

И.Н. ФЕТИСОВ

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА ВИЗУАЛЬНЫМ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Методические указания к лабораторной работе Э –70 по курсу общей физики
Москва, 2019 г.

Рассмотрены законы движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях, описана лабораторная установка, изложена методика измерения удельного заряда электрона. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Удельным зарядом элементарной частицы называют отношение заряда к массе: q/m . Удельный заряд, являющийся фундаментальной физической величиной, можно определить, изучая движение частицы в электрическом и магнитном полях под действием сил, законы которых известны [1–6]. Дж. Дж. Томсон в 1897 г., выполнив подобные опыты с катодными лучами в газоразрядной трубке, обнаружил, что эти лучи являются потоком отрицательных частиц, удельный заряд которых в 1836 раз больше, чем у водородных ионов, т.е., у протонов. Это означало, что отрицательные атомные частицы (электроны) имеют в 1836 раз меньшую массу, чем положительно заряженные частицы – протоны [1].

Цель работы – ознакомление с движением заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, определение удельного заряда электрона.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Методика опыта

В лабораторной работе для измерения удельного заряда электрона применяется специальная электронная лампа, используемая обычно как индикатор (рис. 1). Лампа состоит из семи вакуумных диодов с общим катодом в виде тонкой проволоки, натянутой вдоль трубки. Катод испускает электроны, когда его

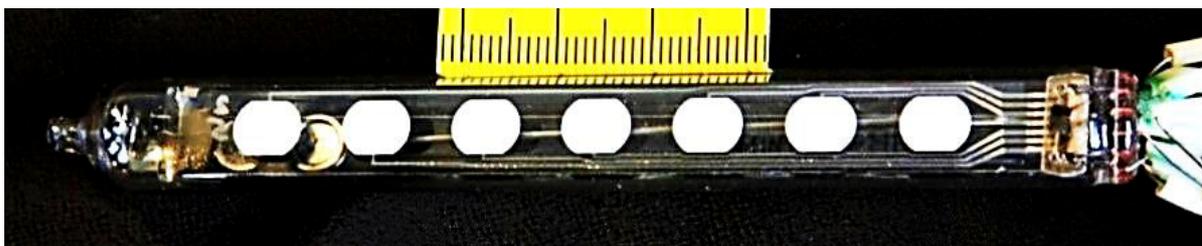


Рис. 1. Вакуумно-люминесцентный индикатор (ИВ-26), состоящий из 7 диодов с плоским анодом, покрытым люминофором.

разогревают электрическим током (явление *термоэлектронной эмиссии*). На плоской стеклянной пластине, расположенной параллельно катоду, методом напыления изготовлены семь металлических анодов с выводами, на которые можно подать положительный потенциал до 30 В относительно катода. Испущенные катодом электроны разгоняются в электрическом поле и бомбардируют поверхность анодов, покрытую люминофором. Люминофор светится в местах, облучаемых электронами (рис. 2).

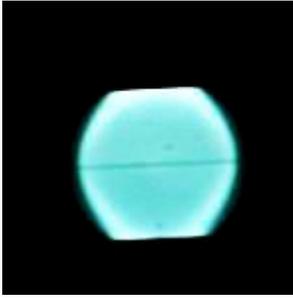


Рис. 2. Свечение анода в отсутствие магнитного поля. Тонкая линия – катод.

В электрическом поле напряженности \vec{E} на заряд q действует сила $\vec{F}_e = q\vec{E}$.

Испущенный катодом электрон, начальной энергией которого можно пренебречь, приобретает в электрическом поле кинетическую энергию, равную работе сил поля на участке от катода до анода. Работу находим как произведение заряда на разность потенциалов U между катодом и анодом:

$$\frac{mv^2}{2} = qU. \quad (1)$$

Из формулы (1) получаем выражение для конечной скорости электронов:

$$v = \sqrt{2qU/m}. \quad (2)$$

В лампе линии напряженности электрического поля лежат в плоскостях, перпендикулярных оси лампы; поэтому электроны движутся в этих плоскостях (рис. 3), Напряженность поля, как видно из рис. 3 по густоте линий, убывает по мере удаления от катода. Поэтому основной разгон электронов происходит вблизи катода. Приближенно будем считать, что конечную скорость, выражаемую формулой (2), электроны приобретают вблизи катода, а дальше движутся с постоянной по модулю скоростью.

