

Исследование особенностей гальваномагнитных явлений в слоях n - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© В.С. Варавин[¶], А.Ф. Кравченко^{¶¶}, Ю.Г. Сидоров^{¶¶¶}

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

(Получена 14 февраля 2001 г. Принята к печати 15 февраля 2001 г.)

Измерены магнитолевые зависимости коэффициента Холла и проводимости в эпитаксиальных структурах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n -типа проводимости при температуре 77 К. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии с заданным распределением состава твердого раствора по толщине. Особенностью полученных зависимостей являются уменьшение проводимости и абсолютной величины коэффициента Холла с ростом магнитного поля. Экспериментальные зависимости можно описать только с привлечением электронов с низкой подвижностью. Показано, что анодный оксид, нанесенный на поверхность пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, увеличивает концентрацию электронов с низкой подвижностью, а анодный фторид — уменьшает. Обсуждаются возможные причины, приводящие к появлению медленных электронов. Наиболее вероятными источниками с низкой подвижностью могут являться приповерхностные слои и электрические микронеоднородности пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Введение

Твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) широко используется при создании эффективных инфракрасных (ИК) фотоприемников на спектральные диапазоны 3–5 и 8–14 мкм. Успешное применение этого узкозонного материала в качестве чувствительного ИК элемента требует точного определения электрических параметров носителей заряда. Обычно параметры вычисляют из зависимостей коэффициента Холла и электрической проводимости от магнитного поля и температуры. Однако эти вычисления связаны с большими трудностями, обусловленными как сложной структурой энергетического спектра электронов, так и особенностями формирования электрически активных центров в объеме слоев и на их границах — несколько типов носителей заряда, возможное образование двумерных слоев на границах, микроскопические неоднородности, большое отношение подвижностей электронов и дырок, большая непараболичность зоны проводимости и др. [1]. Наиболее принципиальным является вопрос о числе различных типов свободных носителей заряда, без знания которого невозможно установить параметры электронного переноса и, следовательно, оценить качество выращенного материала. В материале n -типа проводимости проблема однозначной и корректной характеристики осложняется присутствием электронов с низкой подвижностью ("тяжелых" электронов), приводящих к сильной зависимости коэффициента Холла и проводимости от магнитного поля. Тяжелые электроны наблюдаются в объемных кристаллах КРТ [2], в пленках КРТ, выращенных методами жидкофазовой эпитаксии (ЖФЭ) [3] и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [4]. Причины, приводящие

к появлению электронов с низкой подвижностью, в конкретном материале не всегда ясны.

Наиболее часто называемая причина полевой зависимости коэффициента Холла и проводимости в КРТ — это компенсация материала дырками. Однако во многих случаях компенсация дырками отсутствует и, в частности, измерения спектра подвижности приводят к заключению о присутствии малоподвижных электронов [5].

Цель данной работы состоит в изучении влияния различных обработок и методов приготовления границ слоев n -типа проводимости в структурах КРТ, выращенных методом МЛЭ, на гальваномагнитные явления, используемые для оценки типов и электрофизических параметров носителей заряда.

Методика получения слоев и техника эксперимента

Слои КРТ, использованные в данной работе, выращивали методом МЛЭ [6] на подложках из GaAs. Модуль выращивания КРТ многомодульной установки МЛЭ оснащен системой кольцевых источников, обеспечивающих высокую однородность состава на подложках диаметром до 76 мм без вращения подложки, и встроенным быстродействующим автоматическим эллипсометром для измерения скорости роста и непрерывного контроля состава слоев КРТ в процессе выращивания. Такой контроль позволяет выращивать структуры с заданным распределением состава по толщине [7]. Толщина слоев КРТ составляла 7–10 мкм.

