

## Метод исследования гальваномагнитных свойств $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$

*В.А. Голубятников<sup>1</sup>, А.П. Лысенко<sup>1</sup>, А.Г. Белов<sup>2</sup>, В.Е. Каневский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет» (г. Москва)

## Method of Study on Galvanomagnetic Properties of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ and $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$

*V.A. Golubyatnikov<sup>1</sup>, A.P. Lysenko<sup>2</sup>, A.G. Belov<sup>2</sup>, V.E. Kanevskii<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Research University Higher School of Economics  
<sup>2</sup>Joint Stock Company «Federal State» Research and Design Institute  
of Rare Metal Industry, Moscow

На монокристаллических объемных образцах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) и эпитаксиальных гетероструктурах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  (КРТ/КЦТ) ( $x \approx 0,2$ ) проведены гальваномагнитные измерения по методу Ван-дер-Пау при температуре 295 и 77 К. Образец вместе с криостатом вращался в поле электромагнита на угол от 0 до 360° с шагом 6°. Показано, что для объемного образца КРТ  $p$ -типа при температуре 77 К угловые зависимости измеряемого напряжения представляют собой синусоиды, т.е. коэффициент Холла не зависит от индукции магнитного поля. Однако для эпитаксиальных гетероструктур КРТ/КЦТ при температуре 77 К угловые зависимости измеряемого сигнала заметно отличаются от синусоидальных.

*Ключевые слова:* эффект Холла; коэффициент Холла; теллурид кадмия-ртути; теллурид кадмия-цинка.

The galvanomagnetic Van der Pau measurements have been carried out on monocrystalline  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (MCT) samples and epitaxial  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  (MCT/CZT) heterostructures ( $x \approx 0,2$ ) at  $T = 295$  K and  $T = 77$  K. The sample along with the cryostat rotated in magnetic field of electromagnet by (0–360°) – angle with 6-degree step. Angular dependencies of measured signal for  $p$ -type monocrystalline sample at  $T = 77$  K were shown to be sinusoidal, hence, Hall coefficient did not depend upon magnetic field induction. However, for epitaxial MCT/CZT- heterostructures at  $T = 77$  K measured signal angular dependencies differed greatly from sinusoids.

*Key words:* Hall effect, Hall coefficient; mercury-cadmium telluride; cadmium-zinc telluride.

**Введение.** При исследовании полевых зависимостей коэффициента Холла для различных полупроводниковых материалов значение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита, как правило, регулируют, изменяя силу тока через его обмотки. Образец при этом занимает строго определенное положение, которое не изменяется в процессе проведения измерений. Такой метод имеет ряд недостатков. Один из них – необходимость коммутации направления тока через обмотки электромагнита. Это, в свою очередь, требует использования специального устройства, обеспечивающего плавное уменьшение силы тока до нуля, коммутацию и последующее увеличение силы тока до прежнего значения. Однако нет никакой гарантии, что из-за наличия гистерезиса при перемагничивании сердечника значение индукции магнитного поля останется таким же (по модулю).

В качестве альтернативы можно использовать метод, в котором значение силы тока через обмотки электромагнита не меняется, а образец, закрепленный на держателе, вращается в магнитном поле на  $180^\circ$ . Это эквивалентно изменению направления индукции магнитного поля. Необходимость коммутации направления тока при этом отпадает, что существенно упрощает как измерительную установку, так и процедуру выполнения измерений. Но такой подход удобен только в том случае, когда значение индукции магнитного поля остается постоянным (не требуется снимать полевую зависимость коэффициента Холла), т.е. если заранее известно, что коэффициент Холла не зависит от индукции магнитного поля.

Для узкозонных полупроводниковых материалов, таких как твердые растворы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ),  $x \approx 0,2$ , необходимо проводить гальваномагнитные измерения в широком интервале магнитных полей. Особенностью таких материалов является наличие свободных носителей заряда трех типов: электронов, легких и тяжелых дырок [1] или быстрых и медленных электронов [2–4]. Каждый из перечисленных типов носителей заряда вносит вклад в электрофизические параметры материала, особенно при температурах, близких к 77 К. Анализируя зависимость коэффициента Холла от индукции магнитного поля, можно вычислить значения концентрации и подвижности свободных носителей заряда [4, 5]. Как правило, при проведении таких измерений полевую зависимость коэффициента Холла получают, регулируя силу тока через электромагнит.

Также для измерения индукции магнитного поля применяется метод, в котором сила тока через обмотки электромагнита остается постоянной или используется постоянный магнит. Образец, закрепленный на держателе, вращается в магнитном поле в пределах  $360^\circ$ . Соответственно, проекция вектора индукции магнитного поля  $B_0$  на нормаль к плоскости образца принимает любые значения от нуля до  $\pm B_0$ .

