

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.317.4

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КЛАССИЧЕСКИХ ХОЛЛОВСКИХ
МАГНИТОМЕТРОВ

©2026 г. Х. Р. Ростами*, И. П. Никитин

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук*

Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

**e-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2026 г.

После доработки 19.02.2026 г.

Принята к публикации 05.03.2026 г.

Для исследования степени влияния собственного поля H_N тока смещения I_N преобразователя Холла (ПХ) на исследуемые объекты и точности измерения холловского магнитометра изучено пространственное распределение поля H_N на поверхности и вокруг гетероэпитаксиального ПХ со структурой $n\text{-InSb}-i\text{-GaAs}$. Разработана установка, позволяющая перемещать исследуемый ПХ2 по оси z на расстояние до 25 мм с точностью примерно 1 мкм, вращать его вокруг своей оси на $\varphi = 360^\circ$ с точностью 2° , а также перемещать вдоль оси x на расстояние до 5 мм по отношению к измерительному ПХ1 с точностью примерно 1 мкм. Обнаружено, что на краях тонкой эпитаксиальной пленки $n\text{-InSb}$ происходит резкое изменение направления силовых линий индукции поля H_N , которое приводит к появлению сигнала разбаланса вблизи холловских контактов ПХ. Показано, что точная компенсация H_N полем тока, противофазного I_N , не только позволяет исключить влияние H_N на исследуемые объекты, но и приводит к существенному повышению пространственного разрешения и чувствительности магнитометра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый в последние десятилетия прогресс в микро- и нанотехнологиях сделал возможной разработку высокочувствительных датчиков магнитного поля с повышенным пространственным разрешением для измерения слабых локальных магнитных полей на поверхности и вокруг объектов малых размеров. В частности, были разработаны полупроводниковые магнитометры, основанные на эффекте Холла [1, 2], которые просты в использовании, имеют высокую чувствительность и могут иметь различные размеры и геометрические формы.

Холловские магнитометры на основе гетероэпитаксиальной пленки $n\text{-InSb}-i\text{-GaAs}$ могут работать в широком диапазоне магнитных полей (свыше 10 Тл), частот (приблизительно до 10 кГц) и температур (примерно 1.3–373 К) и позволяют проводить непрерывные измерения векторной составляющей постоянных, переменных и импульсных магнитных полей с высоким пространственным разрешением. Такие магнитометры просты в эксплуатации и имеют невысокую стоимость [3–7]. В холловских зондовых сканерах также используются “крестовые” преобразователи Холла (ПХ), созданные на основе металлических золотых пленок и проволок [8, 9], полуметаллические графеновые и висмутовые пленки [10–13], полупроводниковые тонкие эпитаксиальные пленки на основе кремния [14], двумерные электронно-газовые сенсоры AlSb/InAs [1] и т.д. В зависимости от поставленных задач указанные ПХ различаются размерами рабочей поверхности, чувствительностью, величинами токов смещения, линейностью, остаточным напряжением смещения, температурным коэффициентом, а также частотным, магнитным и температурным диапазонами работы.

В настоящее время чувствительность ПХ на основе InSb сравнима с чувствительностью двумерных электронно-газовых сенсоров AlSb/InAs (2DEG), составляющей около $(0.27\text{--}2.5)\cdot 10^{-7}$ Тл [1]. Преобразователи Холла на основе графена с высокой производительностью и чувствительностью к магнитному полю имеют большие перспективы для разработки сверхчувствительных магнитометров с очень низким энергопотреблением, превосходя лучшие датчики на основе кремния и узкощелевых полупроводников [15]. Однако, в отличие от ПХ, рассмотренных в работах [3–7], преобразователи, указанные в [8–15], могут обеспечить высокое магнитопространственное разрешение только в узких диапазонах магнитных и температурных полей и не позволяют зондировать поверхности объектов на больших пространственных масштабах.

В некоторых работах (см. [16] и приведенные там литературные ссылки) авторы отмечали влияние собственного поля H_H тока смещения I_H через ПХ на исследуемые объекты, однако детальный анализ этой проблемы не проводился; поэтому оценка влияния собственного поля H_H на магнитопространственное разрешение, линейность и точность ПХ по-прежнему остается актуальной проблемой.

Обычно для повышения пространственного разрешения магнитометра ПХ располагаются максимально близко к поверхности исследуемого объекта и размер рабочей поверхности ПХ уменьшается, а для минимизации поля H_H величина тока I_H снижается. Однако это приводит к потере чувствительности и снижению производительности, высокому температурному дрейфу и низкой стабильности работы таких ПХ, а отношение H_H/I_H имеет такой же порядок, как у ПХ с высокими I_H и H_H . Следовательно, для повышения магнитопространственного разрешения ПХ и исключения влияния ПХ на распределение

локальных полей вокруг и на поверхности объекта необходимо сначала скомпенсировать поле H_H используемого ПХ, а затем поместить преобразователь максимально близко к поверхности исследуемого объекта.

В настоящей работе демонстрируется способ одновременного повышения пространственного разрешения и чувствительности холловского магнитометра на основе InSb путем компенсации H_H противофазным ему полем. Благодаря исключению влияния H_H на исследуемый объект и точность магнитометра достигнута чувствительность приблизительно $5.75 \cdot 10^{-9}$ Тл. Это сравнимо с теоретически оцененной чувствительностью (примерно $1.5 \cdot 10^{-9}$ Тл), которая до сих пор остается экспериментально неподтвержденной из-за высокого уровня шума $1/f$ в области низких частот [2].

2. ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО ПОЛЯ ХОЛЛОВСКОГО ЗОНДА НА ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И МАГНИТОМЕТРА

Известно [16, 17], что в идеальном преобразователе Холла (симметричная конструкция, однородный материал, отсутствие побочных эффектов и т.д.) при пропускании тока смещения I_H через тонкую прямоугольную пластину из высокоомного полупроводникового материала шириной a , длиной ℓ и толщиной d в магнитном поле с индукцией B_{\perp} , перпендикулярной поверхности пластины, на поперечных холловских контактах, расположенных по центру боковых сторон, возникает напряжение Холла V_H

$$V_H = a/E_H = a/J_H R_H B_{\perp} = R_H B_{\perp} I_H / d, \quad (1)$$

где R_H – коэффициент Холла (который в слабых магнитных полях не зависит от B_{\perp} и определяется только свойствами полупроводника), E_H – напряженность поля Холла, а $J_H = I_H / a d$ – плотность тока смещения через ПХ. В полупроводниковой пластине с преобладающей концентрацией электронов $R_H = (e n)^{-1}$, где n и e – концентрация и заряд электрона, соответственно. Магнитная чувствительность ПХ определяется выражением

$$\gamma = |V_H| (B_{\perp})^{-1} = |R_H| I_H d^{-1} = I_H (e n d)^{-1} = [P a \mu_e (d \ell e n)^{-1}]^{1/2}, \quad (2)$$

где P – мощность, рассеиваемая на ПХ, а μ_e – подвижность электронов. Как следует из формулы (2), в случае широких, коротких и тонких пластин чем выше подвижность и чем меньше концентрация электронов, тем выше магнитная чувствительность γ . Согласно многочисленным литературным данным (см. [16] и приведенные там литературные ссылки), наиболее высокую μ_e и наименьшую n среди всех известных полупроводников имеет антимонид индия, и ПХ на их основе демонстрируют более стабильные характеристики в широком диапазоне температурных и магнитных полей.

