

УДК 621.315.592

В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, А. Э. Климов, В. Н. Шумский

(Новосибирск)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $Cd_xHg_{1-x}Te$
ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА ПРИ ОСВЕЩЕНИИ**

Проведен анализ зависимости эффекта Холла в эпитаксиальных пленках $Cd_xHg_{1-x}Te$ от концентрации электронов и дырок для однородных и неоднородных образцов. Показано, что определение концентрации носителей заряда и их подвижности в пленках p -типа проводимости по измерениям без дополнительных исследований представляется возможным только в случае достаточно большой концентрации дырок. Предложен метод определения характеристик пленок при освещении, позволяющий разделить электронную и дырочную проводимости и получить информацию об однородности пленок.

Введение. Точное определение концентрации носителей заряда и их подвижности в пленках $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) p -типа проводимости по измерениям эффекта Холла без дополнительных исследований представляется возможным только в случае достаточно большой концентрации дырок. Это связано как со сложной зонной структурой такого соединения, так и с тем, что подвижность электронов в десятки и сотни раз больше, чем подвижность дырок, и обычно электронная проводимость преобладает, даже если концентрация дырок больше концентрации электронов [1].

При не слишком большой концентрации дырок измерение эффекта Холла в магнитных полях напряженностью несколько Тл не дает надежного ответа на вопрос о том, имеет образец электронный или дырочный тип проводимости. Использование метода магнитной спектроскопии подвижности является достаточно сложным и во многих случаях позволяет лишь качественно определить, к какому типу проводимости относится образец [2]. В тонкопленочных образцах (толщиной около 10 мкм и меньше) ситуация осложняется сильным влиянием на характеристики слоевой неоднородности. Вместе с тем точное знание типа проводимости и концентрации является совершенно необходимым для выбора технологических режимов при формировании p - n -переходов.

В настоящей работе предлагается метод, который позволяет определить отдельно электронную и дырочную проводимости и оценить степень однородности пленки путем измерения коэффициента Холла и проводимости без освещения и при освещении образца.

В основу метода положена двухслойная модель Петрица [3], в соответствии с которой носители заряда вносят аддитивный вклад в проводимость и ЭДС Холла. Исследованные пленки КРТ, полученные методом МЛЭ [4], имели буферные широкозонные слои на границе с подложкой и на свободной поверхности и использовались для изготовления матриц фотодиодов с высокими характеристиками [5].

1. Обоснование метода. 1.1. *Однородный образец.* Рассмотрим однородный (по концентрации и подвижности носителей заряда) образец КРТ в слабом магнитном поле (H), так что $\mu_{n,p}H \ll 1$. Примем для определенности $x \approx 0,2$, так что собственная концентрация $n_i \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а подвижность дырок положим равной $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Будем рассматривать только зону легких дырок и не учитывать вакансионные и междоузельные зоны. Тогда связь между параметрами, рассчитанными на основе измерений эффекта Холла и подвижности (для краткости в дальнейшем именуемые как «измеренные»), и истинными параметрами образца (концентрацией и подвижностью электронов и дырок) определяется уравнениями:

$$\sigma_{\text{изм}} = q(\mu_n n + \mu_p p) = \sigma_n + \sigma_p, \quad (1a)$$

$$R_{\text{изм}} = \frac{1}{q} \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2} = \frac{\mu_p \sigma_p - \mu_n \sigma_n}{\sigma_{\text{изм}}^2}. \quad (1б)$$

