

Собственное поле тока смещения преобразователя Холла и установка для его исследования

© Х.Р. Ростами, Л.А. Луканина

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 24 июля 2025 г.

В окончательной редакции 9 декабря 2025 г.

Принято к публикации 17 декабря 2025 г.

Изучено влияние собственного поля тока смещения через преобразователь Холла на исследуемые объекты и точности измерений холловского магнитометра. Рассмотрено собственное поле гетероэпитаксиального преобразователя со структурой $n\text{-InSb}-i\text{-GaAs}$. Для проведения исследований разработана установка, позволяющая с точностью $\sim 1\ \mu\text{m}$ перемещать исследуемый преобразователь относительно измерительного вдоль оси Z на расстояние до 25 mm, вращать исследуемый преобразователь вокруг своей оси на 360° с точностью 2° , а также с точностью $\sim 1\ \mu\text{m}$ линейно двигать его вдоль оси X на расстояние до 5 mm. Обнаружено, что из-за разрывов контура силовых линий индукции собственного поля на краях тонкой эпитаксиальной пленки $n\text{-InSb}$ возникают скачки индукции возле холловских контактов преобразователя. При неоднородном распределении тока смещения по сечению пленки из-за анизотропии и возникших дефектов, созданных механическими напряжениями в пленке при ее выращивании на подложке, неэквивалентности холловских контактов и произвольном расположении выходных проводов преобразователя приводят к созданию на холловских контактах напряжения, которое накладывается на полезный холловский сигнал, вызывая ошибку.

Ключевые слова: преобразователь Холла, холловский магнетометр, собственное поле, ток смещения.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62672.195-25

Введение

К настоящему времени для исследования магнитных и кристаллических микроструктур физических, химических, биологических и других веществ с высоким пространственным и полевым разрешением и в широком диапазоне магнитных и температурных полей разработаны 3D-сканирующие зондовые микроскопы с преобразователями, основанными на эффекте Холла. С этой целью в холловских зондовых сканерах в основном используются „крестовые“ преобразователи Холла (ПХ), созданные на основе металлических золотых пленок и проволок [1,2], полуметаллических графеновых и висмутовых пленок [3–6], полупроводниковых тонких эпитаксиальных пленок на основе кремния [7], высокопроизводительных микродатчиков Холла InSb для работы в широких областях магнитных и температурных полей, сенсоров с двумерным электронным газом GaAs-AlGaAs [8] и т.д. Вышеперечисленные ПХ в связи с поставленными задачами и особенностями технологии их изготовления отличаются размерами рабочей поверхности, чувствительностью, величинами токов смещения, частотным, магнитным и температурным диапазонами работы и т.д. Высокое пространственное разрешение достигается путем существенного уменьшения площади рабочей поверхности ПХ. Для обеспечения микроперемещения ПХ закрепляется на головке пьезоэлектрического сканера. В [9–12] высокопроизводительные микродатчики Холла InSb были изготовлены методом

оптической литографии и встроены в сканирующий зондовый микроскоп Холла для исследования пространственного распределения плотности захваченного магнитного потока (ЗМП) и полей размагничивания на поверхности и вокруг образцов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [12], а также получения изображений локализованных магнитных флуктуаций в непосредственной близости от поверхностей кристаллических пленок одноосного граната при комнатной температуре [10]. Чувствительность датчиков InSb составляет $(2.5-10) \cdot 10^{-7}\ \text{T}$, что более чем на порядок выше, чем у сенсоров с двумерным электронным газом GaAs-AlGaAs, используемых на сегодняшний день [8]. Однако, как видно из этих работ, для одновременного обеспечения высокой чувствительности и пространственного разрешения требуется компромиссное решение, так как повышение чувствительности приводит к уменьшению пространственного разрешения и наоборот. Кроме того, в отличие от [9–12] указанные в [1–8] ПХ могут обеспечить высокое магнито-пространственное разрешение только в узких диапазонах магнитных и температурных полей и не позволяют зондировать поверхности объектов на больших пространственных масштабах. Хотя в некоторых из приведенных работ авторами замечена проблема влияния на исследуемые объекты собственного поля тока питания ПХ, однако подробное изучение этой проблемы не проводилось, что, в свою очередь, не позволяло оценить степень влияния собственного поля H_{HT} тока смещения I_{HT} через ПХ на чувствительность,

пространственное разрешение, линейность и точность холловского зонда. С целью уменьшения влияния поля H_{HT} на параметры холловского зонда приходилось уменьшать величину I_{HT} через ПХ, что неизбежно приводило к падению чувствительности и точности. Для устранения вышеперечисленных недостатков типичных холловских зондов в работах [13,14] был продемонстрирован принцип работы двухступенчатого холловского магнитометра чувствительностью $\sim 8 \cdot 10^{-11}$ Т с пространственным разрешением ~ 300 нм, имевший высокую степень линейности и точности в диапазоне магнитных полей (10^{-11} – 10^{-7}) Т. Использовался гибридный ПХ на основе полупроводникового n -InSb– i -GaAs ПХ и тонкой ВТСП двойниковой эпитаксиальной пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) в качестве чувствительной зоны. В предложенном магнитометре в отличие от классических магнитометров увеличение пространственного разрешения приводит не к уменьшению, а, наоборот, к повышению чувствительности магнитометра, так как локальные слабые магнитные поля регистрируются внутри рабочей поверхности ПХ с помощью отдельно взятых „изолированных“ однородно намагниченных двойников, намагниченность которых растет с уменьшением их размеров за счет существенного роста их критических токов. Благодаря механизму регулирования полей размеров двойников YBCO ВТСП пленки, пространственное разрешение зонда можно менять в широком диапазоне от минимального размера двойников 10–20 нм до размера рабочей поверхности ПХ первой ступени 50×100 мкм. Первый слой также служит для одновременного интегрального усиления локальных полей однородно намагниченных двойников YBCO ВТСП пленки. Следовательно, увеличение рабочей поверхности ПХ приводит к повышению его производительности, а увеличение I_{HT} — к росту чувствительности ПХ (см. ниже). В качестве базового магнитометра первой ступени в работах [13,14] использовался классический магнитометр, работающий на обычном эффекте Холла с ПХ типа ПХЭ 603 118 А, Б и обеспечивающий чувствительность $\sim 2.5 \cdot 10^{-7}$ Т в динамическом диапазоне ($10^{-7} \pm 1.2 \cdot 10^{-1}$) Т. В настоящей работе описываются методы исследования пространственного распределения поля H_{HT} и способы повышения чувствительности как автономного ПХ, так и ПХ в качестве первой ступени гибридного двухступенчатого магнитометра [13,14]. Это позволит установить степень влияния H_{HT} на исследуемые объекты, чувствительность магнитометра, а также внесет вклад в разработку методов компенсации H_{HT} .

1. Обсуждение проблемы возникновения собственного магнитного поля вблизи ПХ и его влияния на параметры исследуемых объектов

Установлено [7,15], что для идеального ПХ (симметричная конструкция, однородный материал, отсутствие

побочных эффектов и т. д.) при пропускании тока смещения I_{HT} через токовые контакты, нанесенные по центру на малых торцах тонкой прямоугольной пластины из высокоомного полупроводникового материала шириной a , длиной ℓ и толщиной d , на поперечных холловских контактах, расположенных по центру боковых сторон, в магнитном поле с индукцией B_{\perp} , перпендикулярной поверхности пластины, возникает напряжение Холла V_{HH} .