**Методика эксперимента.** В [5] описана установка, позволяющая проводить гальваномагнитные измерения, поворачивая образец в поле постоянного магнита с индукцией  $B_0 = 0,34$  Тл. Установка опробована на образце  $p$ -Ge при  $T = 295$  и 82 К. Показано, что подобный способ измерения дает результаты, аналогичные полученным по традиционной методике.

В настоящей работе исследовались угловые зависимости измеряемого напряжения для образцов объемного материала  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  и эпитаксиальных гетероструктур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  (КРТ/КЦТ),  $x \approx 0,2$ . Применялся электромагнит с максимальной индукцией магнитного поля  $B_0 = 0,97$  Тл, что почти в три раза превосходит индукцию магнитного поля постоянного магнита, использованного в установке, описанной в [5]. Образец, помещенный в криостат, находился либо при комнатной температуре, либо при температуре жидкого азота. Криостат с образцом вращался в зазоре электромагнитного поля.

та, шаг поворота составлял  $6^\circ$ . В процессе проведения измерений значение силы тока через обмотки электромагнита поддерживалось постоянным.

Гальваномангнитные измерения проводились по методу Ван-дер-Пау на пластинах прямоугольной формы с линейными размерами: минимальный – 6 мм; максимальный – 12 мм. Толщина монокристаллических образцов составляла 0,7 – 1,1 мм. Образцы вырезались из слитков, выращенных методом Бриджмена. Для снятия нарушенного слоя образцы после резки подвергались вначале механической полировке, а затем химико-механической с использованием полирующего травителя  $\text{Br}_2\text{-HBr}$ -этиленгликоль (0,1:1,0:1,2).

Гетероструктуры КРТ/КЦТ получены методом жидкофазной эпитаксии с последующим отжигом в парах ртути. В качестве подложки использовался  $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ,  $y \approx 0,05$ . Слитки КЦТ также выращивались методом Бриджмена. Из готовой гетероструктуры вырезался образец прямоугольной формы с такими же линейными размерами, как у монокристаллических образцов. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 10 – 30 мкм. Контакты припаивались с помощью микропаяльника сверху по углам образцов. В качестве припоя использовался индий марки 00 или 000.

Необходимо иметь в виду, что в эпитаксиальных гетероструктурах КРТ/КЦТ подложка, толщина которой составляет 0,8 – 1,0 мм, может вносить заметный вклад в электрофизические свойства образца. При проведении гальваномангнитных измерений на таких образцах следует убедиться, что все измеряемые величины относятся к эпитаксиальному слою, т.е. исключить влияние подложки или, если это невозможно, как-то оценить его.

Исследования в [1, 6] показали, что в рассматриваемых гетероструктурах практически всегда существует некий потенциальный барьер, который не совпадает с гетерограницей и всегда сдвинут в сторону подложки на 3 – 10 мкм. Этот потенциальный барьер играет роль «диэлектрической прокладки», изолирующей подложку от эпитаксиального слоя. Можно считать, что все интересующие эффекты происходят непосредственно в эпитаксиальном слое, а влиянием подложки можно пренебречь.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Если коэффициент Холла не зависит от индукции магнитного поля, угловая зависимость измеряемого сигнала должна представлять собой синусоиду. На рис.1 приведена типичная зависимость измеряемого напряжения от угла поворота объемного образца КРТ в магнитном поле при комнатной температуре. Проводимость образца близка к собственной, следовательно, концентрации электронов и дырок приблизительно равны.

Поскольку для образца КРТ ( $x \approx 0,2$ ) при комнатной температуре подвижность электронов приблизительно в 50 раз превосходит аналогичное значение для дырок (а во

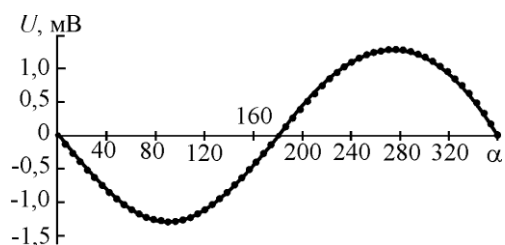


Рис.1. Зависимость измеряемого напряжения от угла вращения для объемного образца КРТ при комнатной температуре ( $I = 0,88$  мА,  $d = 10$  мА)

все кинетические коэффициенты это отношение входит в квадрате), такой образец ведет себя как электронный. Коэффициент Холла от индукции магнитного поля не зависит, и на рис.1 – четкая синусоида.

Для вычисления ЭДС Холла необходимо выполнить следующую процедуру. Сначала правая полуволна экспериментальной зависимости  $U = f(\alpha)$  центрально симметрично отображается, складывается с левой и вычисляется среднее арифметическое значение.

Затем в диапазоне углов  $0 - 180^\circ$  кривая «перегибается» относительно оси симметрии и вновь берется среднее арифметическое значение. Полученная четверть синусоиды  $0-90^\circ$  отвечает изменению индукции магнитного поля в пределах  $0-0,97$  Тл. Это и есть зависимость ЭДС Холла от угла вращения образца.