$$\mu_{\text{изм}} = R_{\text{изм}} \sigma_{\text{изм}}, \quad (1в)$$

$$n(p)_{\text{изм}} = 1/qR_{\text{изм}}. \quad (1г)$$

Из этих величин только проводимость $\sigma_{\text{изм}}$ соответствует истинной проводимости образца при любом значении концентрации электронов (дырок) в образце. Все остальные измеренные величины в той или иной степени отличаются от истинных. Это хорошо видно из рис. 1, 2, на которых показана рассчитанная по формулам (1) зависимость $n(p)_{\text{изм}}$ и $\mu_{\text{изм}}$ от истинной концентрации электронов в пленке (в единицах собственной концентрации носителей) в пределах от $n = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (что соответствует образцу с дырочной проводимостью и концентрацией дырок $p = n_i^2/n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) до $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 1, 2 приведены абсолютные значения $n(p)_{\text{изм}} = |1/qR_{\text{изм}}|$ и $\mu_{\text{изм}} = |R_{\text{изм}} \sigma_{\text{изм}}|$. На самом деле холловский сигнал меняет знак при некотором значении n/n_i , и на рис. 1 поэтому показаны области кривой, где знак холловского сигнала имеет положительное ($p_{\text{изм}}$) и отрицательное ($n_{\text{изм}}$) значения. Как видно, знак холловской ЭДС начинает соответствовать дырочной проводимости только тогда, когда концентрация дырок становится больше чем $p > (2-8)10^{15} \text{ см}^{-3}$ (в зависимости от μ_n), а правильное определение концентрации дырок возможно при ее еще больших значениях. При меньших значениях концентрации дырок знак эффекта Холла соответствует электронной проводимости, но измеренные значения концентрации электронов соответствуют истинным только при

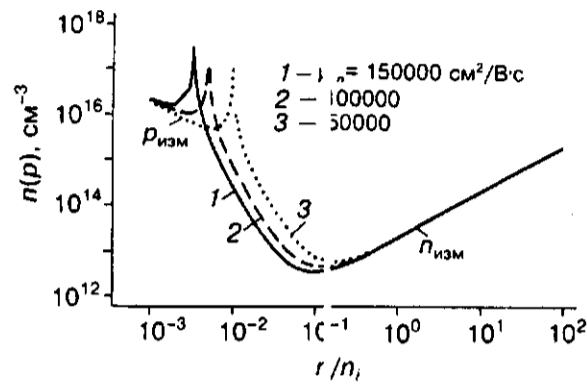


Рис. 1. Зависимость измеренной концентрации электронов (дырок) от отношения истинной концентрации электронов в однородном образце к собственной концентрации при различных значениях подвижности электронов и подвижности дырок, равной $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

$n > 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Необходимо отметить, что из вида зависимости измеренной концентрации от истинной (см. рис. 1) следует, что определение истинной концентрации только по измерению эффекта Холла невозможно, так как одному значению $n_{\text{изм}}$ соответствуют два значения концентрации носителей заряда. В качестве примера представим, что для образца, в котором подвижность электронов равна $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, измерения показали электронный тип проводимости и дали значение концентрации электронов $n_{\text{изм}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В действительности, как это видно из рис. 1 (кривая 1), такие результаты измерений могут быть получены также и для образца с дырочной проводимостью с концентрацией дырок $p \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Измеренная подвижность $\mu_{\text{изм}} = J_{\text{изм}}^2 / \sigma_{\text{изм}}$ (см. рис. 2) соответствует истинной подвижности при $n > 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $p > (2-8)10^{15} \text{ см}^{-3}$, как и для измеренной концентрации, хотя даже для $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ она меньше истинной

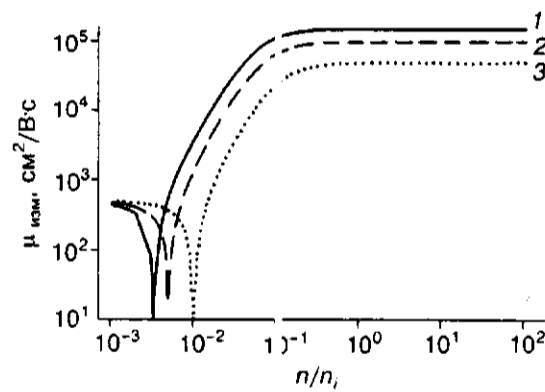


Рис. 2. Зависимость измеренной подвижности электронов (дырок) от отношения истинной концентрации электронов в однородном образце к собственной концентрации при различных значениях подвижности электронов. Параметры кривых те же, что и на рис. 1

подвижности дырок ($500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). При промежуточных значениях истинной концентрации измеренная по формуле (1в) подвижность мала. Это может указывать на то, что, несмотря на измеренный электронный тип проводимости, образец на самом деле дырочный.

Зависимость измеренного коэффициента Холла от измеренной проводимости, которая, как уже было отмечено, совпадает с истинным значением, приведена на рис. 3.