Ток I_H идеального ПХ на широкой и тонкой пластине можно мысленно представить в виде суммарного тока через параллельные токовые нити с диаметром, равным толщине пленки: $I_H = \sum I_{Hi}$. Токи I_{Hi} создают вокруг себя соленоидальные или вихревые поля B_{Hi} , при этом поля между нитями компенсируют друг друга; в итоге для токовых нитей поля $B_H = \sum B_{Hi}$ с обеих сторон ПХ являются однородными, параллельными к поверхности пленки и равными друг другу.

На рис. 1 приведено распределение силовых линий индукции B_H поля $H_H = B_H/\mu_0$ вокруг токовой полосы ПХ. Видно, что силовые линии B_H образуют контур вокруг токовой полосы ПХ. Разнонаправленные силовые линии B_H перпендикулярны току через ПХ и параллельны поверхности ПХ с обеих сторон: $B_{H3} = B_H(-a/2, 0, -d/2)$ и $B_{H4} = B_H(a/2, 0, d/2)$. При этом, поскольку толщина пленки существенно меньше ее ширины, разнонаправленные силовые линии на краях пленки резко меняются: $B_{H1} = B_H(-a/2, 0, 0)$ и $B_{H2} = B_H(a/2, 0, 0)$, так как, исходя из граничных условий на кромках пленки, $B_{H3}/B_{H2} = \mu_3/\mu_2$. Здесь μ_3 и μ_2 – магнитные проницаемости внутри и на краю пленки соответственно [18, 19]. Складывается картина, аналогичная картине сгущения силовых линий поля внутри отверстия соленоида и их расхождения на торцах соленоида.

Рис. 1. Распределение силовых линий B_H вокруг токовой полосы ПХ

Компенсирующее поле не только прижимает силовые линии поля H_H к поверхности ПХ, но и отодвигает его к середине токовой полосы, так как поле H_H создает силу Лоренца, которая прижимает силовые линии к поверхности и к середине пленки в случае одинакового направления токов и, наоборот, отодвигает их в случае противоположного направления токов. Поскольку сила взаимодействия между двумя токовыми полосами обусловлена компонентами B_{Hi} и перпендикулярными им E_{Hi} [19], создается возможность регулировать распределение силовых линий B_{Hi} путем изменения E_{Hi} . Поскольку поле внутри цилиндрической проволоки растет от центра к поверхности по линейному закону пропорционально радиусу цилиндра R , а вне цилиндра уменьшается пропорционально $1/R$ [18–20], регулируя амплитуду и фазу компенсирующего поля, можно исключить влияние поля H_H на исследуемые объекты. Полученный результат очень важен для одновременного повышения как пространственного, так и магнитного разрешения холловского зонда.

В реальных ПХ из-за возможной асимметрии в расположении холловских контактов, неоднородностей и анизотропии материала пленки, ростовых дефектов пленки, неоднородного распределения плотности тока J_H возле холловских контактов и т.д. происходит нарушение уравнения (1), связанное с изменением величины тока $I_H = dJ_H$ на кромках пленки. Как следствие, величины B_{H1} и B_{H2} различаются. Это вызывает неодинаковое смещение токовых и

эквипотенциальных линий возле холловских контактов, в результате чего концентрация силовых линий индукции B_H вблизи контактов будет разной, и интегральное по площади пленки поле B_H становится отличным от нуля. Таким образом, в нулевом внешнем магнитном поле средняя по площади пленки индукция B_H разнонаправленного неоднородного асимметричного собственного поля H_H создает на холловских контактах дополнительное напряжение

$$V_H \sim R_H B_H I_H / d \sim R_H I_H^2 / d. \quad (3)$$

В случае переменного тока через ПХ $I_H = I_0 \cos(\omega t)$,

$$V_H \sim (R_H / d) I_0^2 \cos^2(\omega t). \quad (4)$$

Как следует из формул (3) и (4), значение V_H не зависит от направления тока I_H . Для определения величины B_H можно пользоваться теоремой о циркуляции вектора B :

$$2Bl = \mu_0 i l. \quad (5)$$

Здесь l — длина стороны контура, параллельной плоскости с током [19], i — линейная плотность тока, представляющая собой ток, приходящийся на единицу длины поперечного сечения пленки. Для точек вблизи поверхности пленки и вдали от ее краев

$$B = \mu_0 i / 2 = \mu_0 I / 2a. \quad (6)$$

Согласно формуле (6), для стандартного ПХ типа ПХЭ603118Б на основе антимоноида индия (НПФ Сенсор, Санкт-Петербург), используемого в данной работе, с номинальным током $I_H = 100$ мА и размером рабочей области 50×100 мкм² [6] имеем

$$B_H = \mu_0 i_H / 2 = \mu_0 I_H / 2a \approx 10^{-4} \text{ Тл}. \quad (7)$$

Ток I_H на холловских контактах создает напряжение

$$V = V_H + V_{\text{res}} + V_H + \sum V_i. \quad (8)$$

В этом выражении V_{res} — остаточное напряжение неэквипотенциальности, возникающее на холловских контактах ПХ при нулевом внешнем магнитном поле; $\sum V_i$ — суммарное напряжение систематических ошибок (термомагнитное напряжение, вызванное температурными эффектами и зависимостью коэффициента Холла от температуры) [16]. Согласно паспортным данным [6], коэффициент преобразования γ ПХ типа ПХ Э603118Б составляет более $50 \text{ мкВ} / 10^{-3} \text{ Тл}$, $V_{\text{res}} < 50 \text{ мкВ}$, температурный коэффициент остаточного напряжения менее $0.01 \text{ мкВ} / ^\circ\text{C}$, и температурный коэффициент чувствительности лучше, чем $2 \% / ^\circ\text{C}$. Согласно формуле (4),

$$V_H \sim (R_H / d) I_0^2 (1 + \cos(2\omega t)) / 2, \quad (9)$$

Напряжение на холловских контактах, созданное собственным полем H_H , содержит постоянную и переменную составляющие с частотой второй гармоники. Следовательно, согласно формуле (7), при $B_H \approx 10^{-4}$ Тл выходной сигнал магнитометра в нулевом внешнем поле создает напряжение $V_H \approx 10$ мкВ на холловских контактах; поэтому, как показано в работах [3, 7], магнитная чувствительность магнитометра без компенсации ПХ не выше $2.5 \cdot 10^{-7}$ Тл. Тепловые шумы ΣV_i удастся существенно снизить за счет работы в изотермическом режиме: ПХ находился в жидком азоте или в газопотоочном микрокриостате при заданной температуре с точностью 0.01 К. Таким образом, в нулевом внешнем магнитном поле основной вклад в формулу (8) вносят V_{res} и V_H .

