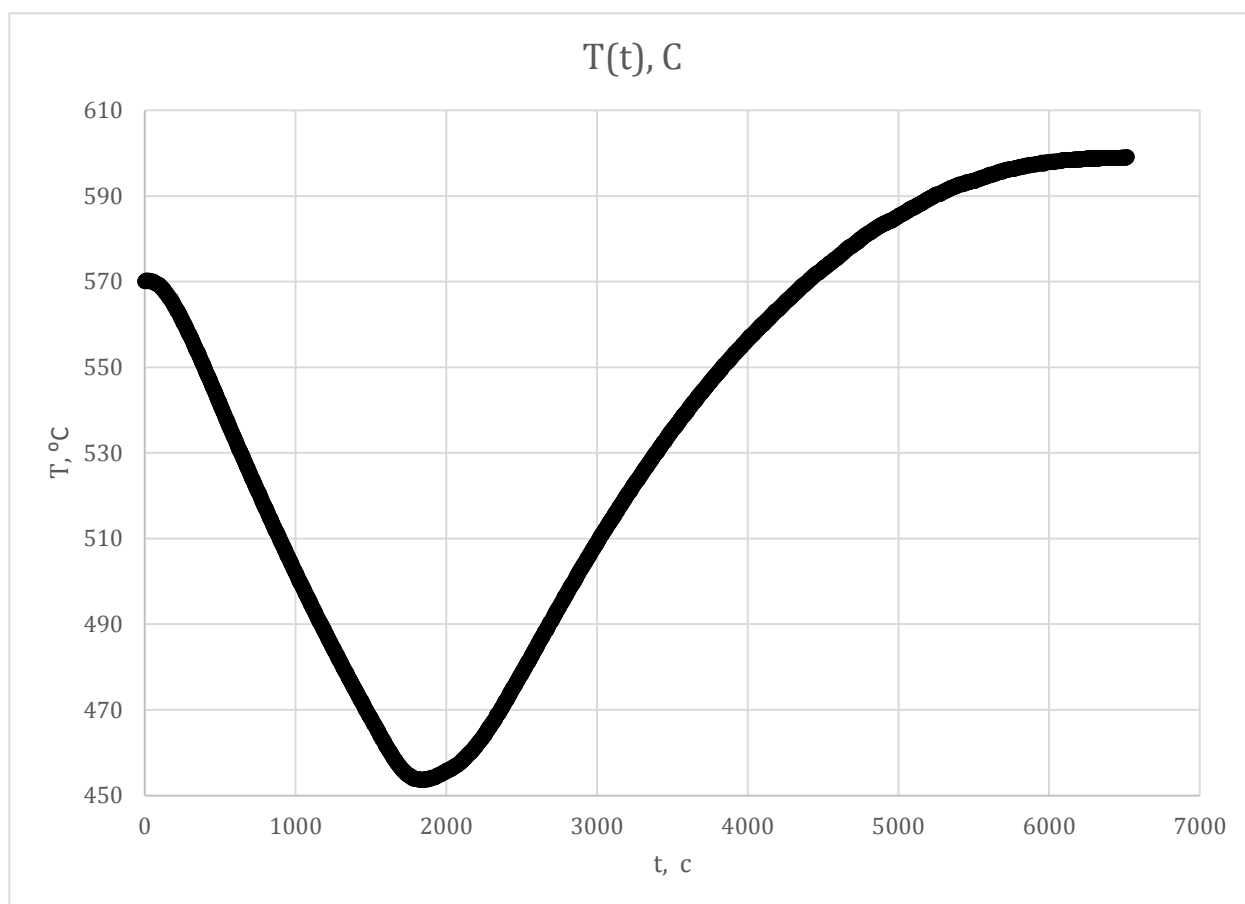


Рис 2. График зависимости температуры корпуса мишени от времени.