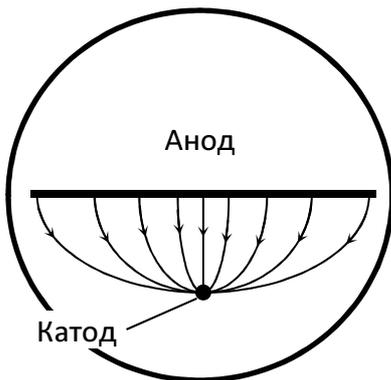


Рис.3

Помимо электрического поля, в лампе создают магнитное поле с помощью двух катушек с током (рис. 4). Линии магнитного поля направлены вдоль оси лампы. На заряженную частицу, движущуюся со скоростью \vec{v} в магнитном поле

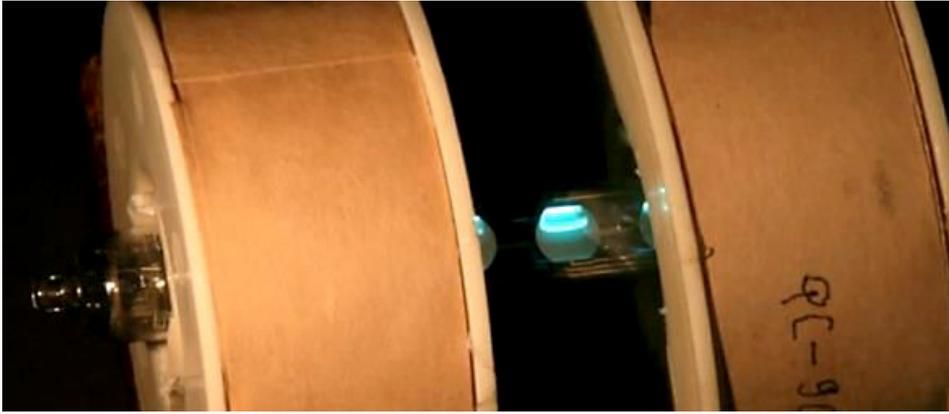


Рис. 4. Вакуумно-люминесцентный индикатор в магнитном поле.

с индукцией \vec{B} , действует магнитная сила (сила Лоренца):

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}).$$

Модуль силы равен

$$F_m = qvB \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Направление силы можно определить

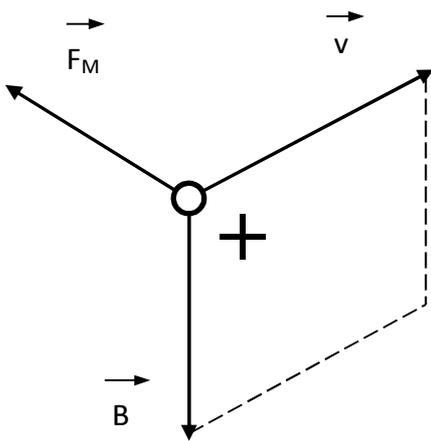


Рис.5

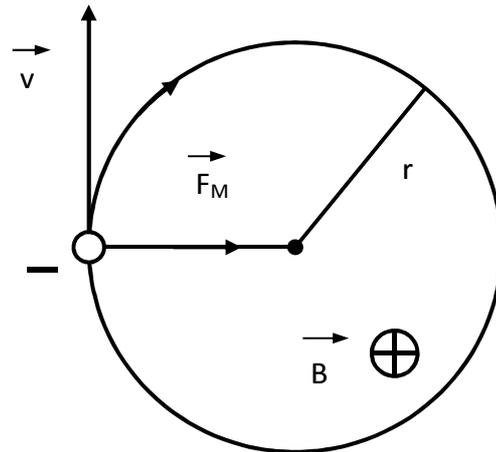


Рис.6

с помощью правила для векторного произведения или левой руки (рис. 5). Поскольку магнитная сила составляет прямой угол с вектором скорости, она не совершает работы, т.е., не изменяет модуля скорости, а изменяет только направление вектора \vec{v} .