С целью уменьшения погрешности измерений, связанной с влиянием поля H_H на показания ПХ и физические параметры исследуемого объекта, поле H_H тщательно компенсировалось. Для этого использовались два одинаковых ПХ с близкими техническими параметрами. Вспомогательный ПХ, используемый для компенсации поля H_H , располагался на обратной стороне подложки основного ПХ. Оба ПХ располагались строго параллельно друг другу в углублении в неподвижном медном диске, установленном на нижней несущей части камеры датчика магнитного поля. Затем через вспомогательный ПХ пропускался ток в противофазе с током смещения I_H основного ПХ, и путем регулировки амплитуды и фазы с помощью фазовращателя и применения синхронного детектирование нам удалось повысить чувствительность магнитометра от уровня приблизительно $2.5 \cdot 10^{-7}$ Тл до примерно $5.75 \cdot 10^{-9}$ Тл на частоте 19 Гц. На более высоких частотах увеличивается разность фаз между током I_H и $V_H(B)$, изменяется форма $V_H(B)$ и усложняется предварительная компенсация как первой, так и второй гармоник $V_H(B)$. Все это очень сильно сказывается в случае регистрации слабых магнитных полей. Кроме того, исключение второй гармоники очень важно в случае спектроскопии измеряемого сигнала по гармоникам.

3. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ЯЧЕЙКИ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На рис. 2а приведены конструктивная схема внешней управляющей части вставки камеры датчика магнитного поля, содержащей механизм вертикального перемещения исследуемого ПХ2 вдоль оси z относительно поверхности измерительного ПХ1, механизм вращения ПХ2 вокруг своей оси в плоскости xy и механизм управления столиком горизонтального перемещения ПХ2 вдоль оси x .

Рис. 2. Измерительная установка

На рис. 2б приведена нижняя часть вставки камеры датчика магнитного поля, содержащая медный диск с ПХ2, закрепленным на головке столика для перемещения по оси x , медный диск с ПХ1, ввинченный в латунную направляющую, жестко фиксированную на конце

центральной штанги, нагреватель, систему подвода проводов к ПХ, нагревателю и термометру. Система работает следующим образом: микрометрический винт через систему преобразователя вращательного движения в линейное соединен с нержавеющей стержнем, он обеспечивает движение по оси z на расстояние до 25 мм с точностью примерно 1 мкм. Стержень, в свою очередь, через систему преобразования линейного движения во вращательное соединен с фланцем тонкостенной нержавеющей трубкой, проходящей через латунные направляющие ползунки, фиксированные на концах тонкостенной нержавеющей трубки. Столик x перемещения через червячную передачу управляется снаружи при помощи нержавеющей стержня, проходящего через латунные направляющие ползунки, фиксированные на фланцах вращающейся тонкостенной нержавеющей трубки. Таким образом, система обеспечивает независимое управление столиком. В центрах дисков для установки ПХ1 и ПХ2 сделаны углубления, высота которых равна их толщине, а диаметр углублений соответствует диагоналям ПХ. Диск с основным измерительным ПХ1 закрепляется на неподвижной несущей части вставки, а второй диск с исследуемым ПХ2 устанавливается в центре координатного столика x перемещения. Измерительные провода проходят между соосными тонкими нержавеющими трубками центральной штанги. Минимальное расстояние между строго параллельными тщательно отполированными поверхностями медных дисков, в которых находятся ПХ1 и ПХ2, устанавливается с помощью пленки толщиной около 10 мкм. Для этого с помощью микровинта медный диск с ПХ2 по оси z приближается к медному диску с ПХ1 до возникновения омического контакта, после чего медный диск с ПХ2 от порога фиксации омметром обрыва омического контакта сдвигается в обратном направлении на 10 мкм [3, 7].

После установки заданных значений z и x положение ПХ2 фиксируется в горизонтальной плоскости. Далее осуществляется вращение ПХ2 относительно ПХ1 от $\varphi = 0$ до $\varphi = 360^\circ$ с шагом 10° , и для каждого φ измеряются значения B_{H1} и B_{H2} . При этом в случае $x = 0$ ось вращения проходит через геометрические центры ПХ1 и ПХ2. После перемещения ПХ2 по осям x или z снова повторяются измерения при вращении ПХ2 для достижения максимальных значений B_{H1} и B_{H2} . Для компенсации люфтов резьбы микровинтов начало и конец перемещения ПХ2 по осям x и z и на угол φ контролируются с помощью омических контактов [3, 7].

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И ОБРАЗЦЫ

Исследования проводились в режимах FC (field cooling) и ZFC (zero field cooling) [3, 21] на образцах из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) разных размеров с разной структурой, критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние T_c , шириной перехода в сверхпроводящее состояние ΔT_c , плотностью критических токов J_c , первым критическим магнитным полем H_{c1} , а также максимальной плотностью $B_{3МП}^{\max}(0)$ захваченного

магнитного потока (ЗМП) в центре на поверхности образцов. Это были монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) (образец №1), монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO) (№2), массивные текстурированные (ось c перпендикулярна плоскости образца) квазимонокристаллические YBCO-образцы (№3), поликристаллические текстурированные по оси c образцы (№4), нетекстурированные керамические образцы ВТСП YBCO (№5) и эпитаксиальные пленки YBCO с осью c , перпендикулярной плоскости подложки NdGaO_3 (110) (№6).

Для оценки степени компенсации напряжения V_H , возникающего в собственном поле H_H , проводились следующие эксперименты.

