

Исследование зависимостей проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля в пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© П.А. Бахтин, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин[†], А.П. Коробкин, Н.Н. Михайлов, Ю.Г. Сидоров

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 8 января 2004 г. Принята к печати 4 марта 2004 г.)

Проведено исследование зависимостей проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля в пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) при 77 К. Пленки n -типа с $X = 0.21-0.23$ были выращены на подложках GaAs ориентации (013) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлено уменьшение проводимости и коэффициента Холла в 3–5 раз при изменении магнитного поля от 0 до 1 Тл. Показано, что такие зависимости хорошо описываются в рамках двухслойной модели с высокой и низкой подвижностью электронов. Анализ измерений при послойном травлении пленок показал, что пленку КРТ можно представить в виде двухслойной структуры. При этом тонкий слой, имеющий высокую концентрацию электронов с низкой подвижностью, расположен у границы с буферным слоем CdTe. Высокая концентрация электронов с низкой подвижностью в этом слое может быть обусловлена повышенной дефектностью слоя. Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали наличие сетки дислокаций в пленке КРТ у границы с буферным слоем.

1. Введение

При создании фотоприемников ИК диапазона на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), как фотовольтаических, так и фотопроводящих, необходимо иметь информацию о концентрации и подвижности носителей заряда и их распределении по толщине структуры. Все производители материала КРТ для определения свойств носителей заряда используют измерения проводимости σ и коэффициента Холла R_H . Однако оценки, базирующиеся на традиционных измерениях при заданной величине магнитного поля, могут привести к некорректным выводам, так как в КРТ возможно присутствие нескольких типов носителей заряда. Общеизвестно, что гораздо больше информации может быть получено, если исследовать зависимости проводимости и коэффициента Холла от величины магнитного поля и провести анализ смешанной проводимости [1–4]. При этом можно определить концентрацию и подвижность для разных типов носителей заряда в образце.

Цель данной работы — исследование зависимостей σ и R_H от магнитного поля в пленках КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), для определения параметров носителей заряда (концентрация, подвижность) и распределения их по толщине пленки.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

В работе изучались пленки КРТ ($X = 0.21-0.23$) толщиной 8–14 мкм, выращенные методом МЛЭ на подложках GaAs (013) [5] с буферным слоем CdTe

толщиной около 6 мкм. Пленки КРТ выращивались в одинаковых условиях и состояли из рабочего слоя постоянного состава и слоев переменного состава у границы с буферным слоем и у свободной поверхности с увеличением X до $X \approx 0.5$ к границам раздела (рис. 1). Толщина слоя переменного состава у границы с буферным слоем составляла 1–1.5 мкм, а у свободной поверхности — 0.4–0.8 мкм.

После изготовления пленки имеют электронный тип проводимости и при малых значениях магнитного поля (до 0.05 Тл) эффективная концентрация (величина $1/|qR_H|$, где q — элементарный заряд) составляет $(2-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а эффективная подвижность ($\mu_H = |\sigma R_H|$) составляет $4 \cdot 10^4 - 1.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре 77 К. При увеличении магнитного поля до 1 Тл наблюдается сильное (в несколько раз) умень-

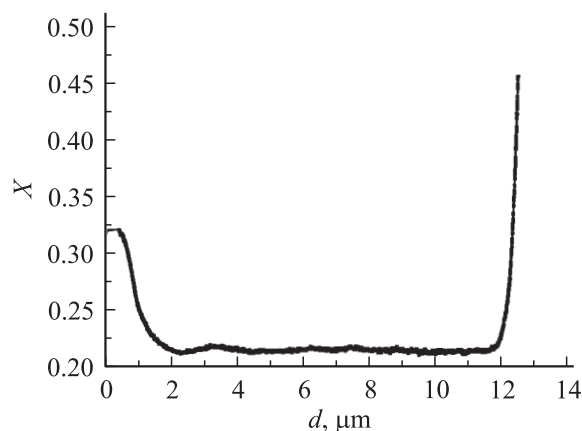


Рис. 1. Распределение состава (величины X) по толщине пленки КРТ, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста. Толщина отсчитывается от границы с буферным слоем CdTe.