В лампе под действием магнитной силы электроны движутся по окружности радиуса r (рис. 6). В согласии со вторым законом Ньютона, силу Лоренца приравняем произведению массы электрона на нормальное (центростремительное) ускорение:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB. \quad (3)$$

Отсюда получаем выражение для радиуса окружности:

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (4)$$

Исключая скорость из формул (1) и (3), получим выражение (5) для удельного заряда частицы (q/m):

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2}. \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), для нахождения удельного заряда необходимо измерить анодное напряжение (U), магнитную индукцию (B) в области движения электронов, а также радиус окружности (r).

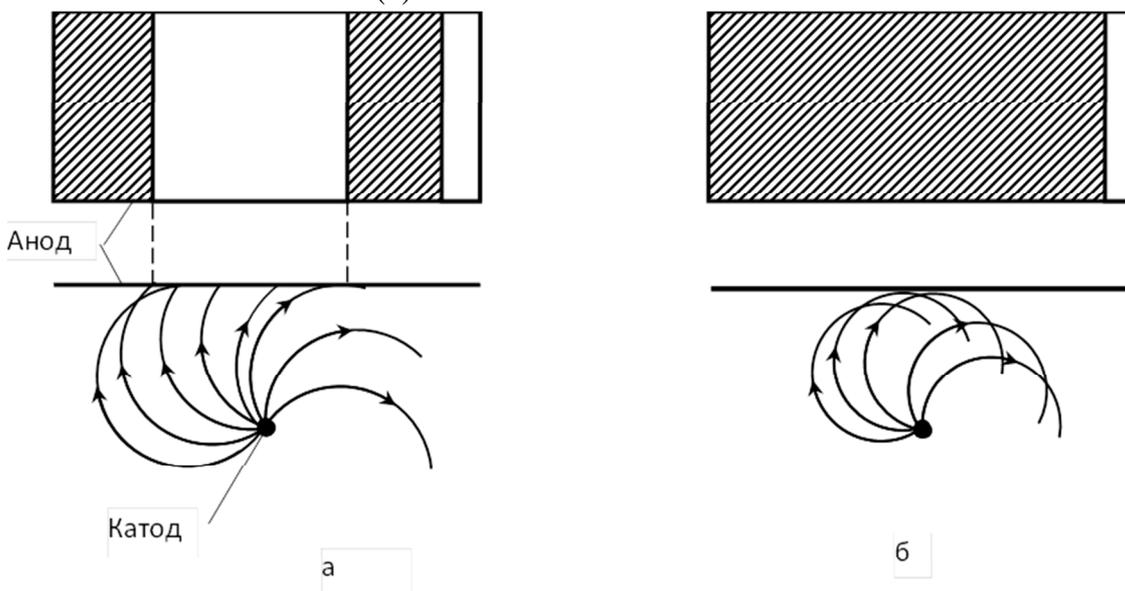


Рис.7

Рассмотрим, как в работе находят радиус окружности. Представим себе, что при заданном анодном напряжении, т.е., при определенной скорости электронов, будем постепенно увеличивать магнитную индукцию B . Вследствие этого, как видно из формулы (4), радиус окружности будет уменьшаться, что визуально проявится в уменьшении светящейся поверхности люминесцентного покрытия анода, как показано светлой широкой полосой на рис. 7, а. По мере дальнейшего увеличения магнитного поля светлая полоса в центре анода будет становиться все более узкой. Наконец, при магнитной индукции (B_k), называемой *критической*, центральная светлая полоса исчезает, как показано на рис. 7, б. При критическом поле радиус окружностей (r_k) известен – он равен, как видно из рис. 7, б, половине расстояния от катода до анода.