Сначала без компенсации H_H YBCO образец подводился к ПХ1 вдоль оси z в режиме ZFC и было обнаружено, что за счет диамагнитного экранирования увеличение J_c и H_{c1} приводило к уменьшению сигнала разбаланса на выходе магнитометра. При отводе образца от ПХ1 сигнал разбаланса возвращался к своему первоначальному значению, а повторное приближение образца к поверхности ПХ1 приводило к росту сигнала разбаланса. Далее YBCO-образец вблизи ПХ1 нагревался до температуры выше T_c и снова охлаждался до температуры жидкого азота $T = 77.4$ К в режиме FC. В данном режиме, по сравнению с режимом ZFC, когда к поверхности ПХ1 приближался находящийся в сверхпроводящем состоянии образец с низкими J_c и H_{c1} , был обнаружен еще больший рост сигнала разбаланса на выходе магнитометра. При отводе YBCO-образца от поверхности ПХ1, как и в первом опыте, сигнал разбаланса уменьшался и принимал свое первоначальное значение. В режиме ZFC изменение выходного сигнала магнитометра вызвано полями размагничивания YBCO-образца, индуцированными полем H_H [21]. В режиме FC, когда находящийся вблизи поверхности ПХ1 YBCO-образец охлаждался от температуры выше T_c до температуры 77.4 К, происходило проникновение H_H внутрь образца через джозефсоновские слабые связи. При отводе образца от поверхности ПХ1 в образце происходил ЗМП полем H_H , который при повторном приближении образца к поверхности преобразователя приводил к увеличению сигнала разбаланса на выходе магнитометра. В табл. 1 приведены параметры образцов и результаты измерений. Аналогичные результаты были получены и при замене образца №1 на образцы №2–6. Однако для образца №2 из-за низкого первого критического магнитного поля H_{c1} и более высокой плотности ЗМП $B_{\text{ЗМП}}^{\text{max}}(0)$ (по сравнению с образцом №1) сигнал разбаланса на выходе магнитометра увеличивался. Для образцов №3–5 из-за более низкого H_{c1} и существенно более высокого $B_{\text{ЗМП}}^{\text{max}}(0)$ (по сравнению с образцами №1, 2, 6) сигнал разбаланса на выходе магнитометра увеличивался еще больше. Как видно в табл. 1, из-за малых размеров образца №1 результаты сильно искажаются, и это необходимо иметь в виду при исследовании объектов малых размеров.

При приближении к поверхности ПХ1 ферромагнитной пленки происходило существенное усиление H_H (из-за высокой магнитной проницаемости пленки), в результате чего сигнал разбаланса увеличивался более, чем на порядок. Следовательно, необходимо иметь в виду, что использование магнитных концентраторов с большой магнитной проницаемостью для усиления и фокусировки силовых линий индукции магнитного поля на поверхности ПХ [2] приводит как к усилению магнитной чувствительности, так и к ухудшению пространственного разрешения ПХ.

Таблица 1. Параметры образцов и результаты измерений

№ образца	Размеры	T_c , К	ΔT_c , К	J_c , А/см ²	H_{c1} , 10 ⁻⁴ Тл	$B_{3МП}^{\max}(0) \cdot 10^{-5}$, Тл ZFC ($z=0.01-1$ мм)	$B_{3МП}^{\max}(0) \cdot 10^{-5}$, Тл FC ($z=0.01-1$ мм)	$V_{\text{ВЫХ}}$, мкВ ZFC ($z=0.01-1$ мм)	$V_{\text{ВЫХ}}$, мкВ FC ($z=0.01-1$ мм)
1	1×1×0.05	91	0.6	5.3·10 ⁵	50	0; 1.2	0; 2.2	1; 3.2	1; 2.2
2	4×4×0.1	90.2	0.6	7.9·10 ⁴	5.2	1; 3.2	1; 3.5	2; 2.6	3.5; 5.1
3	(6–8)×0.7	92	1	2.4·10 ³	3.3	0; 0	2; 4.6	3.5; 3.1	6.5; 11
4	(6–8)×2.1	92	1	1.3·10 ³	0.8	0; 0.5	3.5; 6.1	3.9; 4.6	9.4; 15
5	(6–8)×4.3	92	1	1.4·10 ²	0.1	1; 0.8	5.9; 12.8	5.6; 6.3	12.7; 18
6	10× ×(0.0004–0.001)	92	0.6	6.8·10 ⁵	35	0; 0	3.5; 5.1	3.8; 4.2	2.5; 8.1

Примечание. Размеры образцов 1, 2 указаны в мм³, а 3–6 – в мм². Первые числа в столбцах 7–10 соответствуют значениям соответствующих параметров до приложения поля, вторые – после приложения поля.

Для режимов FC и ZFC повторение эксперимента с компенсированным H_H выявило, что в случае приближения к поверхности ПХ1 как сверхпроводящей, так и магнитной пленок выходное напряжение магнитометра $V_{\text{ВЫХ}}$ не изменялось.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3–7 приведены измеренные зависимости $B_H(\varphi, x, z)$. Как видно на рис. 3, значения B_{H1} и B_{H2} различаются, они максимальны возле холловских контактов ПХ2. B_{H1} и B_{H2} возле холловских контактов (см. рис. 1) создают напряжение Холла,

$$V_H = \sim R_H(B_{H1} - B_{H2})I_H/d, \quad (10)$$

которое накладывается на полезный сигнал Холла, вызывая ошибку. В идеальных ПХ

$$B_{H1} = B_{H2}, \quad B_{H3} = B_{H4}, \quad (11)$$

а H_H не влияет на результаты измерений. Однако, как видно на рис. 3, для реальных ПХ соотношения (2) нарушаются. Согласно рис. 3, 4, зависимость $B_H(\varphi)$ имеет вид, близкий к косинусоидальному закону, B_{H1} , и B_{H2} достигают своих максимальных значения при $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 180^\circ$, $x = 0$ и $z \approx 10$ мм. Как видно на рис. 5, 6, с ростом x , z , φ различие между B_{H1} и B_{H2} увеличивается. Это отчетливо демонстрирует зависимость $B_H(x)$ при $\varphi = 0$ и $z = 10$ мкм, приведенная на рис. 7.