Концентрация и подвижность носителей в слоях КРТ измерялись методом Ван-дер-Пау. Для измерений из пластинок гетероэпитаксиальных структур КРТ диаметром 50.8 мм вырезались образцы размером $1 \times 1 \text{ см}^2$. Использовались прижимные позолоченные контакты. Контрольные измерения на классических холловских структурах с шириной полоски 100 мкм, изготовленных с при-

[¶] E-mail: varavin@isp.nsc.ru

^{¶¶} E-mail: krav@thermo.isp.nsc.ru

^{¶¶¶} E-mail: sidorov@isp.nsc.ru

Факс: 8(3832) 332771

менением фотолитографии, дают аналогичные результаты. Образцы при измерениях погружались в жидкий азот в специальном держателе с экраном, исключающим фоновую засветку. Диапазон тока через образец составлял 0.1–0.3 мА, при этом не наблюдалось зависимости результатов измерений от величины тока.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Непосредственно после выращивания слои КРТ с содержанием теллурида кадмия $x = 0.2\text{--}0.4$ имеют электронный тип проводимости [8]. Отжиг структур при температурах 200–300°С переводит проводимость слоев

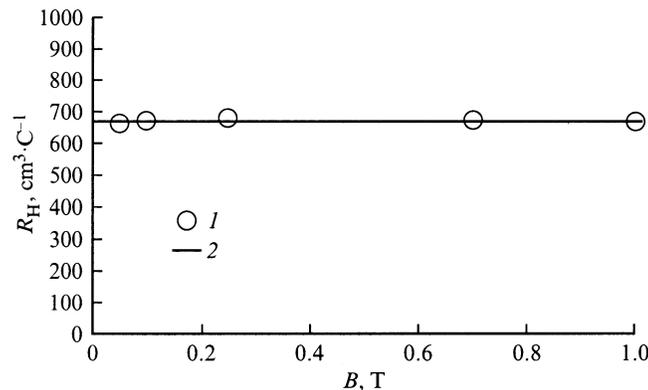


Рис. 1. Полевые зависимости коэффициента Холла для пленки КРТ с $x = 0.22$ p -типа проводимости, выращенной методом МЛЭ. 1 — результаты измерений; 2 — результаты расчета для концентрации дырок $p = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и подвижности $\mu_p = 585 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

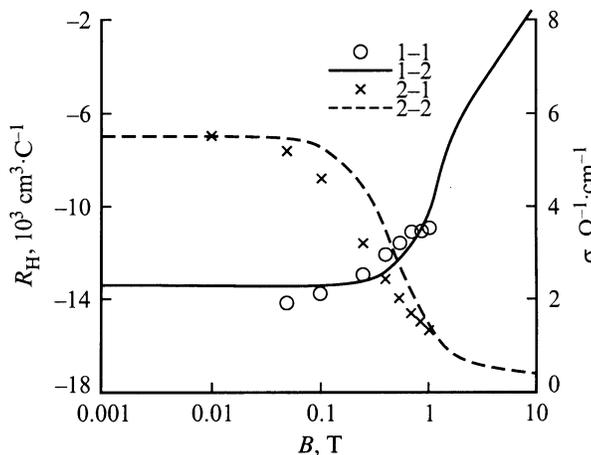


Рис. 2. Полевые зависимости коэффициента Холла и проводимости для пленки КРТ с $x = 0.22$ n -типа проводимости, выращенной методом МЛЭ. 1–1 — результаты измерений коэффициента Холла; 2–1 — результаты измерений проводимости; 1–2 и 2–2 — результаты расчета коэффициента Холла и проводимости соответственно для $n_1 = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $n_2 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu_1 = 86\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_2 = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