Заметим, что в критическом и более сильном магнитном поле остается свечение узкой полоски на правом краю анода, как показано на рис. 7, б. К этому побочному эффекту мы вернемся ниже.

Итак, методика опыта следующая. При заданном анодном напряжении (U) постепенно увеличивают ток электромагнита, наблюдая при этом за изменением свечения анода. Когда центральная светлая полоса исчезает (*критическое состояние*), измеряют ток электромагнита (критический ток I_k) для расчета критической магнитной индукции (B_k). Удельный заряд электрона вычисляют по формуле (6), которая следует из формулы (5) для случая $r = r_k$:

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{r_k^2 B_k^2}. \quad (6)$$

По результатам измерения тока I_k магнитную индукцию находят по формуле (7):

$$B_k = \alpha I_k, \quad (7)$$

где коэффициент пропорциональности α найден экспериментально с помощью тесламетра; значение α приведено на установке.

Радиус окружности (r_k), равный половине расстояния между катодом и анодом, также определен экспериментально и приведен на установке.

Представленную методику измерения (q/m) повторяют при различном анодном напряжении в интервале 30–10 В (всего не менее 10 измерений), и по результатам измерений находят среднее значение $\langle q/m \rangle$, а также случайную погрешность.

Поясим название лабораторной работы. *Магнетроном* называют электронно-вакуумный прибор, предназначенный для генерации токов высокой частоты в радиолокаторе или в микроволновых кухонных печах. И в лабораторной работе, и в магнетроне траектории электронов – похожи, отсюда название – *метод магнетрона*. Критическое состояние в методе магнетрона обычно находят, анализируя зависимость анодного тока от магнитной индукции. Представленная выше визуальная версия метода магнетрона, разработанная на нашей кафедре [6], не требует измерения анодного тока, она обладает наглядностью и быстрым выполнением работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Ознакомление с установкой

Физическая часть лабораторной установки представлена на рис. 8, а ее электрическая



Рис. 8. Лабораторная установка: вакуумно–люминесцентный индикатор в магнитном поле двух катушек.

схема – на рис. 9. Катод лампы разогревается постоянным напряжением (примерно 2 В) от адаптера, включаемого в сетевую розетку. Анодные пластины (всего 7), покрытые люминофором, соединены вместе; на них подают положительный потенциал относительно катода – анодное напряжение (U), которое

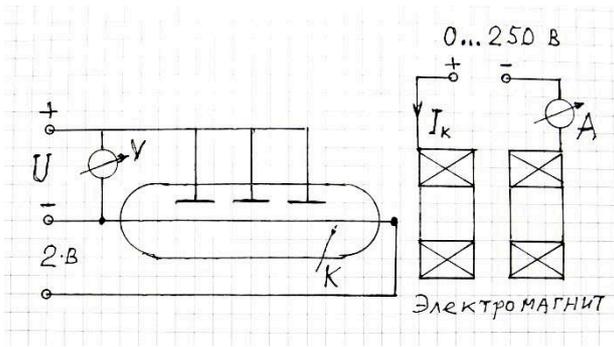


Рис. 9. Электрическая схема лабораторной установки: К – катод.

можно увеличивать до 30 В. Анодное напряжение получают от двух регулируемых источников питания (2...15 В), включенных последовательно (рис. 10), Напряжение каждого источника измеряют встроенным вольтметром, а показания вольтметров – суммируют.



Рис. 10. Источники анодного напряжения.

Магнитное поле в лампе создают, пропуская постоянный ток через две последовательно включенные катушки электромагнита от источника (0...250 В), встроенного в лабораторный стол (рис. 11).



Рис. 11. Источник питания электромагнита.