На рис. 1, а приведена конструктивная схема ПХ. Известно [7,15], что

$$V_{HH} = R_{HT} B_{\perp} I_{HT} / d, \quad (1)$$

где R_{HT} — коэффициент Холла (в слабых магнитных полях не зависит от B_{\perp} и определяется только свойством полупроводника). В полупроводниковой пластине с преобладающей концентрацией электронов $R_{HT} = (e \cdot n)^{-1}$, где n и e — концентрация и заряд электрона соответственно. Магнитная чувствительность ПХ есть

$$\begin{aligned} \gamma &= |V_{HH}| (B_{\perp})^{-1} = |R_{HT}| I_{HT} d^{-1} = I_{HT} (e n d)^{-1} \\ &= [P a \mu_e (d \ell e n)^{-1}]^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где P — мощность, рассеиваемая на ПХ, μ_e — подвижность электронов. Как видно из формулы (2), для широких, коротких и тонких рабочих поверхностей ПХ чем выше подвижность и меньше концентрация электронов, тем выше магнитная чувствительность ПХ γ . Согласно многочисленным литературным данным, среди всех известных полупроводников наиболее высокую μ_e и наименьшую n имеют ПХ на основе антимонида индия,

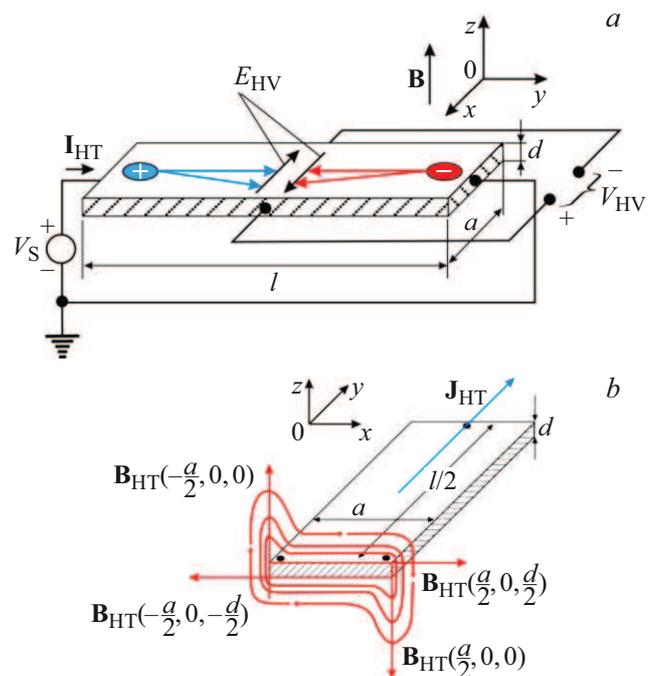


Рис. 1. а — конструктивная схема ПХ; б — распределение силовых линий индукции B_{HT} поля H_{HT} вокруг токовой полосы ПХ.

которые при этом демонстрируют более стабильные характеристики в широком диапазоне температурных и магнитных полей. Ток I_{HT} идеального ПХ с широкой и тонкой рабочей поверхностью мысленно можно представить в виде суммарного тока через параллельные токовые ниточки с диаметрами, равными толщине пленки: $I_{HT} = \Sigma I_{HTi}$. Токи I_{HTi} создают вокруг себя соленоидальные или вихревые поля V_{HTi} , при этом поля между нитями компенсируют друг друга, и в итоге $V_{HT} = \Sigma V_{HTi}$ с обеих сторон рабочей поверхности ПХ являются однородными и равными друг другу.

На рис. 1, *b* приведено распределение силовых линий индукции ВНТ поля H_{HT} вокруг токовой полосы ПХ. Как видно из рис. 1, *b*, силовые линии индукции V_{HT} поля H_{HT} образуют контур вокруг токовой полосы ПХ. Разнонаправленные силовые линии индукции V_{HT} перпендикулярны току через ПХ и параллельны поверхности ПХ с обеих сторон: $V_{HT3} = V_{HT}(-a/2, 0, -d/2)$ и $V_{HT4} = V_{HT}(a/2, 0, d/2)$. При этом из-за существенно меньшей толщины пленки по сравнению с ее шириной силовые линии на краях претерпевают разрывы, вызывающие скачки $V_{HT1} = V_{HT}(-a/2, 0, 0)$, $V_{HT2} = V_{HT}(a/2, 0, 0)$. В реальных ПХ величины этих скачков отличаются из-за технологических проблем получения симметричных холловских контактов, образования неоднородностей, анизотропности материала пленки, возникновения дефектов из-за механических напряжений при выращивании на подложке пленки и т.д. Это вызывает неодинаковое смещение токовых и эквипотенциальных линий возле холловских контактов, в результате чего возле них происходит разная магнитоконцентрация силовых линий индукции ВНТ, и, как следствие, интегральное по площади чувствительного элемента поле ВНТ отлично от нуля. Таким образом, на холловских контактах в нулевом внешнем магнитном поле, кроме возникновения остаточного напряжения неэквипотенциальности и напряжений, вызванных температурными зависимостями коэффициента Холла, средняя по площади чувствительного элемента индукция ВНТ, созданная разнонаправленным неоднородным асимметричным собственным полем H_{HT} , также генерирует дополнительное напряжение

$$V_{HT} \sim R_{HT} V_{HT} I_{HT} / d \sim R_{HT} I_{HT}^2 / d. \quad (3)$$

В случае переменного тока через ПХ — $I_{HT} = I_0 \cos \omega t$,

$$V_{HT} \sim (R_{HT} / d) I_0^2 \cos^2 \omega t. \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4), значение V_{HT} не зависит от направления тока I_{HT} . Для определения величины V_{HT} можно пользоваться теоремой о циркуляции вектора \mathbf{B} :

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 I. \quad (5)$$

Для точек вблизи поверхности пленки и вдали от ее краев

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

где i — линейная плотность тока, представляющая собой ток, приходящийся на единицу длины поперечного сечения пленки. Согласно формуле (6), у использованного в данной работе ПХ типа ПХЭ 603 118 А, Б:

$$B_{|textHT} = \mu_0 i_{HT} / 2 = (\mu_0 I_{HT}) / 2a \approx 10^{-4} T. \quad (7)$$

2. Конструктивная схема магнитометра и камеры датчика магнитного поля

На рис. 2, *a* приведена 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 .

На рис. 2, *b* 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 и обеспечивает движение по оси Z на расстояние до 25 mm с точностью $\sim 1 \mu m$. 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, равные по высоте их толщинам, 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 нержавеющей трубками центральной штанги. Минимальное расстояние между строго параллельными тщательно отполированными поверхностями медных дисков, в которых находятся ПХ1 и ПХ2, устанавливается с помощью пленки толщиной $\sim 10 \mu m$. 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 $10 \mu m$ [16].