[†] E-mail: varavin@isp.nsc.ru

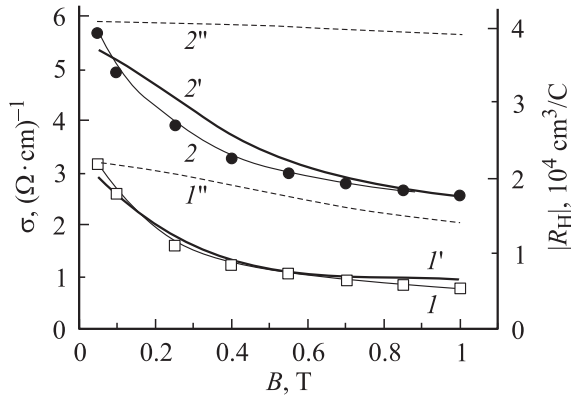


Рис. 2. Зависимости коэффициента Холла и проводимости от магнитного поля. Толщина пленки КРТ $d = 13.4$ мкм, $X = 0.215$. 1, 1', 1'' — $\sigma(B)$; 2, 2', 2'' — $R_H(B)$. 1, 2 — экспериментальные зависимости; 1', 2' — расчетные зависимости с учетом двух типов электронов; 1'', 2'' — расчетные зависимости с учетом только варизонных слоев.

шение проводимости и коэффициента Холла. Нами были проведены измерения проводимости и коэффициента Холла в диапазоне магнитных полей 0–1 Тл, в том числе и при послойном травлении пленок КРТ.

На рис. 2 показаны характерные экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента Холла и проводимости от магнитного поля.

Расчет зависимостей проводился в предположении присутствия нескольких типов носителей заряда в пленках [4]:

$$\sigma(B) = \frac{\left[\sum_i \sigma_{xx}^i(B) \right]^2 + \left[\sum_i \sigma_{xy}^i(B) \right]^2}{\sum_i \sigma_{xx}^i(B)}, \quad (1)$$

$$R_H(B) = \frac{1}{B} \frac{\sum \sigma_{xy}^i(B)}{\left[\sum_i \sigma_{xx}^i(B) \right]^2 + \left[\sum_i \sigma_{xy}^i(B) \right]^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{xx}^i(B)$, $\sigma_{xy}^i(B)$ — компоненты тензора проводимости в магнитном поле, имеющие вид

$$\sigma_{xx}^i(B) = \frac{qn_i\mu_i}{1 + \mu_i^2 B^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}^i(B) = \frac{qn_i\mu_i^2 B}{1 + \mu_i^2 B^2}. \quad (4)$$

Индекс i обозначает разный тип носителей.

Так как пленки КРТ имели на границах варизонные слои, нами предварительно были сделаны расчеты полевых зависимостей с учетом этих слоев. В варизонных слоях величина X больше, чем в рабочем слое, следовательно, подвижность электронов в этих слоях ниже, чем в рабочем слое. Расчет с учетом зависимости подвижности электронов от состава КРТ в варизонных слоях показал, что в случае одинаковой концентрации в

рабочем и варизонных слоях зависимости проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля будут существенно слабее (кривые 1'' и 2''), чем наблюдаемые экспериментально (рис. 2). Предположение об одинаковой концентрации носителей в рабочем и варизонных слоях основано на том, что экспериментально наблюдается лишь незначительное снижение концентрации электронов с увеличением X от 0.2 до 0.4 в пленках КРТ, выращенных в одинаковых условиях. Таким образом, только наличием варизонных слоев нельзя объяснить наблюдаемые зависимости от магнитного поля.

Лучшее соответствие расчетов экспериментальным зависимостям можно получить, лишь предположив наличие в пленке КРТ электронов с низкой подвижностью. При этом экспериментальные зависимости можно достаточно хорошо описать с учетом двух типов электронов (рис. 2, кривые 1', 2'). Подгонка расчетных зависимостей к экспериментальным данным осуществлялась подбором значений n_i и μ_i так, чтобы получить максимальное соответствие одновременно для обеих зависимостей $\sigma(B)$ и $R_H(B)$. Для зависимостей на рис. 1 были получены следующие подгоночные параметры: $\mu_1 = 130000$ см²/(В·с), $n_1 = 1.3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $\mu_2 = 9000$ см²/(В·с), $n_2 = 3.0 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

Для разных пленок расчетные значения n_1 и μ_1 для электронов с высокой подвижностью составляют $(1-3) \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $100000-160000$ см²/(В·с) соответственно, n_2 и μ_2 для электронов с низкой подвижностью — $(2-5) \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $2000-12000$ см²/(В·с) соответственно. Для изучения распределения электронов по толщине пленки КРТ были проведены измерения при послойном травлении пленки. Травление проводилось в растворе 1% Br в HBr. Время каждого травления было одинаковым и толщина отдельного травленного слоя считалась равной общей толщине травленной части пленки, деленной на число травлений. В травленных слоях дифференциальным методом определялись проводимость и коэффициент Холла (при поле 0.5 Тл), а также подвижность и концентрация носителей по следующим формулам (двухслойная модель Петрица [6]):