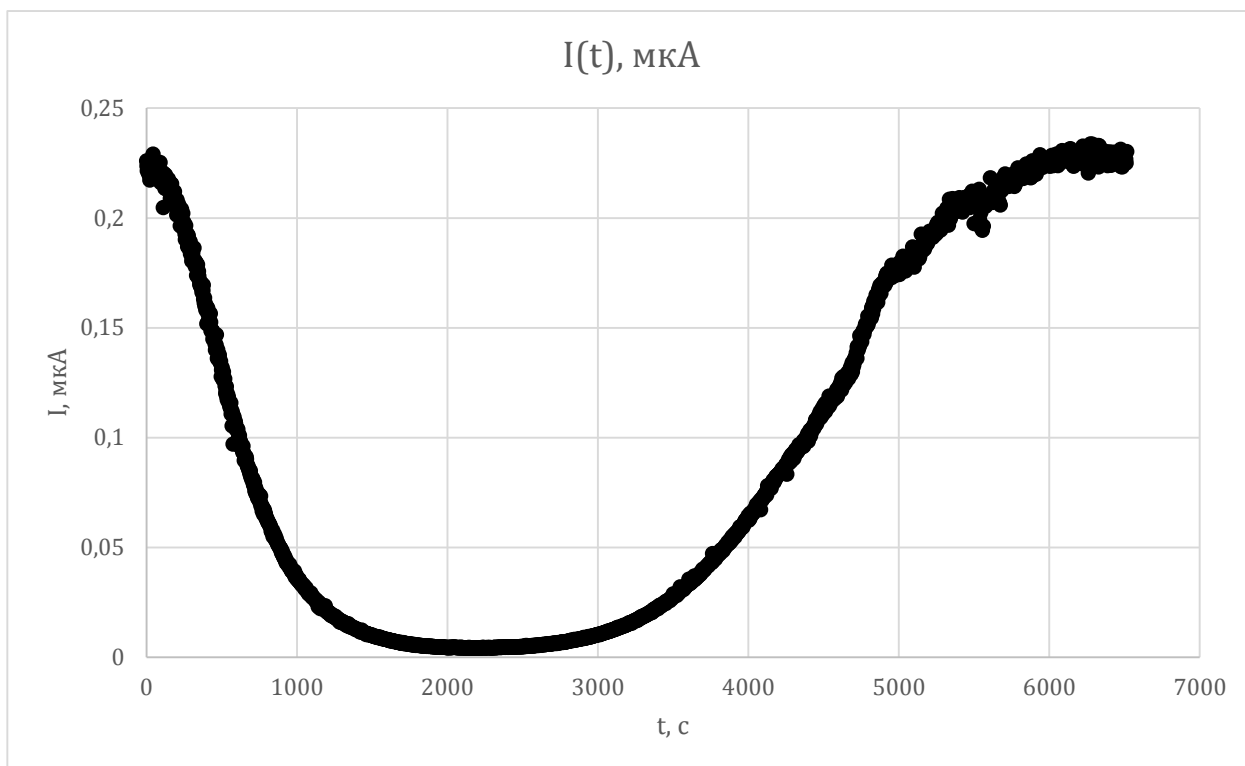


Рис 3. График зависимости ионного тока от времени.

