

УДК 621.315.592

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ПОВОРОТА ОБРАЗЦА В ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

© В. А. Голубятников¹, Ф. И. Григорьев¹, А. П. Лысенко¹,
Н. И. Строганкова¹, А. Г. Белов², В. Е. Каневский²

Статья поступила 6 ноября 2014 г.

Разработана и изготовлена установка, позволяющая измерять гальваномагнитные параметры образцов полупроводниковых материалов путем вращения образца в поле постоянного магнита. Измерения проводятся при комнатной температуре либо при температуре, близкой к точке кипения жидкого азота (образец находится в парах жидкого азота). Поворот образца осуществляется с помощью блока управления и индикации, изготовленного на базе микроконтроллера, который управляет шаговым двигателем. Направление тока через образец изменяется с помощью коммутатора. Измеряемый сигнал через интерфейс поступает на персональный компьютер, где фиксируется и обрабатывается с помощью специально разработанной программы.

Установка опробована на образце германия p -типа электропроводности. Измерения проводились при температурах 300 и 82 ± 3 К. Показано, что при этих температурах зависимости измеряемого сигнала от угла поворота образца близки к синусоидальным. Они проходят через нуль при 0, 180 и 360°, что подтверждает отсутствие гистерезиса.

Возможности установки могут быть существенно расширены за счет увеличения индукции магнитного поля до 1,4 Тл путем замены наконечников сердечника. Процесс управления поворотом образца, записи значений измеряемого сигнала и обработки результатов измерений можно автоматизировать посредством разработки соответствующего программного обеспечения.

Ключевые слова: гальваномагнитные измерения; постоянный магнит; вращение образца в магнитном поле.

Для ряда практических приложений необходимо проводить гальваномагнитные измерения образцов полупроводниковых материалов в различных магнитных полях, перекрывая возможно более широкий интервал значений индукции магнитного поля.

Так, например, типичной особенностью твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) с $x \approx 0,2$ является наличие трех типов свободных носителей заряда: электронов, легких и тяжелых дырок. При температурах, близких к 77 К, все они вносят вклад в кинетический коэффициент Холла. Учитывая, что подвижность электронов в 30–40 раз превосходит подвижность легких дырок и в 150–200 раз — тяжелых, а в коэффициент Холла отношения подвижностей входят в квадрате, то для заведомо дырочного образца возможно, что коэффициент будет отрицательным. В этом случае необходимы измерения в максимально широком диапазоне магнитных полей. Увеличение значения индукции магнитного поля B приведет к тому, что вклад электронов (как более подвижных носителей заряда) существенно уменьшится, коэффициент Холла сменит знак с «минуса» на «плюс» и при $B \rightarrow \infty$ «вый-

дет на насыщение». Наоборот, для образца n -типа электропроводности при увеличении индукции магнитного поля коэффициент Холла будет оставаться отрицательным, лишь слегка уменьшаясь по модулю (за счет изменения холл-фактора).

Иначе говоря, измерения в различных магнитных полях позволяют, в частности, различить между собой образцы КРТ n - и p -типов электропроводности. Анализ зависимости коэффициента Холла от магнитной индукции позволяет получить информацию о концентрации и подвижности свободных носителей заряда [1, 2].

На практике реализация гальваномагнитных измерений в широком интервале магнитных полей сталкивается со значительными техническими трудностями. Малые поля (до 0,3 Тл) получают, используя различного вида соленоиды, более сильные — с помощью мощных электромагнитов. Но при этом из-за остаточной намагниченности сердечника не удастся уверенно работать в области малых полей.

При проведении гальваномагнитных измерений обычно используют электромагниты, в которых индукция магнитного поля в зазоре сердечника регулируется значением силы тока, протекающего через электромагнит. Таким системам присущ ряд недостатков принципиального характера. Так, даже если применить высокостабильный источник питания,

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия.

² Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «ГИРЕДМЕТ», Москва, Россия.

то обмотки электромагнита неизбежно нагреваются, в результате чего уменьшается ток через электромагнит, а следовательно, индукции магнитного поля. Использование различных охлаждающих систем ведет к значительному усложнению конструкции установки, а для ряда практических приложений (например, при экспрессном контроле свойств полупроводниковых материалов в промышленных условиях) полностью исключено.

В настоящей работе предложен вариант установки, свободной от перечисленных недостатков, в которой индукция магнитного поля изменяется не за счет изменения тока через обмотки электромагнита, а благодаря повороту образца в криостате в поле постоянного магнита.

Конструкция установки. Схема рабочего блока установки, включающего постоянный магнит, криостат и поворотное устройство, представлена на рис. 1.

Дьюар из нержавеющей стали 1 укреплен на поддоне 2, способном поворачиваться с помощью шагового двигателя 3, расположенного на пластине 4. Образец 5 смонтирован на медной вставке 6, зафиксированной с помощью специального устройства на опорном подпятнике 7 на дне дьюара. Сверху дьюар закрыт заглушкой 8, имеющей отверстие (на рис. 1 не показано) для заливки жидкого азота.

