

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМАГНИТНЫХ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ХОЛЛОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Hall measurement results are greatly influenced by thermoelectric and thermo-magnetic voltages. Therefore, the sample must be temperature stabilized and placed inside evacuated volume. Voltages caused by these effects were calculated for some important semiconductor materials and compared against corresponding Hall voltages. A simple method is proposed to lower thermal effects using microsecond current pulses from mistermiated forming line. Measurements show that at current through metal sample near 200 A there is no any influence from thermal voltage.

Введение. На результативность холловских измерений существенно влияют дополнительные поперечные ЭДС, которые обусловлены движением носителей заряда, выделением и поглощением энергии в образце. К этим явлениям относятся гальваномагнитные, термоэлектрические и термомагнитные эффекты. Напряжения, вызванные этими эффектами, по абсолютной величине ($\sim 10^{-7}$ – 10^{-3} В) оказываются сравнимыми с ЭДС Холла. Теоретические расчеты показывают, что существует множество (около 100) различных кинетических эффектов, прямо или косвенно зависящих от поперечного магнитного поля [1]. Влияние электрических напряжений вследствие термомагнитных эффектов нельзя исключить путем усреднения измеряемого напряжения по двум направлениям тока и магнитного поля. Наряду с этим ЭДС термомагнитных эффектов, как и ЭДС Холла, линейно зависят от магнитной индукции и плотности тока. Поэтому исключение термомагнитных напряжений путем варьирования этих параметров является сложной задачей.

Влияние указанных факторов удается уменьшить применением частотного режима питания образца [2], переменного магнитного поля при постоянном токе через образец [3], включением образца в компенсационную схему [4]. Для снижения тепловых эффектов приходится применять специальные меры по термостатированию образца, что значительно усложняет конструкцию установки.

В данной работе приводятся результаты численных оценок ЭДС, вызванных тепловыми эффектами, которые наиболее существенно воздействуют на результативность холловских измерений. Обосновывается применение импульсного режима питания.

Оценка ЭДС тепловых эффектов. Результаты сравнительных оценок ЭДС побочных эффектов для некоторых полупроводниковых материалов приведены в таблице. Результаты расчетов представлены для образца размером $10 \times 5 \times 0,5$ мм при температуре $T = 300$ К, перепадах температуры в продольном и поперечном направлениях 3 и 1 К соответственно, магнитной индукции $B = 0,1$ Тл. В расчетах использовались соотношения для магниторезистивного падения напряжения и ЭДС термомагнитных эффектов, полученные в [5–7].

Из таблицы видно, что почти для всех полупроводниковых материалов наибольший вклад в измеряемую поперечную ЭДС вносят напряжения асимметрии контактов и термоЭДС.

Измерения, проведенные на металлических образцах, показывают, что термоЭДС может составлять около 60% от поперечного напряжения [8].

Влияние термоЭДС существенно уменьшается, если для питания образца применять короткие импульсы. Чтобы сократить неравномерность температурного поля по объему образца, ток на протяжении импульса должен поддерживаться постоянным. Длительность импульса t_n должна определяться из условия $t_n \ll \tau$, где τ – время изменения температуры в области измерительного контакта. При таком условии поперечная термоЭДС, вызванная перепадом температуры между гранями образца за время действия импульса, будет значительно меньше холловского напряжения. Время τ для образца прямоугольной формы можно рассчитать по следующей формуле:

$$\tau = \mu B b \left(\frac{c_p \rho}{\alpha j} \right), \quad (1)$$

где μ – подвижность носителей заряда; B – магнитная индукция; b – ширина образца; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала образца; α – удельная термоЭДС; j – плотность тока.

Оценка по формуле (1) для металлов дает значение $\tau \sim 50$ мс. Для полупроводниковых образцов ($\alpha \sim 10^{-3}$ В/К, $\mu \sim 0,1$ м²/Вс и $j \sim 10^4$ А/м²) время τ примерно на порядок больше.

ЭДС Эттингсгаузена вызвана нагревом и охлаждением противоположных граней образца вследствие дрейфа электронов в поперечном направлении.

Напряженность поперечного электрического поля, возникающего под действием магнитного поля, составляет $\sim 10^{-4}$ – 10^{-1} В/м. Поэтому из-за слабого тепловыделения в области измерительного контакта время нарастания ЭДС этого эффекта в металлах и полупроводниках должна составить порядка 100 с. Такое же характерное время нарастания имеет и ЭДС вследствие эффекта Нернста – Эттингсгаузена, которая обусловлена различным отклонением встречных потоков электронов к боковым граням образца при наличии продольного градиента температуры.