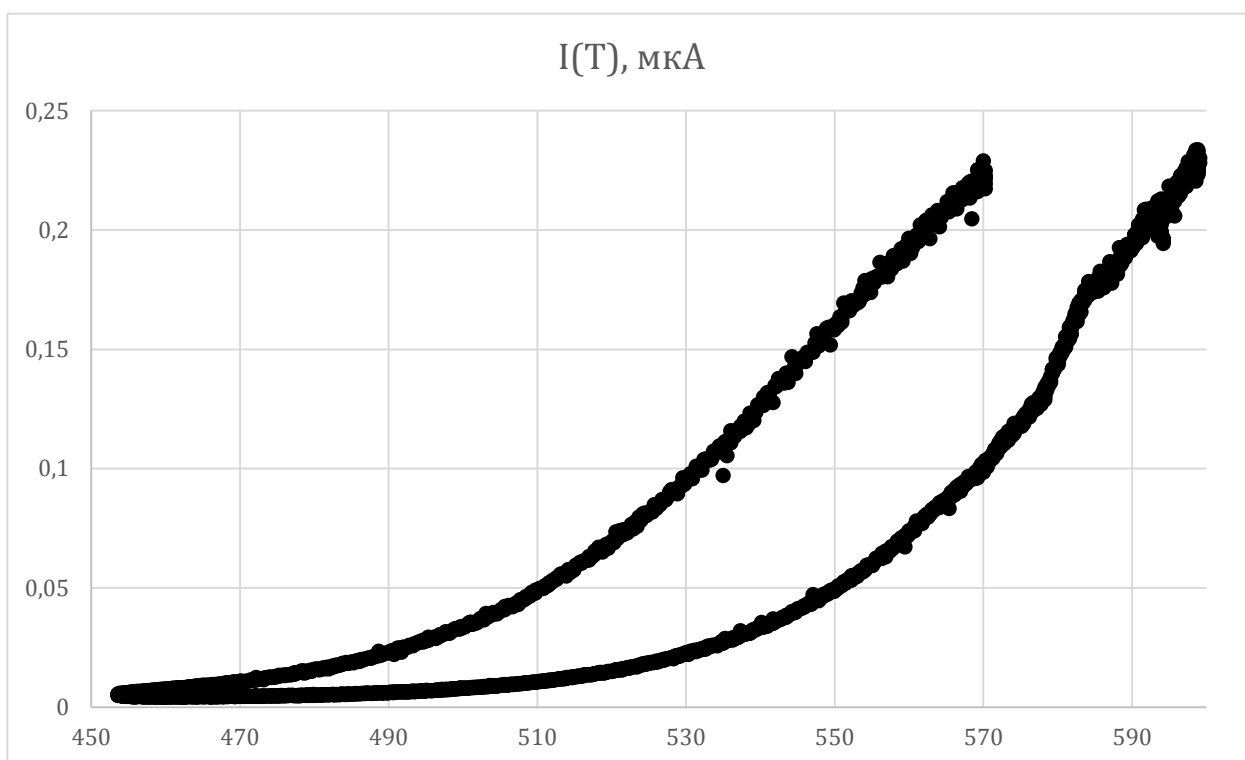


Рис 4. График зависимости ионного тока от температуры корпуса мишени.

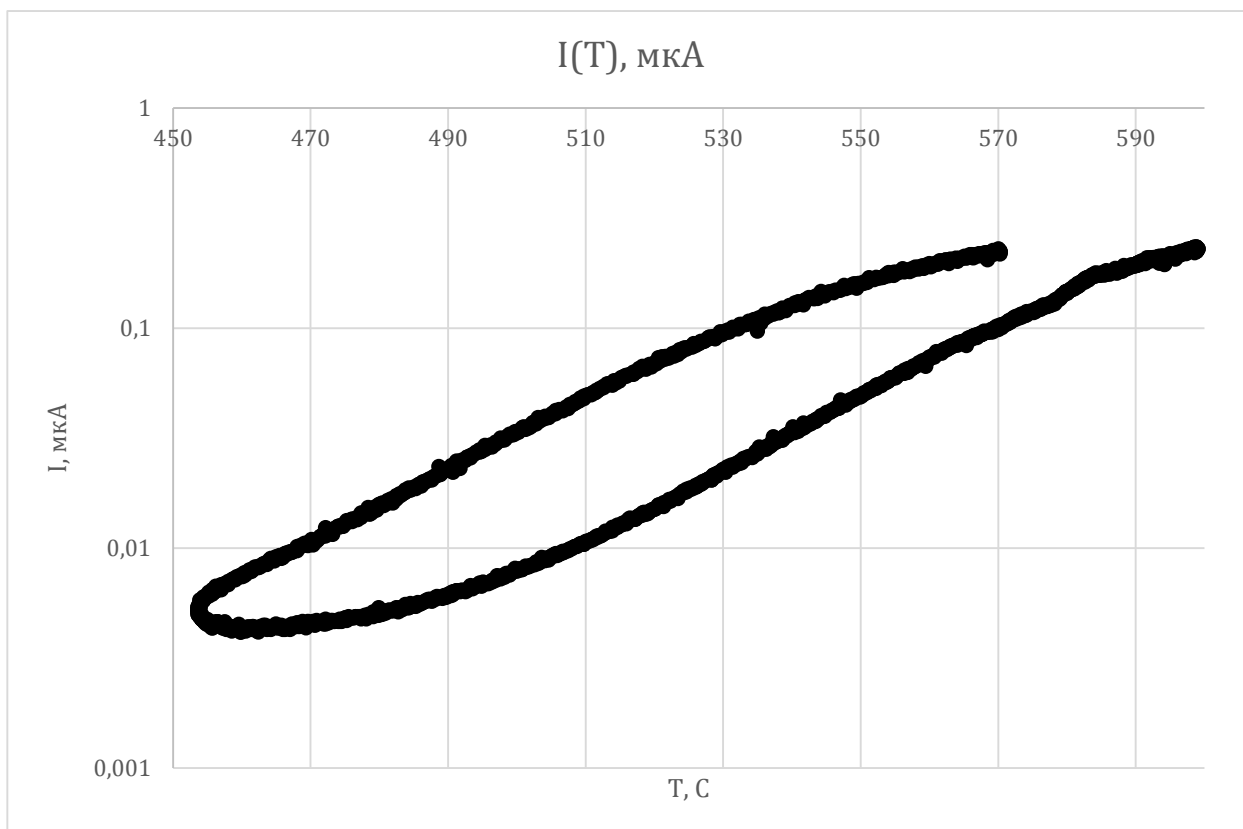


Рис 5. График зависимости ионного тока от температуры корпуса мишени с логарифмической шкалой.