$$\mu = |R_H| \sigma,$$

$$N = \frac{1}{q|R_H|},$$

где

$$\sigma = \frac{\sigma_{n+1}d_{n+1} - \sigma_n d_n}{d_{n+1} - d_n}, \quad (5)$$

$$R_H = \frac{\sigma_{n+1}^2 |R_{Hn+1}| d_{n+1} - \sigma_n^2 |R_{Hn}| d_n}{(\sigma_{n+1} d_{n+1} - \sigma_n d_n)^2} (d_{n+1} - d_n). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) индексы n и $n+1$ обозначают n -е и $(n+1)$ -е травление, d_n и d_{n+1} — толщина пленки КРТ после n -го и $(n+1)$ -го травления соответственно.

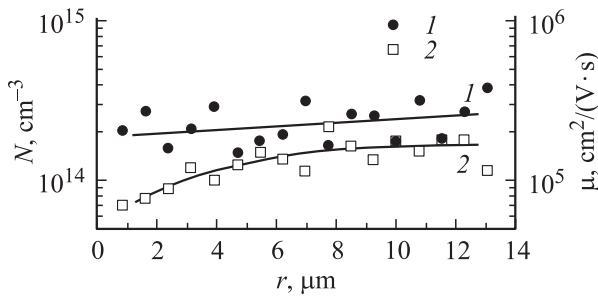


Рис. 3. Концентрация и подвижность электронов в стравленных слоях, r — расстояние от гетероперехода до середины стравленного слоя. Толщина пленки КРТ $d = 13.4$ мкм, $X = 0.215$. Точки — рассчитанные значения концентрации (1) и подвижности (2), сплошные кривые — сглаженные распределения концентрации (1') и подвижности (2') по толщине пленки.

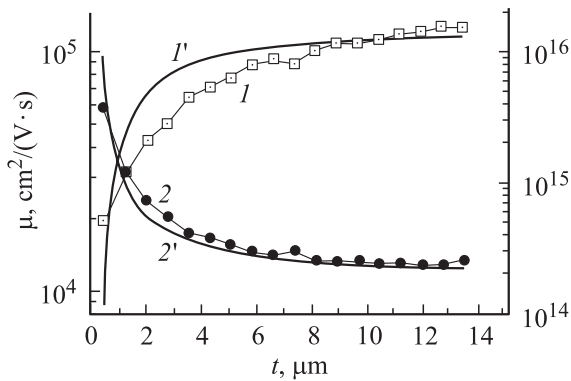


Рис. 4. Зависимости подвижности μ и концентрации электронов N в оставшемся слое от его толщины t . Толщина пленки КРТ $d = 13.4$ мкм, $X = 0.215$. 1 и 2 — экспериментальные зависимости, 1' и 2' — расчет по двухслойной модели; 1, 1' — концентрация; 2, 2' — подвижность.

На рис. 3 показаны подвижность и концентрация носителей в стравленных слоях. Видно, что в стравленных слоях концентрация носителей примерно постоянная, а подвижность несколько снижается при приближении к границе гетероперехода. Нужно отметить, что для разных образцов величина подвижности в стравленных слоях может превышать исходную эффективную подвижность в 1.5–3 раза. Из рис. 3 видно, что в оставшейся части пленки с уменьшением толщины резко уменьшается величина подвижности и растет концентрация. Такие зависимости могут быть связаны со слоевой неоднородностью, и нами была рассмотрена двухслойная модель. По этой модели пленка состоит из основного слоя, имеющего электроны с высокой подвижностью и малой концентрацией, и тонкого слоя (~ 0.5 мкм) у границы гетероперехода, имеющего высокую концентрацию электронов с низкой подвижностью. Расчет концентрации и подвижности в оставшейся части пленки, проведенный по двухслойной модели, показывает очень хорошее качественное и количественное соответствие

экспериментальным данным (рис. 4). Полученные подгоночные значения подвижности и концентрации двух типов электронов

$$d_1 = 12.9 \text{ мкм}, \quad n_1 = 1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3},$$

$$\mu_1 = 130000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}); \quad d_2 = 0.5 \text{ мкм},$$

$$n_2 = 9.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad \mu_2 = 9000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$$

также хорошо согласуются со значениями, полученными из подгонки зависимостей от магнитного поля для исходного образца. Высокая концентрация электронов с низкой подвижностью в этом слое может быть обусловлена большой дефектностью слоя. Исследования пленки с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что на расстоянии около 0.1 мкм от границы с буферным слоем образуется сетка дислокаций несоответствия. По литературным данным [6,7], высокая плотность дислокаций в КРТ может приводить к увеличению концентрации электронов и снижению их подвижности.

