

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 538.9

**ГЕНЕРАТОР МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО
ПОЛЯ И СОПУТСТВУЮЩИЙ МЕТОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИКИ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ**

©2025 г. А. С. Пашенко^{а,*}, Н. Н. Черноусов^а, А. А. Турпак^а, А. В. Давыденко^{а,**}

^а *Дальневосточный федеральный университет*

Департамент общей и экспериментальной физики, лаборатория пленочных технологий

Россия, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

**e-mail: pashenko.ase@dyfu.ru*

***e-mail: davydenko.av@dyfu.ru*

Поступила в редакцию 04.06.2025 г.

После доработки 30.06.2025 г.

Принята к публикации 08.07.2025 г.

Для измерения неуниверсальных параметров динамики доменных границ в тонких магнитных пленках разработан прибор, позволяющий совместно с микроскопом, использующим магнитооптический эффект Керра, проводить исследования движения доменных границ в режимах со скоростями, на два-три порядка большими, чем те, которые было можно измерять, используя стандартный электромагнит. Для обработки результатов измерений, полученных с помощью импульсов магнитного поля произвольной формы, была разработана и успешно реализована математическая методика коррекции результатов. Сравнение значений неуниверсальных параметров режима ползучести доменных границ, полученных с использованием необработанных результатов и результатов после обработки с помощью методики математической коррекции, показало необходимость использования данной методики для повышения точности определяемых параметров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тонкие ферромагнитные пленки в настоящее время являются перспективным объектом для исследований, так как на их основе возможно создание различных типов энергонезависимой и быстродействующей памяти [1]. Для измерения подвижности доменных стенок в процессе перемагничивания пленок, в частности, используется определение зависимости скорости

смещения доменных границ от величины приложенных токовых или магнитных воздействий. Скорость высчитывается по перемещению границы, произошедшему после подачи стимулирующего импульса известной продолжительности. Скорость движения границ в интересующих нас режимах работы может достигать десятков или даже сотен метров в секунду [2, 3]. Доступная для измерения величина перемещения доменной стенки ограничена несколькими долями миллиметра обзора видимости магнитооптического микроскопа Керра, при помощи которого наблюдаются домены. Максимальное измеряемое перемещение доменной стенки может быть ограничено еще больше вследствие наличия в пленке близкорасположенных дефектов, играющих роль центров зарождения доменов под воздействием импульсов магнитных полей. При объединении соседних доменов доменные стенки между ними исчезают. Из этого следует, что для возможности проведения измерений длительность импульса магнитного поля должна быть менее десятка микросекунд, в то время как время нарастания поля стандартного электромагнита составляет около 400 мкс.

Цель данной работы – создание прибора, генерирующего импульсы магнитного поля с регулируемой амплитудой и длительностью порядка нескольких микросекунд, используемого совместно с микроскопом Керра, уже оборудованным электромагнитами для создания продольных и поперечных магнитных полей.

2. СХЕМА, КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Представленная на рис. 1 основная часть схемы представляет из себя блок конденсаторов C_1 , разряжающихся через диод D_1 , транзистор T_2 и катушку индуктивности L_1 . Для увеличения быстродействия и компактности прибора, катушка индуктивности которого должна была помещаться в четырехмиллиметровом промежутке между образцом магнитной пленки и объективом микроскопа, в качестве последней был использован одиночный плоский медный виток диаметром 4 мм и расчетной индуктивностью около 6 нГн. В связи с этим для создания достаточных величин магнитного поля все части прибора должны иметь минимально возможную паразитную индуктивность, малое сопротивление и способность выдержать большой кратковременный ток. В качестве накопительных конденсаторов C_1 были использованы полипропиленовые пленочные конденсаторы в связи с их относительно высокой удельной плотностью энергии и добротностью, а также слабой зависимостью емкости от напряжения на конденсаторах. Конденсаторный блок состоял из 15 конденсаторов с расстоянием между выводами 20 мм с суммарной емкостью 22.5 мкФ. В качестве основных