Как видно из рисунка, для данной подвижности каждому значению проводимости соответствуют два значения измеренного коэффициента Холла (за исключением точки, в которой проводимость имеет минимум). Заштрихованное пространство между кривыми 1 и 3 определяет весь набор соответствий между $\sigma_{\text{изм}}$ и $R_{\text{изм}}$ для данных минимального и максимального значений подвижности электронов при заданном ($500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) значении дырочной подвижности. Как видно из рисунка, измеряемый коэффициент Холла имеет максимум (а измеряемая концентрация – минимум) вблизи минимума проводимости. На рисунке стрелками показаны направления «в сторону n -типа» и «в сторону p -типа». Эти стрелки означают, что в первом случае увеличение проводимости сопровождается увеличением концентрации электронов, а во втором случае – дырок. Тогда, имея расчетные данные, приведенные на рис. 3, для однородного образца можно определить истинные значения концентрации электронов и дырок. Процедура такого определения выглядит следующим образом:

1) по измеренной проводимости и коэффициенту Холла определяется, какая ветвь зависимости $R_{\text{изм}} = f(\sigma)$ от минимума (в сторону p -типа или n -типа) должна использоваться (см. рис. 3);

2) по измеренному значению коэффициента Холла определяется истинное значение концентрации электронов и дырок. Допустим, что измеренная проводимость равна $0,2 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$. При этом значении проводимости в определенном выше диапазоне значений подвижности носителей заряда возможны два значения измеренного коэффициента Холла: $4\cdot 10^5$ и $2\cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{Кл}$ (точки a и b на рис. 3). Пусть измерено второе значение $R_{\text{изм}}$, что соответствует концентрации $n \cong 3\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В соответствии с п. 1 на кривой

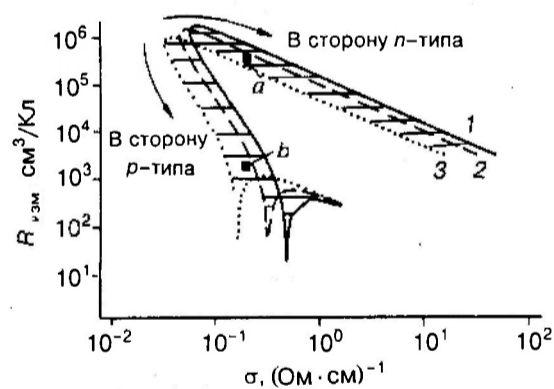


Рис. 3. Зависимость измеренного коэффициента Холла в однородном образце от измеренной проводимости. Параметры кривых те же, что и на рис. 1

зависимости измеренной концентрации от истинной (см. рис. 1) следует выбирать точку с таким же значением измеренной концентрации ($R_{изм}$) и лежащую слева от минимума кривой. Тогда истинное значение концентрации электронов в образце $n \cong 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Это означает, что образец имеет дырочную проводимость и концентрацию дырок $p = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Если измерено второе значение, то это означает, что образец имеет проводимость, близкую к собственной.

Главная проблема заключается в том, что на практике неизвестно, является измеряемый образец однородным или нет. В последнем случае нельзя применять зависимости, рассчитанные для однородного образца.

1.2. *Неоднородный образец.* Рассмотрим двухслойный образец, состоящий из слоев p - и n -типа (a и b соответственно), в которых состав, а также подвижности электронов и дырок одинаковы в обоих слоях. В соответствии с моделью Петрица [3] для измеряемых величин можно записать:

$$\sigma_{изм} = \sigma_a d_a / d + \sigma_b d_b / d, \quad d_a + d_b = d, \quad (2a)$$

$$R_{изм} = \frac{R_b \sigma_b^2 d_a / d + R_a \sigma_a^2 d_b / d}{\sigma_{изм}^2}, \quad (2б)$$

$$\mu_{изм} = R_{изм} \sigma_{изм} = - \frac{R_b \sigma_b^2 d_a / d + R_a \sigma_a^2 d_b / d}{\sigma_{изм}}, \quad (2в)$$

$$n(p)_{изм} = 1/q R_{изм}, \quad (2г)$$

где индексы a, b относятся соответственно к каждому из двух слоев, а R_a и R_b определяются в соответствии с формулой (1б) при подстановке соответствующих индексов. При дальнейших расчетах в качестве базового выбран слой b с дырочной проводимостью, для которого задаются все необходимые параметры, и изменяется концентрация носителей в слое a , проходя значения от дырочной до электронной проводимости.