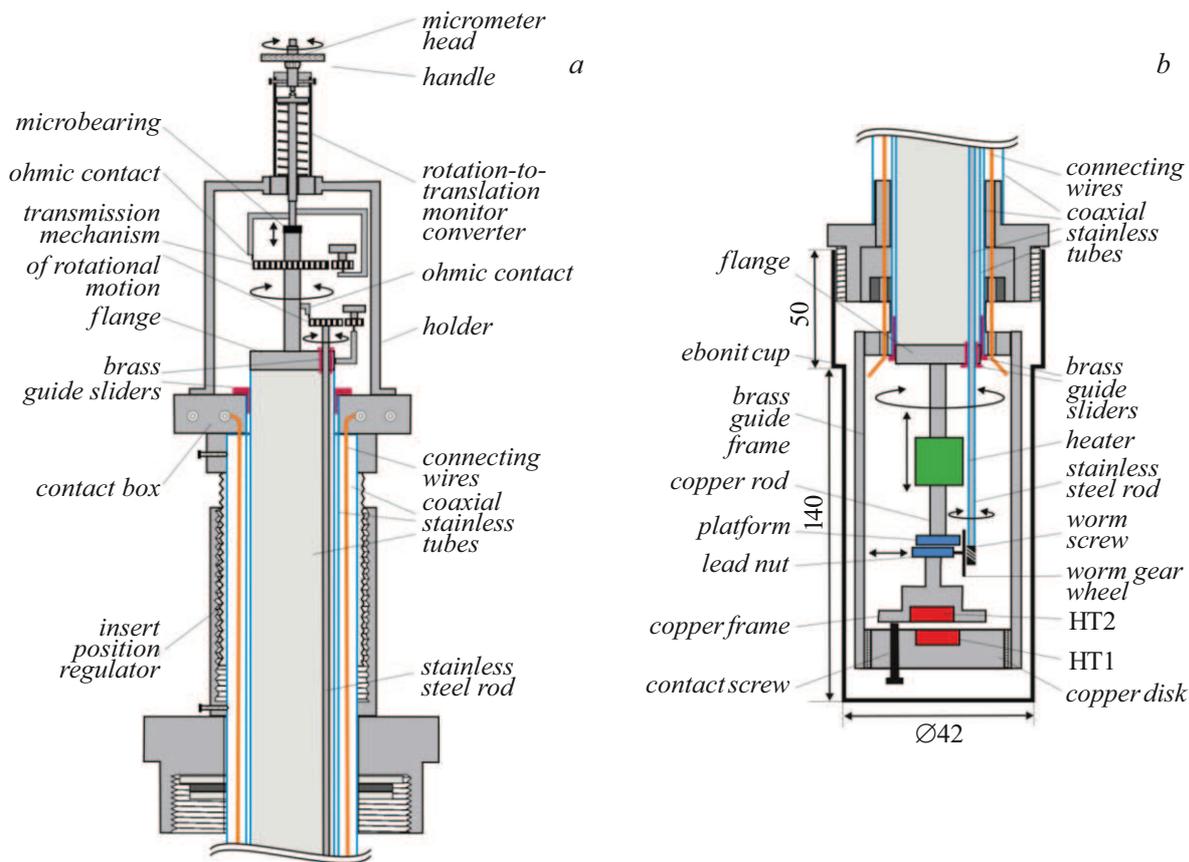


Рис. 2. Конструктивная схема магнитометра и камеры датчика магнитного поля: *a* — внешняя управляющая часть камеры датчика магнитного поля; *b* — нижняя часть камеры датчика магнитного поля.

После установки заданных значений Z и X положение ПХ2 фиксируется в горизонтальной плоскости. Далее осуществляется вращение ПХ2 относительно ПХ1 от $\varphi = 0$ до 360° с шагом 10° , и для каждого φ измеряются значения V_{HT1} и V_{HT2} . 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 V_{HT1} и V_{HT2} . Для компенсации люфтов резьб микровинтов начало и конец перемещения ПХ2 по осям X , Z и на угол φ контролируются с помощью омических контактов [16].

3. Принцип действия магнитометра

Для обеспечения повышенной чувствительности, линейности, высокой степени точности, стабильности, меньшего температурного дрейфа во времени как ПХ и магнитометра, так и микроскопа на их основе в широком диапазоне температурных и магнитных полей и частот необходимо тщательно компенсировать: остаточное напряжение смещения на холловских контактах ПХ, возникающее в отсутствие внешнего магнитного поля из-за неэквипотенциальности холловских контактов; неоднородность распределения физических параметров материала пленки ПХ; эффект пьезосопротивления, вы-

званный механическими и температурными напряжениями материалов пленки и подложки ПХ, возникающими в технологическом процессе изготовления ПХ; систематические ошибки, вызванные температурной зависимостью коэффициента Холла и другими побочными эффектами. Такой компенсации можно достичь, когда питание ПХ осуществляется высокостабильным переменным током с малыми нелинейными искажениями и при работе ПХ в изотермическом режиме. Путем усреднения можно существенно скомпенсировать остаточное напряжение, побочные эффекты, вызванные температурной зависимостью коэффициента Холла, полем H_{HT} , температурным дрейфом показаний ПХ и нулем электронной части микроскопа во времени (см. [16] и приведенную литературу).

На рис. 3 приведена блок-схема магнитометра. Магнитометр работает следующим образом: высокостабильное по частоте и амплитуде синусоидальное напряжение с малыми нелинейными искажениями с генератора синусоидального напряжения (SWO) поступает на прецизионный источник тока (CS-1) с повышенной стабильностью по току. Переменный ток $I_{HP} = I_0 \cos \omega t$ с выхода источника проходит через ПХ1 и на холловских контактах создает напряжение

$$V = V_{HH} + V_{resid} + V_{HT} + \Sigma V_i. \quad (8)$$

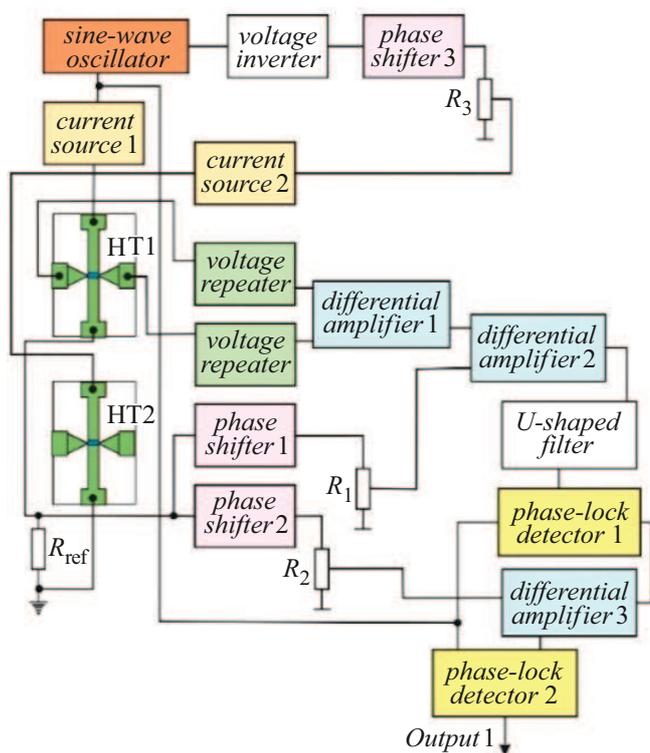


Рис. 3. Блок-схема магнитометра.