силовых ключей T_2 были использованы кремниевые MOSFET-транзисторы, благодаря их высокому быстродействию и возможности протекания через них большого импульсного тока. Три транзистора STP30NF20 были использованы и подключены параллельно друг другу для повышения максимально возможного тока и уменьшения паразитной индуктивности. Для тех же целей проводники печатной платы, через которые пропускались импульсы тока, состояли из сплошных медных областей, расположенных на близлежащих слоях четырехслойной печатной платы. Между витком, создающим магнитное поле на образце, и печатной платой, расположенными друг от друга на расстоянии около 60 мм, было сделано соединение в виде двух параллельно расположенных медных пластин. Лабораторный блок питания G_1 , управляемый от компьютера через интерфейс RS-232, предоставлял питание для зарядки и определял напряжение зарядки конденсаторов при подаче импульса. Контроль за зарядом конденсаторов и открытие ключей осуществлял микроконтроллер, получающий от компьютера по USB-порту команды на подачу импульсов. После получения команды микроконтроллер за счет закрытия шунтирующего транзистора T_1 начинает зарядку конденсаторной батареи через ограничитель тока G_2 . Ограничитель тока состоит из токоизмерительного резистора, биполярного транзистора и операционного усилителя, управляющего базой биполярного транзистора и поддерживающего постоянное напряжение на токоизмерительном резисторе. В момент, когда напряжение на конденсаторной батарее достигает около 70% от напряжения блока питания G_1 , напряжение на резисторном делителе R_3-R_4 начинает превышать напряжение на делителе R_1-R_2 , что приводит к срабатыванию компаратора DA_1 , сигнал от которого запускает в микроконтроллере прерывание, которое посылает сигнал на открытие выходных транзисторов T_2 на заданный промежуток времени. В процессе разряда конденсаторов ток через цепь возрастает до максимума и уменьшается до нуля по кривой, близкой к полусинусоидальной. После завершения положительной полуволны диоды Шоттки D_1 препятствуют протеканию тока противоположной направленности от отрицательно заряженных конденсаторов. Вскоре после этого закрываются транзисторы T_2 . Если необходимо подать еще несколько импульсов, то микроконтроллер ждет до следующей зарядки конденсаторов и повторяет процедуру разрядки через виток заданное в команде число раз, после чего разряжает конденсаторы за счет открытия транзистора T_1 .

Рис. 1. Схема устройства

3. ТЕОРИЯ ДИНАМИКИ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ

Как известно из литературных данных, движение доменных границ под воздействием перпендикулярного магнитного поля имеет три режима – ползучести, депиннинга и текучести. Для первого и третьего режимов известны подтвержденные теоретические зависимости скорости от магнитного поля [2, 3]. В режиме ползучести скорость доменной границы в плоской магнитной пленке подчиняется следующей экспоненциальной зависимости:

$$v = v_d(H_x, T) \exp \left(- \frac{T_d \left[\left(\frac{H_z}{H_d} \right)^{-1/4} - 1 \right]}{T} \right), \quad (1)$$

где H_z – индукция внешнего магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленки, H_x – индукция внешнего магнитного поля в направлении движения доменной стенки, H_d – поле депиннинга, T – температура, T_d – температура депиннинга, $v_d(H_x, T)$ – скорость депиннинга. В режиме текучести эта зависимость становится линейной:

$$v = mH_z. \quad (2)$$

Коэффициент подвижности доменной границы m зависит от того, в каком диапазоне по отношению к полю Уолкера проводятся измерения.

Получение коэффициентов этих зависимостей, а также значений полей и скоростей, при которых происходит смена режимов динамики доменных границ, позволяет количественно характеризовать исследуемую магнитную систему и влияние различных параметров системы и внешних условий на ее внутренние характеристики.

4. МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ

Как было сказано выше, форма импульса магнитного поля, создаваемого прибором, не является прямоугольной и поэтому скорость доменной стенки нельзя вычислить простым делением расстояния на время. Посредством измерений мы получаем расстояния, которые прошла доменная стенка в целом за один импульс, в разные моменты которого мгновенные значения скорости доменной границы были разными. Расстояние S , которое прошла доменная граница после подачи одного импульса с напряжением конденсаторов V , равняется следующему интегралу:

$$S(V) = \int_0^{t_{\text{imp}}} v(H) dt = \int_0^{t_{\text{imp}}} v(kw(t, V)) dt, \quad (3)$$

где t_{imp} – длительность импульса, $v(H)$ – функция зависимости мгновенной скорости от мгновенного значения магнитного поля, $w(t, V)$ – зависимость некалиброванной формы импульса магнитного поля от времени и от напряжения на блоке питания V , k – коэффициент пропорциональности между значением магнитного поля и функцией $w(t, V)$, описывающей форму импульса. Функцию $w(t, V)$ можно определить экспериментально посредством интегрирования измеряемого осциллографом напряжения на близкорасположенной измерительной катушке V_{ind} , пропорционального производной магнитного поля, создаваемой прибором:

$$w(t, V)c = \int_0^{t_{\text{imp}}} V_{\text{ind}}(t, V) dt. \quad (4)$$

Зная $w(t, V)$, с помощью следующих математических методов можно численно вычислить функцию $v(H)$. Функцию $w(t, V)$ можно перевести в следующую функцию, показывающую плотность времени, проведенного образцом при том или ином мгновенном значении магнитного поля:

$$T(H, V) = \int_0^{t_{\text{imp}}} \delta(H - kw(t, V)) dt, \quad (5)$$

где δ — дельта-функция Дирака.

Используя функцию $T(H, V)$, которую можно вычислить, зная k , V и $w(t, V)$, мы получим более простое выражение для $S(V)$:

$$S(V) = \int_0^{H_{\text{max}}} v(H) T(H, V) dH. \quad (6)$$

Это выражение в дискретном виде есть система линейных уравнений с известной матрицей T_{vh} и вектором $\mathbf{S}_v$:

$$\mathbf{S}_v = T_{vh} \mathbf{v}_h. \quad (7)$$

Переход в дискретный вид будет происходить следующим образом. Результат измерений пройденного пути состоит из N измерений, каждому из которых соответствует одно из равномерно расположенных напряжений от V_1 до V_N , и каждому из этих напряжений соответствует равномерно расположенное создаваемое им максимальное в импульсе магнитное поле от H_{i+1} до H_{i+N} . Поля от $H_1=0$ до H_i соответствуют значениям, меньшим максимального значения поля в импульсе при минимальном значении напряжения блока питания в эксперименте. Таким образом, система уравнений имеет N уравнений и $i+N$ неизвестных. Если будут найдены значения $v(H)$ для полей от H_1 до H_i , а также коэффициент k , то система уравнений может быть решена известными методами решения систем линейных уравнений.

Для нахождения $v(H)$ для полей от H_1 до H_i из полученной системы уравнений извлекается ее часть, соответствующая полям от H_1 до H_{i+m} , для которых заведомо известно, что зависимость $v(H)$ подчиняется закону ползучести. На этом этапе, если коэффициент k неизвестен, то он предполагается равным единице. Вектор скорости определяется через упрощенную функцию скорости доменной границы в режиме ползучести $v=v_0 \exp(A(H)^{-1/4})$ с двумя неизвестными параметрами A и v_0 . Далее эти два параметра вычисляются итерационным алгоритмом минимизации ошибки квадрата отклонения вычисленных значений расстояний $S_v = T_{vh} v_h(v_0, A)$ от экспериментальных. Получив параметры A и v_0 , мы вычисляем неизвестные $v(H)$ для полей от H_1 до H_i . После этого, решив полную систему уравнений, находим S_v для полей от H_{i+1} до H_{i+N} в предположении, что $k=1$.