На рис. 4 в качестве примера приведена зависимость измеренного коэффициента Холла двухслойной структуры от концентрации носителей заряда (в относительных по отношению к собственной концентрации единицах) в слое a , толщина которого составляет 0,01 от общей толщины образца. Как видно из рисунка, если в базовом слое концентрация дырок равна $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, то наличие даже такого тонкого слоя a влияет на измеряемую концентрацию для всей структуры, начиная с концентрации электронов в этом слое на уровне собственной концентрации. Расчеты показывают, что это влияние существенно в широком диапазоне концентраций дырок в слое b . Как видно из формулы (2а), измеряемая проводимость является комбинацией из проводимостей двух слоев и может принимать различные значения в зависимости от соотношения толщины и параметров этих слоев. Поэтому в случае двухслойного образца по результатам стандартных измерений эффекта Холла в принципе невозможно определить раздельно концентрации в этих слоях и подвижности электронов и дырок.

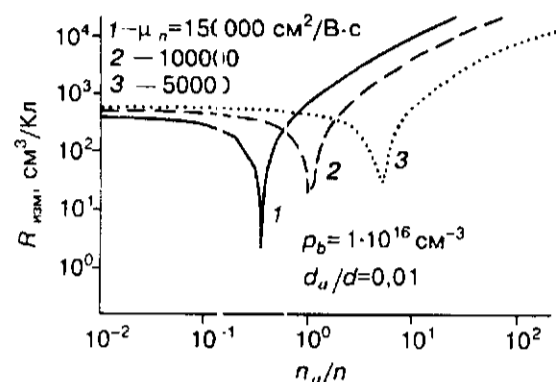


Рис. 4. Зависимость измеренного коэффициента Холла двухслойного образца от концентрации носителей заряда в слое a . При заданы параметры образца, подвижность дырок равна $500 \text{ cm}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

1.3. *Измерение коэффициента Холла и проводимости при освещении.* Под действием излучения в образце возникает избыточная концентрация носителей заряда – как электронов, так и дырок. В отсутствие захвата выполняется условие нейтральности. В общем случае $\Delta n = \Delta p$ по всему образцу, а если не учитывать эффекты разделения носителей на границе двух областей, то $\Delta n_a = \Delta p_a$ и $\Delta n_b = \Delta p_b$. Тогда

$$\sigma'_a = \sigma_a + \Delta\sigma_a = \sigma_a + \Delta\sigma_{na} + \Delta\sigma_{pa} = \sigma_a + q\mu_p\Delta p_a + q\mu_n\Delta n_a, \quad (3a)$$

$$\sigma'_b = \sigma_b + \Delta\sigma_b = \sigma_b + \Delta\sigma_{nb} + \Delta\sigma_{pb} = \sigma_b + q\mu_p\Delta p_b + q\mu_n\Delta n_b \quad (3б)$$

и

$$\sigma'_{изм} = \sigma'_a + \sigma'_b. \quad (3в)$$

Если, как и раньше, исходить из модели Петрица, то измеряемые коэффициенты Холла для каждого из слоев при освещении записываются в виде

$$R'_{аизм} = R_{аизм} \sigma_a^2 / \sigma_a'^2 + \frac{\mu_{pa} \Delta\sigma_{pa} - \mu_{na} \Delta\sigma_{na}}{\sigma_a'^2}, \quad (4a)$$

$$R'_{бизм} = R_{бизм} \sigma_b^2 / \sigma_b'^2 + \frac{\mu_{pb} \Delta\sigma_{pb} - \mu_{nb} \Delta\sigma_{nb}}{\sigma_b'^2}. \quad (4б)$$

Можно показать, что измеренные коэффициенты Холла и проводимость для всего образца в темноте и при освещении связаны зависимостью

$$R'_{изм} \sigma_{изм}'^2 - R_{изм} \sigma_{изм}^2 = \Delta\sigma_b (d_b/d) (\mu_{pb} - \mu_{nb}) + \Delta\sigma_a (d_a/d) (\mu_{pa} - \mu_{na}), \quad (5)$$

где $R'_{a,b}$, $\sigma'_{a,b}$ относятся к измерениям при освещении.