Рис. 3. Зависимость $B_H(\varphi)$ при заданной величине z и разных значениях x

Рис. 4. Зависимость $B_H(\varphi)$ при заданной величине x и разных значениях z

Рис. 5. Зависимость $B_H(z)$ при заданной величине x и разных значениях φ

Рис. 6. Зависимость $B_H(x)$ при заданной величине z и разных значениях φ

Рис. 7. Зависимость $B_H(x)$ при $z = 10$ мкм и $\varphi = 0$, $\varphi = 180^\circ$

Видно, что измеренные значения тангенциальной и перпендикулярной компонент B_H на холловских контактах составляют примерно $1.34 \cdot 10^{-4}$ и $-1 \cdot 10^{-4}$ Тл соответственно, эти величины по модулю неплохо согласуются с оцененным по формуле (7) значением (около 10^{-4} Тл). Таким образом, как следует из рисунков, топология распределения поля H_H по поверхности и вокруг ПХ сильно неоднородна. Следовательно, необходимо иметь в виду, что взаимодействие поля H_H с локальными полями на поверхности образцов будет приводить к существенному искажению трехмерного распределения таких величин, как, например, плотность ЗМП [21] на поверхности ВТСП-образцов и намагниченность магнитных материалов [5].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов вытекает, что для достижения более высокой точности и упрощения процедуры компенсации H_H при изготовлении ПХ необходимо выращивать одинаковые (близкие по техническим параметрам a , ℓ , d и входным сопротивлениям) тонкие эпитаксиальные пленки n -InSb с обеих сторон монокристаллической полуизолирующей подложки i -GaAs в едином технологическом цикле. Кроме того, при исследовании локальных полей объектов малых размеров необходимо соблюдать баланс размеров ПХ и объектов из-за усиления влияния H_H .

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00395-25-00 Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Han R., Wei Q., Wang H., Gu G., Wei D., Xiong P., Zhao J.* // IEEE Sens. J. 2025. V. 25. № 2. P. 2487. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3507799>
2. *Popovic R.S.* // Proceeding of the International Conference on Microelectronics (MIEL–2014), 2014. P. 69. <https://doi.org/10.1109/MIEL.2014.6842087>
3. *Rostami Kh.R., Nikitin I.P.* // Next Research. 2025. V. 2. P. 100331. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100331>
4. *Rokeakh A.I., Artyomov M.Yu.* // Rev. Sci. Instrum. 2023. V. 94. P. 034702. <https://doi.org/10.1063/5.0131896>
5. *Игнатъев В.К., Орлов А.А., Перченко С.В., Станкевич Д.А.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 15. С. 3. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.15.44864.16434>
6. Преобразователи Холла (ГОСТ 7.82–2001, 01.01.2021 г.) <http://sensorspb.ru/price5.doc>
7. *Ростами Х.Р.* // ПТЭ. 2019. №3. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S003281621903025X>
[*Rostami Kh.R.* // Instrum. Exp. Tech. 2019. V. 62. P. 450. <https://doi.org/10.1134/S0020441219030230>]
8. *Gerken M., Solignac A., Momeni Pakdehi D. et al.* // J. Sens. Sens. Syst. 2020. V. 9. P. 391. <https://doi.org/10.5194/JSSS-9-391-2020>
9. *Sandhu A., Okamoto A., Shibasaki I., Oral A.* // Microelectron. Eng. 2004. V. 73–74. P. 524. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(04\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(04)00205-9)
10. *Shaw G., Kramer R.B.G., Dempsey N.M., Hasselbach K.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 113702. <https://doi.org/10.1063/1.4967235>
11. *Dede M., Akram R., Oral A.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 182407. <https://doi.org/10.1063/1.4966896>
12. *Li P., Collomb D., Jieh Lim Z., Dale S., Shepley Ph., Burnell G., Bending S.J.* // Appl. Phys. Lett. 2022. V. 121. P. 043502. <https://doi.org/10.1063/5.0097936>
13. *Collomb D., Li P., Bending S.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2022. V. 33. P. 243002. <https://doi.org/10.1088/1361-648x/abf7e2>
14. *Vervaeke K., Simoen E., Borghs G., Moshchalkov V.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2009. V. 80. P. 074701. <https://doi.org/10.1063/1.3160105>
15. *Petit L., Fournier T., Ballon G. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2024. V. 22. P. 014071. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.22.014071>

16. *Кучис Е.В.* Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. Москва: Радио и связь, 1990.
17. *Baltes H.B., Popović R.S.* // Proc. IEEE. 1986. V. 74. № 8. P. 1107.
18. *Астахов А.В., Широков Ю.М.* Курс физики, Т. 2. Москва: Наука, 1980.
19. *Калашиников С.Г.* Электричество. Москва: Наука, 1985.
20. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. Основные законы. Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002.
21. *Rostami Kh.R.* // Supercond. Sci. Technol. 2023. V. 36. № 9. P. 095012.
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ace8c9>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Распределение силовых линий B_H вокруг токовой полосы ПХ.

Рис. 2. Измерительная установка.

Рис. 3. Зависимость $B_H(\varphi)$ при заданной величине z и разных значениях x .

Рис. 4. Зависимость $B_H(\varphi)$ при заданной величине x и разных значениях z .

Рис. 5. Зависимость $B_H(z)$ при заданной величине x и разных значениях φ .

Рис. 6. Зависимость $B_H(x)$ при заданной величине z и разных значениях φ .

Рис. 7. Зависимость $B_H(x)$ при $z = 10$ мкм и $\varphi = 0, \varphi = 180^\circ$.

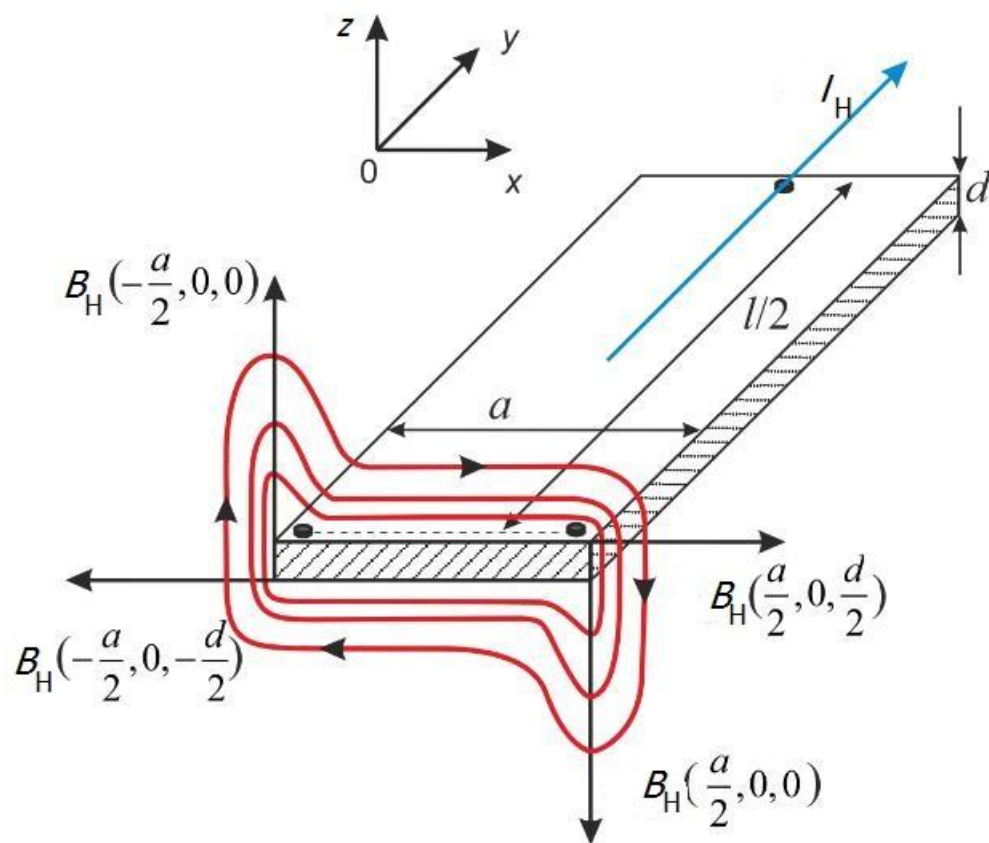


Рис. 1.