Задание 2. Подготовка установки к работе

- (1) Вставить в сетевую розетку адаптер питания катода. При этом должен загореться «Индикатор катода» на лабораторной установке (рис. 8).
- (2) Два источника анодного напряжения соединить последовательно: гнездо \oplus одного источника соединить проводом с гнездом $(-)$ – другого источника (рис. 10).
- (3) Подключить клеммы «АНОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» лабораторной установки (рис. 8) к источникам анодного напряжения (рис. 10), соблюдая правильную полярность.
- (4) Подключить источники анодного напряжения к сетевым розеткам и нажать клавиши «СЕТЬ» источников.
- (5) Ручки регулировки напряжения «ГРУБО» и «ТОЧНО» источников анодного напряжения повернуть в направлении часовой стрелки до упора (рис. 10). При этом на вольтметрах источников должно быть примерно по 15 В.
- В результате подачи на лампу накального и анодного напряжений должно появиться яркое свечение люминофора анодов вакуумно-люминесцентного индикатора.
- (6) Ручку "U" в блоке питания электромагнита повернуть против направления часовой стрелки до упора (минимальное напряжение), а тумблер "AC/DC" установить в положение "DC" (постоянный ток) (рис. 11).
- (7) Собрать электрическую схему электромагнита. Провод \oplus электромагнита соединить с гнездом \oplus блока питания. Провод $(-)$ электромагнита подключить к гнезду "20A" мультиметра, а гнездо "COM" мультиметра соединить с гнездом $(-)$ блока питания. Настроить мультиметр в режим измерения постоянного тока до 20 А. Включить питание мультиметра.
- (8) Включить блок питания электромагнита с помощью клавишного переключателя (см. слева внизу на рис. 11). Повернуть ручку "U" регулировки напряжения на четверть оборота, и убедиться, что через магнит протекает ток.

Задание 3. Выполнение измерений

- (1) Записать в табл.1 параметры установки, приведенные на установке.

Таблица 1

Критический радиус $r_k =$	$B_k = \alpha I_k$, где $\alpha =$
----------------------------	-------------------------------------

- (2) Подготовить табл. 2.

Таблица 2

U , В	I_k , А	B_k , Тл	q/m в ед. 10^{11} Кл/кг

Примечание: в таблице 12 строк

- (3) Освоить визуальную методику нахождения критического состояния, производя наблюдения за анодом в середине зазора между катушками.

Установить анодное напряжение 30 В. Опыт начинают, когда магнитное поле отсутствует (ручка "U" блока питания электромагнита повернута против часовой стрелки до упора). При этом вся поверхность анода испускает свечение (рис. 12, а).

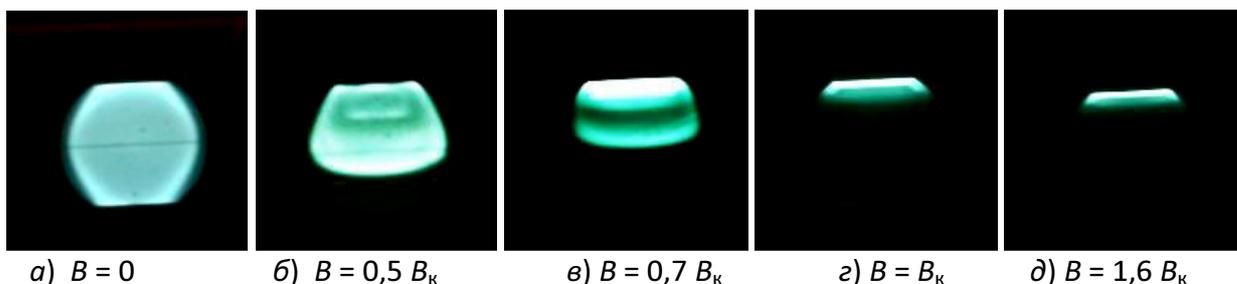


Рис. 12. Фотографии анода в различном магнитном поле (B_k – индукция критического поля).

Медленно увеличивать ток магнита. При этом радиус окружностей, по которым движутся электроны – уменьшается, вследствие чего электроны не бомбардируют нижнюю часть анода, которая остается темной (см. рис.12, б).

При приближении к критическому магнитному полю B_k светлая полоса разделяется на две части – в центре анода и на верхнем краю (см. рис. 12, в).