Для нахождения коэффициента k с помощью стандартного калиброванного электромагнита, способного выдавать прямоугольные импульсы с длительностью от нескольких миллисекунд, мы измеряем $v(H)$ для диапазона низких скоростей и магнитных полей. Коэффициент k находится из условия, что линеаризованные графики $v(H)$ режима ползучести, полученные с помощью разных приборов в координатах $\ln(v)$ от $H^{-1/4}$, должны лечь на одну прямую. Это также вычисляется численно.

5. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования был взят образец тонкой магнитной пленки состава Si(111)/Cu(2 нм)/Pd(3 нм)/Co(0.7 нм)/Pd(3 нм), полученный методом физического осаждения в сверхвысоковакуумной установке Omicron. Образец имел поле эффективной перпендикулярной магнитной анизотропии около 4400 Э, коэрцитивную силу около 120 Э и выраженную доменную структуру, наблюдаемую в микроскоп Керра. Для стабильного зарождения домена в заданном месте пленки с целью дальнейшего изучения динамики его границ на поверхности пленки с помощью травления сфокусированным пучком ионов галлия в электронно-ионном сканирующем микроскопе Thermoscientific Scios 2 была сформирована область с пониженной коэрцитивной силой, которая и являлась центром зарождения исследуемого домена, скорость движения стенок которого измерялась.

Дальнейшие измерения проводились на установке магнитооптического микроскопа Керра Evico Magnetics при комнатной температуре в автоматическом режиме. После полного перемагничивания образца в одном из направлений и зарождения начального домена благодаря малым постоянным полям программа, анализируя изображения, приходящие с камеры

микроскопа, подавала импульсы с определенным напряжением на лабораторный блок питания G_1 до тех пор, пока разрастание домена не превышало 300 мкм. Это полное расстояние измерялось и делилось на число приложенных импульсов. Пример изображения, получаемого микроскопом в процессе измерений, представлен на рис. 2. В результате, повторяя этот процесс для всего возможного диапазона напряжений, при которых удавалось провести измерения, мы получали график расстояния, пройденного границей домена за один поданный импульс заданной амплитуды.

Рис. 2. Пример изображений, получаемых при измерениях.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Необходимые для проведения алгоритма корректировки формы импульсов экспериментально полученные зависимости $w(t, V)$ представлены на рис. 3. Результаты измерений показывают, что в диапазоне напряжений менее 15 В добротность образующегося при открытии транзисторов колебательного контура оказывается слишком малой для поддержания колебаний и ток плавно затухает по экспоненциальному закону. Также в этом диапазоне влияние нелинейных свойств элементов цепи незначительно, вследствие чего форма импульса не зависит от напряжения, а его амплитуда линейно возрастает с повышением напряжения. При напряжениях более 15 В начинает проявляться нелинейность полупроводниковых элементов цепи, вследствие чего форма импульса искажается, а его амплитуда начинает нелинейно расти с ростом напряжения. Значения функции $w(t, V)$ при промежуточных значениях напряжения в ходе работы алгоритма вычисляются с помощью интерполяции.

Рис. 3. График формы импульса магнитного тока в зависимости от времени и напряжения блока питания.

На рис. 4 представлены результаты измерений $S(H)$, полученные по описанной выше методике, также на рис. 5 показан результат работы алгоритма коррекции $v(H)$ в линейном и логарифмическом масштабах.

Рис. 4. Экспериментальный график зависимости расстояния, пройденного доменной стенкой за один импульс приложенного магнитного поля.

Рис. 5. Обработанная зависимость скорости доменной границы образца от приложенного перпендикулярного магнитного поля

Полученные зависимости соответствуют экспериментальным результатам для подобного рода магнитных систем, что подтверждает работоспособность описанной методики. На

основании полученных данных были вычислены параметры теоретических зависимостей, которые представлены в табл. 1. Используемая методика расчета этих характеристик такая же, как и в работе [3].