Значение коэффициента Холла  $R$  может быть вычислено по формуле

$$R = \frac{U_X d}{BI},$$

где  $U_X$  – ЭДС Холла, отвечающая углу  $\alpha$ ;  $d$  – толщина образца;  $B = B_0 \sin \alpha$  – магнитная индукция, отвечающая углу  $\alpha$  ( $B_0 = 0,97$  Тл);  $I$  – сила тока через образец.

Так как и  $U_X$ , и  $B$  пропорциональны  $\sin \alpha$ , получаем, что  $R = \text{const}$ . Для данного образца  $R = -(120 \pm 10) \text{ см}^3/\text{Кл}$  во всем интервале значений  $B$ . Такое же значение получено и при «стандартных» измерениях, когда образец расположен перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, которая регулируется изменением тока через обмотки электромагнита.

Приблизительно так же выглядит угловая зависимость измеряемого сигнала, полученная при  $T = 77$  К для образца КРТ  $p$ -типа электропроводности (рис.2). «Полярность» полуволи синусоиды обратная (см. рис.1). При этой температуре в образце присутствуют дырки двух типов: легкие и тяжелые, причем вклады от тех и других в коэффициент Холла сопоставимы [1]. Несмотря на это, как следует из полученных экспериментальных данных, коэффициент Холла не зависит от индукции магнитного поля и для всех значений  $B$  составляет  $(630 \pm 20) \text{ см}^3/\text{Кл}$ . Стандартные измерения дают такой же результат.

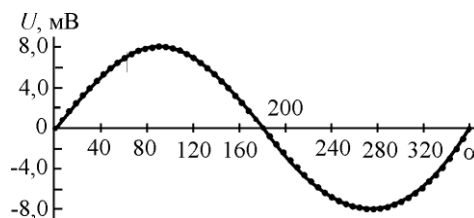


Рис.2. Зависимость измеряемого напряжения от угла вращения для образца КРТ  $p$ -типа при  $T = 77$  К ( $d = 0,82$  мм,  $I = 10$  мА)

Насколько зависимость измеряемого сигнала, приведенная на рис.2, описывается действительно синусоидой ( $U = U_{\max} \sin \alpha$ ), иллюстрирует рис.3. Видно, что экспериментальные точки практически идеально ложатся на прямую.

Для эпитаксиальных гетероструктур КРТ/КЦТ картина иная. На рис.4 представлена угловая зависимость измеряемого напряжения для одного из таких образцов при температуре жидкого азота. Полученная зависимость далека от синусоиды, хотя и является

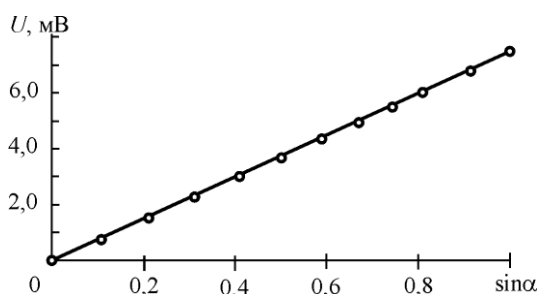


Рис.3. Зависимость измеряемого сигнала от синуса угла вращения

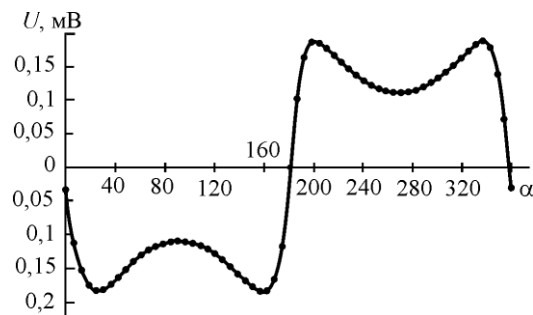


Рис.4. Зависимость измеряемого напряжения от угла вращения образца КРТ/КЦТ при  $T = 77$  К (толщина эпитаксиального слоя 10 мкм,  $I = 1,0$  мА)

центрально-симметричной, в чем можно убедиться, построив зависимость модуля измеряемого сигнала от угла вращения образца в полярных координатах (годограф).

Наблюдаемые различия могут быть обусловлены типом исследуемого объекта: в одном случае это объемный материал, в другом – эпитаксиальная гетероструктура. Однако, во-первых, зависимость  $U(\alpha)$  для этого образца, снятая при комнатной температуре, очень близка к синусоиде, во-вторых, характерные длины свободного пробега носителей заряда в таком материале при  $T = 77$  К не превышают сотен нанометров, поэтому эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм не отличается от объемного материала. Наоборот, для некоторых объемных образцов КРТ с сильной полевой зависимостью коэффициента Холла при  $T = 77$  К наблюдались угловые зависимости измеряемого сигнала, заметно отличающиеся от синусоидальных. Таким образом, все определяется не типом образца (объемный монокристаллический или эпитаксиальная гетероструктура), а наличием зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля. Последняя может быть вызвана самыми различными факторами, но в первую очередь необходимо принимать во внимание именно наличие свободных носителей заряда разных типов.