КРТ в дырочный тип. В отожженных слоях КРТ p -типа проводимости зависимость коэффициента Холла R_H от магнитного поля B отсутствует (рис. 1). Отсутствие зависимости от магнитного поля свидетельствует о наличии только одного типа носителей, и КРТ p -типа с одним типом носителей [9,10] может быть приготовлен с большой степенью вероятности. КРТ n -типа проводимости тоже может быть приготовлен с одним типом носителей [11], однако в большинстве случаев в материале n -типа наблюдается полевая зависимость коэффициента Холла R_H и проводимости σ (рис. 2). Точками на рис. 2 показаны результаты холловских измерений, а линиями — результаты расчета для двух типов носителей: подвижных электронов с концентрацией $n_1 = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_1 = 86\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и электронов с концентрацией $n_2 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и низкой подвижностью $\mu_2 = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Обработка результатов холловских измерений при наличии полевой зависимости проводилась по модели, учитывающей два типа носителей. Использовались следующие выражения для коэффициента Холла R_H и проводимости σ [12]:

$$R_H = \frac{R_{H1}\sigma_1^2(1 + \sigma_2^2 B^2 R_{H2}^2) + R_{H2}\sigma_2^2(1 + \sigma_1^2 B^2 R_{H1}^2)}{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 \sigma_2^2 B^2 (R_{H1} + R_{H2})^2}, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 \sigma_2^2 B^2 (R_{H1} + R_{H2})^2}{(\sigma_1 + \sigma_2) + B^2 \sigma_1 \sigma_2 (\sigma_1 R_{H1}^2 + \sigma_2 R_{H2}^2)}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) R_{H1} , R_{H2} , σ_1 , σ_2 — коэффициенты Холла и проводимости, обусловленные первым и вторым типом носителей соответственно, B — индукция магнитного поля.

Следует отметить, что точность определения параметров носителей с низкой подвижностью очень мала. Например, смена типа носителя с электронов на дырки практически не влияет на результаты подгонки расчетных полевых зависимостей к экспериментальным. Для повышения точности необходимо проводить измерения полевой зависимости в широком интервале значений индукции магнитного поля.

Дырочная проводимость в КРТ обусловлена вакансиями в подрешетке металла [13]. Концентрация доноров в слоях КРТ, выращенных методом МЛЭ, должна быть минимальна вследствие низкой температуры выращивания, и действительно, этот метод позволяет готовить слои КРТ с низкой концентрацией электронов проводимости (на уровне $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и высокой подвижностью. Из расчетов равновесных концентраций донорных центров, вводимых как собственными точечными дефектами, так и наиболее вероятными примесями, следует, что в условиях МЛЭ равновесные концентрации донорных центров не превышают уровень $10^7\text{--}10^{10} \text{ см}^{-3}$. Как показано в работе [14], наиболее вероятным донорным центром в слоях КРТ, выращенных методом МЛЭ, является антиструктурный теллур, концентрация которого определяется отклонением условий кристаллизации КРТ

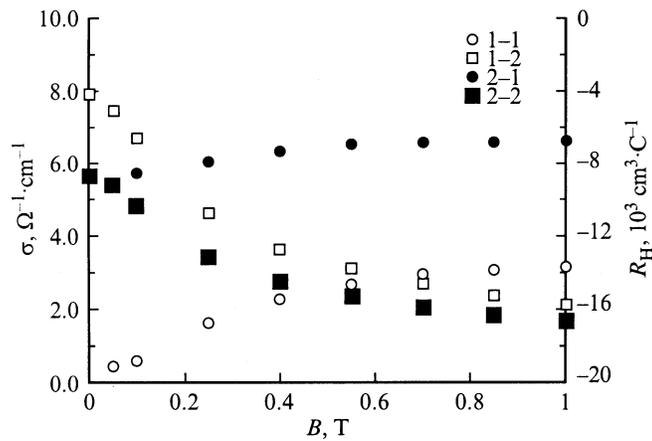


Рис. 3. Полевые зависимости коэффициента Холла и проводимости для пленки КРТ с $x = 0.22$ n -типа проводимости до (1-2, 1-1) и после (2-1, 2-2) нанесения анодного оксида.