Таблица 1. Неуниверсальные параметры режима ползучести магнитной системы Si(111)/Cu(2 нм)/Pd(3 нм)/Co(0.7 нм)/Pd(3 нм) для скорректированных по представленной методике и необработанных данных

Параметр	T_d , К	H_d , Э	$v(H_d)$, м/с
Данные после обработки с помощью методики коррекции результатов	13500 ± 1000	185 ± 5	4.1 ± 0.5
Необработанные данные ($t_{\text{eff}} = 0.5$ мкс)	14000 ± 1000	170 ± 10	1.5 ± 1
Необработанные данные ($t_{\text{eff}} = 0.7$ мкс)	13500 ± 1000	180 ± 10	2.5 ± 1
Необработанные данные ($t_{\text{eff}} = 1$ мкс)	13000 ± 1500	180 ± 10	3.5 ± 1.5

Примечание. Вычисление параметров проводится путем подгонки экспериментальных данных теоретическими зависимостями скорости доменной границы от приложенного магнитного поля.

Неуниверсальные параметры режима ползучести можно определить и по необработанным алгоритмом коррекции данным. Для этого необходимо ввести произвольно выбранный параметр – эффективную длительность импульса t_{eff} – и с его помощью поставить в соответствие пройденным длинам некоторую эффективную скорость. Очевидно, что полученные таким способом неуниверсальные параметры будут сильно зависеть от выбранной эффективной длительности импульса, и они могут значительно отличаться от действительных. Обработанные таким образом данные в предположении, что эффективная длина импульса составляет 0.5, 0.7 и 1 мкс, также представлены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что при эффективной длине импульса, равной 0.7 мкс, температуры и поля депиннинга для обработанных и необработанных данных в пределах ошибки совпадают, однако сильно различаются значения третьего неуниверсального параметра – скорости доменной границы при поле депиннинга. Отметим, что без использования методики математической коррекции результатов возрастает ошибка рассчитанных неуниверсальных параметров.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения скоростей доменных границ в различных динамических режимах в тонких пленках был сконструирован генератор микросекундных импульсов магнитного поля.

Генератор управлялся с помощью компьютерной программы, он позволял изменять амплитуду импульсов магнитного поля. Форма импульсов магнитного поля была близка к полусинусоидальной. Эффективная продолжительность импульсов магнитного поля увеличивалась с увеличением амплитудного значения импульсов магнитного поля. Для определения скорости смещения доменных границ в мгновенном значении магнитного поля была разработана и успешно протестирована методика математической коррекции, позволяющая решить данную задачу путем обработки значений интегральных смещений доменных стенок вследствие воздействия на них импульсов магнитного поля с различными амплитудами и произвольной формой.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-22-20079, <https://rscf.ru/project/25-22-20079/>).

КОНФЛИКТЫ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xuanyao F., Yusung K., Karthik Y., Deliang F., Abhronil S., Anand R., Kaushik R.* // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 2015. V. 35. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2015.2481793>
2. *Metaxas P.J., Jamet J.P., Mougin A., et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 217208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.217208> .
3. *Jeudy V., Pardo R., Torres W., Bustingorry S., Kolton A.* // Phys. Rev. B 2018. V. 98. P. 054406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.054406> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема устройства.

Рис. 2. Пример изображений, получаемых при измерениях. Слева – изображение начального домена, справа – разница между изображениями домена до и после подачи импульсов. Белым цветом показана область, на которую увеличился домен.

Рис. 3. График формы импульса магнитного тока в зависимости от времени и напряжения блока питания.

Рис. 4. Экспериментальный график зависимости расстояния, пройденного доменной стенкой за один импульс приложенного магнитного поля.

Рис. 5. Обработанная зависимость скорости доменной границы образца от приложенного перпендикулярного магнитного поля в линейном масштабе (**а**) и логарифмизированном для режима ползучести виде (**б**). Графики, отмеченные черным и красным цветом, соответствуют измерениям, проведенным с помощью импульсного метода и с помощью стандартного электромагнита.