Результаты сравнительных оценок эффекта Холла и побочных эффектов

Источник побочного эффекта	Отношение ЭДС побочного эффекта к ЭДС Холла, %				
	CdTe	GaAs	Ge	InSb	BiTe
ЭДС неэквипотенциальности	$1,4 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	17	$5 \cdot 10^3$
ТермоЭДС	1,9	2,7	8,5	5,6	$1,4 \cdot 10^2$
ЭДС магниторезистивного эффекта	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,04	0,17	3,2	$7 \cdot 10^{-3}$
ЭДС Эттингсгаузена	10^{-11}	$8 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-3}$	0,1
ЭДС Нернста – Эттингсгаузена	10^{-3}	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,4	0,7
ЭДС Пельтье – Нернста – Эттингсгаузена	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,1
ЭДС Риги – Ледюка	$3 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
ЭДС Пельтье – Риги – Ледюка	10^{-20}	$5 \cdot 10^{-9}$	10^{-8}	10^{-3}	4

Экспериментальные результаты. Характерное время уменьшения термоЭДС оценивалось по длительности спада сигнала термоЭДС между контактами, припаянными к образцу из медно-никелевого сплава (проводимость $\sim 10^7$ Ом·м). Удельная термоЭДС паяных контактов определялась по точке плавления припоя и составила около 5 мкВ/К. Образец нагревался импульсом тока от разряда батареи конденсаторов с запасаемой энергией 10 Дж.

На рис. 1 представлены схема измерений и типичные осциллограммы напряжения между выводами на грани образца. Сигнал с выводов 1 и 3 пропорционален току через образец и практически полностью обусловлен омическим падением напряжения, так как перепад температур между противоположными краями образца близок к нулю. Сигнал с выводов 2 и 3 зависит также и от термоЭДС вследствие нагрева, поскольку температура в центральной части образца наибольшая. Этот сигнал характеризуется затянутым спадом импульса. В опыте не предпринималось специальных мер для тепловой изоляции образца. Поэтому время около 10 мс следует считать минимальным.

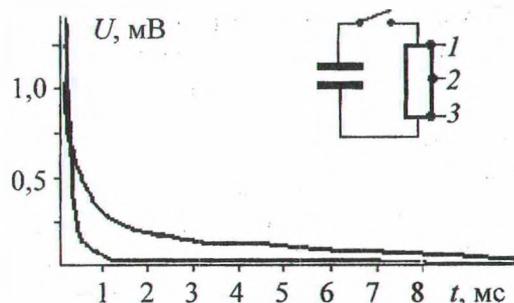


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на образце, нагреваемом импульсом тока разряда батареи конденсаторов. Нижняя осциллограмма получена с выводов 1 и 3, верхняя – с выводов 2 и 3 и содержит составляющую, обусловленную термоЭДС

Влияние термоЭДС при питании образца импульсами малой длительности проверялось

на установке, схема которой представлена на рис. 2. Генератор микросекундных импульсов собран на основе формирующей линии в виде коаксиального кабеля РК50-2-11 с волновым сопротивлением 50 Ом и длиной около 100 м. Коммутация линии на нагрузку обеспечивается тригatronным разрядником. В качестве образца использовалась медно-никелевая полоска размером $30 \times 20 \times 0,2$ мм.

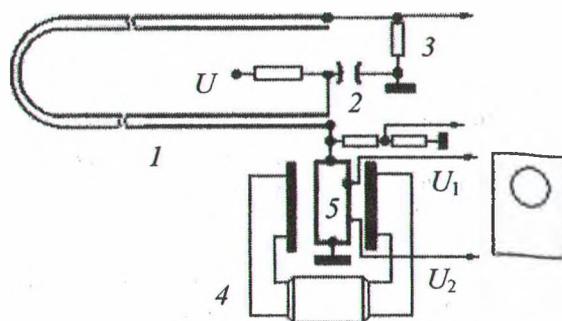


Рис. 2. Установка для холловских измерений с прямоугольным импульсом тока: 1 – линия; 2 – разрядник; 3 – токовый шунт; 4 – электромагнит; 5 – образец

На рис. 3 показаны типичные осциллограммы тока и напряжения через образец. Наблюдается последовательность импульсов тока и напряжения разной полярности, так как сопротивление нагрузки линии меньше ее волнового сопротивления. Количество тепла, выделяющегося в образце за импульс, составляет около 0,03 Дж и соответствует максимальному изменению температуры менее чем на 10^{-3} К.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики образца, которые построены по амплитудным значениям импульсов последовательности U_1 и U_2 , полученных от разных точек грани образца. Линейность характеристик доказывает, что влияние термоЭДС на регистрируемый сигнал отсутствует, а различие между характеристиками обусловлено омическим падением напряжения.