от равновесия. Расчеты концентрации антиструктурного теллура в условиях МЛЭ КРТ с учетом отклонения от равновесия предсказывают повышение концентрации до значений 10^{14} – 10^{15}cm^{-3} . Высокие концентрации электронов с низкой подвижностью не могут быть связаны с легированием объема пленки КРТ и скорее всего связаны с поверхностью. Следует отметить, что электроны с низкой подвижностью, наблюдавшиеся в объемных кристаллах КРТ [2], имели меньшую концентрацию, и если они связаны с поверхностью, то это вполне естественно, так как в данной работе изучались достаточно тонкие пленки (толщина 7–10 мкм) с низкой концентрацией носителей и поэтому относительный вклад носителей поверхностного слоя велик.

Если тяжелые электроны существуют в приповерхностном слое, то изменения состава поверхностного слоя КРТ должны привести к изменению подвижности этих электронов. Например, при повышении содержания CdTe в поверхностном слое подвижность тяжелых электронов должна падать.

Были выращены структуры с варизонными слоями на поверхности, причем содержание CdTe на поверхности изменялось от $x = 0.4$ до $x = 0.95$. Однако влияния состава поверхностного слоя на подвижность тяжелых электронов обнаружить не удалось. При травлении варизонного слоя, рост которого закончился к поверхности практически чистым CdTe, не произошло заметного изменения полевой зависимости коэффициента Холла и проводимости.

В то же время различные обработки поверхности влияют на параметры малоподвижных электронов. Так, при нанесении анодного оксида наблюдаются характерные изменения полевых зависимостей проводимости и коэффициента Холла, показанные на рис. 3. Обработка результатов измерений показывает, что происходит увеличение концентрации электронов с низкой подвиж-

ностью от $5 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ при неизменных характеристиках электронов с высокой подвижностью.

Нанесение анодного фторида (методика из работы [15]) также влияет на полевые зависимости (рис. 4). Пленка анодного фторида понижает скорость поверхностной рекомбинации и влияет на изгиб зон на поверхности [16]. Образец для нанесения анодного фторида был вырезан из той же пластины гетероэпитаксиальной структуры КРТ, из которой был вырезан образец для нанесения анодного оксида. Обработка результатов измерений полевых зависимостей проводимости и коэффициента Холла по модели с двумя типами электронов показывает, что анодный фторид оказывает обратное воздействие по сравнению с анодным оксидом — концентрация электронов с низкой подвижностью снижается от $5 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$, а подвижность увеличивается от значения $< 1000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$, до значения $> 4000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$.

Использованный метод МЛЭ выращивания структур позволяет полностью изолировать n -слой от поверхнос-

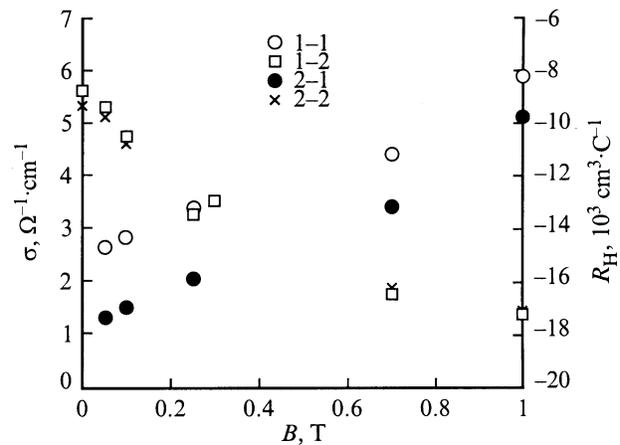


Рис. 4. Полевые зависимости коэффициента Холла и проводимости для пленки КРТ с $x = 0.22$ n -типа проводимости до (1-2, 1-1) и после (2-1, 2-2) нанесения анодного фторида.