Образец 5 на вставке опускают в трубку 9 и закрепляют относительно дьюара, но он имеет возможность вместе с дьюаром поворачиваться вокруг вертикальной оси. Образец 5 помещают между полюсами постоянного магнита 10, снабженного съемными наконечниками 11. Сверху постоянный магнит закрыт крышкой 12.

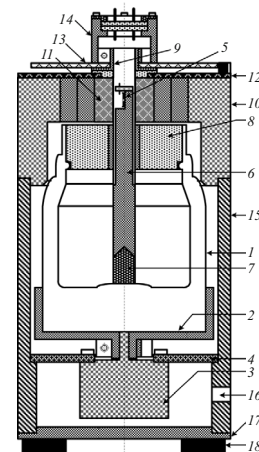
Трубка 9 жестко соединена с диском 13, имеющим деления для контроля угла поворота образца (вместе с дьюаром) относительно нулевого положения. Сверху вся конструкция закрыта разъемом 14, через который к образцу подводят контактные провода.

В корпусе 15 просверлено отверстие 16 для вывода проводов от шагового двигателя. К днищу корпуса 17 прикреплены три ножки 18.

При низкотемпературных измерениях образец обдувают парами жидкого азота, выходящего по специальной канавке вверх вдоль вставки 6 и затем — из-под нижней части разъема — в атмосферу. Температуру образца контролируют с помощью медно-константановой термопары, спай которой укреплен в непосредственной близости от образца (на рис. 1 не показан).

На рис. 2 представлена блок-схема установки «Цилиндр». Датчик начального положения 3 служит для фиксации начала отсчета угла поворота образца 1 в поле постоянного магнита 2. Поворот образца осуществляют с помощью блока управления и индикации 4, изготовленного на базе микроконтроллера ATMEGA U8-20P4, который управляет шаговым двигателем ДШИ-200-2-1 5. Однократное нажатие

Рис. 1. Схема основного блока установки



кнопки контроллера вызывает поворот образца на угол $1,8^\circ$ (в ту или другую сторону).

Сигнал от термопары измеряют цифровым вольтметром В7-54/3 6; ток через образец задается прибором В1-13 7 и коммутируется с помощью коммутатора 8. Измеряемый сигнал, фиксируемый цифровым вольтметром В7-65/5 9, через интерфейс RS-232 10 поступает на персональный компьютер 11, где обрабатывается с помощью специально разработанной программы.

При произвольном угле поворота α (угол между плоскостью образца и вектором индукции магнитного поля **B**) ЭДС Холла можно записать в виде

$$V_{\text{холл}} = \frac{RB \sin \alpha I}{d},$$

где I — сила тока через образец; R — постоянная Холла; d — толщина образца.

Для испытания установки был взят прямоугольный (не более 6×8 мм) образец германия p -типа проводимости. Контакты припаивались индием на одну из рабочих поверхностей образца, предварительно подвергнутого травлению в полирующем травителе.

Измерения ЭДС Холла проводили по четырехконтактной схеме (метод Ван-дер-Пау) — при каждом фиксированном положении образца относительно постоянного магнита проводили четыре измерения падения напряжения. Вначале ток пропускали по диагонали образца (см. рис. 2, контакты 1 и 3, I_{13}), и измеряли падение напряжения между контактами 2 и 4 (V_{24}). Затем меняли направление тока (I_{31}) и вновь фиксировали значение падения напряжения (V_{42}). Далее ток пропускали по другой диагонали образца (контакты 2 и 4) и процедуру измерений повторяли. По полученным значениям падения напряжения (с учетом знаков) вычисляли ЭДС Холла (подробнее см. [3, 4]).

Поскольку в германии p -типа проводимости присутствуют свободные носители заряда только одного типа — дырки, причем их концентрация не зависит от индукции магнитного поля, то можно ожидать, что коэффициент Холла не будет зависеть от **B** и, следовательно, зависимость ЭДС Холла от угла поворота при-

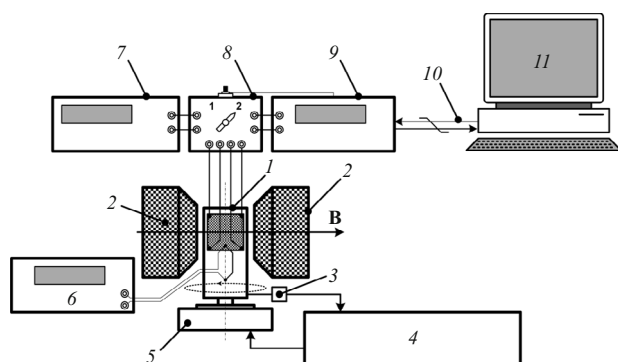


Рис. 2. Блок-схема установки «Цилиндр»

ближается к синусоиде, что и подтвердил эксперимент. На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость холловской ЭДС от угла для образца p -Ge при температурах 300 и 82 ± 3 K.

