

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Буцыкина Мария Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Старение датчиков Холла

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. А.А. Старостенко

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2020г.

Преподаватель практикума

В.В. Максимов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2020г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2020г.

Новосибирск 2020

Оглавление

1. Введение	4
2. Теория	5
2.1. Устройство датчиков Холла	5
2.2. Физика старения полупроводников	6
2.3. Характеристики датчиков Холла и требования к ним	9
3. Установка	10
3.1. Калибровочный дипольный магнит	10
3.2. Калибровочная каретка	11
4. Методика эксперимента	12
5. Результаты	12
6. Погрешность	14
7. Заключение	15
8. Список литературы	17
9. Приложение	18

Аннотация

В данной работе исследуется процесс старения датчиков Холла и его влияние на их характеристики; приведены значения остаточного напряжения, чувствительности, температурных коэффициентов и некоторых других характеристик датчиков до и после старения. Была выдвинута гипотеза, что процесс старения может быть использован не только для проверки датчиков на «выносливость» (то есть для изучения их поведения при больших значениях магнитных полей, температуры и тока), но также для улучшения некоторых характеристик датчиков.

Старение проводилось в полях магнитной индукции значением 22 кГс. Анализ данных выявил сильное изменение некоторых характеристик, что говорит о возможности использовать процесс старения для улучшения характеристик датчиков Холла.

Ключевые слова: датчики Холла, процесс старения, высокая температура в полупроводниках, остаточное напряжение, температурные коэффициенты остаточного напряжения, температурные коэффициенты чувствительности.

Работа выполнена в ИЯФ СО РАН.

1. Введение

С развитием физики элементарных частиц и модификацией ускорительной техники растут требования к параметрам магнитных элементов. В частности, для современной техники необходима большая точность в измерении магнитного поля электронных линз. Допустимое отклонение магнитной оси в квадрупольях сибирского кольцевого источника фотонов составляет порядка 20 микрон, точность нахождения оси должна быть значительно лучше.

Существует множество методик измерений, которые основаны на разных физических явлениях; к примеру, измерение датчиками Холла. Данный метод использует эффект Холла для регистрации и расчета магнитного поля.

Для проведения измерений поля датчиками Холла с высокой точностью, характеристики датчиков должны соответствовать определенным требованиям. Так как паспортные данные не всегда отображают действительные значения, проводится искусственный отбор. Для долгосрочного использования датчиков Холла, также необходимо проводить дополнительный отбор на их стабильность. Для этого используется метод старения: датчики помещают в магнитное поле на длительное время и нагревают до высокой температуры ($\sim 60^{\circ}\text{C}$). После проведения данного метода значения характеристик датчиков Холла отклоняются от первоначальных показаний. В зависимости от величины поля и качества изготовления образцов изменения могут быть как существенными, так и пренебрежимо малыми. Однако на практике было выявлено, что старение не только помогает выявить нестабильные датчики, но также исправить некоторые характеристики у «хороших» образцов. В данной работе рассматривается влияние метода старения на характеристики датчиков Холла.

Главными задачами в этой работе были:

1. Предложить физическую модель старения датчиков Холла.
2. Проверить экспериментально, как процесс старения повлиял на характеристики датчиков.

2. Теория

2.1. Устройство датчиков Холла

Датчик Холла – это радиоэлемент, который используют для измерения магнитного поля; его действие основано на эффекте Холла.

Эффект Холла – эффект, возникающий в проводнике (или, как в нашем случае, полупроводнике), помещенном в магнитное поле. Данный эффект является частным случаем действия силы Лоренца. (рис1)