Анализ данных

На рис. 4 наблюдается гистерезис. Это объясняется тем, что температура паров магния в трубке не совпадает с температурой корпуса трубки. В реальности температура паров запаздывает относительно температуры корпуса. При температурах нагрева, при которых проводился эксперимент, нагрев паров происходит в основном за счет теплопроводности стенок контейнера. Изменение температуры паров пропорционально количеству подведенного тепла, а значит пропорционально разности температуры паров и корпуса.

$$\frac{dT_{\text{п}}}{dt} = (T_{\text{к}} - T_{\text{п}})/\tau \quad (9)$$

где $T_{\text{к}}$ – температура корпуса, $T_{\text{п}}$ – температура паров, τ – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность времени, характеризующий задержку изменения температуры магния относительно изменения температуры корпуса.

Численно решая уравнение (9), получим для кривой нагрева:

$$T_{\text{п } k+1} = T_{\text{п } k} + (T_{\text{к } k} - T_{\text{п } k})(t_{k+1} - t_k)/\tau \quad (10)$$

Гистерезис наименее выражен при $\tau = 380$ с. Тогда получаем приближенное значение температуры паров магния от времени и зависимость ионного тока от температуры паров.

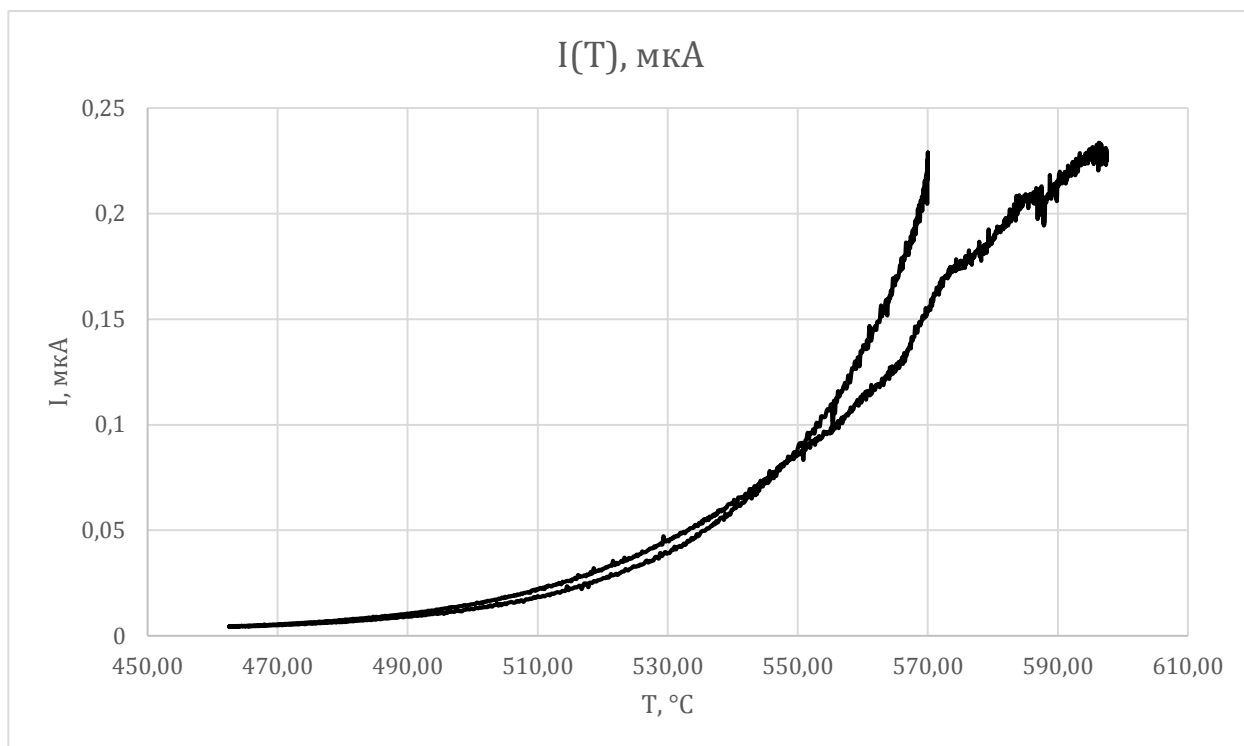


Рис. 6. Зависимость ионного тока от температуры мишени.