В этом выражении $V_{НН}$ — полезный холловский сигнал; V_{resid} — остаточное напряжение неэквипотенциальности, возникающее на холловских контактах ПХ1 при нулевом внешнем магнитном поле; $V_{НТ}$ — дополнительное напряжение, возникающее в собственном поле $H_{НТ}$; ΣV_i — суммарное напряжение систематических ошибок (терромагнитное напряжение, вызванное температурными эффектами, и зависимостью коэффициента Холла от температуры). Для регистрации напряжения V сигналы с холловских контактов через повторители напряжения с высокими входными сопротивлениями (исключающими влияние на результаты измерения полей, созданных сквозными входными измерительными токами повторителей) поступают на входы дифференциального усилителя (DU) 1, выход которого подключен к одному из входов DU2, на второй вход которого через фазовращатель 1 и прецизионный резистор R_1 от эталонного сопротивления R_{ref} , последовательно соединенного с ПХ1, подается напряжение, пропорциональное току $I_{НТ}$ через ПХ1. Выходной сигнал DU2 через П-образный фильтр (подавляющий низкочастотные и высокочастотные шумы) подается на вход SD1, на опорный вход которого подается сигнал из SWO. Далее сигнал с выхода SD1 подается на один из входов DU3, на второй вход которого через фазовращатель 2 и прецизионный резистор R_2 из R_{ref} подается напряжение, пропорциональное току $I_{НТ}$. Выходной сигнал DU3 подается на вход SD2, на опорный вход которого подается сигнал из SWO. Такое схемное решение обеспечивает

выходной сигнал магнитометра $V_{out} = K_u V_{in} \sim 10^5 V_{in}$. Таким образом, в изотермическом режиме в отсутствие внешнего магнитного поля предложенная схема позволяет компенсировать суммарное напряжение ошибок $V_{resid} + V_{НТ} + \Sigma V_i$ примерно в $3 \cdot 10^5$ раза, и во столько же раз усиливать полезный сигнал $V_{НН}$ при включении внешнего магнитного поля. Минимальный уровень выходного сигнала магнитометра в основном определяется порогом магнитной чувствительности ПХ1, зависящим от характеристик полупроводника, который является материалом пленки ПХ1. Коэффициенты усиления DU1-3 в зависимости от уровня входного сигнала магнитометра V_{in} задаются независимо друг от друга в ручном режиме или с помощью компьютера. Это позволяет обеспечить режим работы DU1-3, исключающий риск их попадания в область насыщения. Отметим, что входные и выходные сопротивления источников тока CS1 и CS2 $R_{in} > 10^7 \Omega$, $R_{out} > 10^8 \Omega$ соответственно. На частоте 1 kHz при $I_{НТ} = 100$ mA и изменении нагрузки в пределах 0–68 Ω нестабильность тока была меньше 0.005%. Коэффициент нелинейных гармоник в полосе 0.1–1 kHz менее 0.01%. Нестабильность тока за 8 h работы источника на частоте 1 kHz с током нагрузки 100 mA при комнатной температуре (20 °C) была < 0.01%. Среди всех известных полупроводников n -InSb имеет самую высокую подвижность электронов, регулируемую в диапазоне $\mu_e \approx (1.5-7.8) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, с длиной свободного пробега электронов $0.7 \mu\text{m}$ при 300 K и концентрацией электронов $(0.7-1.2) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. В магнитометре в качестве основного ПХ использовался ПХЭ 603 118 А, Б, изготовлений методом оптической литографии на основе гетероэпитаксиальной структуры n -InSb– i -GaAs при помощи выращивания легированной эпитаксиальной пленки n -InSb разных размеров и толщины на монокристаллической полуизолирующей подложке i -GaAs (ООО „ВЕГА-ФЛЕКС“, Санкт-Петербург) [9–12]. ПХЭ 603 118 А, Б с внешним размером $3 \times 2 \times 0.6 \text{ mm}$ имеет следующие параметры: размер рабочей поверхности $100 \times 50 \mu\text{m}$; магнитная чувствительность 0.81–1.28 V/T при $B = 0.1$ T и токе 100 mA; остаточное напряжение 30–60 μV ; входное сопротивление 5.2 Ω ; выходное сопротивление 7.5 Ω ; рабочая температура 1.5–373 K; температурный коэффициент магнитной чувствительности 0.005 %/°C; температурный коэффициент остаточного напряжения 0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Коэффициент нелинейности 0.3% при $B = 2$ T; коэффициент расходимости < 0.1% при $B = 0.1$ T; ток питания 100 mA; верхний предел индукции 10 T. ПХ с такими характеристиками обеспечивают линейность 0.2%–0.3% в диапазоне полей до 2 T, который существенно превосходит линейность 2DEG сенсоров AlSb/InAs и других видов ПХ. Кроме того, n -InSb– i -GaAs ПХ обладают самой высокой удельной чувствительностью и сравнительно лучшими метрологическими, полевыми и температурными характеристиками.

Так как сигналы от холловских контактов и эталонного сопротивления выровнены по амплитуде, всякое неконтролируемое изменение амплитуды $I_{НТ}$ и уход его

фазы дополнительно компенсировался с помощью DU2. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитометр настраивали прецизионными резисторами R_1 и R_2 , добиваясь поочередно сначала наименьшего показания SD1, а затем SD2. Благодаря применению процедуры первоначального вычитания–усиления–повторного двукратного вычитания–усиления и использованию двухэтапного синхронного детектирования, повышается точность компенсации ошибок. Это приводит к существенному повышению уровня $V_{\text{НН}}(B)$ по сравнению с уровнем шумов, включая собственные шумы операционных усилителей. Для экранировки поля Земли и внешних помех криостат помещался в цилиндрический магнитный экран из алюминиевого каркаса, обмотанного поверх пермаллоевой лентой или медной сеткой и установленного дном на пермаллоевом диске, закрепленном на подставке криостата. Более прецизионно магнитное поле Земли компенсировалось с помощью соленоида индуктивностью $L_2 \approx 0.067$ Н, соосной соленоиду с индуктивностью $L_1 \approx 4.26$ Н, создающей внешнее магнитное поле. Вставка камеры датчика магнитного поля помещалась внутрь соосно соленоидам. Компенсация осуществлялась путем пропускания через соленоид L_2 постоянного тока регулируемого источника. Таким образом, предложенная принципиальная электрическая схема отличается от традиционных схем подключения ПХ в плечо моста и поочередного импульсного переключения токовых и холловских контактов на входе интегратора, тем самым вызывая импульсные помехи, требующие сложных схем их подавления.

4. Характеристики камеры датчика магнитного поля и магнитометра

На рис. 4 приведена блок-схема составной части микроскопа для тестирования следующих показателей: чувствительность; линейность; точность выходного сигнала камеры датчика магнитного поля и магнитометра.