Как и ожидалось, зависимость ЭДС Холла от угла между направлением тока в образце и вектором магнитной индукции на тестовом германиевом образце носит синусоидальный характер. Отклонение этой зависимости от синусоидальной представляет особый интерес и наблюдается в случаях: а) зависимости коэффициента Холла от значения магнитной индукции; б) естественной анизотропии электропроводности материала образца; в) привнесенной неоднородности образца.

Для случая *а* экстремумы зависимости наблюдаются при углах 90 и 180° (направление тока перпендикулярно вектору магнитной индукции), а нулевые значения зависимости — при угле 0° (направление тока параллельно вектору магнитной индукции). Сами зависимости симметричны относительно линий, перпендикулярных оси абсцисс и проходящих через экстремумы.

Для случая *б* с учетом ненулевой толщины образца экстремумы могут достигаться при иных углах, но нулевые значения также будут при угле 0° . При этом симметрия относительно линии, перпендикулярной оси абсцисс, отсутствует.

Для случая *в* возможны любые отклонения, так как силовые линии электрического поля в образце искривлены произвольной неоднородностью образца.

Однако во всех случаях зависимость будет строго периодической (с периодом 360°), «равенство площадей» сохраняется, т.е. интеграл от ЭДС Холла по углу на произвольном интервале в 360° будет равен нулю.

Принципиальное отличие наблюдения зависимости ЭДС Холла от значения магнитной индукции методом поворота от обычного метода состоит в том, что при методе поворота можно выявить неоднородности образца (случаи *б* и *в*), которые обычный метод не выявляет.

Таким образом, на примере образца p -Ge показано, что рассматриваемая установка позволяет проводить измерения гальваномагнитных параметров образцов полупроводниковых материалов, для которых

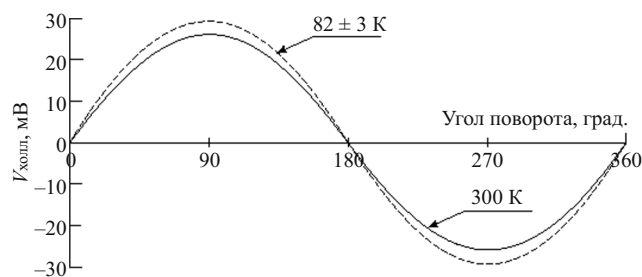


Рис. 3. Зависимость ЭДС Холла от угла поворота для образца p -Ge при температурах 300 и 82 ± 3 K

отсутствует зависимость коэффициента Холла от индукции магнитного поля. Если такая зависимость имеет место (например, для образцов твердых растворов КРТ при $T \approx 80$ K, когда в образце присутствуют носители заряда разных типов [1, 2]), то интерпретация полученных результатов заметно усложнится. В этом случае необходимо учитывать не только влияние составляющей вектора B , нормальной к плоскости образца, но и вклад от продольной составляющей этого вектора, которая также будет влиять на движение свободных носителей заряда. Интерпретация результатов, полученных на образцах различных полупроводниковых материалов, — вопрос самостоятельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А. Г., Белогорохов А. И., Лакеенков В. М. Об особенностях электрофизических свойств гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ / Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 8. С. 917 – 919.
2. Белов А. Г., Белова И. М., Каневский В. Е., Свиридов М. С., Шленский А. А. О влиянии медленных электронов на полевые зависимости коэффициента Холла для твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $T = 77$ K / Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. № 10. С. 1178 – 1181.
3. Van der Pauw L. J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape / Philips Research Reports. 1958. Vol. 13. N 1. P. 1 – 9.
4. Van der Pauw L. J. A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape / Philips Technical Review. 1958. Vol. 20. N 8. P. 220 – 224.

REFERENCES

1. Belov A. G., Belogorokhov A. I., Lakeenkov V. M. Ob osobennostyakh elektrofizicheskikh svoystv geterostruktur $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ [The specific characteristics of electrophysical properties of $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ -Heterostructures] / Fiz. Tekhnika Poluprovodn. 2001. Vol. 35. N 8. P. 917 – 919 [in Russian].
2. Belov A. G., Belova I. M., Kanevskii V. E., Sviridov M. S., Shlenskii A. A. O vliyani medlennykh elektronov na polevyie zavisimosti koëffitsienta Kholla dlya tverdykh rastvorov $Cd_xHg_{1-x}Te$ pri $T = 77$ K [The influence of slow electrons upon hall coefficient field dependencies for $Cd_xHg_{1-x}Te$ solid solutions at $T = 77$ K] / Fiz. Tekhnika Poluprovodn. 2007. Vol. 41. N 10. P. 1178 – 1181 [in Russian].
3. Van der Pauw L. J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape / Philips Research Reports. 1958. Vol. 13. N 1. P. 1 – 9.
4. Van der Pauw L. J. A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape / Philips Technical Review. 1958. Vol. 20. N 8. P. 220 – 224.