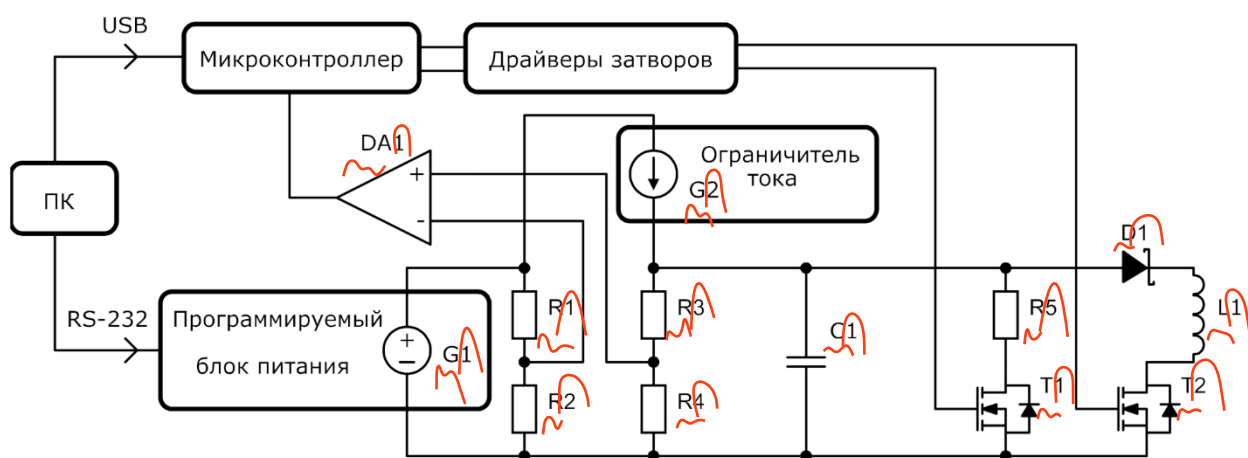


Рис. 1.

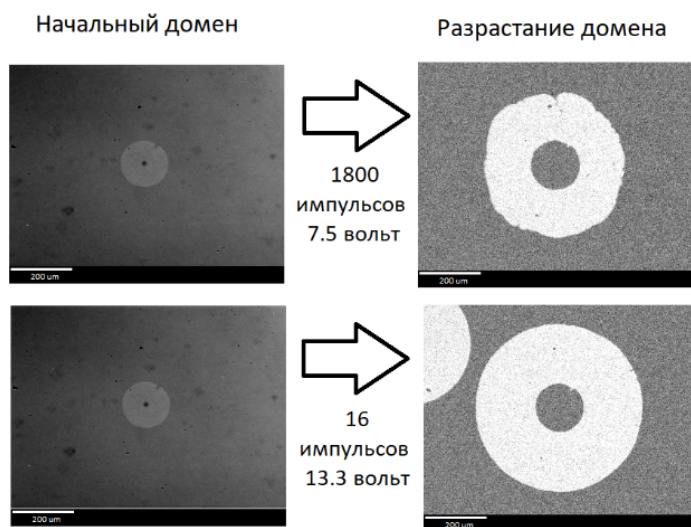


Рис. 2.

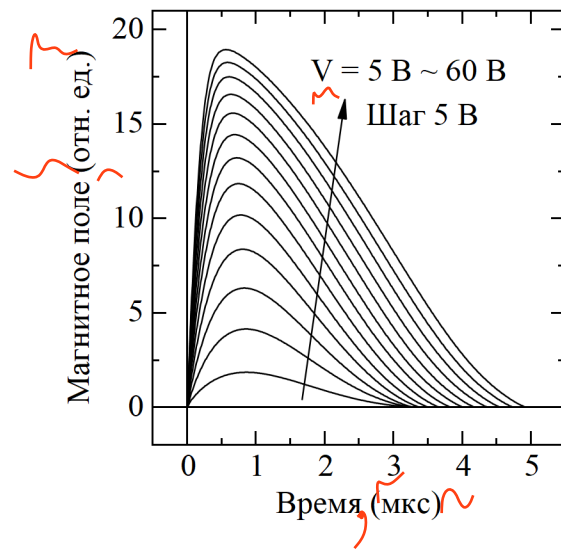


Рис. 3.