4.1. Магнитная чувствительность и способы ее определения

Для оценки разрешения магнитометра сначала с помощью откалиброванного ПХ при сравнительно большом токе через соленоид L_1 находили постоянную катушки $K = H/I$. Затем для предельно малого тока через соленоид L_1 с подключением выхода магнитометра на один из входов компаратора производилось сравнение выходного напряжения магнитометра с поданным на второй вход компаратора напряжением от регулируемого источника опорного напряжения. Далее через соленоид пропускался ток, и регулировалась его величина до тех пор, пока на выходе компаратора не возникал скачок. После этого определялась величина тока, и по формуле $K = H/I$ устанавливался минимальный порог поля H , позволяющий вычислить чувствительность магнитометра.

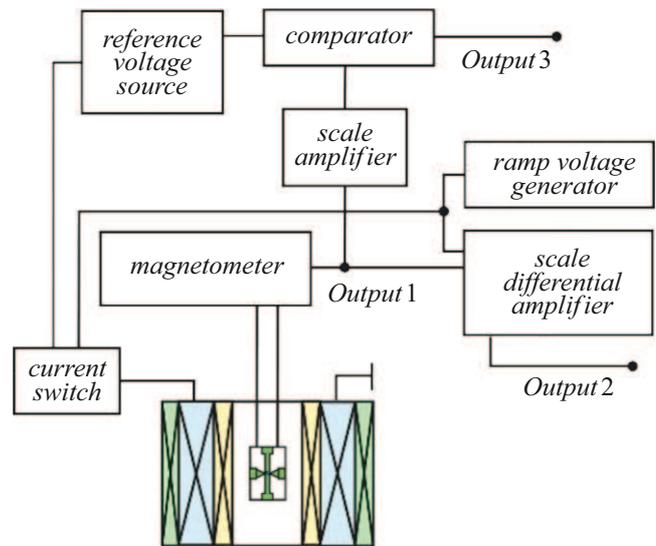


Рис. 4. Блок-схема составной части установки для тестирования показателей по чувствительности, линейности и точности камеры датчика магнитного поля и магнитометра.

На рис. 5, а для наглядности приведен выходной сигнал компаратора, на один из входов которого подавался опорный сигнал, пропорциональный току через L_1 , а на второй — через усилитель — подавался выходной сигнал магнитометра. При выравнивании сигналов путем регулировки тока через соленоид происходит скачок выходного сигнала компаратора из состояния U_1 в состояние U_2 . Было установлено, что чувствительность магнитометра без компенсации $H_{\text{НТ}}$ на частоте 19 Hz превышает $2.5 \cdot 10^{-7}$ Т. Работа на более высокой частоте 100–1000 Hz хотя и позволяет избавиться от низкочастотных помех (фликер шума $1/f$), но на таких частотах существенную роль играют тепловые шумы (белый шум, шумы Джонсона) высокого сопротивления полупроводника по сравнению с металлическими ПХ. Кроме того, очень сильно сказывается влияние паразитных емкостей из-за перемещения в пространстве движущихся частей микроскопа. С ростом рабочей частоты также увеличивается разность фаз между $V_{\text{НН}}$ и V_{resid} , изменяется форма $V_{\text{НН}}$, что сильно сказывается в случае регистрации слабых магнитных полей. Для уменьшения погрешностей измерений, связанных с влиянием поля $H_{\text{НТ}}$ на показания ПХ и физические параметры исследуемого объекта, поле $H_{\text{НТ}}$ тщательно компенсировалось. Сравнительный анализ компенсации поля $H_{\text{НТ}}$ проводился тремя разными способами: i — измерительный ПХ1 и компенсирующий ПХ2 располагали лицевыми сторонами друг к другу; ii — ПХ2 располагали с обратной стороны подложки ПХ1; iii — с обратной стороны подложки ПХ1 на текстолите печатной платы располагали медную шину, имеющую одинаковые геометрические размеры с ПХ1 и полученную с помощью фотолитографии травлением фоторезистивной маски, нанесенной на печатной

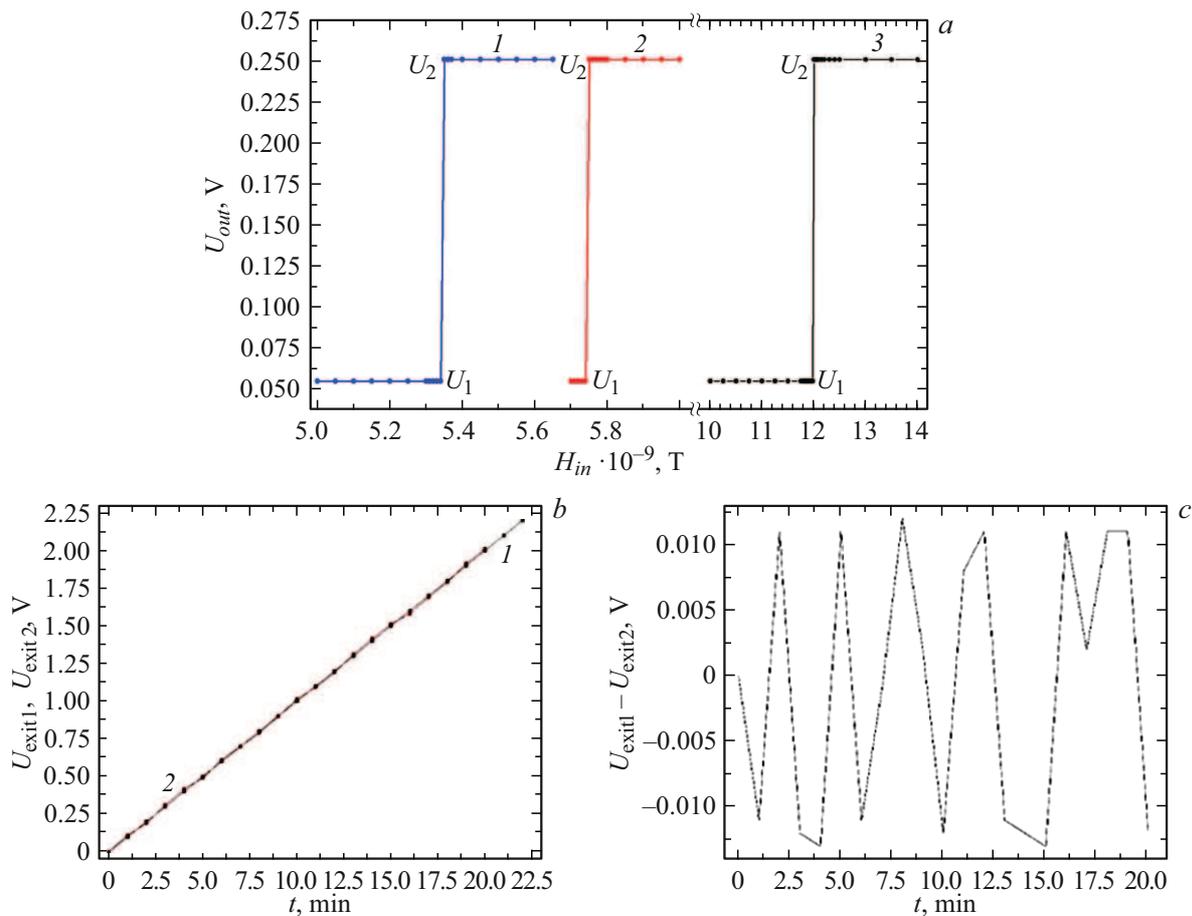


Рис. 5. Выходной сигнал компаратора, на один из входов которого подавался опорный сигнал, пропорциональный току через L_1 , а на второй вход через усилитель подавался выходной сигнал магнитометра (а), кривые 1–3 соответствуют различной геометрии эксперимента (разд. 4.1); временные зависимости выходного сигнала магнитометра, пропорционального току через соленоид L_1 (кривая 1), и генератора пилообразного напряжения (кривая 2) (b); временная зависимость выходного сигнала дифференциального усилителя, определяемая разностью выходных напряжений магнитометра и генератора пилообразного напряжения (c).