Учитывая, что подвижность электронов так же, как и подвижность дырок, одинакова во всем образце и, кроме того, в КРТ с составом вблизи $x = 0,2$ подвижность электронов много больше подвижности дырок, можно записать:

$$R'_{изм} \sigma_{изм}^2 - R_{изм} \sigma_{изм}^2 = \mu_n [\Delta\sigma_b(d_b/d) + \Delta\sigma_a(d_a/d)] = \mu_n \Delta\sigma_{изм}. \quad (6a)$$

Так как все величины в формуле (6a) являются измеряемыми, то оказывается возможным определить истинную подвижность электронов:

$$\mu_n = (R'_{изм} \sigma_{изм}^2 - R_{изм} \sigma_{изм}^2) / \Delta\sigma_{изм}. \quad (6b)$$

Используя формулы (3a)–(3в), можно получить:

$$\sigma_{изм} = q\mu_n n_{ср} + q\mu_p p_{ср} = \sigma_{иср} + \sigma_{рсп},$$

где $n_{ср}$ и $p_{ср}$ – значения концентрации электронов и дырок, усредненные по всему образцу:

$$n_{ср} \equiv n_a(d_a/d) + n_b(d_b/d), \quad p_{ср} \equiv p_a(d_a/d) + p_b(d_b/d).$$

Для неоднородного образца справедливо неравенство $n_{ср} p_{ср} \neq n_i^2$.

Теперь можно получить уравнения, связывающие усредненные по всему объему образца истинные значения электронной и дырочной проводимостей и концентрации:

$$\sigma_{иср} = \sigma_{изм} \frac{\mu_p - R_{изм} \sigma_{изм}}{\mu_p + \mu_n}, \quad n_{ср} = \sigma_{иср} / q\mu_n, \quad (7a)$$

$$\sigma_{рсп} = \sigma_{изм} \frac{R_{изм} \sigma_{изм} - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}, \quad p_{ср} = \sigma_{рсп} / q\mu_p. \quad (7b)$$

Таким образом, при выполнении соотношения $R_{изм} \sigma_{изм} \gg \mu_p$, что обычно имеет место, и проведении одного дополнительного измерения эффекта Холла и проводимости образца при освещении можно установить истинное значение подвижности электронов, средние по всему объему значения электронной и дырочной проводимостей и концентрации электронов, но не концентрации дырок, так как подвижность дырок априори неизвестна и не определяется из проведенных измерений.

Однако можно, используя известные литературные данные о подвижности дырок в валентной зоне, определить интервал возможных усредненных по объему концентрации дырок. В качестве иллюстрации к изложенному на рис. 5, 6 приведены результаты, которые должны быть получены непосредственно при измерении структуры с концентрацией дырок в основном объеме $p = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в темноте и при обработке измерений коэффициента Холла и проводимости в темноте и при освещении.

С увеличением концентрации электронов в слое a измерения эффекта Холла в темноте (см. рис. 5, кривая 1) дают сначала p -тип, а затем при

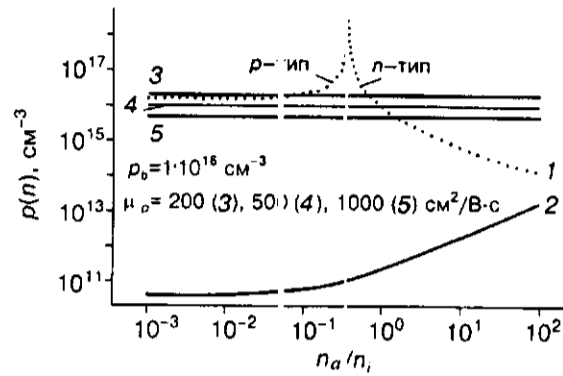


Рис. 5. Зависимость измеренной концентрации в темноте (1), а также рассчитанной средней концентрации электронов (2) и дырок (3) при различных значениях их подвижности для двухслойного образца при концентрации фотовозбужденных электронов $\Delta n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Приведены параметры образца и кривых

$n_a \geq 6 \cdot 10^{12}$ *n*-тип проводимости. При низкой концентрации n_a концентрация дырок и их подвижность (см. рис. 6, кривая 1) соответствуют истинным значениям, но наличие тонкого слоя с собственной проводимостью (толщина слоя составляет 1 % от общей толщины) приводит к тому, что, если судить по измерениям, образец имеет электронный тип проводимости с концентрацией $n \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью электронов около $600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Если концентрация электронов в тонком слое увеличивается, то вплоть до $n_a/n_i = 100$ измеренная концентрация уменьшается, а подвижность увеличивается. При освещении, когда избыточная концентрация носителей равна собственной, измерения дают электронный тип проводимости. Подвижность, измеряемая при этих условиях, почти не зависит от концентрации электронов в слое *a* вплоть до $n_a \approx 2 \cdot 10^{15}$, что не соответствует истинной подвижности электронов.

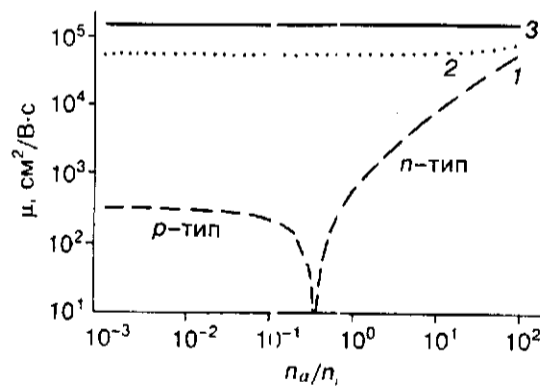


Рис. 6. Зависимость измеренной (1), измеренной при освещении (2) и истинной (3) подвижности электронов для двухслойного образца при концентрации фотовозбужденных электронов $\Delta n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Параметры образца те же, что и на рис. 5

Расчет концентрации носителей заряда (усредненной по всему объему) по приведенным выше формулам при измерении в темноте и при освещении дает правильные, истинные значения вне зависимости от концентрации электронов в слое a . Средняя концентрация электронов по всему образцу (см. рис. 5, кривая 2) вплоть до $n_a \cong 10^{12} \text{ см}^{-3}$ остается примерно постоянной и равной концентрации неосновных носителей в слое b , а при больших значениях n_a начинает определяться концентрацией в слое a . Средняя концентрация дырок совпадает с истинной в слое b , если она рассчитана при подвижности дырок, равной $500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, т. е. заложенной в уравнения (3)–(7).

Расчет позволяет также получить истинные значения электронной подвижности (см. рис. 6, кривая 3). Как видно из рисунка, рассчитанная подвижность электронов совпадает с истинной подвижностью при любых значениях концентрации электронов в слое a .

Расчеты для измерений при освещении (см. рис. 5, 6) были выполнены при избыточной концентрации носителей заряда $\Delta n = n_i$. Для того чтобы определить допустимый диапазон изменения концентрации неравновесных носителей, рассмотрим зависимость измеряемых и рассчитанных величин от Δn . Следует специально заметить, что для расчета параметров структуры нет необходимости проводить измерения при разном освещении, а достаточно одного дополнительного измерения.

На рис. 7 приведены измеренная при освещении (кривая 1) и рассчитанные зависимости усредненных концентраций электронов (кривая 2) и дырок (кривая 3) от концентрации избыточных электронов.

Как видно из рисунка, увеличение концентрации неравновесных электронов приводит сначала к уменьшению измеренной концентрации, а затем к ее увеличению. Это связано с тем, что в отсутствие освещения дырочная проводимость, как это можно видеть на рис. 5, преобладает над электронной. С ростом избыточной концентрации доля электронной проводимости увеличивается, но, несмотря на этот рост, измеряемая концентрация (см.

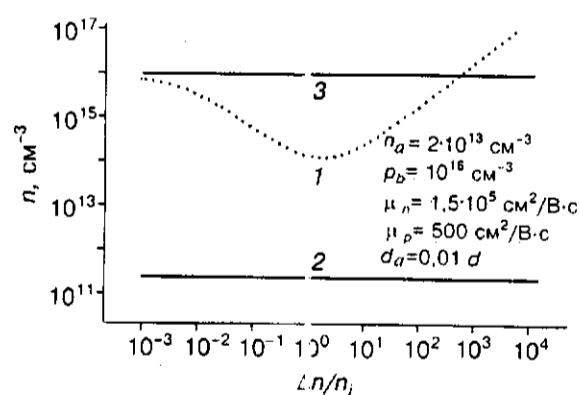


Рис. 7. Зависимость измеренной (1) и рассчитанных средних концентраций электронов (2) и дырок (3) для двухслойного образца от концентрации неравновесных носителей заряда при освещении. Приведены параметры образца

рис. 7) уменьшается до тех пор, пока электронная проводимость не сравняется по величине с дырочной.