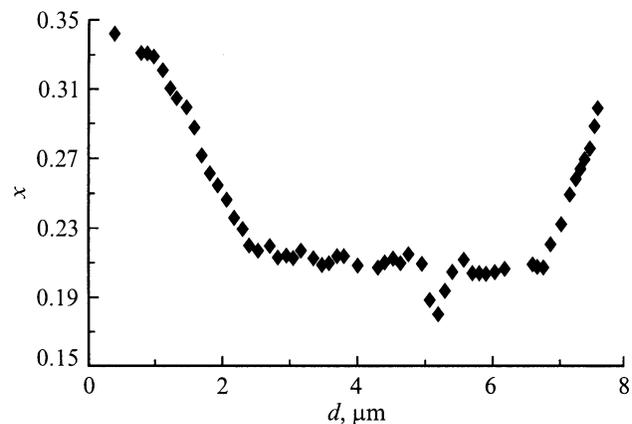


Рис. 5. Распределение состава по толщине структуры на основе КРТ с узкозонной прослойкой, измеренное эллипсометрическим методом в процессе выращивания.

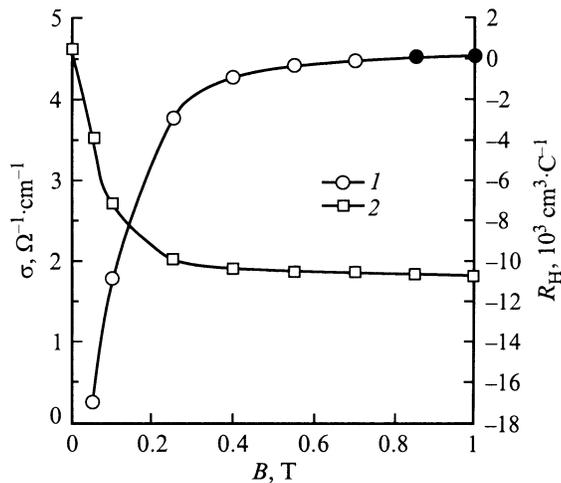


Рис. 6. Полевые зависимости коэффициента Холла (1) и проводимости (2) структуры КРТ p -типа проводимости с узкозонной прослойкой n -типа проводимости.

ти. Проводимость слоев КРТ с составами, соответствующими $x > 0.19$, легко переводится в проводимость p -типа в результате отжига при температуре $200\text{--}220^\circ\text{C}$. В то же время при более низком содержании теллурида кадмия слои сохраняют n -тип проводимости при таком отжиге. Поэтому, поскольку приповерхностные электроны отсутствуют в слоях p -типа проводимости, можно приготовить структуру КРТ, в которой слой с $x < 0.19$ будет заключен между слоями с большим содержанием CdTe, и отжечь ее, сохранив электронный тип проводимости в слое с малым содержанием CdTe. Такая структура была выращена. На рис. 5 представлено распределение состава по толщине d , измеренное эллипсометрическим методом в процессе выращивания структуры. До отжига структура имела n -тип проводимости с полевыми зависимостями проводимости и коэффициента Холла, подобными приведенным на рис. 3. Полевые зависимости после отжига представлены на рис. 6. Отчетливо виден переход к проводимости p -типа при высоких значениях магнитной индукции. Обработка результатов измерений по модели с двумя типами носителей (электронами и дырками) удовлетворительно описывает результаты измерений и дает значения концентрации и подвижности для электронов $n = 8.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 125\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ и для дырок $p = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Вклада электронов с низкой подвижностью не обнаруживается. В этом эксперименте исключена не только поверхность как причина появления тяжелых электронов, но и благодаря малости концентрации электронов устранены другие причины возможного образования тяжелых электронов — хвосты плотности состояний [17] и тем более примесная зона с прыжковой проводимостью, хотя при больших концентрациях донорной примеси эти причины устранить нельзя.

Были проведены измерения полевой зависимости проводимости узких длинных образцов, вырезанных из пластин гетероэпитаксиальных структур КРТ, когда направление тока совпадало с направлением магнитного поля. Поскольку в этом случае сила Лоренца равна нулю, в однородном и изотропном образце полевая зависимость проводимости должна отсутствовать. Из эксперимента следует, что при изменении магнитной индукции от 0.05 до 1 Тл происходит изменение проводимости, различное в разных образцах и достигающее до 30%. Это свидетельствует о наличии в измеренных образцах электрических неоднородностей.