плате. Далее ПХ1 и ПХ2 или медная шина строго параллельно друг другу располагались в углубление внутри неподвижного медного диска, установленного на несущей нижней части камеры датчика магнитного поля (разд. 1). Затем через ПХ2 или медную шину пропусклся ток, противофазный току смещения I_{HT} через ПХ1. Для этого сигнал с SWO через фазовращатель 3 и прецизионный резистор R_3 поступал на вход прецизионного источника тока CS2, идентичного CS1, питающего ПХ1. Выходной ток CS2 пропусклся через бифилярно намотанный (с маленьким шагом накрутки) провод к подводющему проводу ПХ1, соединенный с ПХ2 или с медной шиной, и, регулируя амплитуду и фазу с помощью фазовращателя и применением синхронного детектирования после каждой ступени компенсации суммарного остаточного сигнала ПХ, удалось повысить чувствительность магнитометра от уровня $\sim 2.5 \cdot 10^{-7}$ Т до $\sim 5.3 \cdot 10^{-9}$ Т в случае i (кривая 1 на рис. 5, a); $\sim 5.75 \cdot 10^{-9}$ Т в случае ii (кривая 2 на рис. 5, a); $\sim 1.2 \cdot 10^{-8}$ Т в случае iii (кривая 3 на рис. 5, a).

4.2. Способы определения линейности и точности выходного сигнала камеры датчика магнитного поля и магнитометра на его основе

Для определения коэффициента нелинейности магнитометра через соленоид L_1 из источника через соленоид пропусклся линейно нарастающий во времени ток и сравнивались выходные сигналы источника и магнитометра.

На рис. 5, b приведены временные зависимости выходного сигнала магнитометра, пропорционального току через соленоид L_1 (кривая 1) и выходного сигнала источника (кривая 2) (рис. 4).

На рис. 5, c приведена временная зависимость выходного сигнала дифференциального усилителя, определяемая разностью выходных напряжений магнитометра и источника. По степени отклонения линейности тока и поля, а также по уровню нулевого сигнала на выходе дифференциального усилителя было установлено, что коэффициент нелинейности магнитометра в области сла-

бых полей составлял $< 0.003\%$ и уменьшался с ростом уровня сигнала. Следует отметить, что коэффициент нелинейности магнитометров [12,16] с нескомпенсированными ПХ составлял $< 0.01\%$ и в основном задавался нелинейностью ПХ, которая при $B = 2\text{ Т}$ составляет менее 0.04% . В области слабых полей ПХ проявляет более высокую линейность (менее 0.01%), чем указано в паспорте. Температурные дрейфы параметров ПХ уменьшали, задавая и постоянно поддерживая в газопроточном микрокриостате температуру с нестабильностью меньше 0.01 К или измерительную часть микроскопа помещали в жидкий азот. По паспорту ПХ температурные коэффициенты составляли $V_{\text{НН}}$ менее $0.08\text{ }\mu\text{В/К}$ и V_{resid} менее $0.54\text{ }\mu\text{В/К}$. Кроме того, после каждой заданной температуры сигналы разбаланса, вызванные тепловыми эффектами, дополнительно компенсировали с помощью электронной схемы.

Таким образом, из полученных результатов отчетливо видно, что чем точнее компенсация поля $H_{\text{НТ}}$, тем проще повысить чувствительность магнитометра с сохранением высокой линейности, точности, стабильности и повторяемости результатов измерения при их усреднении в течение длительного времени работы магнитометра в динамическом диапазоне полей $(0.1-5) \cdot 10^{-8}\text{ Т}$ и температур $77.4-150\text{ К}$.

Из этих сравнений также вытекает, что при использовании в магнитометрах [12,16] ПХ с компенсированным полем $H_{\text{НТ}}$ можно более чем на порядок повысить степень линейности и точности магнитометра. Кроме того, для достижения высокого разрешения, точности и линейности магнитометра во всем диапазоне измерений необходимо диапазон регистрируемых полей магнитометра дискретно разделить по своим жестко фиксированным параметрам.

С целью определения величины и пространственного распределения поля $H_{\text{НТ}}$ был исследован спад осевого распределения $H_{\text{НТ}}(Z)$ при вертикальном перемещении нескомпенсированного по $H_{\text{НТ}}$ ПХ2 относительно поверхности скомпенсированного по $H_{\text{НТ}}$ ПХ1. Кроме того, для подробного выяснения механизмов возникновения $H_{\text{НТ}}$ в реальных ПХ также проводился сравнительный анализ результатов, полученных с помощью ПХ, имеющих разные размеры рабочих поверхностей. Эксперимент проводился с ПХ1 и ПХ2, размеры рабочих поверхностей которых брали в различных вариантах: 50×00 , 150×450 , 250×1000 , 500×1500 , $500 \times 2000\text{ }\mu\text{м}$ [9]. При этом через ПХ1 и ПХ2 пропускать постоянный или переменный ток величиной 100 мА .

5. Экспериментальные методики и образцы

Исследования проводились в режимах FC (field cooling), ZFC (zero field cooling) [12,16]. Для исследований были выбраны монокристаллы YBCO с $T_c \approx 91\text{ К}$

размерами $\sim 1 \times 1 \times 0.05\text{ мм}$ (образец № 1); монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO) с $T_c \approx 90.2\text{ К}$ размерами $\sim 4 \times 4 \times 0.1\text{ мм}$ (образец № 2); массивные текстурированные (ось c перпендикулярна плоскости образца) квазимонокристаллические (расплавленные) YBCO образцы № 3, поликристаллические текстурированные по оси c образцы № 4 и нетекстурированные керамические YBCO ВТСП образцы № 5; эпитаксиальные пленки YBCO с осью c , перпендикулярной плоскости подложки NdGaO_3 (110) (образец № 6). Образцы в форме диска диаметром $D \sim 6-8\text{ мм}$ и толщиной $h \sim 0.4-1.0\text{ }\mu\text{м}$ (пленки) и $\sim 0.7-4.3\text{ мм}$ (массивные образцы № 3-5) имели $T_c \approx 92\text{ К}$ и ширину перехода $\Delta T_c \approx 0.6-1\text{ К}$.

С целью оценки степени компенсации напряжения $H_{\text{НТ}}$, возникающего в собственном поле $H_{\text{НТ}}$, проводились следующие эксперименты.

1. Сначала без компенсации $H_{\text{НТ}}$ в режиме ZFC к ПХ1 вдоль оси Z подводили YBCO образец, и было обнаружено уменьшение 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 в режиме FC находящийся ближе к ПХ1 YBCO ВТСП образец нагревали до температуры выше T_c и снова охлаждали до температуры жидкого азота $T = 77.4\text{ К}$. В данном опыте был обнаружен еще больший рост сигнала разбаланса на выходе магнитометра по сравнению с режимом ZFC, когда к поверхности ПХ1 приближали образец, находящийся в сверхпроводящем состоянии. При отводе YBCO образца от поверхности ПХ1, как и в первом опыте, сигнал разбаланса уменьшался, принимая свое первоначальное значение. В режиме ZFC изменение выходного сигнала магнитометра вызвано полями размагничивания YBCO образца, индуцированными полем $H_{\text{НТ}}$ [12]. В режиме FC, когда YBCO образец, находящийся вблизи поверхности ПХ1, охлаждался с температуры выше T_c до температуры 77.4 К , происходило проникновение $H_{\text{НТ}}$ через джозефсоновские слабые связи внутрь образца. При отводе образца от поверхности ПХ1 в образце происходил захват магнитного потока (ЗМП) созданным полем $H_{\text{НТ}}$, который при повторном приближении образца к поверхности преобразователя приводил к увеличению сигнала разбаланса на выходе магнитометра. 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 $B_{\text{тр}}^{\text{max}}(0)$ по сравнению с образцом № 1 — сигнал разбаланса на выходе магнитометра увеличивался. Для образцов № 3-5 — из-за более низкого H_{c1} и существенно высокого $B_{\text{тр}}^{\text{max}}(0)$ по сравнению с образцами № 1, 2, 6 — сигнал разбаланса на выходе магнитометра увеличивался еще больше. При приближении к поверхности ПХ1 ферромагнитной пленки (из-за ее высокой магнитной проницаемости) происходило существенное усиление $H_{\text{НТ}}$, в результате чего сигнал разбаланса увеличивался более, чем на порядок. Следовательно, в случае

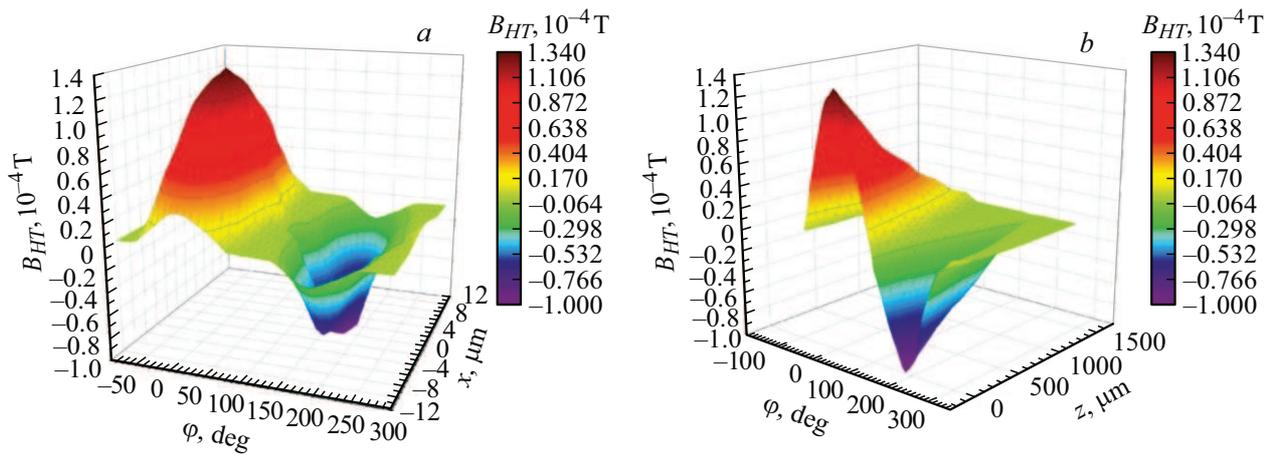


Рис. 6. 3D-зависимости $B_{HT}(\varphi, X, Z)$ в случаях, когда при заданном Z меняются φ и X (a); при заданном X меняются φ и Z (b).

использования магнитных концентраторов с большой магнитной проницаемостью для усиления и фокусировки силовых линий индукции магнитного поля на поверхности ПХ [17] необходимо иметь в виду, что это приведет как к усилению магнитной чувствительности, так и к ухудшению пространственного разрешения ПХ.

2. Для режимов FC и ZFC, повторяя эксперимент с компенсированной H_{HT} , мы обнаружили, что в случае приближения к поверхности ПХ1 как сверхпроводящей, так и магнитной пленок, выходное напряжение магнитометра не изменялось.

6. Экспериментальные результаты и их обработка

С целью установления величины и пространственного распределения $B_{HT}(\varphi, X, Z)$ на поверхности и вокруг ПХ2 нами была зондирована топология поля $B_{HT}(\varphi, X, Z)$ с помощью перемещения некомпенсированного по H_{HT} исследуемого ПХ2 относительно поверхности скомпенсированного по H_{HT} измеряющего ПХ1. Для исследования распределения силовых линий индукции ВНТ поля H_{HT} вокруг холловских контактов ПХ2 сначала были измерены значения B_{HT} на одном из контактов Холла и его изменение вдоль линии, соединяющей данный холловский контакт с холловским контактом на противоположной грани ПХ2 по оси X с помощью столика линейного перемещения. В данном случае линия, соединяющая холловские контакты ПХ2, совпадала с линией, соединяющей холловские контакты ПХ1, т.е. на концах этих линий углы составляли $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 180^\circ$. Далее с помощью поочередного изменения координат X , Z и путем вращения ПХ2 на угол φ вокруг своей оси, совпадающей с осью, проходящей через геометрический центр ПХ1, было картографировано распределение B_{HT} на поверхности ПХ2 с помощью ПХ1. Следует отметить, что с увеличением Z ПХ1 охватывает все большую область рабочей поверхности ПХ2 и позволяет одновременно наблюдать не только

за распределением силовых линий B_{HT1} и B_{HT2} возле обоих холловских контактов, но и за распределением их суммарного поля на поверхности ПХ2, и создает возможность следить за динамикой их изменения в зависимости от φ , X , Z . Это позволяет установить обнуление суммарного сигнала на выходе ПХ1 и соответственно выходного напряжения магнитометра при выравнивании значений B_{HT1} и B_{HT2} .

На рис. 6 приведены 3D-зависимости $[B_{HT}(\varphi, X, Z)](\varphi, X, Z)$ в случаях когда при заданном Z меняются φ и X (рис. 6, a); при заданном X меняются φ и Z (рис. 6, b). На рис. 6 хорошо видны диапазоны и закономерности роста и спада $B_{HT}(\varphi, X, Z)$.