Если провести обработку кривой  $U(\alpha)$ , изображенной на рис.4, по описанному алгоритму, то получим зависимость коэффициента Холла от индукции магнитного поля,

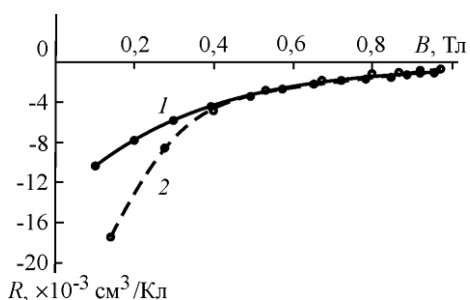


Рис.5. Зависимости коэффициента Холла гетероструктуры КРТ/КЦТ от индукции магнитного поля: 1 – образец вращается в поле электромагнита; 2 – образец расположен перпендикулярно линиям индукции магнитного поля

представленную на рис.5 (кривая 1). Для сравнения здесь же приведена полевая зависимость, полученная «в стандартном режиме» (кривая 2), когда образец расположен перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, а индукция регулируется изменением силы тока через обмотки электромагнита. Кривая 2 указывает на сильную зависимость коэффициента Холла от индукции магнитного поля. В образцах КРТ при температурах, близких к 77 К, имеются свободные носители заряда трех типов: электроны, легкие и тяжелые дырки. При увеличении магнитной индукции вклад электронов в коэффициент Холла

уменьшается, в результате чего значение  $R$ , оставаясь отрицательным, уменьшается по модулю и даже может стать положительным [1].

Как видно из рис.5, во всем интервале значений индукции магнитного поля коэффициент Холла отрицательный (заметное изменение значений  $R$  по модулю). В области сильных полей ( $B \geq 0,4$  Тл) обе зависимости близки друг к другу, в то время как в левой части рисунка они заметно расходятся. Это обстоятельство свидетельствует либо о том, что используемый алгоритм вычисления коэффициента Холла по угловой зависимости измеряемого сигнала выбран неправильно, либо что при малых углах поворота (т.е. при малых значениях  $B$ ) имеются неучтенные эффекты, искажающие общую картину.

**Заключение.** Сравнительный анализ зависимостей ЭДС Холла от магнитной индукции, полученных обычным методом и методом вращения образца в магнитном поле, дают дополнительную информацию о свойствах образца.

Вопрос о количественной интерпретации полученных результатов является предметом самостоятельного исследования. Необходимо подробно проанализировать, какие

именно процессы происходят при взаимодействии свободных носителей заряда с магнитным полем в условиях, когда сила тока остается неизменной, а направление вектора индукции меняется. Особое внимание следует обратить на исследование образцов с сильной полевой зависимостью коэффициента Холла, поскольку именно для них угловые зависимости измеряемого сигнала заметно отличаются от синусоидальных.

### 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. Исследование зависимостей проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля в пленках  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии» / П.А. Бахтин, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 10. – С. 1203–1206.
3. Влияние низкотемпературного отжига на электрофизические параметры пленок  $n-CdHgTe$  / П.А. Бахтин, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – №10. – С. 1207–1210.
4. О влиянии медленных электронов на полевые зависимости коэффициента Холла для твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  при  $T = 77K$  / А.Г. Белов, И.М. Белова, В.Е. Каневский и др. // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – №10. – С. 1178–1181.
5. Белов А.Г., Белова И.М., Каневский В.Е. // Разработка математической модели для описания полевых зависимостей коэффициента Холла для твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  при  $T = 77K$  // Изв. МГИУ. Информационные технологии. – 2007. – №1. – С. 9–13.
6. Елизаров А.И., Богобоцкий В.В., Белов А.Г. // Вольт-амперные характеристики потенциальных барьеров в гетероструктурах  $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$  // ФТП. – 1990. – Т. 24. – № 5. – С. 923–926.

Статья поступила  
16 марта 2015 г.

**Голубятников Вадим Александрович** – ведущий электроник департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* электроника, физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Лысенко Александр Павлович** – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов. **E-mail:** [aplysenko@hse.ru](mailto:aplysenko@hse.ru)

**Белов Александр Георгиевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Гиредмет» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов.

**Каневский Владимир Евгеньевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Гиредмет» (г. Москва). *Область научных интересов:* измерение параметров полупроводниковых материалов, обеспечение качества полупроводниковых материалов, метрология, стандартизация.