

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кульбаченко Илья Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование температурных коэффициентов в датчиках Холла

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

Научный руководитель:

Старостенко А.А.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Максимов В.В.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы являлось определение температурных коэффициентов датчиков Холла, описание их температурной зависимости на качественном уровне, а также оценка влияния изменения температуры на показания датчиков. В работе использовались датчики Холла фирмы ИП «Вериго» типа ПХЭ 603118Б, с подложкой из арсенида галлия (GaAs) и напылением из антимонида индия (InSb).

Данное исследование является актуальным для стенда магнитных измерений ИЯФ СО РАН, где была выполнена работа, так как точность определения карты магнитного поля может быть повышена, при учете температурных коэффициентов во время калибровки датчиков.

Были получены температурные коэффициенты датчиков и приведены возможности их дальнейшего применения.

Ключевые слова: *температурные коэффициенты, датчики Холла, измерения магнитных полей.*

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	5
2.1. Эффект Холла.....	5
2.2. Температурные коэффициенты.....	6
3. Экспериментальная часть.....	7
3.1. Описание установки, методика эксперимента и полученные результаты.....	7
3.2. Анализ результатов.....	15
4. Вывод.....	16
5. Список литературы.....	17

1. Введение

С развитием ускорительной техники и усложнением проектов ускорителей, растут и требования к параметрам магнитных элементов. В частности, повышаются требования к точности магнитных измерений электронных линз.

В связи с повышением требований к магнитным элементам, соответственно, растут и требования к магнитным измерениям. Существуют несколько практик получения карты магнитного поля, которые используют в зависимости от поставленной задачи. Например, датчики ЯМР с высокой точностью (относительная погрешность меньше 10^{-6}) определяют однородное магнитное поле, но в силу большого размера чувствительной области не подходит для измерения полей с градиентом. Вот некоторые из приборов для магнитного измерения:

- Датчики ЯМР (используется явление ЯМР);
- Датчики Холла (используется эффект Холла);
- Индукционные магнитометры (основаны на явлении электромагнитной индукции);

Преимуществами датчиков Холла являются малый размер их чувствительной области (в эксперименте были использованы датчики с чувствительной областью 50×100 мкм), что позволяет строить карту градиентных магнитных полей и полей магнитов со сложной геометрией; высокая точность ($\sim 0,01\%$ до $0,1\%$), большой интервал измеряемых полей (< 1 мТл до 30 Тл).

Недостатками таких датчиков является нелинейный характер магнитной чувствительности, необходимость в калибровке и чувствительность к температуре. Последнее свойство представляет особенный интерес, изучение которого и составляет данная работа.

2. Теоретическая часть

2.1. Эффект Холла

Измерение магнитного поля датчиками Холла основаны на эффекте Холла. Это явление заключается в появлении поперечной разности потенциалов, при прохождении тока в проводнике, помещенном в магнитное поле. Очевидно, что в отсутствии магнитного поля, ток не будет отклоняться от своей прямолинейной траектории.

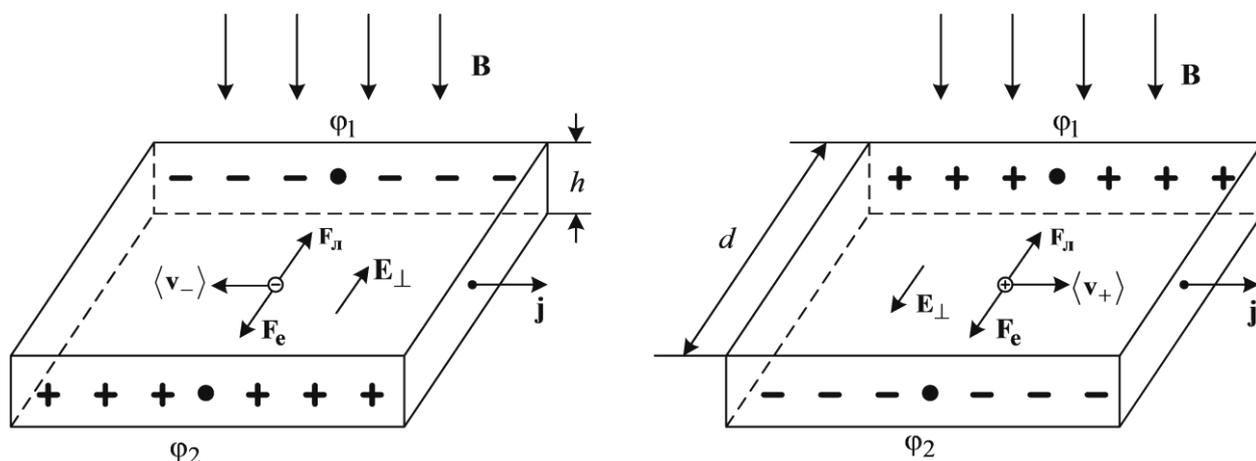


Рис. 1. Движение заряда в проводнике с взаимоперпендикулярными электрическим и магнитным полем.

Так как в работе используется датчик с прямоугольной чувствительной областью, в теоретическом описании будем пользоваться такой же геометрией. Поместим полупроводник в перпендикулярное току однородное магнитное поле, тогда сила Лоренца, действующая на заряженную частицу (здесь и далее формулы указаны в СГС):

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[(\mathbf{v}_T + \mathbf{v}_d) \times \mathbf{B}]$$

В этой формуле скорость частицы состоит из двух компонент: \vec{v}_T – тепловая скорость, обусловленная хаотическим движением электронов, и \vec{v}_d – дрейфовая скорость, возникающая благодаря приложению электрического поля. При усреднении данной формулы, в силу хаотичной природы, тепловая составляющая скорости станет равной нулю.

Так как в датчиках, которые были выбраны для эксперимента, чувствительная область состоит из полупроводника n – типа, то ток в образце будет определяться движением электронов. Согласно уравнению (1), магнитная составляющая силы будет отклонять носители заряда к одной из граней. Появится соответствующая разница потенциалов, вызванная дополнительным электрическим полем \mathbf{E}_\perp , которое образовано скоплением этих заряженных частиц. Заряд у грани будет расти до тех пор, пока магнитная составляющая силы Лоренца не компенсируется силой этого электрического поля:

$$eE_{\perp} = -\frac{e}{c}[\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}] \quad (2)$$

Учитывая, что плотность тока:

$$\mathbf{j} = -en\mathbf{v}_d$$

Найдем выражение для этого дополнительного поля, также называемого полем Холла:

$$E_{\perp} = -\frac{jB}{en}$$

Зная ширину чувствительной зоны d , нетрудно найти холловское напряжение:

$$U_H = -\frac{jhdB}{enh} = -\frac{IB}{enh} = \frac{R_H IB}{h}$$

Где $I = j \cdot h \cdot d$ – полный ток, $R_H = -\frac{1}{e \cdot n}$ – постоянная Холла.

2.2. Температурные коэффициенты

Температурная зависимость датчиков Холла обусловлена зависимостью от температуры трёх характеристик: постоянной Холла, ненагруженного (остаточного) напряжения Холла и внутреннего сопротивления самого датчика.

Зависимость постоянной Холла от температуры связана с ее определением:

$$R_H = -\frac{1}{e \cdot n}$$

Из уравнения видно, что этот параметр зависит от концентрации носителей заряда, которая изменяется с температурой, в силу тепловой природы.

Внутреннее сопротивление датчиков, с ростом температуры, резко падает. Связано это со двумя фактами: относительно небольшое количество электронов проводимости и устройство кристаллической решётки. Так, при увеличении температуры, электропроводность будет возрастать, несмотря на усиление движения решётки.

Чувствительность датчиков Холла отличается, даже если они сделаны из одних и тех же материалов, получены одинаковым способом. К примеру, в выборке из 10 датчиков, взятых для эксперимента, температурный коэффициент остаточного напряжения (ТКОН) варьируется от 0 до $360 \frac{\text{мГс}}{\text{°C}}$, температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) при 10 кГс – от 10 до $1620 \frac{\text{мГс}}{\text{°C}}$.

Для практических целей целесообразно измерять общий вклад этих зависимостей. Таким образом, можно будет учесть суммарный вклад в поправку к измеренному датчиком значению поля.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки, методика эксперимента и полученные результаты

Температурные коэффициенты были найдены эмпирическим путём для выборки из десяти датчиков. Для этого измерительную каретку, специальное устройство для крепления датчиков, помещают в калибровочный магнитный диполь (КМД) производства ИЯФ, с абсолютной точностью измерения магнитного поля в диапазоне до 2,5 Тл на уровне $5 \cdot 10^{-6}$. Подаваемый ток на выводы датчиков соответствует номиналу в паспорте и составляет 100 мА. Устройство каретки описано на рис.2.

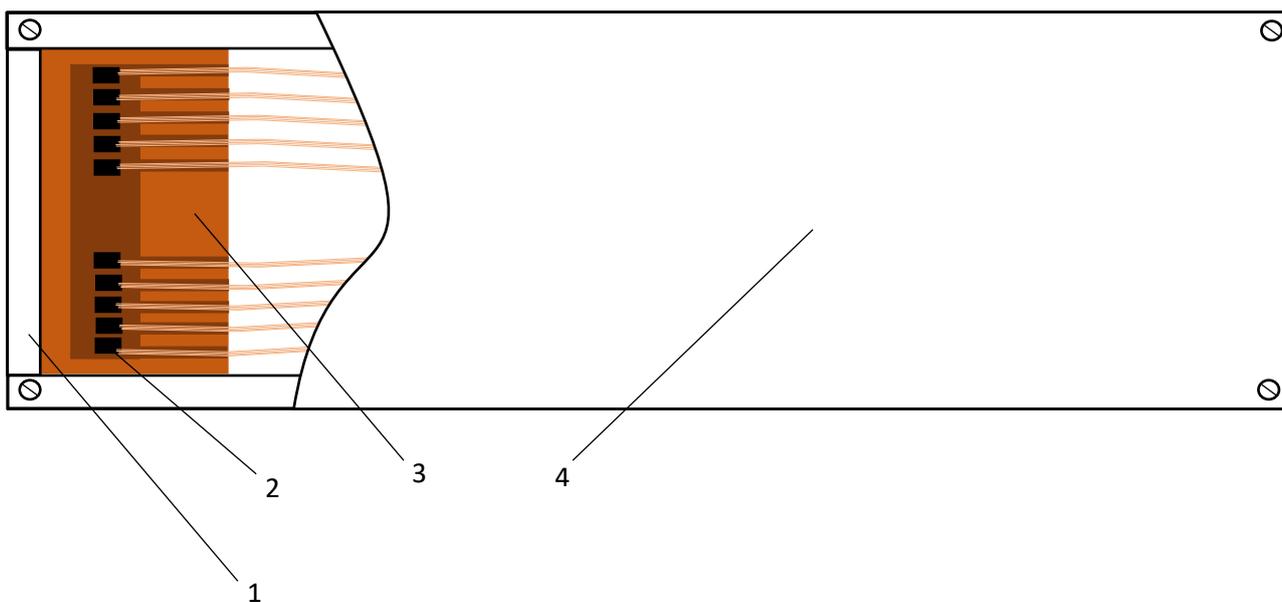


Рис.2. Схематичное устройство каретки: 1 – корпус из текстолита; 2 – датчик Холла; 3 – медная пластина с углублением для датчиков и пазами для выводов; 4 – крышка из текстолита.

Информация об используемых датчиках Холла:

- Структура чувствительной области: гетероэпитаксиальное напыление из антимонида индия (InSb)
- Размер чувствительной области: $0,1 \times 0,05 \times 0,01$ мм
- Производство и тип: ИП «Вериго» типа ПХЭ 603118Б

- Подложка сделана из арсенида галлия (GaAs), её размер составляет $3 \times 2 \times 0,6$ мм

Датчики имеют четыре вывода: два токовых и два сигнальных. Геометрия датчика представлена на рис.3.



Рис.3. Датчик Холла типа ПХЭ 603118Б.

Далее изложен порядок выполнения эксперимента.

Измерение ТКОН:

1. Каретка с закрепленными датчиками была помещена в магнитный экран, чтобы избежать влияния внешнего магнитного шума.
2. Далее включался элемент Пельтье, встроенный под медную пластину. В силу высокой теплопроводности меди, а также благодаря термопрокладке и дополнительной прижимающей крышке, разность температур между датчиками была пренебрежительно мала (температурная стабильность каретки за 36 часов составила $\pm 0,07$ °С, это соответствует относительной погрешности равной 0,006 при среднем значении поля в экране 1,5 Гс).
3. Было проведено три цикла нагревания-охлаждения. Интервал температур составил от 26,1 до 39,2 °С. Показания температуры снимались с терморезистора Pt100, который находился в медной пластине. Заявленная погрешность: $\pm 0,15$ °С.
4. В силу линейной зависимости холловского напряжения от температуры (наглядно представлено на следующих графиках), температурные коэффициенты высчитываются как угловой коэффициент.

Учет влияния погрешностей:

Источник тока Keithley 6211: ± 1 мкА при токе 100 мА

Keithley 2812А (АЦП): ± 1 мкВ при подаваемом напряжении до 1,5 В

Магнитное поле КМД измерялось датчиками ЯМР, чья относительная погрешность не превышает 10^{-6} . При достаточно однородном поле, можно рассчитывать на абсолютную погрешность ± 5 мкГс.

Суммарная погрешность измерений не превышает $2 \cdot 10^{-5}$.

В результате были получены температурные коэффициенты остаточного напряжения, представленные в Таблица 1. Также получены графики зависимости показаний датчиков от температуры, из них представлены графически данные датчиков №2, №5 и №9. Они отражают вид хороших, средних и плохих датчиков. Деление на категории для отбора весьма условное, критерии изображены в Таблица 2.

Номер датчика	ТКОН, $\frac{\text{мГц}}{^\circ\text{C}}$
1	-220
2	390
3	-50
4	30
5	40
6	-80
7	-
8	-10
9	0
10	10

Таблица 1. Значения ТКОН для выборки из 10 датчиков.

Отрицательные значения ТКОН (как и ТКЧ) и, соответственно, отрицательный наклон у графиков объясняются разной полярностью подключения сигнальных выводов.

	1-я категория	2-я категория	3-я категория	4-я категория
Остаточное напряжение ($U_{\text{ост}}$), мкВ	0 – 75	75 – 100	100– 150	>150
Температурный коэффициент остаточного напряжения (ТКОН), мГц/°С	0 – 30	30 – 60	60 – 100	>100
Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) при $V = 10$ кГц, мГц/°С	0 – 200	200 – 300	300 – 400	>400
Коэффициент нелинейности (КН) при $V = 20$ кГц, %	0 – 0,25	0,26 – 0,5	0,51 – 1	>1
Долговременная стабильность за 24 часа, Гс	0 – 0,2	0,21 – 0,3	0,31 – 0,5	>0,5

Таблица 2. Категории отбраковки датчиков Холла.

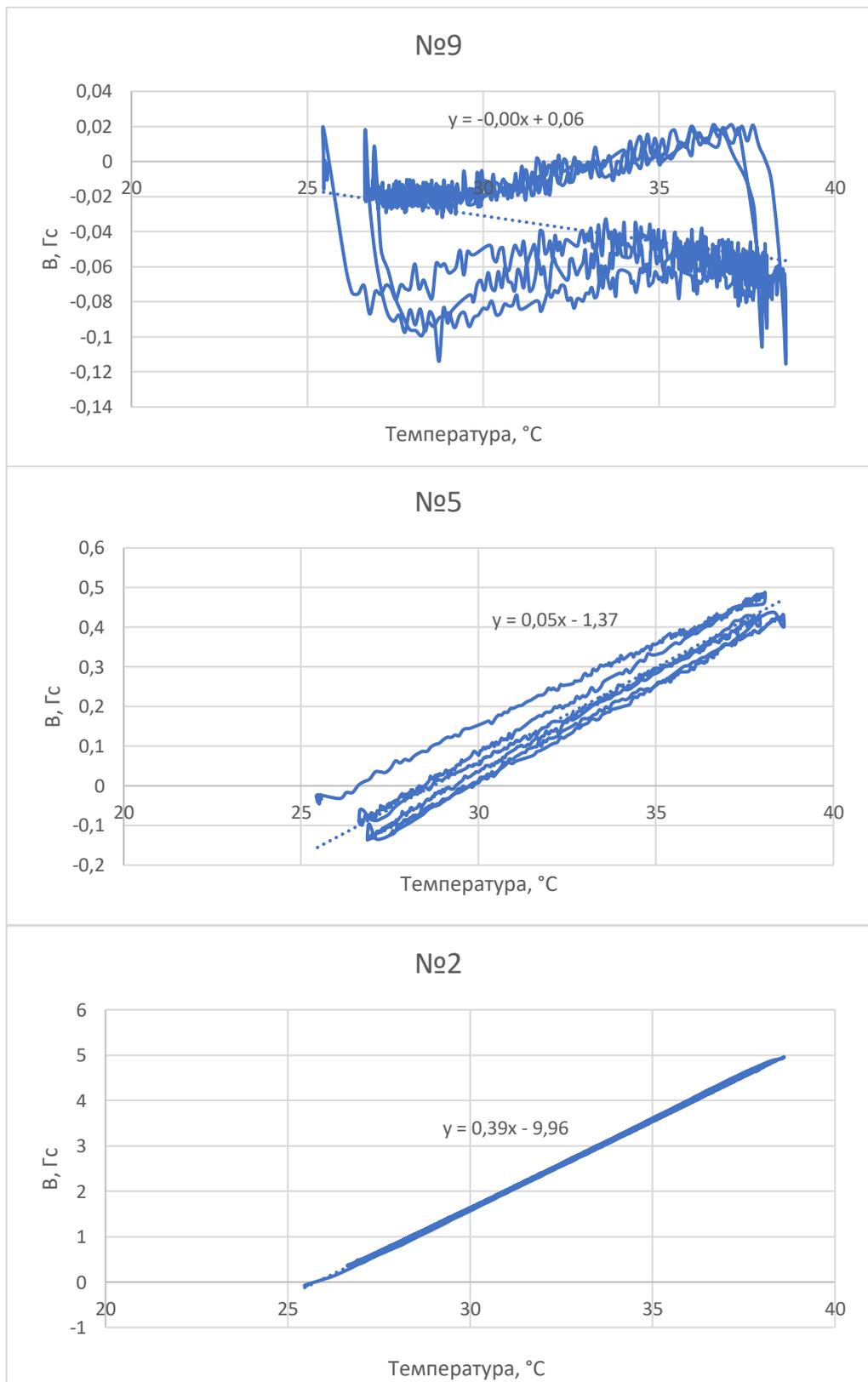


Рис.4. Зависимость показаний датчиков от температуры. Виден линейный характер этой зависимости.

Измерение ТКЧ:

1. Измерительная каретка с закрепленными датчиками была помещена в однородное магнитное поле КМД величиной 10 кГс.
2. Далее, как и в измерении ТКОН, включался элемент Пельтье и было проведено три цикла нагревания-охлаждения. Вычисление температурных коэффициентов чувствительности происходили аналогично (см. п.4 в измерении ТКОН).
3. Те же пункты выполнялись и при поле -10 кГс, для измерения ТКЧ при этой величине поля соответственно.

Полученные температурные коэффициенты приведены в Таблица 3. Температурные зависимости показаний датчика, также как и для ТКОН, приведены для датчиков №2, №5, №9 при 10 кГс и -10 кГс, на рис.5 и рис.6, соответственно.

Номер датчика	ТКЧ (10 кГс), $\frac{\text{мГс}}{^\circ\text{C}}$	ТКЧ (-10 кГс), $\frac{\text{мГс}}{^\circ\text{C}}$
1	-1320	540
2	-50	1020
3	-1470	1210
4	160	-30
5	100	-10
6	-130	-90
7	-	-
8	130	-70
9	110	-120
10	160	-120

Таблица 3. Измеренные значения ТКЧ в выборке из 10 датчиков.

Данные для датчика №7 отсутствуют, так как эксперимент был проведен после процедуры искусственного старения датчиков, в ходе которого он пришёл в неисправность.

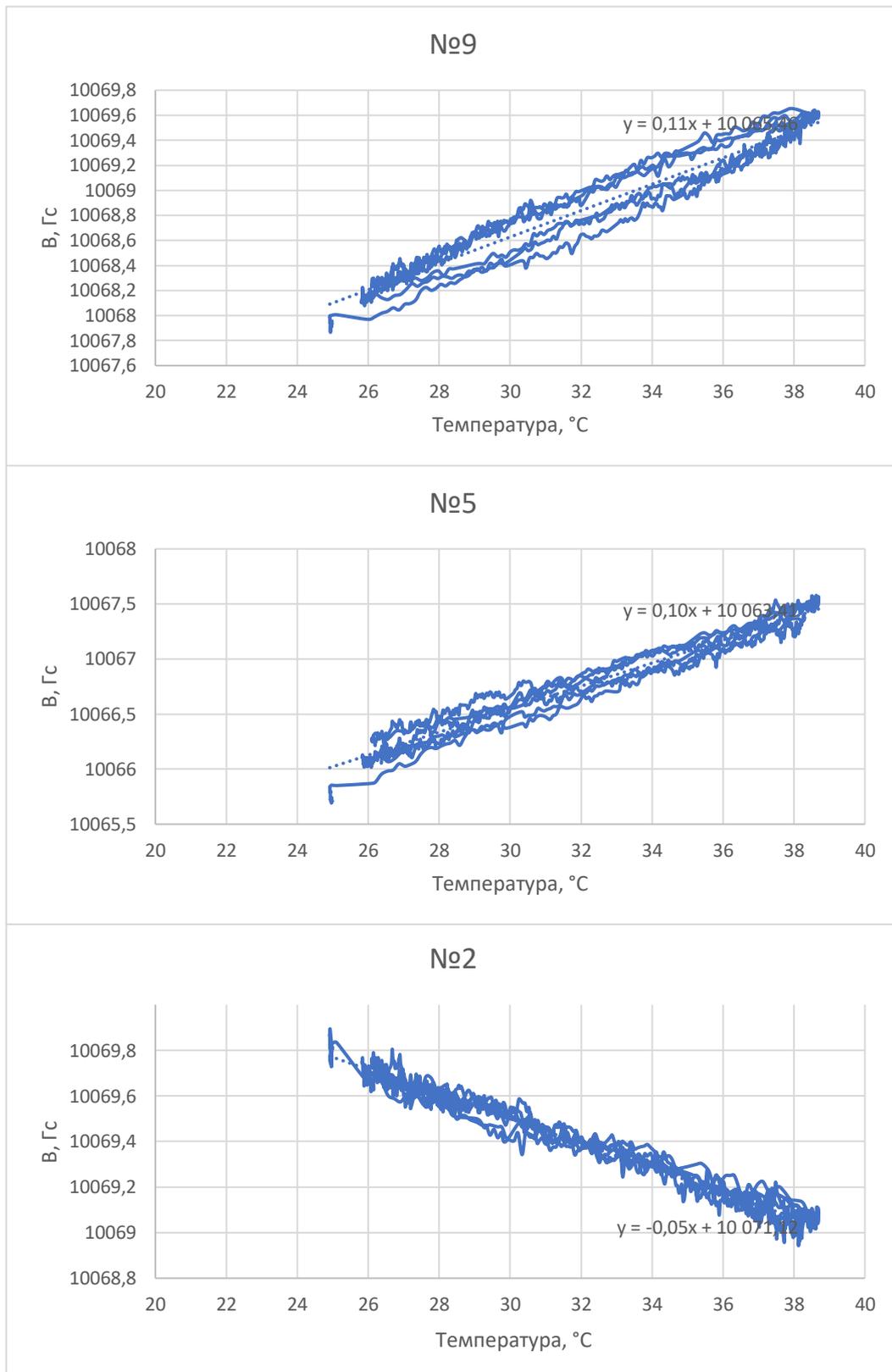


Рис.5. Зависимость показаний датчиков от температуры (10 кГц).

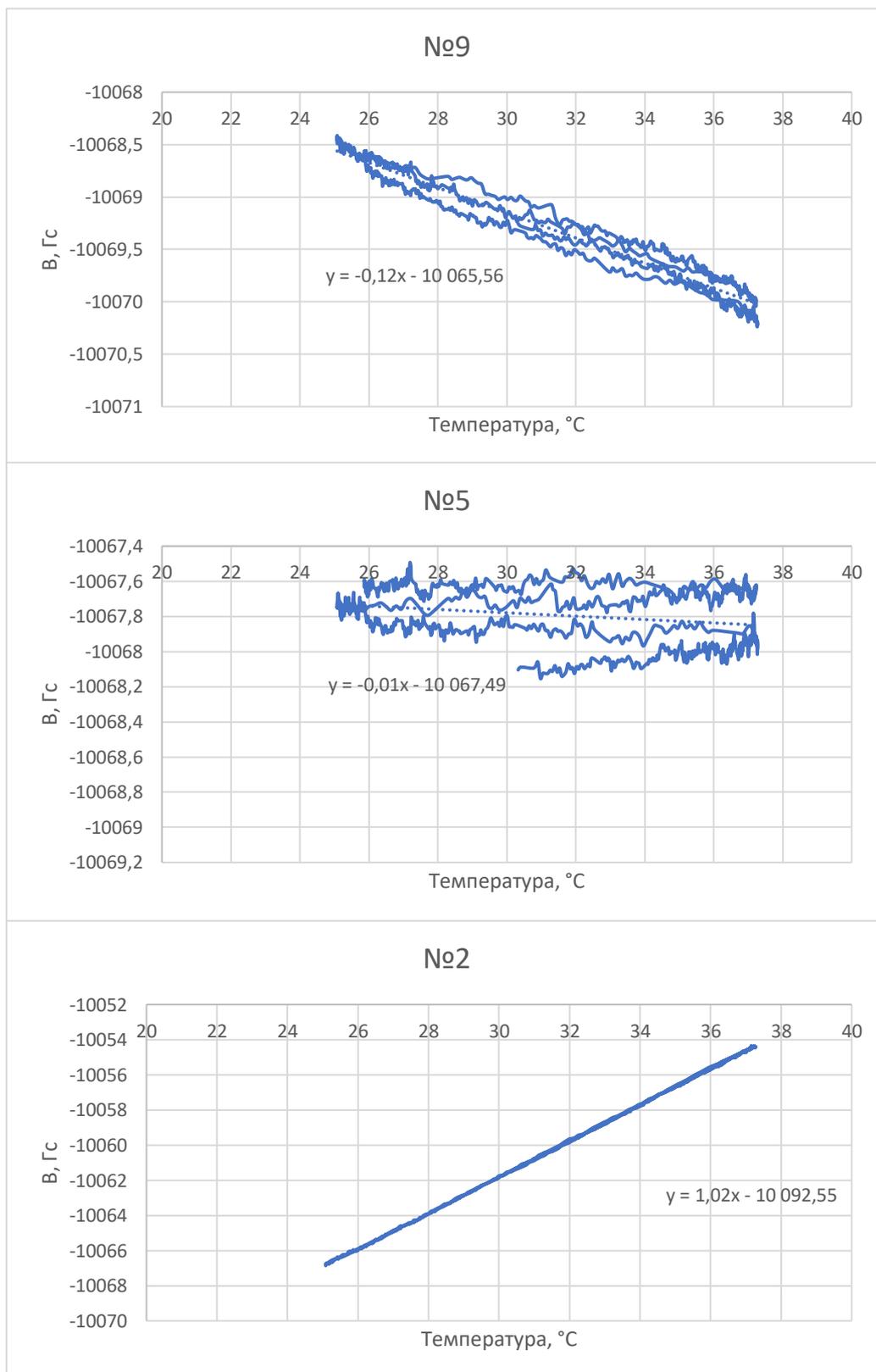


Рис.6. Зависимость показаний датчиков от температуры (-10кГс)

3.2. Анализ результатов

Рассматривая полученные данные, а также учитывая тот факт, что все десять датчиков были из одной партии, можно прийти к следующим выводам. Параметры датчиков, полученных одним и тем же путем, могут разительно отличаться, даже если они были сделаны в одной партии.

Это связано с тем фактом, что образование слоев эпитаксиальной пленки сильно зависит от условий на границе с подложкой, ведь эпитаксия – это процесс кристаллизации при низких температурах. На качество осаждаемого материала оказывает большое влияние качество подложки и степень чистоты её поверхности. Процесс изготовления таких датчиков оказывается трудоемким и не исключает большого разброса электрофизических свойств.

Кроме процесса производства, на датчики существенно влияют и другие факторы, такие как микротрещины, неидеальная геометрия чувствительной зоны, плохой контакт при пайке выводов, неоднородное легирование полупроводника.

Также, проанализировав рис.5. и рис.6, было замечено, что при разных направлениях поля температурный коэффициент чувствительности отличается. В соответствии с Таблица 3, разница значений ТКЧ для одного датчика варьируется от $10 \frac{\text{мГс}}{\text{°C}}$ (для датчика №9) до $970 \frac{\text{мГс}}{\text{°C}}$ (для датчика №2), с учетом направления магнитного поля. Объясняется это структурой пленки чувствительной зоны. В силу её малой толщины, 10 мкм, и существовании переходного слоя на границе GaAs-InSb, возникает эффект инжекции, характерный для p-n переходов. Это приводит к неодинаковости направлений в чувствительной зоне. При смене знака поля, направление силы Лоренца меняется на противоположное, электрическое поле, соответственно, тоже. Это значит, что холловское напряжение будет отличаться, а вместе с ним и соответствующие температурные коэффициенты.

При рассмотрении графиков, стоит учитывать масштаб вертикальной оси. Шумы, которые выражены скачками графика, вызваны дробовым шумом, связанным с тепловым движением электронов, а также внешними магнитными полями, которые не удастся в полной мере экранировать.

4. Вывод

При учете поправок на температурные коэффициенты можно использовать большее количество датчиков, даже которые попадают в низкие категории отбора, повысив точность их измерений. С другой стороны, на данный момент в используемой каретке установлена система термостабилизации, которая обеспечивает стабильность в доли сотых градуса. Также при общем анализе было выявлено, что датчики с относительно высокими температурными коэффициентами, как правило, имеют изъяны в других параметрах, такие как высокое остаточное напряжение, более выраженную нелинейность чувствительности, большую расходимость показаний при смене направления магнитного поля. Таким образом, недостаточно сделать поправки на температурную зависимость, так как решение проблем высоких остаточных напряжений или нелинейности представляет собой более трудную задачу, которая ещё не решена.

Но в то же время, данная работа несёт практическую пользу. Апертура магнитных элементов является ограничением для размеров каретки. Следовательно, для каждой магнитной линзы, чью карту магнитного поля предстоит измерить, создается новая каретка. Система термостабилизации не годится в случаях маленьких апертур, тут пригодится использование поправок на температурные коэффициенты. Создание такой каретки для квадрупольной линзы с радиусом вписанной апертуры 10 мм, которая находится в накопительном кольце ВЭПП-5, является хорошим приложением для теории данной курсовой, а также интересным проектом следующей работы.

5. Список литературы

1. Сиенко М., Плейн Р., Хестер Р. Структурная неорганическая химия. Перевод с английского Дяткиной М.Е. - М.: Мир, 1968г.. – 344 с.
2. Мирзабаев М., Потаенко К., Тихонов В. Эпитаксиальные датчики Холла и их применение. -Ташкент: Фан, 1986.. – 215 с.
3. Tumanski S. Handbook of magnetic measurements. 2011.