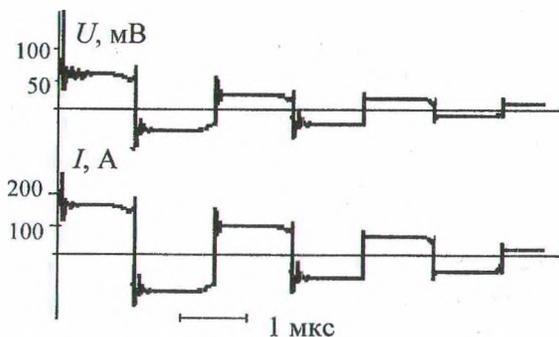


Рис. 3. Оциллограмма тока разряда линии на образец

Таким образом, если питание образца осуществляется импульсом микросекундной длительности, то влияние термоЭДС на регистрируемый сигнал полностью исключается.

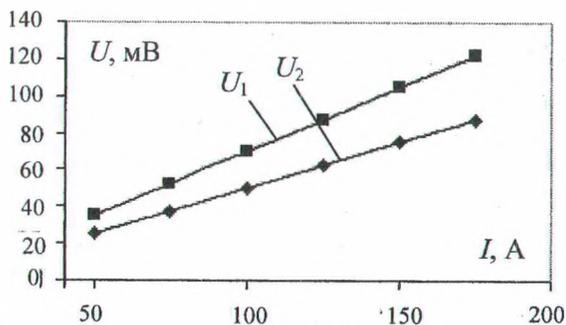


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики для двух точек на грани образца из медно-никелевого сплава, полученные по амплитудным значениям последовательности импульсов

Применение последовательных импульсов с постоянной амплитудой на протяжении каждого из импульсов позволяет также контролировать зависимость поперечного напряжения от тока при неизменных тепловых условиях. Постоянная Холла R при отсутствии термоЭДС определяется по величине изменения поперечного напряжения при варьировании магнитной индукции B по следующей формуле:

$$R = \frac{\Delta U \delta}{\Delta B I}, \quad (2)$$

где ΔU — изменение поперечного напряжения на образце при изменении индукции на ΔB ; δ — толщина образца; I — ток через образец. Подвижность носителей заряда рассчитывается по

значению R , найденному по формуле (2), и наклону вольт-амперной характеристики образца.

Закключение. На основе сравнительных оценок показано, что наибольший вклад в холловский сигнал вносит термоЭДС. Характерное время изменения термоЭДС для образца, размеры которого являются типовыми для холловских измерений, составляет $\sim 10^{-2}$ с. Составляющую сигнала, обусловленную термоЭДС, можно исключить использованием питания серией прямоугольных импульсов тока микросекундной длительности. Применение последовательности импульсов позволяет получить холловские параметры при фиксированных тепловых условиях.

Полученные результаты могут быть использованы при постановке холловских измерений полупроводниковых материалов.

Литература

1. Омеляновский, Э. М. Определение холл-фактора в атомных полупроводниках / Э. М. Омеляновский, В. И. Фистуль // Заводская лаборатория. — 1964. — № 5. — С. 559–562.
2. Александров, А. Л. Двухчастотный метод измерений ЭДС Холла в высокоомных материалах с низкой подвижностью носителей заряда / А. Л. Александров, А. С. Веденев, И. Б. Гуляев / ПТЭ. — 1982. — № 2. — С. 163–166.
3. Friend, R. H. Design of an Alternating Current Source for Resistivity and Hall Effect Measurements / R. H. Friend, N. Bett // Phys. E: Sci. Instrum. — 1980. — Vol. 13, № 3. — P. 294–297.
4. Andercon, A. G. In-Situ Mobility Profiling of GaAs MESFET's Using the Hall Current Technique / A. G. Andercon, C. R. Westgate // IEEE Trans. — 1987. — Vol. ED-34, № 7. — P. 1441–1447.
5. Кухарский, А. А. Гальваномагнитные кинетические коэффициенты при произвольном магнитном поле / А. А. Кухарский, В. К. Субашиев // ФТТ. — 1971. — Т. 113, № 8. — С. 2258–2260.
6. Киреев, П. Е. Физика полупроводников / П. Е. Киреев. — М.: Высшая школа, 1969. — 580 с.
7. Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников / А. И. Ансельм. — М.; Л.: Физматгиз, 1962. — 408 с.
8. Мадьяров, В. Р. Влияние тепловых эффектов на чувствительность холловских измерений в металлах / В. Р. Мадьяров // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. — 2005. — Вып. XIII. — С. 77–79.