Так как на детектор падают только ионы $^{13}\text{C}^{3+}$, то количество пролетевших через УМС ионов в секунду равно отношению ионного тока к заряду одного иона, равного $3e$, где e – абсолютный заряд электрона.

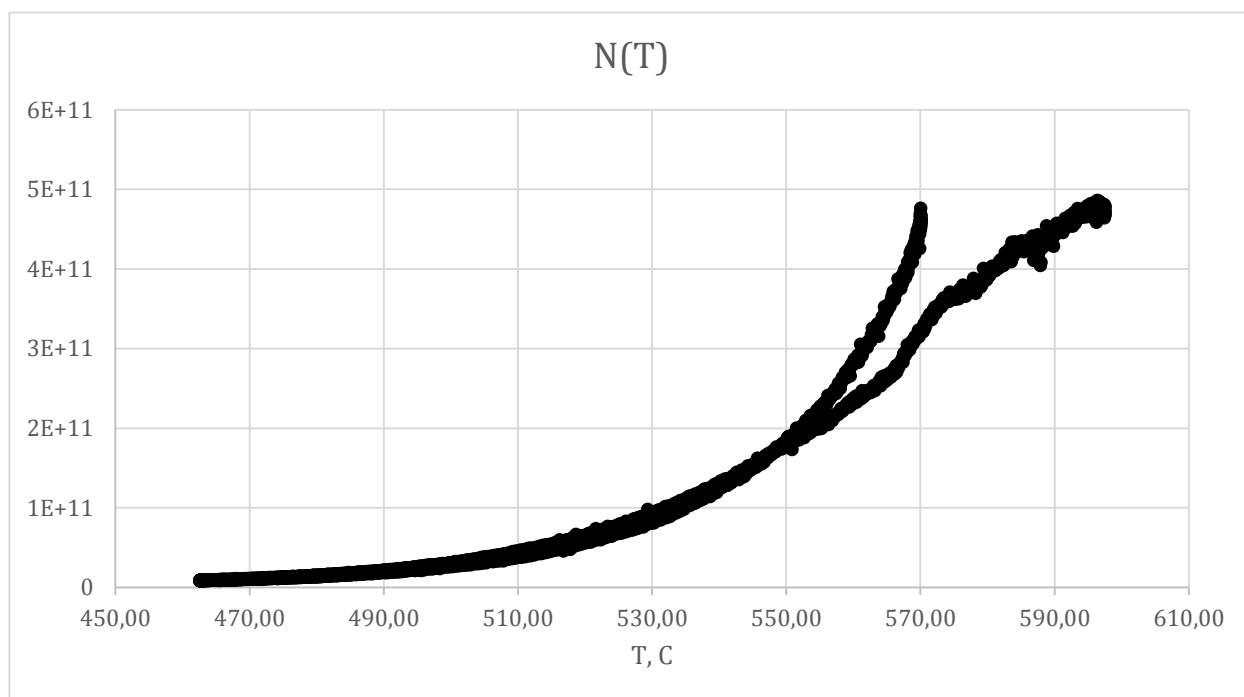


Рис 7. Зависимость количества пролетевших в секунду через УМС частиц $^{13}\text{C}^{3+}$ от нагрева мишени.

Изменение температуры нагрева мишени влияет на прохождение ионов только после мишени. Низкая температура паров магния согласно таблице 1 означает низкое давление в мишени. Чем ниже давление паров в мишени, тем ниже вероятность перезарядки, а значит ниже количество ионов $^{13}\text{C}^{3+}$. Так как установка настроена на прохождение только этих ионов, то ионный ток состоит только из них. Из этого следует, что уменьшение температуры паров магния в мишени означает уменьшение регистрируемого ионного тока.

Заключение

В результате эксперимента была получена зависимость количества ионов $^{13}\text{C}^{3+}$, прошедших УМС, от температуры паров магния в мишени. Экспериментальные данные соответствуют теоретической части.

Список литературы

1. Яковлев В. И. Классическая электродинамика: Часть 1. Электричество и магнетизм. – Изд. 2-е, испр. и доп., 2016
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики, том 3. Электричество. – 1977
3. https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor_pressure
4. <http://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/nauchnye-ustanovki/uskoritelnyj-mass-spektrometr>