При медленном увеличении поля заметить, когда центральная светлая полоса исчезнет (рис. 12, г). Это состояние считаем критическим; для него измеряем ток электромагнита I_k для расчета B_k .

Заметим, что в сильном магнитном поле остается светлая полоса на верхнем краю анода (см. рис. 12, в – 12, д). Это свечение остается даже в сильном поле, в несколько раз превышающем критическое значение. Этот побочный эффект, объясняемый, по-видимому, действием пространственного заряда облака электронов в лампе, не мешает определению удельного заряда.

(4) Для различных значений анодного напряжения в интервале от 30 В до 10 В (всего 10–12 значений) найти критическое состояние. Результаты измерения U и I_k записать в табл. 2.

ВНИМАНИЕ! При токе менее 0,2 А необходимо изменить режим работы мультиметра для сохранения требуемой точности измерений: (а) вместо гнезда «20 А» произвести подключение к гнезду «mA»; (б) вращающийся переключатель установить в положение «200 mA».

(5) Определить знак заряда электрона по отклонению его в магнитном поле вакуумно-люминесцентного индикатора. Получить компас у дежурного инженера лаборатории. Располагая компас между катушками электромагнита вблизи лампы, найти направление вектора \vec{B} , совпадающее с направлением стрелки компаса. Результаты опыта описать в отчете.

(6) Выключить все источники питания установки. В блоке питания магнита ручку "U" повернуть на минимальное напряжение, а клавишный переключатель выключить. Отключить сеть источников анодного напряжения.

(7) Адаптер питания катода отключить от сети,

Задание 4. Обработка результатов измерений и выводы

(1) Используя результаты измерений I_k , вычислить по формуле (7) магнитную индукцию B_k . Результаты вычислений записать в табл. 2.

(2) По результатам измерений U и B_k вычислить по формуле (6) удельный заряд (q/m). Результаты вычислений записать в табл. 2.

(3) Вычислить среднее значение удельного заряда и записать результат в табл. 3.

Таблица 3

Результат измерений (среднее и полуширина доверительного интервала для доверительной вероятности $P = 0,68$)	Табличное значение
$\langle q/m \rangle =$	$q/m = 1,758820024(\pm 11) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

(4) Для краткости формулы удельный заряд обозначим x . Вычислить полуширину доверительного интервала Δx для среднего значения удельного заряда $\langle x \rangle$, используя следующую формулу, справедливую для доверительной вероятности $P = 0,68$ при числе усредняемых результатов $n \geq 10$:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}.$$

Результат вычисления Δx привести в табл. 3.

(5) Полученное значение удельного заряда сравнить с табличным значением (см. табл. 3). Сделать выводы.

Задание 5.

(1) Для уточнения физической картины данного эксперимента выполнить расчеты нескольких физических величин и привести результаты в табл. 4.

Таблица 4

Максимальная скорость электронов	$v =$
Сравнение со скоростью света	$v/c =$
Нормальное ускорение	$a_n =$
Сравнение с ускорением свободного падения	$a_n/g =$
Сравнение с магнитным полем Земли $B_{\text{земли}} = 50 \text{ мкТл}$	$B_k/B_{\text{земли}} =$

(2) Сделать вывод о допустимости использования классических (нерелятивистских) формул.

(3) Влияет ли сила тяжести на движение электронов?

(4) Может ли земное магнитное поле исказить результат опыта?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие силы действуют на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях?
2. Какие траектории движения заряженной частицы возможны в однородном магнитном поле?
3. В чем состоит сущность метода магнетрона для измерения q/m электрона?
4. Как определяют в работе знак заряда электрона?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. – М.: Вузовская книга, 2011. – 196 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2008. – 624 с.
3. Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 422 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2.

- Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во «Астрель», 2004. – 336 с.
5. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 319 с.
6. Фетисов И.Н. Визуальный метод магнетрона для определения e/m электрона в сравнении со стандартным методом магнетрона // *Физическое образование в вузах*. Т. 24, №1, 2017, с. 92 – 99.