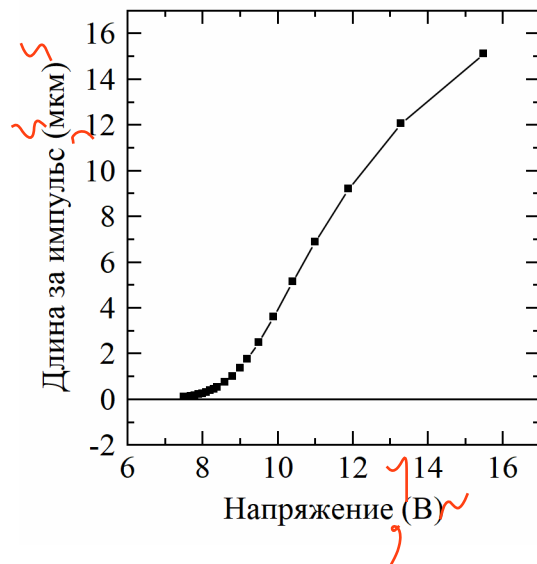


Рис. 4.

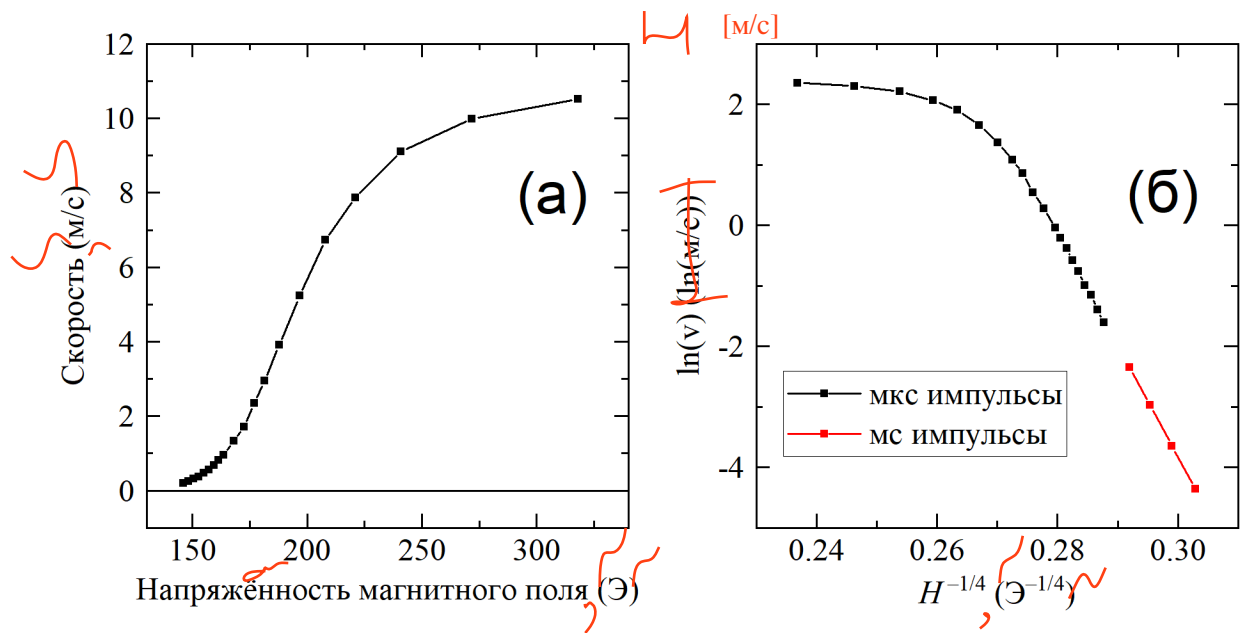


Рис. 5.