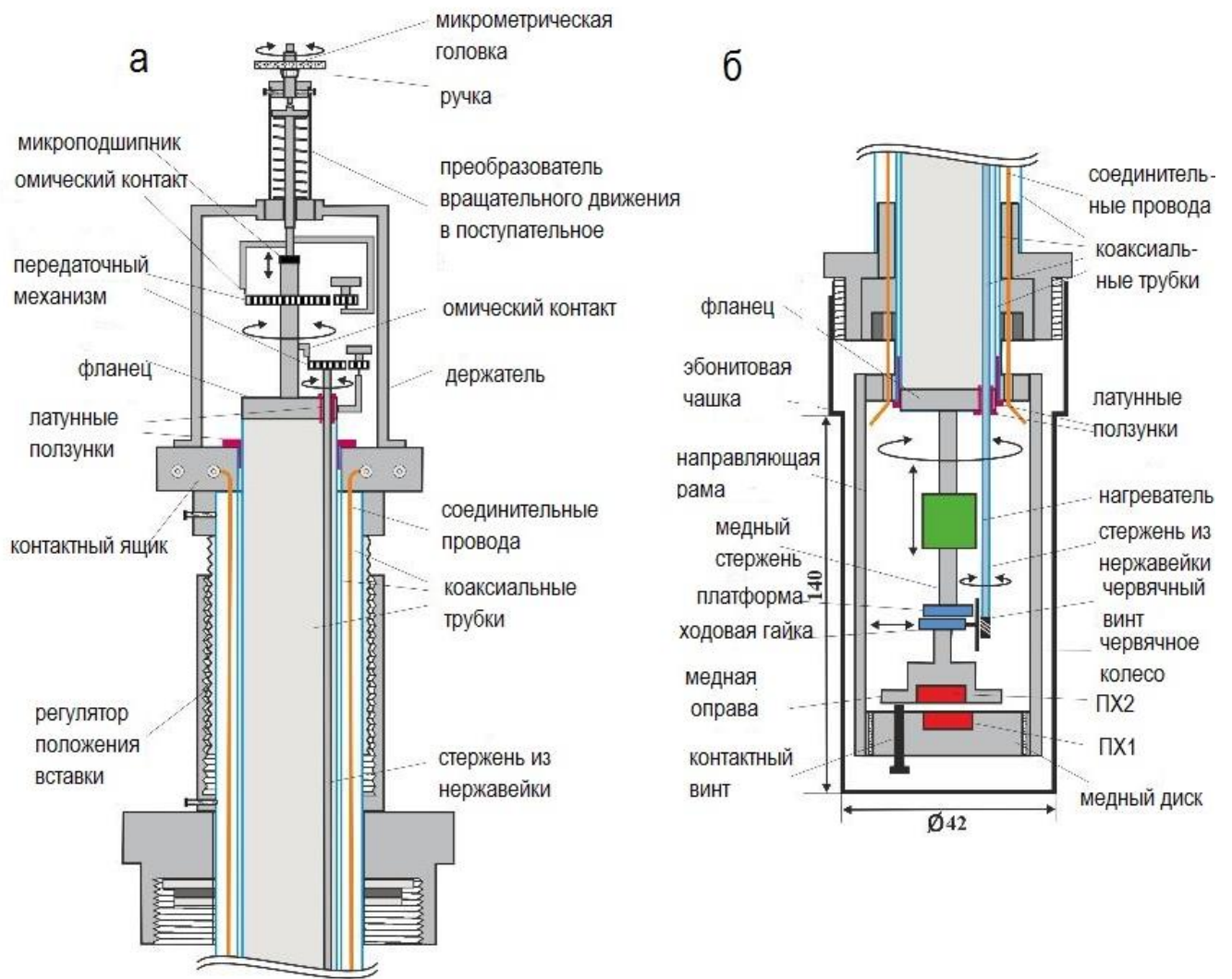


Рис. 2.