Возможная причина влияния поверхности — существование поверхностного заряда, величина которого зависит от обработки поверхности. Согласно теории локальной электронейтральности, инородное включение в КРТ, например теллура или кадмия, или поверхностное загрязнение сдвигают уровень Ферми в КРТ на границе с включением к уровню электронейтральности. Для КРТ, особенно с небольшим содержанием CdTe, уровень Ферми лежит высоко в зоне проводимости [18], и это означает увеличение концентрации электронов вблизи включения. Этот же результат получится, если рассматривать зонную структуру материала включения и КРТ — уровни Ферми теллура, кадмия, ртути лежат существенно выше уровня локальной электронейтральности КРТ и сшивка их с зонной структурой КРТ приведет к повышению уровня Ферми в КРТ на границе с включением.

Присутствие малоподвижных электронов может быть обусловлено по крайней мере четырьмя причинами:

- дополнительными долинами в зоне проводимости;
- слоями обогащения вблизи поверхности, что в принципе допустимо, если учесть большую работу выхода электронов из КРТ и расположение локального уровня электронейтральности выше дна зоны проводимости [18];
- модуляцией дна зоны проводимости, обусловленной случайным распределением электрически заряженных центров, приводящих к хвостам плотности состояний;
- образованием примесной зоны и возникающей прыжковой проводимостью.

Первая причина обусловлена свойством самого КРТ и должна проявляться независимо от метода получения КРТ и обработки поверхности. Однако особенности зонной структуры не должны давать разной концентрации малоподвижных электронов в образцах с одинаковым положением уровня Ферми. Другими словами, если малоподвижные (тяжелые) электроны есть следствие особенностей зонной структуры КРТ, то их концентрация должна однозначно коррелировать с концентрацией легких электронов (в отсутствие дырок, т.е. компенсации) и не должна зависеть от способа или режима приготовления КРТ. Результаты, приведенные в работе [2], однозначно свидетельствуют, что в объемном КРТ (кристаллы КРТ) в отсутствие существенной компенсации концентрация тяжелых электронов падает при увеличении концентрации легких электронов, т.е. экспери-

ментальные результаты, полученные на объемных кристаллах КРТ, не подтверждают определяющего влияния зонной структуры на появление тяжелых электронов. Более того, экспериментальные исследования спектра оптического поглощения в КРТ при энергии фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны, не показали никаких особенностей, связанных со сложным законом дисперсии [17].

Если малоподвижные электроны не вызваны (по крайней мере в основном) наличием свободной поверхности КРТ, тогда следует рассматривать образование областей в объеме, в которых подвижность электронов по каким-то причинам понижена. Границы включений вполне могут соответствовать таким областям. Плотность и размер включений должны зависеть от метода приготовления КРТ (объемные кристаллы, ЖФЭ, МЛЭ), так как в этих методах отличаются соотношения активностей компонентов, температуры роста и скорости роста, приведенные к температуре. Однако для КРТ, выращенного любым методом, характерно присутствие электронов с низкой подвижностью и, следовательно, характеристикой материала должно служить соотношение концентраций подвижных и малоподвижных электронов в зависимости от концентрации подвижных электронов. Чем выше это отношение при одной и той же концентрации подвижных электронов, тем меньше включений с областями малоподвижных электронов вокруг них. Если, несмотря на разные условия приготовления КРТ, это соотношение изменяется только с изменением концентрации подвижных носителей, а при их равенстве одинаково для разных методов выращивания, то это — фундаментальное свойство материала.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о существенном влиянии характера обработки поверхности пленок КРТ на результаты холловских измерений. Поэтому для однозначной характеристики пленок КРТ n -типа с низкой концентрацией и высокой подвижностью электронов проводимости необходимо формировать состояние поверхности с известными изгибом зон и плотностью поверхностного заряда и высокой однородностью плотности заряда по поверхности. Качество материала может быть охарактеризовано отношением концентрации легких электронов к концентрации тяжелых электронов — при постоянной концентрации легких электронов пленки становятся более совершенными с увеличением этого отношения.