Расчет зависимости измеренной при освещении, а также рассчитанной по формуле (66) подвижности от избыточной концентрации носителей показал следующее.

Измеряемая при освещении подвижность электронов для образца с параметрами как на рис. 7 растет с ростом концентрации неравновесных носителей, достигая истинного значения ($150000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) при концентрации избыточных носителей заряда больше $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В то же время рассчитанная по формуле (66) подвижность электронов равна истинному значению и не зависит от концентрации избыточных носителей заряда.

Таким образом, дополнительное измерение эффекта Холла и проводимости при освещении позволяет определить истинные параметры структуры и оценить ее однородность. В широких пределах изменения избыточной концентрации ($0,001n_i < \Delta n < 100n_i$) расчет дает возможность правильно определять истинное значение подвижности электронов и усредненные по всему объему концентрации электронов и дырок. Для определения возможностей метода были проведены экспериментальные измерения и рассчитаны параметры структур.

2. Эксперимент. Измерения проводились на следующих структурах: подложка GaAs – буферный слой CdTe – пленка КРТ с составом $x \approx 0,2$ – широкозонный слой КРТ с составом $x \approx 0,3$.

На рис. 8 в качестве примера приведены измеренная и рассчитанная по формулам разд. 1.3 подвижности электронов для образца 327 толщиной 12,1 мкм.

Как видно из рис. 8, при увеличении интенсивности освещения измеренная подвижность (кривая 1) увеличивается от значения $\sim 60000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ в темноте до $115000 - 118000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Качественный характер изменения подвижности соответствует проведенным выше расчетам. На этом же рисунке приведено значение рассчитанной (истинной) подвижности электронов для разных значений интенсивности излучения (кривая 2). В соответствии с изложенным в разд. 1.3 подходом рассчитанная истинная

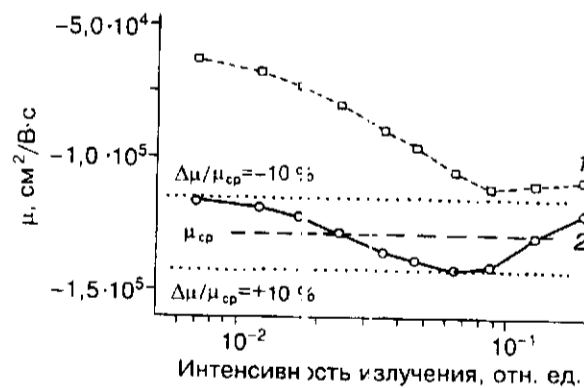


Рис. 8. Зависимость измеренной подвижности электронов от освещения (кривая 1) и значения подвижности для образца 327, рассчитанные по формуле (66), (кривая 2)

подвижность электронов не должна зависеть от интенсивности падающего на образец излучения. Наблюдаемая в эксперименте зависимость, скорее всего, связана с погрешностями измерений. Действительно, разброс значений не превышает $\pm 10\%$ от среднего значения подвижности, которое равно $128000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Были также измерены и рассчитаны концентрации электронов и дырок, усредненные по всей толщине образца. При расчете средней концентрации дырок использовались два значения подвижности: $\mu_p = 200$ и $\mu_p = 1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что соответствует обычно встречаемым в литературе минимальному и максимальному значениям подвижности дырок.