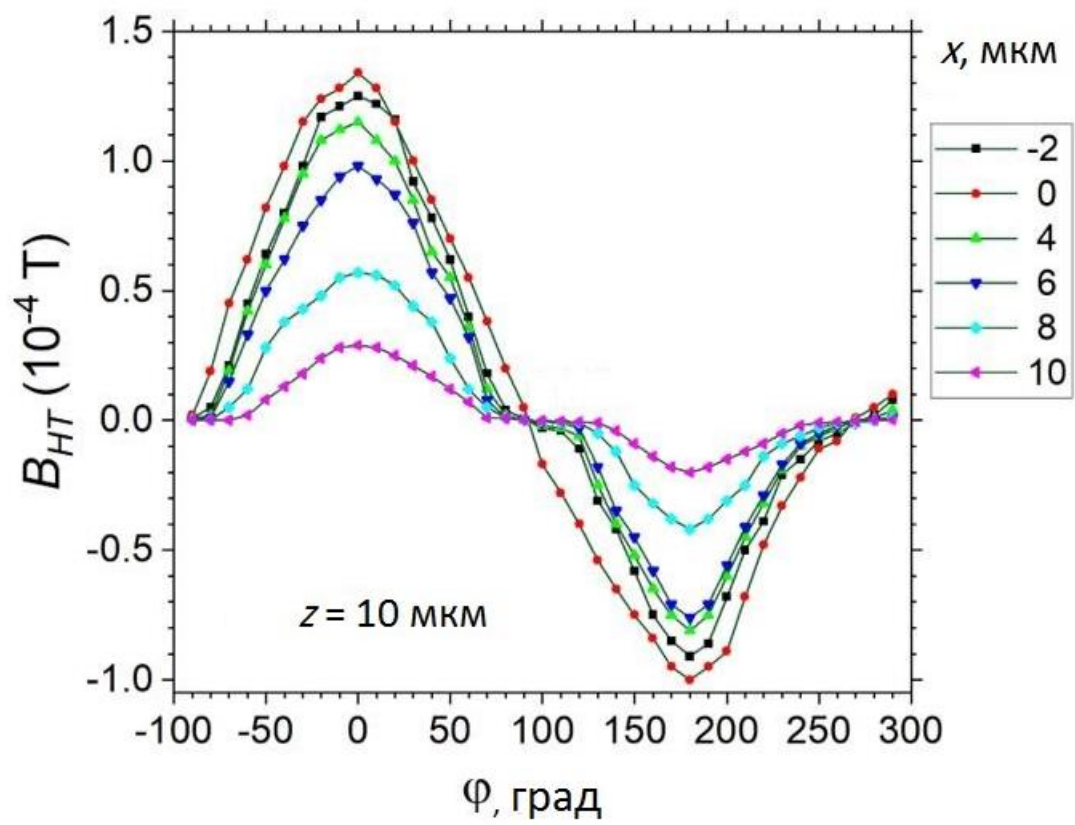


Рис. 3.

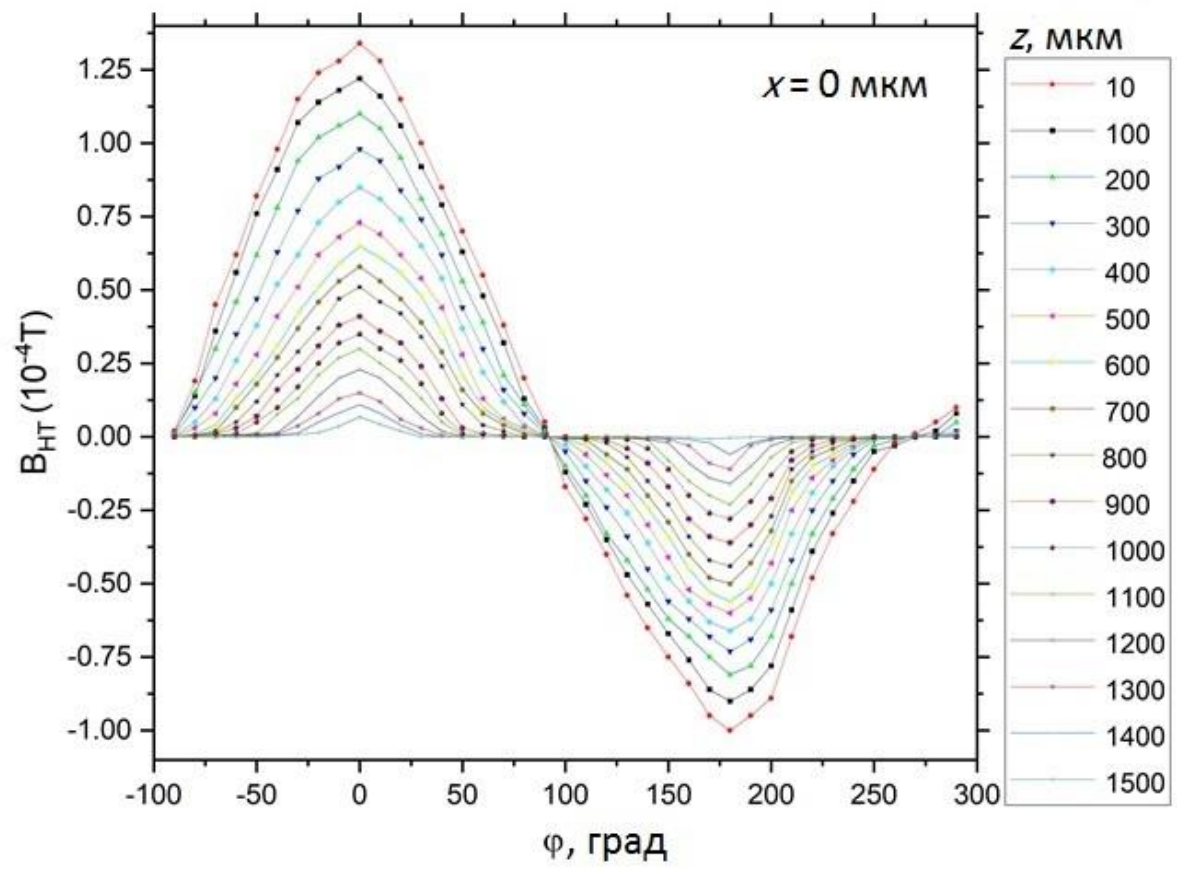


Рис. 4.