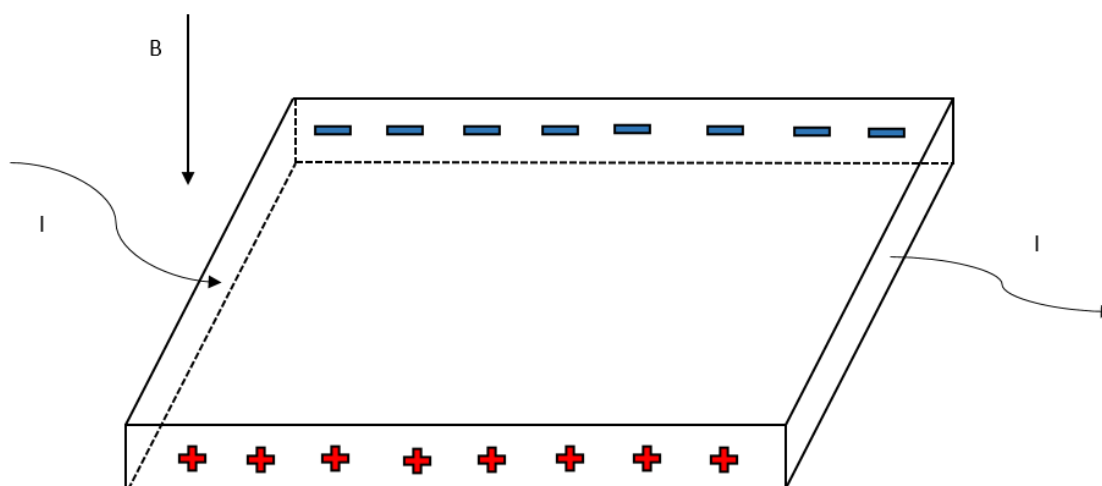


Рисунок 1

Движущиеся заряды будут отклоняться под действием силы, за счет чего на боковых гранях полупроводника будет возникать разность потенциалов. Очевидно, что роль играет именно перпендикулярная плоскости пластинки составляющая магнитного поля. Это означает, что для более точного измерения индукции пластинку надо расположить под углом в 90° к силовым линиям.

Датчик Холла представляет из себя подложку, сделанную из GaAs, с напылением из InSb. Арсенид галлия служит в качестве диэлектрика. [1] Особенность этого материала в том, что радиоэлементы, изготовленные из него, могут работать от низкого питания (как правило меньше 0,5 В). Антимонид индия [2] напылен на небольшую прямоугольную область на подложке. Эта область будет называться чувствительной областью, и с нее мы

будем снимать эдс Холла. GaAs легирован донорной примесью. Датчики имеют 4 контакта: два токовых (для питания) и два сигнальных. С последних снимается холловское напряжение U – по нему можно определить величину магнитного поля:

$$B = \frac{R * I}{a} U, \quad (1)$$

где R – коэффициент Холла, I – ток в полупроводнике, a – ширина датчика.
(рис2)



Рисунок 2

2.2. Физика старения полупроводников

Старение – это процесс, в ходе которого выявляются дефекты полупроводникового элемента. Существует два основных способа осуществления этого процесса: повышенная электрическая нагрузка и тепловое воздействие. Также возможны их комбинации. В данной работе детально рассматривается второй способ.

Из-за разного шага кристаллических решеток GaAs и InSb появляются механические напряжения. Рассмотрим два атома арсенида галлия. Расстояние между ними в ненапряженном состоянии $d_0=5,65$ А. Для растянутой атомной структуры $d=d_0+\Delta d$, где Δd - изменение длины связи между атомами GaAs. [3] Энергия взаимодействия двух атомов будет соответствовать удвоенной

энергии ковалентной связи, которая в свою очередь выражается следующим образом:

$$E = \alpha \frac{1}{d^2}, \quad (2)$$

где α – коэффициент, зависящий от характеристик материала, d – шаг решетки. Выведем формулу энергетического сдвига напряженной связи относительно ненапряженной:

$$E_{\text{сд}} = E_0 \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta d}{d_0}\right)^2} - 1 \right), \quad (3)$$

где E_0 – энергия ненапряженной ковалентной связи атомов GaAs. По формуле (3) видно, что с увеличением механического напряжения, энергия сдвига уменьшается, располагаясь все глубже в валентной зоне. Свободная энергия атома в напряженной структуре становится отличной от минимальной, и атом переходит в неустойчивое состояние. В следствии, он поглощает дырку, что переводит свободную энергию из локального максимума в максимальный. В результате образуется деформация. Поэтому напряженные ковалентные связи можно рассматривать как ловушки для дырок.

Оценим концентрацию напряженных связей следующим образом:

$$N_{\text{нс}} = N_{\text{нс0}} \exp(-wt), \quad (4)$$

где коэффициент w определяет скорость образования поверхностных состояний, $N_{\text{нс0}}$ – концентрация напряженных валентных связей в начальный момент времени.

Коэффициент w зависит от следующих параметров: концентрация дырок (N_a), вероятность захвата дырки на ловушки (f_p), эффективное сечение захвата дырок (σ_p), тепловая скорость движения дырок (v_T), отношение количества разорванных и релаксированных связей (K_{rel}). [4]

$$w = \sigma_p * v_T * f_p * K_{\text{rel}} * N_a, \quad (5)$$

Вероятность захвата дырок ловушками оценим с помощью распределения Максвелла-Больцмана:

$$f = \exp\left(\frac{E_{\text{св}} - F}{kT}\right), \quad (6)$$

где F – уровень Ферми, который описывается следующей формулой:

$$F = kT * \ln\left(\frac{2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{N_a}\right), \quad (7)$$

где m_p – масса протона, h – постоянная Планка.

Скорость теплового движение дырки:

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (8)$$

Введем понятие эффективного сечения захвата дырки на ловушки. Под этим определением будем понимать область в пространстве, попав в которую дырка будет поглощена напряженной связью. Тогда величина будет численно равна площади круга с радиусом, равным шагу решетки:

$$\sigma_p = \pi d^2.$$

Расстояние между атомами в ненапряженной кристаллической решетке можно вычислить по следующей формуле:

$$d = \frac{b}{\beta_0^2} kT, \quad (9)$$

где b и β – кубический и квадратичный член разложения в ряд потенциальной энергии взаимодействия частиц в твердом теле.

Тогда окончательно w принимает следующий вид:

$$w = \frac{\sqrt{3}\pi b^2}{\beta_0^4 \sqrt{m}} (kT)^{5/2} \frac{N_a}{2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2}} \exp\left(\frac{E_{\text{сд}}}{kT}\right). \quad (10)$$

Таким образом, скорость образования поверхностных состояний зависит от температуры. Этот результат можно интерпретировать следующим образом: повышая температуру, мы увеличиваем энергию напряженных валентных связей. Благодаря этому, их энергетический уровень поднимается из глубины валентной зоны ближе к поверхности, где энергии достаточно для релаксации напряжения.

2.3. Характеристики датчиков Холла и требования к ним

- Остаточное напряжение на контактах, $U_{ост}$ [мкВ].

Остаточным напряжением называется разность потенциалов между сигнальными контактами при помещении датчика, подключенного к питанию, в нулевом магнитном поле. Основной причиной появления остаточного напряжения является расположение контактов в неэквипотенциальных точках. На это могут влиять разные параметры. Основными являются геометрия чувствительной области (вместо прямоугольника она обычно представляет из себя трапецию ил даже более сложную фигуру) и неоднородная кристаллическая структура. Как правило, эта характеристика не меняется во время продолжительной эксплуатации. Однако, как показала практика, датчики с большим остаточным напряжением ведут себя нестабильно, и после нескольких месяцев использования погрешность измерения может сильно увеличиться. Поэтому очень важно отсеивать датчики с высокими остаточными напряжениями еще на этапе калибровки.

- Температурный коэффициент остаточного напряжения (ТКОН) [мГс/°С].

Этот коэффициент описывает зависимость остаточного напряжения от температуры. Зная ТКОН и начальное остаточное напряжение, мы можем пересчитать значение последнего в зависимости от температуры. Вычитая его из показаний датчика, мы получим значение магнитной индукции, приближенное к истинному. Однако если ТКОН слишком высокое, остаточное напряжение будет варьироваться в большом диапазоне, что также обычно говорить о нестабильности датчика при долгой эксплуатации.

- Температурные коэффициенты чувствительности (ТКЧ) [мГс/°С].

ТКЧ показывают, как изменяется чувствительность датчика при изменении его температуры. Чувствительность датчика – это напряжение, которое возникает на сигнальных контактах на единицу тока и единицу внешнего магнитного поля. [8]

$$\gamma = \frac{U}{BI}, \quad (11)$$

- Расходимость чувствительности датчиков при разной полярности поля [%].

Эта характеристика датчика показывает, насколько отличаются значения чувствительности датчиков при разной полярности.

- Нелинейность датчиков[%].

Эта характеристика показывает, насколько чувствительность датчиков отклоняется от линейной.

В зависимости от значений вышеперечисленных характеристик, датчики делят на категории пригодности. Зеленый цвет означает, что показания характеристик датчика в норме, желтый цвет – отклонения есть, но не критичны, красный цвет – датчик не пригоден для использования.

Ост напр,(мкВ)	0-50	50-100	100-150	150 и более
ТКОН, (мГс/°С)	0-30	30-60	60-100	100 и более
ТКЧ-1Тл(мГс/°С)	0-200	200-300	300-400	400 и более
Расходимость, %	0-0.03	0.03-0.06	0.06-0.1	0.1 и более

Табл. 1

3. Установка

3.1. Калибровочная дипольная линза

Все измерения проводились в специальной калибровочной дипольной линзе – электромагните с однородным, известным в каждой точке, полем. Последний пункт крайне важен, когда речь заходит не об измерении магнитного поля, а о проверке работоспособности датчиков. Однако даже в самом качественном магните, реальное значение индукции может отклоняться от значений, рассчитанных теоретически. Это связано с асимметрией конструкции, неправильной геометрией полюсов (из-за чего более высокие гармоники могут не компенсироваться и влиять на показания датчиков), также ярмо магнита при больших значениях тока может пропускать магнитный поток и т.д. Поэтому поле параллельно измеряется датчиками ЯМР. Внутри

диполя установлены рельсы, по которым передвигается калибровочная каретка. [7]

3.2. Калибровочная каретка

Для оптимизации процесса, датчики калибруются сразу партией – от 8 до 12 штук за раз. Они помещаются в специальную каретку. (рис3)

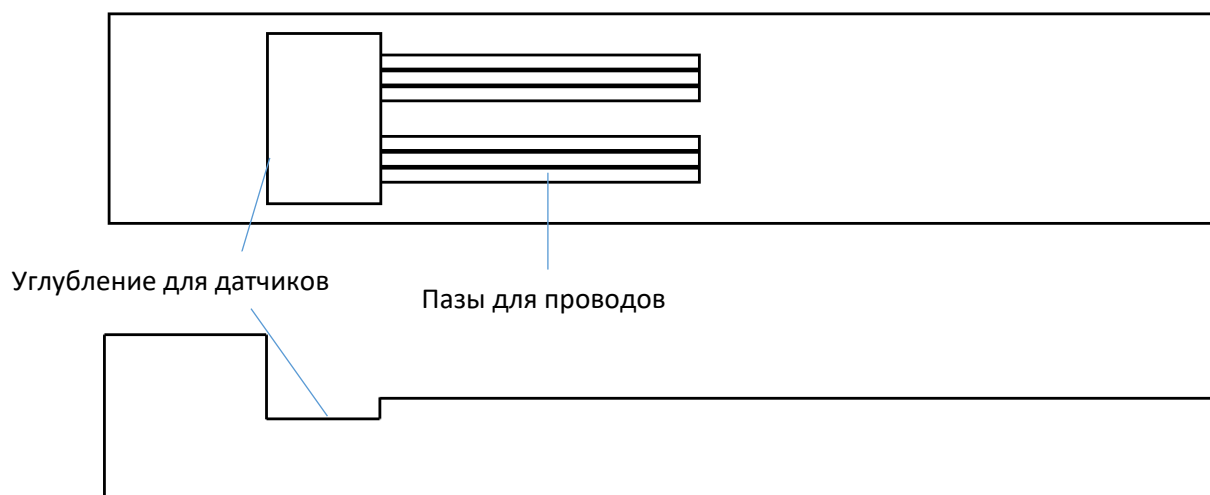


Рисунок 3

Датчики закрепляются в пазе, их контакты выводятся по каналам и распаиваются по пинам. Сверху на датчики кладется термопрокладка, после чего каретка плотно закрывается крышкой. Таким образом, датчики Холла оказываются крепко закреплены под малым углом (как правило $0,2^\circ - 0,3^\circ$) к плоскости, перпендикулярной магнитному полю, и не будут менять своего пространственного положения даже при переворачивании каретки.