Поскольку слой с высокой концентрацией электронов у границы гетероперехода является шунтирующим при изготовлении фоторезисторов, необходимо минимизировать его вклад в общую проводимость пленки, который достигает величины 0.05–0.5 для исследованных пленок. Были исследованы пленки КРТ с различным начальным составом варизонного слоя на границе с буферным слоем CdTe. Из анализа зависимостей от магнитного поля определялись подвижность и концентрация электронов с низкой подвижностью и величина шунтирующего сопротивления R для фоточувствительного элемента в форме квадрата. Зависимости подвижности и шунтирующего сопротивления от начального состава варизонного слоя показаны на рис. 5. Видно, что подвижность малоподвижных электронов снижается с ростом X . При этом величина R монотонно возрастает с ростом X за счет снижения подвижности. Для концентрации электронов с низкой подвижностью наблюдается разброс примерно в 2 раза, и ее величина в пересчете на поверхностную составляет $(7-15) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, при этом отсутствует зависимость от начального состава.

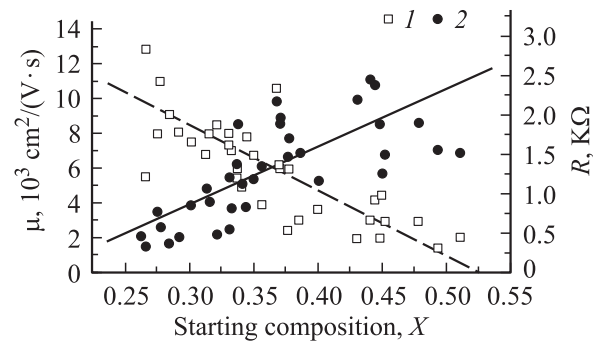


Рис. 5. Зависимости подвижности медленных электронов μ (1) и шунтирующего сопротивления R (2) для фоточувствительного элемента в форме квадрата от начального состава варизонного слоя на границе с буферным слоем CdTe.

Таким образом, уменьшить вклад малоподвижных электронов в общую проводимость пленки КРТ можно, если выращивать на границе с буфером варизонный слой с большим начальным значением X .

3. Заключение

В пленках КРТ n -типа проводимости, выращенных методом МЛЭ, наблюдается снижение в несколько раз проводимости и величины коэффициента Холла с ростом магнитного поля. Зависимости от магнитного поля хорошо описываются моделью проводимости двух типов носителей заряда: электронов с высокой и низкой подвижностью.

Анализ измерений при послойном травлении показал, что в пленке КРТ у границы с буферным слоем находится тонкий слой, имеющий высокую концентрацию электронов с низкой подвижностью, что может быть обусловлено дефектностью этого слоя. Этот слой может существенно снижать эффективную подвижность и повышать эффективную концентрацию в пленках КРТ, а также оказывать шунтирующее действие на фоторезисторы. Уменьшить вклад электронов с низкой подвижностью в общую проводимость пленки КРТ можно, если выращивать на границе с буфером варизонный слой с большим начальным значением X .

Авторы выражают благодарность И.И. Ижнину за полезные обсуждения, А.К. Гутаковскому за исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии граничащих с буфером слоев в пленках КРТ.

Список литературы

- [1] M.B. Reine, K.R. Maschhoff, S.P. Tobin, P.W. Norton, J.A. Mroczkowski, E.E. Krueger. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 788 (1993).
- [2] J.R. Meyer, C.A. Hoffman, F.J. Bartoli, D.A. Arnold, S. Sivanathan, J.P. Faurie. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 805 (1993).
- [3] E. Finkman, Y. Nemirovsky. *J. Appl. Phys.*, **53** (2), 1052 (1982).
- [4] L.F. Lou, W.H. Frye. *J. Appl. Phys.*, **56** (8), 2253 (1984).
- [5] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).
- [6] R.L. Petritz. *Phys. Rev.*, **110**, 1254 (1958).
- [7] С.Г. Гасан-заде, С.В. Старый, М.В. Стриха, Г.А. Шепельский. *ФТП*, **37** (1), 8 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of conduction dependences and the Hall coefficient on magnetic field in CdHgTe layers grown by MBE method

P.A. Bahtin, C.A. Dvoreckij, V.S. Varavin, A.P. Korobkin, N.N. Mihajlov, J.G. Sidorov

Institute of physics of semiconductors of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
630090 Novosibirsk, Russia