

УДК 621.382:537.633.2

## ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСТОЯННОЙ ХОЛЛА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ ТВЕРДОГО РАСТВОРА КРТ

К. О. Болтарь

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

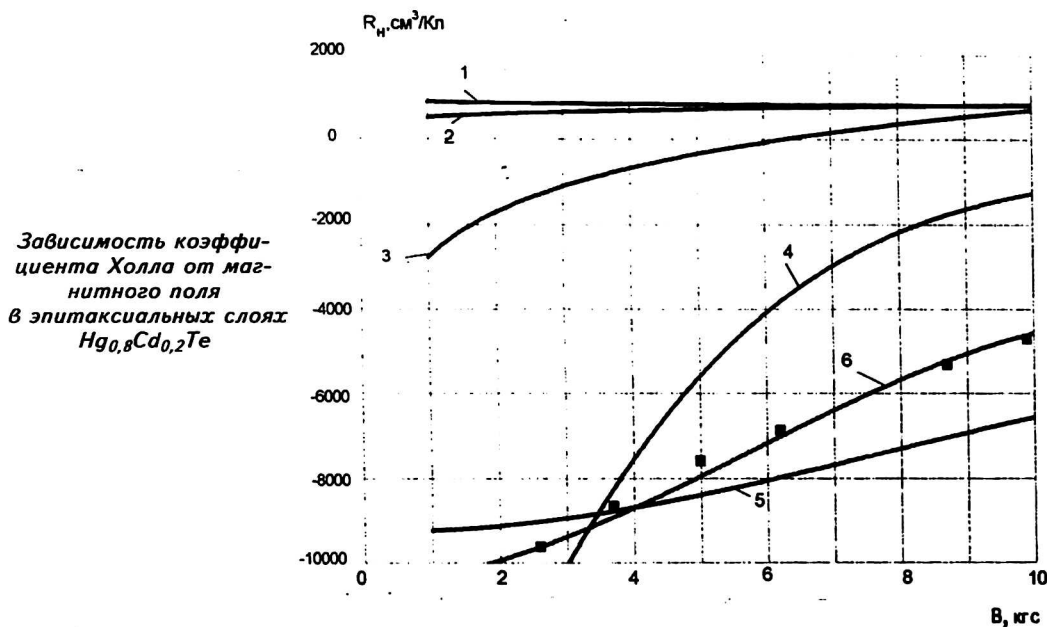
*Исследовано влияние тонкого поверхностного слоя инверсной проводимости в эпитаксиальных слоях р-типа  $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$  на зависимости коэффициента Холла от магнитного поля. Разработан метод расчета концентрации и подвижности носителей заряда в эпитаксиальном слое, учитывающий наличие слоя на поверхности.*

Измерения коэффициентов Холла в магнитных полях 1—10 кГс — основной метод экспресс-контроля типа, проводимости, концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах [1]. Однако тонкий приповерхностный инверсный слой может существенно исказить результаты расчетов на основании гальваномагнитных измерений концентрации и подвижности носителей заряда в эпитаксиальных слоях р-типа проводимости полупроводников с большим различием подвижности дырок и электронов. Этот эффект гораздо заметнее для

эпитаксиальных слоев, чем для объемных кристаллов из-за малой толщины эпитаксиальных слоев. Характерным примером таких полупроводников являются твердые растворы кадмий—ртуть—теллур (КРТ), отношение подвижности электронов и дырок в которых при температуре жидкого азота превышает 100 [2].

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента Холла от магнитного поля для эпитаксиальных слоев  $p$ -типа  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ . Проведены оценки влияния тонкого поверхностного слоя на эти зависимости и разработаны методы расчета концентрации и подвижности носителей, учитывающие наличие инверсного слоя. В качестве подложки использовались монокристаллические пластины  $\text{CdZnTe}$  с содержанием  $\text{Zn}$  4 %.

На рисунке представлены рассчитанные зависимости коэффициентов Холла  $R_H$  от магнитного поля  $B$  для эпитаксиального слоя  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$  толщиной 20 мкм концентрацией акцепторов  $P = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  с тонким поверхностным слоем  $n$ -типа проводимости. Кривые 1—5 отличаются поверхностной концентрацией электронов: 1 —  $N_s = 0$ ; 2 —  $N_s = 10^9$ ; 3 —  $N_s = 10^{10}$ ; 4 —  $N_s = 10^{11}$ ; 5 —  $N_s = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; 6 — экспериментальные данные; рассчитанное значение  $N_s = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ .



Зависимость коэффициента Холла от магнитного поля в эпитаксиальных слоях  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$

При расчетах использовались характерные для температуры жидкого азота значения подвижности дырок  $\mu_p = 400 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  и электронов  $\mu_n = 50\,000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Значения  $R_H(B)$  вычислены по формуле для двухслойных структур [1]:

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{p \frac{\mu_p^2}{1 + \mu_p^2 B^2} + p_1 \frac{\mu_1^2}{1 + \mu_1^2 B^2} - \frac{N_s}{d} \frac{\mu_n^2}{1 + \mu_n^2 B^2}}{\left( \frac{p\mu_p}{1 + \mu_p^2 B^2} + \frac{p_1\mu_1}{1 + \mu_1^2 B^2} + \frac{N_s}{d} \frac{\mu_n}{1 + \mu_n^2 B^2} \right)^2 + B^2 \left( \frac{p\mu_p^2}{1 + \mu_p^2 B^2} + \frac{p_1\mu_1^2}{1 + \mu_1^2 B^2} + \frac{N_s}{d} \frac{\mu_n^2}{1 + \mu_n^2 B^2} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона.

При  $N_s = 0$  выражение (1) упрощается до классического вида

$$R_n(B) = \frac{1}{(Pq)}$$

Из кривых 1—5 следует, что оценки концентрации акцепторов, исходя из одного типа носителей заряда, по формуле вида  $P = 1 / (qR_n)$ , без учета приповерхностного инверсного слоя, при малых магнитных полях несостоятельны. При максимальном поле  $B = 10$  кГс ошибка порядка 3 % при  $N_s = 10^7 \text{ см}^{-2}$  и 40 % — при  $N_s = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Зависимость же  $R_n(B)$  для  $N_s = 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (кривая 5) очень мало отличается от зависимости, характерной для образца *n*-типа с концентрацией электронов  $N = N_s/d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n = 50\,000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Конечно, при достаточно больших полях  $B \gg 10$  кГс даже  $N_s = 10^{12} \text{ см}^{-2}$  должна произойти инверсия знака коэффициента Холла, однако применение таких магнитных полей затруднительно для экспресс-контроля и требует учета квантовых эффектов.

Из формулы (1) следует, что приповерхностным слоем электронов в эпитаксиальных слоях КРТ *p*-типа можно пренебречь при обработке результатов измерений коэффициентов Холла, если их концентрация  $N_s \ll Pd\mu_p^2 / \mu_n^2(1 + B^2\mu_p^2)$ .

Слой с поверхностной концентрацией электронов  $N_s = 10^{12} \text{ см}^{-2}$  возникает на поверхности  $p = \text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$  при длительной отмывке в слабощелочной или нейтральной среде [3], анодном окислении поверхности [4], медленном остывании ампул после отжига эпитаксиальных структур [5], удалении органических загрязнений в кислородной плазме [6]. Кроме того, состояние поверхности КРТ нестабильно при длительном хранении. Только специальная пассивация поверхности позволяет получать поверхность без инверсного слоя.

Создана программа для расчета на ЭВМ значений  $P$ ,  $\mu_p$ ,  $\mu_n$ ,  $N_s$  по измеренным зависимостям  $R_n(B)$ . Программа строит теоретическую зависимость  $R_n(B)$  путем варьирования в (1) параметров  $p$ ,  $\mu_p$ ,  $\mu_n$ ,  $N_s$  с целью минимизации среднеквадратического отклонения расчетной зависимости  $R_n(B)$  от экспериментальной.

Программа позволяет в случае малой концентрации электронов находить также подвижность легких дырок — параметр, в значительной степени характеризующий чистоту эпитаксиального слоя  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$  *p*-типа. При этом в формулу (1) добавляются слагаемые, характеризующие вклад в постоянную Холла легких дырок, а подвижность и концентрация легких дырок добавляется в число варьируемых в программе параметров.

Экспериментально исследованы зависимости  $R_n(B)$  эпитаксиальных слоев *p*-типа  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ . Измерения проводились по методу Ван-Дер-Пау при  $T = 77 \text{ К}$ . Величина постоянного тока 1 мА.

Пример вычисленных (кривая 6) и экспериментальных (маркеры) значений  $R_n(B)$  для одного из исследованных образцов толщиной 20 мкм изображен на рисунке. Получены следующие значения:  $P = 9,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $N_s = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu_n = 27\,000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Среднеквадратическое отклонение вычисленных  $R_n(B)$  от измеренных составило 0,12 %. После сравнения поверхностного слоя толщиной 2 мкм и пассивации поверхности получена зависимость  $R_n(B) = \text{const с } P = 1 / (qR_n) = 9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_p = 420 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, при определении концентрации и подвижности дырок в тонких эпитаксиальных слоях  $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$  по измеренным зависимостям постоянной Холла от магнитного поля, необходимо очень тщательно проводить подготовку поверхности образцов для устранения поверхностного инверсного слоя. Разрабо-

тана программа расчета результатов измерений зависимости коэффициента Холла от магнитного поля, позволяющая устранять влияние поверхностного слоя на результаты расчета концентрации и подвижности носителей полупроводниковых пластин.

#### Л и т е р а т у р а

1. К у ч и с Е. В. Гальваномагнитные явления и методы их исследования. — М.: Радио и связь, 1990. С. 264.
2. Б о в и н а Л. А., С т а ф е е в В. И. Узкозонные твердые растворы CdHgTe: физика соединений  $A^2B^6$  —М.: Наука, 1986. Гл. 8. С. 246.
3. C h e n M. C. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65(4). P. 1571—1577.
4. Z e m e l A., S h e r A., E g e r D. // Ibid. 1987. V. 62(5). P. 1861.
5. J o p e s V. C., H a r t T. R. // J. Sci. Technol. 1987. № A5(2). P. 174.
6. V y d y a n a t h H. R., H i n e r C. H. // J. Appl. Phys. 1987. V. 65(8). P. 3080.

## HALL EFFECT IN EPITAXIAL $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$ LAYERS INTERPRETATION PECULIARITY

*K. O. Boltar*

The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

*The influence of thin inversion surface layer in p-type  $Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$  epitaxial structure on magnetic field Hall coefficients dependence have been investigated. The method of carriers concentration and mobility in epitaxial layer determination including the presence of thin inversion surface layer on it surface is discussed.*

E-mail: boltar@glasnet.ru