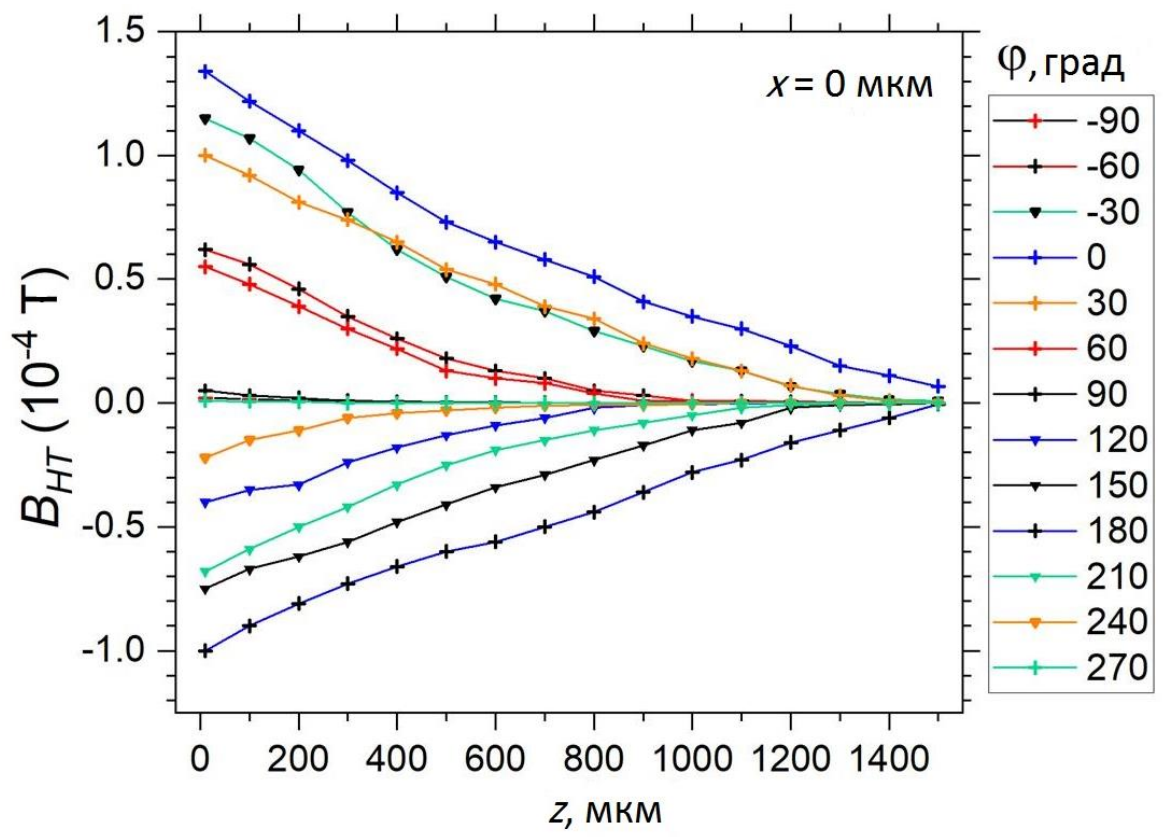


Рис. 5.

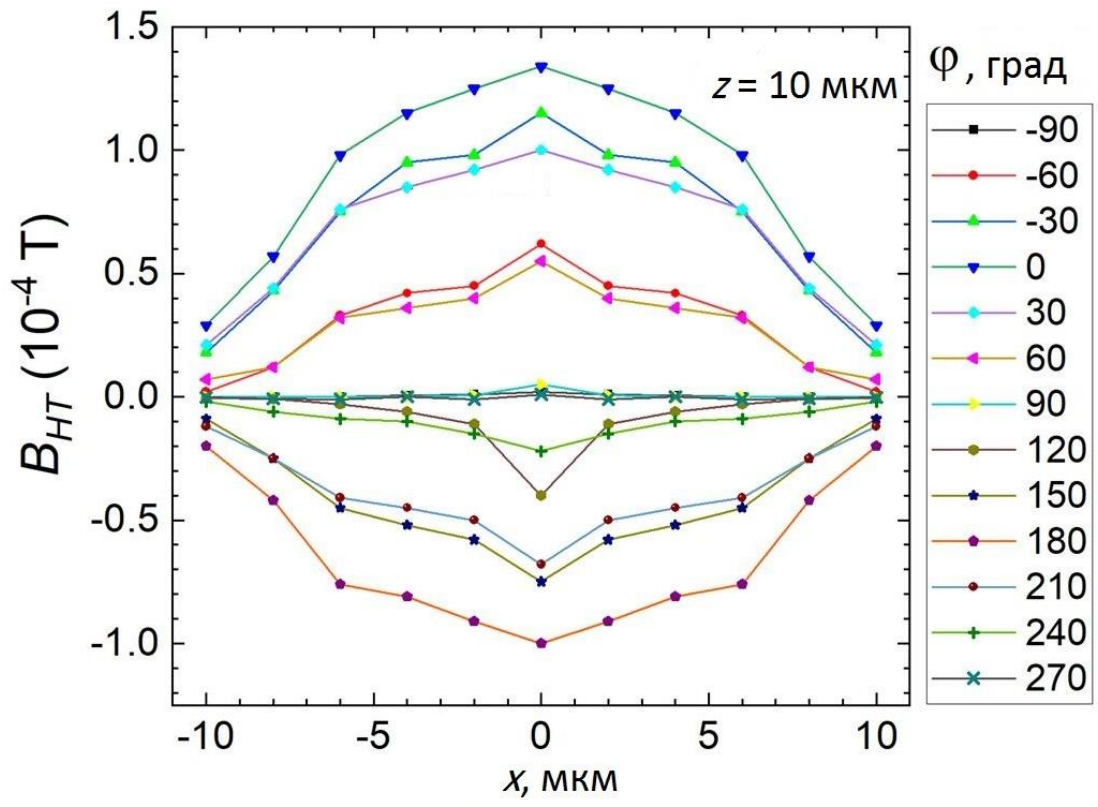


Рис. 6.

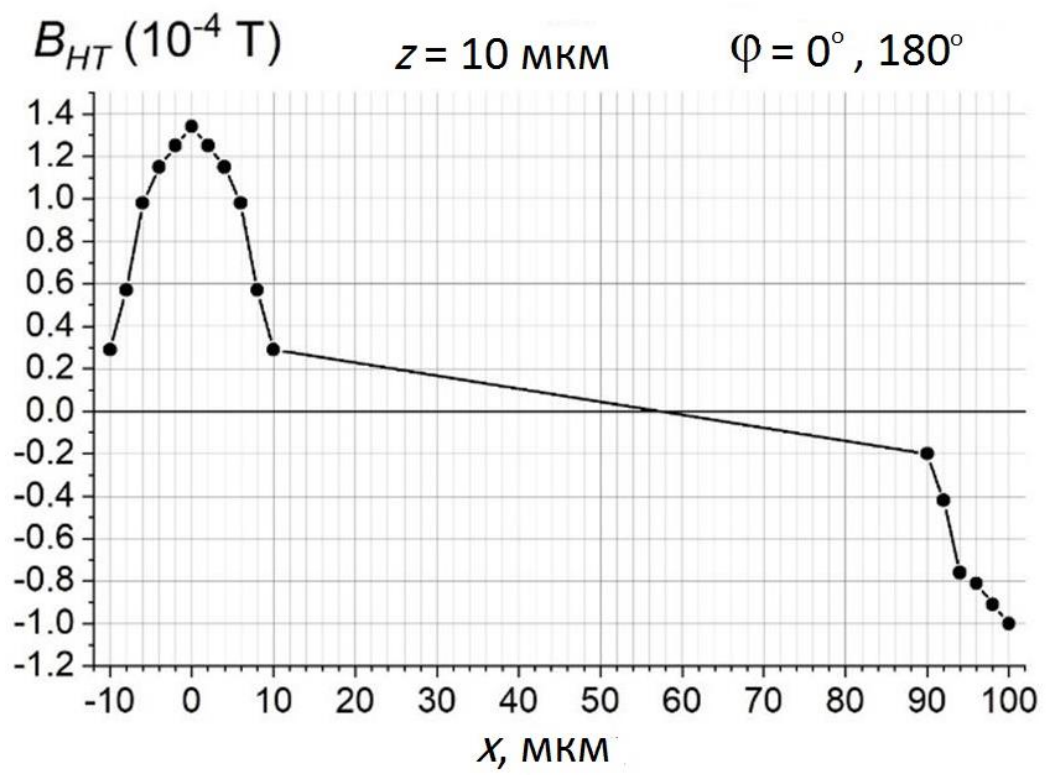


Рис. 7.