Авторы приносят благодарность Программе «Физика твердотельных наноструктур», частично поддержавшей данную работу по гранту № 2000-3Т.

Список литературы

- [1] В.А. Погребняк, И.М. Паренко, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. ФТП, **39**, 319 (1998); Y.S. Gui, G.Z. Zheng, I.H. Chu, S.L. Guo, X.C. Zhang, D.Y. Tang. J. Appl. Phys., **82**, 5000 (1997); T. Thio, S.A. Solin. Appl. Phys. Lett., **72**, 3497 (1998); J. Antoszewski, L. Faraone. Proc. SPIE, **2552**, 146 (1995).
- [2] E. Finkman, Y. Nemirovsky. J. Appl. Phys., **53**, 1052 (1982).
- [3] D.L. Leslie-Pelesky, D.G. Seiler, M.R. Loloee, G.L. Littler. Appl. Phys. Lett., **51**, 1916 (1987).
- [4] J. Antoszewski, L. Faraone. J. Appl. Phys., **80**, 3881 (1996).
- [5] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, C.A. Hoffman, D. Redfern, J. Antoszewski, L. Faraone, J.R. Lindemuth. J. Appl. Phys., **84**, 4966 (1998).
- [6] K.K. Svitashov, S.A. Dvoretzky, Yu.G. Sidorov, V.A. Shvets, A.S. Mardezhov, I.E. Nis, V.S. Varavin, V.I. Liberman, V.G. Remesnik. Cryst. Res. Technol., **29**, 745 (1994).
- [7] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, А.О. Суслыков, В.Н. Овсюк. Прикл. физика, № 5, 121 (2000).
- [8] V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, V.I. Liberman, N.N. Mikhailov, Yu.G. Sidorov. J. Cryst. Growth, **159**, 1161 (1996).
- [9] В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, А.Э. Климов, В.Н. Шумский. Автометрия, № 4, 59 (1998).
- [10] L. He, J.R. Yang, S.L. Wang, S.P. Guo, M.F. Yu, X.Q. Chen, W.Z. Fang, Y.M. Qiao, Q.Y. Zhang, R.J. Ding, T.L. Xin. J. Cryst. Growth, **175/176**, 766 (1997).
- [11] O.A. Shegai, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, A.M. Palkin, Yu.G. Sidorov, M.V. Yakushev. Proc. 8th Int. Conf. on Narrow Gap Semicond. (Shanghai, China, 1997) p. 52.
- [12] Р. Смит. Полупроводники (М., Мир, 1982).
- [13] H.R. Vidyathan. J. Electrochem. Soc., **128**, 2609 (1981).
- [14] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, А.П. Шотов, Ю.Г. Селиванов, А.В. Бабушкин, В.В. Копылов. Тез. докл. 2-го Росс.-Укр. семинара "Нанозифика и нанозлектроника" (Киев, 2000) с. 109.
- [15] E. Weiss, C.R. Helms. J. Electrochem. Soc., **138**, 993 (1991).
- [16] E. Weiss, N. Mainzer. J. Vac. Sci. Technol. A, **6**, 2765 (1988).
- [17] V.N. Brudnyu, S.N. Grinyaev, V.E. Stepanov. Physica B, **212**, 429 (1995).
- [18] V. Nathan. J. Appl. Phys., **83**, 2812 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of peculiarities of galvanomagnetic phenomena in n -Cd_xHg_{1-x}Te layers grown by molecular-beam epitaxy

V.S. Varavin, A.F. Kravchenko, Yu.G. Sidorov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia