

ЭФФЕКТ ХОЛЛА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Елаш Н.Д., Ефимчик К.П., студенты гр.424403

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодучин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию на тему эффекта Холла и его применения. Анализируются основные принципы работы датчиков Холла, их использование в различных сферах.

Ключевые слова. эффект Холла, датчики Холла, магнитное поле, полупроводники, InSb, сенсоры, миниатюрные датчики.

Введение. Эффект Холла – это явление, наблюдаемое в проводниках или полупроводниках при прохождении тока через них в перпендикулярном направлении тока магнитном поле. При воздействии магнитного поля на движущиеся электрические заряды в проводнике возникает поперечное электрическое поле, перпендикулярное как направлению тока, так и магнитному полю (рис. 1).

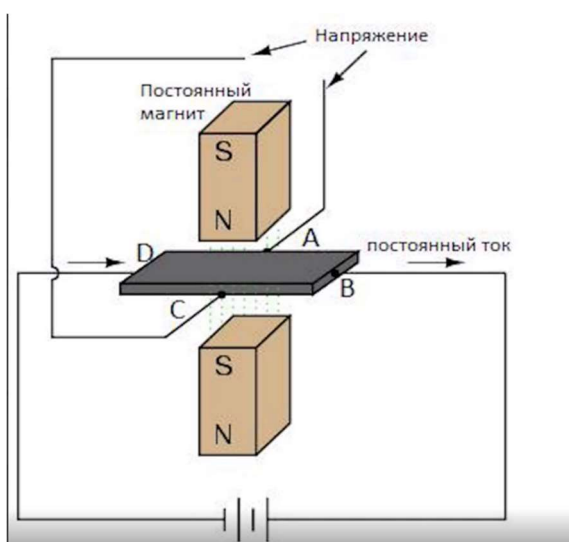


Рисунок 1 – Схематическое представление эффекта Холла

Этот эффект был открыт американским физиком Эдвардом Холлом в 1879 году. Когда проводник с током помещается в магнитное поле, на его краях начинает действовать сила Лоренца, которая отклоняет носители тока (например, электроны) вбок. Это создает разницу потенциалов между сторонами проводника, которая называется поперечным напряжением Холла.

$$U_H = R \cdot \frac{IB}{d} \quad (1)$$

Если расписать постоянную Холла (R), то формула примет следующий вид.

$$U_H = \frac{IB}{ned} \quad (2)$$

Эта формула, которая применяется к токопроводящей пластине, говорит нам, что напряжение Холла зависит от величины тока (I), протекающего через проводник, от магнитной индукции (B), от элементарного заряда электрона (e), количества электронов в единице объема (n) и от толщины пластины (d).

Основная часть. Этот физический эффект стал важнейшим инструментом исследования полупроводников, позволяя не только измерять концентрацию носителей заряда, но и определять их тип – электроны или дырки. В современных условиях измерение магнитных полей осуществляется различными методами – от простейших устройств до сложных высокоточных систем. Наиболее простыми датчиками являются герконы, принцип работы которых основан на замыкании контактов под действием магнитного поля. Эти устройства нашли широкое применение в системах безопасности, например, в датчиках открытия дверей и окон. Более совершенные измерения проводятся с

использованием современных магнитометров, среди которых особое место занимают датчики Холла. Они подразделяются на цифровые (униполярные и биполярные) и аналоговые, обеспечивая либо дискретный сигнал, либо непрерывное измерение магнитной индукции.

Хотя в большинстве датчиков используется классический эффект Холла, существуют и другие его разновидности. Аномальный эффект Холла наблюдается в материалах без внешнего магнитного поля и обусловлен спин-орбитальным взаимодействием. Квантовый эффект Холла проявляется при экстремально сильных магнитных полях и низких температурах, демонстрируя квантование сопротивления. Спиновый эффект Холла, приводящий к разделению электронов с разными спинами, представляет особый интерес для перспективных направлений спинтроники. Мы будем рассматривать классический эффект Холла.

Наряду с датчиками Холла существуют и другие методы детектирования магнитных полей, включая катушки индуктивности, оптические методы (эффекты Керра и Фарадея), а также сверхпроводящие датчики, отличающиеся высокой точностью, но сложностью применения.

Благодаря своей компактности, доступности и универсальности датчики Холла нашли широчайшее применение в различных сферах. В электронике они используются в клавиатурах, дисководах и системах охлаждения компьютеров. В автомобильной промышленности датчики применяются в антиблокировочных системах тормозов, они отслеживают скорость вращения колес и передают данные в бортовой компьютер. Кроме того, датчики Холла используются в системах зажигания, управлении впрыском топлива, определении положения коленчатого вала, контроле угла поворота колес при маневрах, а также для диагностики работы электродвигателей путем фиксации их вращения. Закрепив постоянный магнит на валу, получим простой счетчик оборотов, а также можно обеспечить контроль скорости вращения валов и точное позиционирование в робототехнических системах (рис. 2).