Корпус каретки изготовлен из меди, так как этот материал является диамагнетиком и не вносит изменений во внешнее магнитное поле и показания датчиков. Так же из-за хорошей электропроводимости меди, каретку можно использовать для заземления. Внутри самого корпуса находятся элементы Пельтье – нагревательные элементы, с помощью которых можно исследовать зависимость чувствительности датчиков от температуры.

4. Методика эксперимента

Отбор на стабильность датчиков проводился в калибровочном магнитном диполе при повышенных параметрах эксплуатации, таких как температура (~343 К), сила тока (180 мА) и внешнее магнитное поле (22 кГс); в рамках эксперимента суммарное время воздействия на датчики составило 40 часов. Использовался источник тока (Keithley 6221) со стабилизацией по току. Величина тока для старения должна быть в 1,5 – 2 раза больше номинального. Если выбрать большее значение, датчик придет в непригодность. До и после проведения процесса старения измерялись основные характеристики, составлялась сравнительная таблица с первоначальными, новыми и паспортными данными, оценивались изменения.

Для снятия остаточного напряжения каретка с датчиками помещалась в экран из диамагнетика (чтобы избежать влияния магнитных шумов на показания). По датчикам пускали ток и непрерывно снимали напряжение с сигнальных контактов. Аналогично измерялся ТКОН: при отсутствующем внешнем магнитном поле датчики плавно нагревали с помощью элементов Пельтье и снимали с них показания.

Остальные характеристики датчиков снимали в калибровочном магните. Каретку помещали на подвижки и начинали двигать в магнитном поле, останавливаясь через каждый сантиметр и снимая напряжение с датчиков Холла и датчиков ЯМР. Все показания датчиков Холла пересчитывались с учетом остаточного напряжения и ТКОН и сравнивались с показаниями датчиков ЯМР.

5. Результаты

Были измерены характеристики датчиков Холла до старения. 3 из 10 датчиков имели хорошие показатели: 7, 8 и 10 (смотреть табл.2 в приложении). Их остаточные напряжения были 25, 21 и 41 соответственно; температурные коэффициенты чувствительности варьировались от 70 до 140 мГс/С°;

температурные коэффициенты остаточного напряжения – от 10 до 30 мГс/С°. Рассмотрим изменение характеристик после старения.

- Остаточное напряжение.

Остаточное напряжение измерялось для двух полярностей. Все результаты проведены в таблице 2 (смотреть в приложении). Датчик №7 во время старения сгорел. Остаточное напряжение всех остальных датчиков изменялось: среднеквадратическое отклонение значений напряжения после старения оказалось примерно равным 5,44 (мкВ) для условно положительной полярности и 8,32 (мкВ) для отрицательной. Однако, изменение происходило, как и в лучшую сторону, так и в худшую. Остаточные напряжения 8 и 10 датчиков значительно снизилось: у 8 датчика напряжение уменьшилось на 38%, у 10 – на 7%.

Изначально полупроводник имеет неоднородную структуру (в некоторых областях концентрация донорной примеси больше, чем в соседних). При нагревании образца скорость диффузии увеличивается и примесь распределяется более равномерно. Однако, как показали результаты эксперимента, температуры в 343 К недостаточно, чтобы значительно снизить остаточное напряжение.

- Температурный коэффициент остаточного напряжения.

ТКОН также изменились после старения; среднеквадратическое отклонение составило 6,40 (мГс/С°). ТКОН датчика №4 уменьшилось в 2 раза: теперь, при увеличении температуры датчика на 1 С°, его показания увеличиваются на 30 мГс, а не 60. Благодаря этому, он был переведен из «желтой» категории в «зеленую». ТКОН датчика №9 уменьшился до 0. Это показывает эффективность старения для улучшения характеристик датчиков.

У изначально «хороших» датчиков - 8 и 10 – температурные коэффициенты также значительно снизились: на 66% у каждого.

- Температурные коэффициенты чувствительности.

ТКЧ, также, как и остаточное напряжение, измерялись для двух разных полярностей. В результате их среднеквадратическое отклонение составило 15,49 и 17,92 для положительной и отрицательной полярности.

Температурные коэффициенты 8 датчика в результате старения не изменились. ТКЧ 10 датчика выросли на 8-12%.

- Расходимость чувствительности датчиков при разной полярности поля.