Результаты расчетов приведены в таблице. В колонке 2 таблицы приведены значения собственной концентрации носителей заряда, определенные в соответствии с [1]. Значения ширины запрещенной зоны были определены экспериментально по спектральной зависимости фотопроводимости. В колонках 3 и 4 даны значения измеренных в темноте концентрации электронов (все образцы показали n -тип проводимости) и их подвижности. В колонках 5–10 приведены рассчитанные по измерениям в темноте и при освещении параметры структур. Колонки 6 и 8 соответствуют $\mu_p = 200$, а колонки 7 и 9 – $\mu_p = 1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Колонки 8 и 9 рассчитывались как

$$n_{i1\text{ср}} = (n_{\text{ср}} p_{1\text{ср}})^{1/2} \quad \text{и} \quad n_{i2\text{ср}} = (n_{\text{ср}} p_{2\text{ср}})^{1/2}.$$

Этот расчет был проведен для оценки однородности пленок. Действительно, если образец однородный, то $(n_{\text{ср}} p_{1\text{ср}})^{1/2} \equiv n_i$. Если же образец состоит из двух и более слоев, то $(n_{\text{ср}} p_{1\text{ср}})^{1/2} > n_i$. Критерием однородности (неоднородности) образца может служить отклонение от единицы отношения $\beta = n_i / (n_{\text{ср}} p_{\text{ср}})^{1/2}$. Для образцов, параметры которых приведены в таблице, для максимально возможной подвижности дырок β изменяется от 0,006 для образца 303 до 0,9 для образца 403. Малые значения β (образцы 303, 327) указывают на то, что исследуемые образцы неоднородны, т. е. состоят, как минимум, из двух слоев различного типа проводимости.

В то же время образец 403 очень близок к однородному. Отличие β от единицы (10%) вполне может быть обусловлено погрешностями в определении n_i и $n_{i2\text{ср}}$.

Номер образца	Параметры без освещения			Рассчитанные параметры						
	n_i , см^{-3}	n_s , см^{-3}	μ_n , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_{\text{ср}}$, см^{-3}	$p_{\text{ср}}$, см^{-3}	$p_{2\text{ср}}$, см^{-3}	$n_{\text{ср}}$, см^{-3}	$n_{2\text{ср}}$, см^{-3}	$n_{\text{инт}}$, см^{-3}	$\beta = n_i / n_{i2\text{ср}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
303	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{15}$	12700	$1,5 \cdot 10^{15}$	$7,7 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$	11100	0,006
403	$1 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{13}$	23600	$1,1 \cdot 10^{12}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	110300	0,9
404	$1 \cdot 10^{13}$	$2,9 \cdot 10^{13}$	28300	$1,4 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$2,6 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{13}$	41800	0,16
327	$1 \cdot 10^{13}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	57000	$6,6 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	129000	0,013

Заключение. Результаты проведенных расчетов показали, что традиционные измерения эффекта Холла и проводимости в пленках КРТ в области составов, для которых подвижность электронов много больше подвижности дырок, не позволяют определить истинные значения концентрации и подвижности носителей заряда даже для однородных образцов и обычно показывают *n*-тип проводимости и не зависимости от истинного соотношения ионизованных акцепторных и донорных примесей.

Это приводит к тому, что при изготовлении *p-n*-переходов приходится сначала создавать в пленках дополнительные акцепторные центры до тех пор, пока по измерениям эффекта Холла и проводимости не будет установлен *p*-тип проводимости, и лишь после этого проводить имплантацию донорных примесей. В свою очередь, это приводит к увеличению туннельных токов и ухудшению параметров приборов.

Предложенный метод дает возможность определения истинного значения электронной подвижности и средних значений концентрации электронов и дырок в образце и оценки однородности пленки всего при одном дополнительном измерении эффекта Холла и проводимости при освещении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика соединений А^{II}В^{VI} /Под ред. А. Н. Георгобиани, М. К. Шейнкмана. М.: Наука, 1986.
2. Artoszewski J., Seymour D. J., Farione L. Magneto-transport characterization using quantitative mobility-spectrum analysis // J. Electron. Materials. 1995. 24. P. 1255.
3. Petritz R. L. Theory and experiment for measuring the mobility and density for carriers in the space charge region of a semiconductor surface // Phys. Rev. 1958. 110. P. 1254.
4. Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Varavin V. S. et al. Peculiarities of the MBE growth physics and technology of narrow-gap II-VI compounds // Thin Solid Films. 1997. 307. P. 253.
5. Vasilyev V. V., Esaev D. G., Ovsyuk V. N. et al. Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 956.

Поступила в редакцию 25 мая 1998 г.