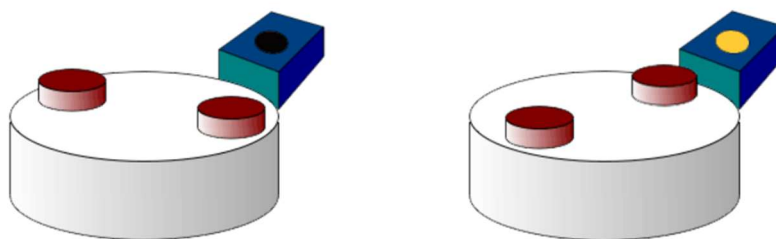


Рисунок 2 – Принцип определения скорости и наличия вращения

Также датчики нашли своё применение и в электротехнике, например, существуют различные модели токоизмерительных клещей, основанные на этом эффекте. В отличие от обычных клещей с трансформатором тока, модели с датчиком Холла способны измерять не только переменный, но и постоянный ток. Кроме того, стационарные кольцевые датчики на эффекте Холла (рис. 3) обеспечивают дистанционный контроль параметров цепи и автоматическое управление нагрузками без необходимости прямого вмешательства человека.



Рисунок 3 – Кольцевой токоизмерительный датчик, работающий на эффекте Холла

Датчики Холла широко применяются в бесколлекторных (вентильных) электродвигателях, включая сервоприводы. В конструкции некоторых электрических двигателей постоянного тока используются датчики, которые обеспечивают контроль положения ротора и передают соответствующие сигналы на управляющий контроллер. В качестве примера на рисунке 4 показан электрический вентилятор с датчиком Холла.



Рисунок 4 – Электрический вентилятор с датчиком Холла

Датчики Холла широко применяются в системах управления различными устройствами, включая джойстики для дистанционного управления космическими аппаратами (такими как Луноход), тяжелой строительной техникой (карьерными самосвалами, экскаваторами, погрузчиками), а также промышленным оборудованием (кранами и другими механизмами).

Бытовые приборы, такие как стиральные машины и холодильники, используют датчики Холла для контроля положения дверей. Также их активно используют в медицине для контроля точности в различных медицинских устройствах и системах. Например, в МРТ-сканерах, КТ-аппаратах и рентгеновском оборудовании. Кардиостимуляторы и дефибрилляторы используют датчики Холла для просмотра работы механических элементов. Анализаторы крови их применяют для точного дозирования реагентов. На основе эффекта Холла работают некоторые ионные реактивные двигатели.

Также датчики Холла применяют и в космосе. Например, АРГУС (программа Марс-96), у которого были цели изучить атмосферу и поверхность Марса (рис. 5). Для этого в него были встроены такие датчики, как полнооборотный датчик угла поворота, секторный датчик угла поворота, устройство гальванической развязки, бесконтактный выключатель.

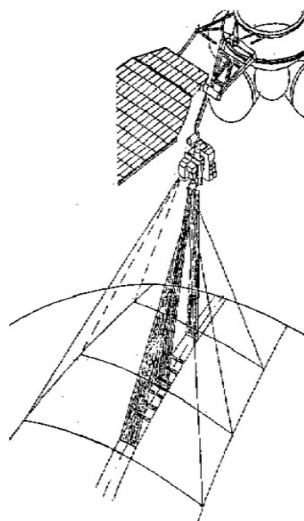


Рисунок 5 – АРГУС

В космическом аппарате «Марс Экспресс» летает прибор «Омега» – катрирующий спектрометр видимого и ближнего ИК диапазонов с сенсорами положения. Три независимые канала измерений сенсора обеспечивали точность в 1 угловую секунду.

Сейчас их применяют при производстве космической техники, автотранспорта и авиационной техники, в системах управления производственными процессами, в измерительной и вычислительной технике, атомной промышленности, в дефектоскопии, медицинских и бытовых приборах и т.д.

Существуют технологии датчиков, которые будут развиваться в будущем, но уже имеют применение в наши дни. Одним из таких примеров являются полупроводниковые приборы на основе гетероэпитаксиальных структур антимида индия (InSb). Это может стать новым поколением миниатюрных датчиков.

InSb – узкозонный полупроводник, характеризующиеся высокими значениями подвижности и собственной концентрации электронов при температуре $T = 300 \text{ K}$. При использовании InSb в качестве активного слоя изменение температуры на один градус приводит к относительному изменению собственной концентрации на 2.2%, у более широкозонных полупроводников изменение собственной концентрации в процентном соотношении больше (например, для Si оно составляет 8.3% на один градус). Таким образом, благодаря высокой подвижности и слабой зависимости собственной концентрации от температуры, InSb широко используется для изготовления датчиков магнитного поля.

Ввиду отсутствия непроводящих подложек для создания датчиков Холла слои InSb выращиваются на полуизолирующих подложках GaAs или высокоомных подложках Si.

Уже через десятилетие датчики Холла могут стать неотъемлемым элементом множества передовых технологических систем благодаря своей компактности, энергоэффективности и способности точно измерять магнитные поля. В первую очередь, их широкое применение прогнозируется в области нейротехнологий: они будут встраиваться в нейроинтерфейсы нового поколения для считывания слабейших сигналов от нейронов мозга, обеспечивая более точное и надёжное управление внешними устройствами силой мысли. Это откроет новые горизонты для людей с ограниченными возможностями, а также для развития человеко-машинных интерфейсов в профессиональной сфере – от медицины до космических миссий.

Кроме того, датчики Холла найдут применение в наноробототехнике и гибкой электронике: к примеру, в медицинских наноустройствах, способных передвигаться по кровеносным сосудам и выполнять целевые задачи (доставка лекарств, микрохирургия) под управлением внешнего магнитного поля. Такие устройства смогут автономно адаптироваться к изменениям в организме благодаря встроенным сенсорам Холла, реагирующим на малейшие магнитные флуктуации.

В смарт-материалах будущего датчики Холла будут отвечать за самонастройку и самодиагностику конструкций — от «умных» зданий и мостов до летательных аппаратов, повышая их безопасность и долговечность. В транспортной сфере ожидается их активное применение в электромобилях следующего поколения, где они обеспечат абсолютную точность в управлении электродвигателями, системами рекуперации энергии и адаптивной подвеской.

Также предсказывается внедрение датчиков Холла в квантовые вычислительные системы и магнитооптические устройства, где они будут использоваться для сверхчувствительного измерения квантовых состояний и управления спиновыми структурами. Благодаря достижениям в области нанофабрикации, эти сенсоры станут ещё миниатюрнее и точнее, что позволит им интегрироваться в структуры, ранее считавшиеся недоступными для классических сенсорных технологий.

Универсальность и надёжность датчиков Холла сделали их неотъемлемым компонентом современных технологических решений, прочно вошедшим в нашу повседневную жизнь.

Вывод. Эффект Холла, открытый более века назад, сегодня стал фундаментом для создания широкого спектра устройств, играющих ключевую роль в самых разных областях – от бытовой техники до космических исследований. Благодаря своей универсальности, точности и компактности датчики Холла применяются в автомобилестроении, электронике, медицине, энергетике и промышленности. Развитие технологий и появление новых материалов, таких как InSb, открывает перед этими сенсорами ещё более широкие перспективы – от внедрения в нейроинтерфейсы и нанороботы до использования в квантовых системах. Эффект Холла – это не просто физическое явление, а мощный инструмент, формирующий облик технологий настоящего и будущего.

Список использованных источников:

1. *Understanding and Applying the Hall Effect* / Robert Keim // 03.07.2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-applying-the-hall-effect/>
2. *Semiconductor Devices Physics and Technology* / S. M. Sze // John Wiley & Sons, Inc, 2002. – 576 p. Режим доступа: https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL95/Semiconductor.Devices_Physics.Technology_Sze.2ndEd_Wiley_2002.pdf
3. Эффект Холла: что это, зачем используется и где применяется / 23.05.2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/555950/>
4. *Sensors and Signal Conditioning* / Ramón Pallás-Areny, John G. Webster // John Wiley & Sons, Inc, 2001. – 571p. Режим доступа: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-805983-159098eec0.pdf>
5. Моделирование кинетических и термоэлектрических свойств антимонида индия – диссертационная работа / Сергеев Г. С. // Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2014. – 152 с. Режим доступа: http://www.issp.ac.ru/ebooks/disser/Sergeev_G_S.pdf
6. InSb/GaAs-гетероструктуры для датчиков магнитного поля / М. А. Суханов [и др.] // Письма в Журнал технической физики, 2023.– С. 27-30. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/7c6820235102f0303ce3bbd606b5e7a8/pjtf7095.pdf>

THE HALL EFFECT AND ITS APPLICATION

Yelash N.D., Yefimchik K.P.

Students group 424403

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics

Abstract. This paper is devoted to the study of the Hall effect and its applications. The fundamental principles of Hall sensors and their use in various fields are analyzed.

Keywords. Hall effect, Hall sensors, magnetic field, semiconductors, InSb, sensors, miniature devices.