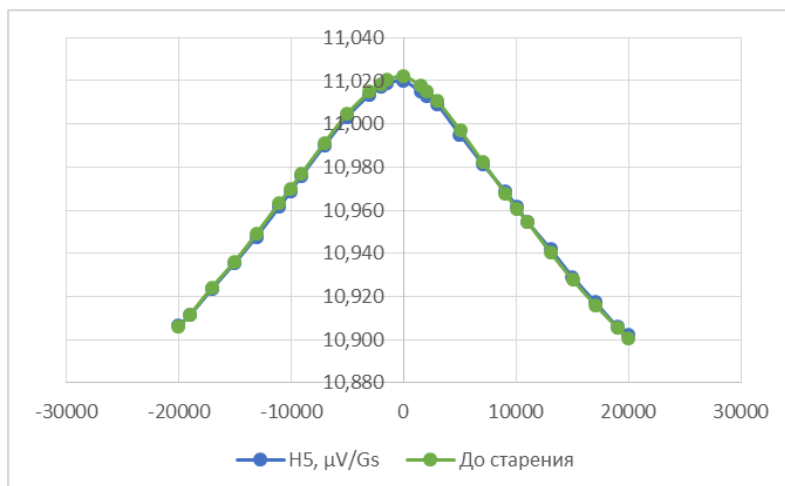


График 1

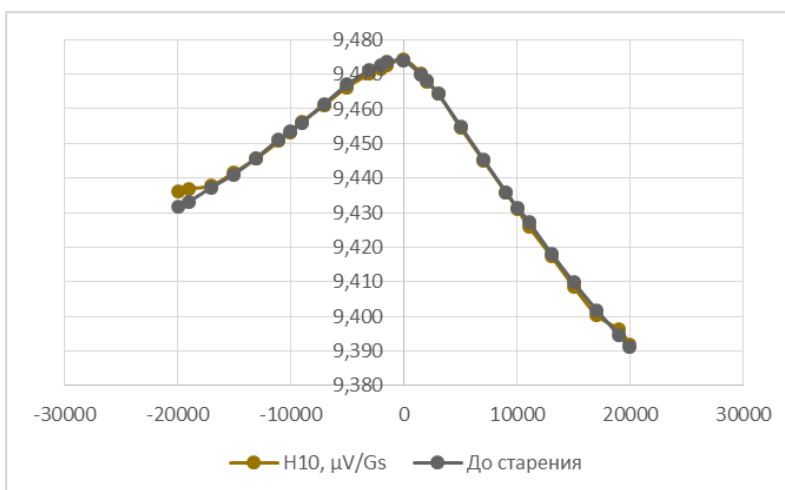


График 2

Расходимость измерялась для двух полей: 1 кГс и 10 кГс. Их изменения, однако, оказались незначительны: 0,005% для 1 кГс и 0,020% для 2кГс. Наглядно изменение расходимости для датчиков №5 и №10 можно посмотреть на графиках 1 и 2 соответственно. Для датчика №10 расходимость уменьшилась с 0,04% до 0,02%.

- Нелинейность.

Измерялась для двух полярностей. Среднеквадратическое отклонение составило 0,039% и 0,029% для положительной и отрицательной полярности соответственно.

6. Погрешность

Все показания датчиков Холла сравнивались с показаниями датчиков ЯМР. Их абсолютная погрешность – $5 \cdot 10^{-6}$ (Гц). [9]

Кроме того, существует погрешность АЦП (Keithley 2812A), значение которой в диапазоне до 1,5 В составляет 10^{-6} (В).

Погрешность источника тока датчиков Холла (Keithley 6211) для 100 мАм – 10^{-5} ; для источника тока магнита относительная погрешность составляет также 10^{-5} .

Суммарная погрешность составляет примерно $2,65 \cdot 10^{-5}$.

7. Заключение

В данной работе исследовалось влияние старения на характеристики датчиков Холла. Из 10 датчиков Холла изначально были выбраны 3: 7, 8 и 10, так как их характеристики были достаточно хорошие (Остаточное напряжение – 25, 21, 41 мкВ соответственно; температурные коэффициенты остаточного напряжения – 10, 30, 30 мГц/С°; температурные коэффициенты чувствительности для 10 кГц (-10 кГц) – 100 (100), 130 (70), 140 (110) мГц/С°). После старения показатели 8 и 10 датчиков значительно улучшились: остаточное напряжение снизилось на 38% и 7% соответственно; температурные коэффициенты остаточного напряжения – на 66%; температурные коэффициенты чувствительности, однако, почти не изменились (у 8 датчика не изменились совсем, у 10 – повысились на 8-12%). В итоге, из партии, состоящей из 10 датчиков, 7 было отбраковано.