Таким образом, как видно из проведенных исследований, топология распределения поля H_{HT} по поверхности и вокруг ПХ сильно неоднородна. Следовательно, необходимо иметь в виду, что взаимодействие поля H_{HT} с локальными полями на поверхности образцов при их топографировании будет приводить к существенному искажению трехмерного распределения, например, таких величин, как плотность ЗМП на поверхности ВТСП образцов и намагниченность магнитных материалов. Обычно для повышения пространственного разрешения магнитометра приходится ПХ располагать слишком близко к поверхности исследуемого объекта. Однако, как видно из рис. 6, b, для вышеуказанных ПХ зависимость $[B_{HT}(\varphi, X, Z)/B_{HT(0)^{\max}}](Z)$ достигает при аппроксимации нулевого значения при $Z \geq 2$ mm. Следовательно, для повышения пространственного разрешения магнитометра необходимо предварительно скомпенсировать поле H_{HT} используемого ПХ, что позволит разместить ПХ гораздо ближе к поверхности исследуемого объекта, не влияя на локальные поля, распределенные на его поверхности. Как обычно для повышения пространственного разрешения приходится уменьшать размер площади рабочей поверхности ПХ, а для уменьшения поля H_{HT} необходимо снизить величину тока I_{HT} . В связи с этим необходимо иметь в виду, что, кроме потери чувствительности, плохого теплоотвода, высокого температурного дрейфа показаний ПХ по времени, приводящего

к низкой стабильности работы таких ПХ, соотношение H_{HT}/I_{HT} будет одного порядка с таковым соотношением для ПХ с высокими I_{HT} и H_{HT} . Так что для более тесного приближения любого ПХ к поверхности исследуемого объекта и повышения чувствительности ПХ сначала необходимо скомпенсировать поле H_{HT} .

Как известно [9–12], толщина подложки i -GaAs для ПХ типа ПХЭ 603 118 А, Б и других ПХ из этой серии составляет $\sim 600 \mu\text{m}$; с другой стороны, рис. 6, b показывает, что при удалении от поверхности ПХ на расстояние $\sim 600 \mu\text{m}$ V_{HT} падает примерно на 40%. Отсюда следует, что для полноценной компенсации V_{HT} необходимо амплитуду противофазного тока через медную компенсирующую полосу увеличивать примерно на 40% по сравнению с током I_{HT} через ПХ. Кроме этого, из-за нестройной параллельности основной и компенсирующей токовых шин и расстоянием $\sim 600 \mu\text{m}$ между ними необходимо регулировать не только амплитуду, но и фазу тока через компенсирующую медную шину. Согласно [13,14], с целью повышения пространственного разрешения магнитометра при измерении распределения плотности ЗМП внутри двойников, имеющих малые размеры до 10–25 nm, и на границе двойникового необходимо измерить локальные поля внутри рабочей поверхности ПХ. Также для существенного усиления локальных полей необходимо использовать ПХ с большими размерами рабочей поверхности и с высоким током смещения I_{HT} . Следует отметить, что, хотя это и приведет к повышению поля H_{HT} по сравнению с ПХ, питающимся малыми токами I_{HT} и имеющим меньшие размеры, тем не менее из-за высокого коэффициента усиления холловского напряжения, высокого пространственного разрешения и более стабильной работы предпочтительно использование ПХ больших размеров с высокими токами I_{HT} [13,14].

Заключение

Обнаружено, что при удалении от поверхности ПХ на расстояние $\sim 600 \mu\text{m}$ нормированное осевое распределение $[V_{HT}(\varphi, X, Z)/V_{HT}(0)^{\text{max}}](Z)$ падает на $\sim 40\%$. Так как толщина подложки i -GaAs для ПХ типа ПХЭ 603 118 А, Б составляет $\sim 600 \mu\text{m}$, для полноценной компенсации V_{HT} и оперативного снижения погрешностей необходимо амплитуду противофазного тока через компенсирующую полосу увеличивать на $\sim 40\%$ по сравнению с током I_{HT} через измерительный ПХ. Кроме того, из-за нестройной параллельности измерительной и компенсирующей токовых шин и расстояния между ними $\sim 600 \mu\text{m}$ необходимо регулировать не только амплитуду, но и фазу компенсирующего тока через ПХ2 или медную шину, параллельную токовой полосе ПХ, что позволит повысить чувствительность холловского магнитометра более чем на порядок.

Из полученных результатов также вытекает, что для достижения более высокой точности и упрощения процедуры компенсации H_{HT} необходимо при производстве

ПХ выращивать одинаковые (близкие по техническим параметрам) тонкие эпитаксиальные пленки n -InSb с обеих сторон монокристаллической полуизолирующей подложки i -GaAs в едином технологическом цикле.

При использовании данного магнитометра в качестве первой ступени описанного в [13,14] двухступенчатого магнитометра можно повысить его чувствительность до $\sim 10^{-12}$ – 10^{-13} Т с сохранением высокой степени линейности, точности, стабильности и повторяемости результатов измерения при их усреднении в течение длительного времени работы магнитометра.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Gerken, A. Solignac, D. Momeni Pakdehi, A. Manzin, T. Weimann, K. Pierz, S. Sievers, H.W. Schumacher. *J. Sens. Sens. Syst.*, **9**, 391 (2020).
- [2] A. Sandhu, A. Okamoto, I. Shibasaki, A. Oral. *Microelectron. Eng.*, **73–74**, 524 (2004).
- [3] G. Shaw, R.B.G. Kramer, N.M. Dempsey, K. Hasselbach. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 113702 (2016).
- [4] M. Dede, R. Akram, A. Oral. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 182407 (2016).
- [5] P. Li, D. Collomb, Zh.J. Lim, S. Dale, Ph. Shepley, G. Burnell, S.J. Bending. *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 043502 (2022).
- [6] D. Collomb, P. Li, S. Bending. *J. Phys.: Condens. Matter*, **33**, 243002 (2022).
- [7] H.P. Baltes, R.S. Popović. *IEEE*, **74** (8), 1107-1 (1986).
- [8] K. Vervaeke, E. Simoen, G. Borghs, V.V. Moshchalkov. *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 074701 (2009).
- [9] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://sensorspb.ru/price5.doc>
- [10] A.I. Rokeakh, M.Yu. Artyomov. *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 034702 (2023).
- [11] В.К. Игнатъев, А.А. Орлов, С.В. Перченко, Д.А. Станкевич. *Письма в ЖТФ*, **43** (15), 3 (2017). [V.K. Ignat'ev, A.A. Orlov, S.V. Perchenko, D.A. Stankevich. *Tech. Phys. Lett.*, **43** (15), 687 (2017).]
- [12] Kh.R. Rostami. *Supercond. Sci. Technol.*, **36**, 095012 (2023).
- [13] Kh.R. Rostami, I.P. Nikitin. *Measurement*, **153**, 107423 (2020).
- [14] Kh.R. Rostami, I.P. Nikitin. *Sensors and Actuators A: Physical.*, **346**, 11384 (2022).
- [15] R.S. Muller, T.I. Kamins. *Device Electronics for Integrated Circuits* (John Wiley and Sons, Inc, 1977, 1986)
- [16] Х.Р. Ростами. *ЖТФ*, **90** (12), 2066 (2020). [Kh.R. Rostami. *Tech. Phys.*, **65** (12), 1975 (2020).]
- [17] R.S. Popovic. *High Resolution Hall Magnetic Sensors*. *PROC 29th Int. Conf. on Microelectronics (MIEL 2014)* (Belgrad, Serbia, 12–14 May, 2014), p. 69–74.