Была предложена физическая модель старения, которая оправдала себя на практике. В дальнейшем планируется рассмотреть другие параметры старения и их влияние на эффективность процесса. К ним относятся сильное магнитное поле и повышенный ток.

В дальнейшем планируется исследовать влияние повышенной электрической нагрузки на полупроводник, создать полную физическую модель, учитывающую оба параметра процесса старения, и, в следствии, оптимизировать процесс старения датчиков Холла.

8. Список литературы

1. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/index.html>
2. <http://www.matprop.ru/InSb>
3. <https://chem21.info/info/96476/>
4. М.А. Булушева, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов, А.В. Скородумова: «Физическая модель процесса старения МОП-структуры»
5. Ling-Ling Gong, Wan Chen, Wen Kang, Lei Zhang, Xiang-Zhen Zhang, Shu-Chen Sun, Fu-San Chen, Lei Wu, Ya-Jun Sun, Zhi-Qiang Li, Yu-Feng Yang, Hui-Hua Lu, Xiao-Yu Li, Shu-Tao Zhao: “Magnetic field strength and temperature-dependent calibration system of Hall probe for the NEPS-TF cryogenic permanent magnet undulator”
6. Л.П. Амосова, В.Л. Комолов: «полупроводниковые и жидкокристаллические устройства для систем оптической обработки информации»
7. Jack Tanabe: «Iron Dominated Electromagnets»
8. К.Д. Потаенко, В.И. Тихонов: «Эпитаксиальные датчики Холла и их применение»
9. «Technical specifications and performance requirements for NMR magnetometer»

9. Приложение

№	Уост +, мкВ	Уост -, мкВ	ТКОН, мGs/°С	ТКЧ(-10кГс), мGs/°С	ТКЧ(10кГс), мGs/°С	До старения		После старения		" +" нелин, %	" -" нелин, %
						расход(1кГс), %	расход(10кГс), %	расход(1кГс), %	расход(10кГс), %		
1	205	142	-200	600	-1380	0,27	1,28	1,92	2,94		
2	292	340	360	1000	-110	-0,25	-1,09	2,33	1,46		
3	41	96	-40	1340	-1620	0,16	0,77	2,43	3,06		
4	37	8	60	-20	160	-0,06	-0,26	0,47	0,27		
5	118	48	50	10	80	-0,02	-0,09	0,52	0,46		
6	76	21	-80	-70	-130	-0,01	0,02	0,87	0,89		
7	25	11	10	-100	100	-0,02	-0,10	0,33	0,26		
8	21	24	30	-70	130	-0,03	-0,14	0,41	0,30		
9	18	95	30	-70	70	0,01	0,05	0,30	0,34		
10	41	11	30	-110	140	-0,04	-0,23	0,41	0,34		
После старения											
№	Уост +, мкВ	Уост -, мкВ	ТКОН, мGs/°С	ТКЧ(-10кГс), мGs/°С	ТКЧ(10кГс), мGs/°С	расход(1кГс), %	расход(10кГс), %	" +" нелин, %	" -" нелин, %		
1	213	151	-220	540	-1320	0,24	1,10	1,84	2,72		
2	271	327	390	1020	-50	-0,24	-1,03	2,22	1,42		
3	4	63	-50	1210	-1470	0,14	0,70	2,31	2,88		
4	56	22	30	-30	160	-0,07	-0,24	0,44	0,27		
5	137	64	40	-10	100	-0,04	-0,06	0,48	0,46		
6	88	31	-80	-90	130	-0,02	0,02	0,81	0,84		
7	горел										
8	13	4	-10	-70	130	-0,04	-0,13	0,39	0,29		
9	30	95	0	-120	110	0,01	0,04	0,63	0,34		
10	38	5	-10	-120	160	-0,02	-0,24	0,42	0,34		

Табл. 2