

ВЛИЯНИЕ АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ И ФОТОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА В КРИСТАЛЛАХ $Cd_xHg_{1-x}Te$

Гасан-заде С. Г., Жадько И. П., Зинченко Э. А.,
Фридрих Е. С., Шепельский Г. А.

В кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.20$) n - и p -типа исследовано влияние анодного окисления поверхности на характеристики фотопроводимости (ФП) и фотомагнитного эффекта (ФМЭ), а также на эффект Холла и электропроводность. Анализ результатов проведен с учетом наличия на границе раздела полупроводник—окисел фиксированного положительного заряда большой плотности. Показано, что кратковременная ультрафиолетовая подсветка приводит при низкой ($T \leq 80$ K) температуре к качественной трансформации характеристик образца из-за перехода его в новое стационарное состояние с практически полной релаксацией электрического приповерхностного потенциала. В образцах p -типа обнаружено возникновение пространственной концентрационной неоднородности в приповерхностной области кристалла после нанесения анодного окисла. Кроме того, коэффициент Холла испытывает инверсию знака, а величины ФП и ФМЭ резко возрастают в образцах p -типа и, напротив, уменьшаются в образцах n -типа.

1. Сравнительное исследование характеристик фотопроводимости (ФП) и фотомагнитного эффекта (ФМЭ) совместно с гальваномагнитными измерениями содержит, как известно, ценную информацию не только о важнейших параметрах полупроводника, но и характере возможных в нем неоднородностей, влияющих на процессы рекомбинации и переноса носителей тока. Если, однако, методы определения рекомбинационных и кинетических параметров хорошо развиты и давно используются на практике (см., например, [1]), то о возможностях изучения макронеоднородностей на базе совместных измерений ФП и ФМЭ в кристаллах можно судить лишь косвенно по отдельным публикациям. Как показывает анализ (см., например, [2, 3]), исследование неоднородностей этим методом наиболее эффективно в полупроводниках с биполярной фотопроводимостью и сильно различающимися значениями подвижностей электронов и дырок ($\mu_n \gg \mu_p$). Именно к таким полупроводниковым материалам относится большинство сложных соединений ИК техники, в которых проблеме изучения неоднородностей в силу ряда известных причин традиционно уделяется большое внимание.

В настоящей работе метод совместных измерений фотоэлектрических и гальваномагнитных эффектов использован для исследования таких неоднородностей, которые обычно возникают при обработке и пассивации поверхностей полупроводника. В частности, изучено влияние анодного окисления поверхностей на характеристики ФП и ФМЭ, эффекта Холла и электропроводности в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.20$). На основе сравнительного анализа полученных результатов обсуждаются некоторые свойства окисла, границы раздела окисел—полупроводник, а также характер изменения объемных параметров кристалла, вызванного его окислением.

2. Опыты выполнены на образцах n - и p -типа проводимости с концентрацией активных примесей $N_d - N_a \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $N_a - N_d \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Размер образцов (мм): $l_x = 8-10$; $l_y = 0.8-1$; $l_z \approx 2$. Анодное окисление zx -граней (после предварительной процедуры полировки и глубокого травления образ-

дов) проводилось в щелочном электролите по стандартной методике [4]. Толщина окисного слоя $\sim 400 \text{ \AA}$. Токовые контакты наносились на торцевые yz -грани. Измерения ФП и ФМЭ проводились при 80 К, а постоянной Холла R_H и удельного сопротивления ρ — в диапазоне 4.2–250 К.

Последовательность проведения экспериментов была следующей. Сначала снимались спектральные характеристики (СХ) ФП и ФМЭ, а также температурные зависимости R_H и ρ на образцах n - и p -типа с анодно-окисленными поверхностями xz . Затем при 80 К одна или обе окисленные xz -поверхности в течение 10–15 мин подвергались освещению ультрафиолетовым (УФ) излучением ($\lambda \leq 0.38 \text{ мкм}$). Такая подсветка, взаимодействуя с окислом, приводит, как было недавно показано, к новому квазистационарному состоянию приповерхностной структуры полупроводника, которое при $T \leq 80 \text{ К}$ сохраняется сколько угодно долго [5, 6].

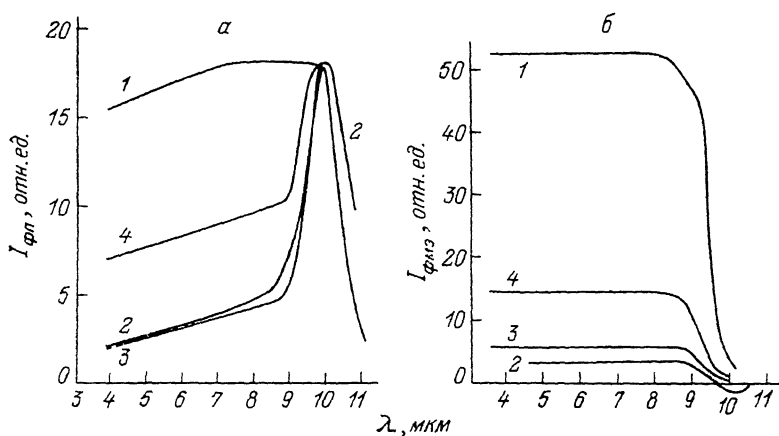


Рис. 1. Спектральные характеристики фотопроводимости (а) и фотомангнитного эффекта (б) образца n -типа.

1 — окисленная поверхность; 2 — окисленная поверхность, предварительно подвергнутая ультрафиолетовой подсветке; 3 — после снятия окисла; 4 — после стравливания приповерхностных областей кристалла на глубину $\sim 10 \text{ мкм}$. Весь цикл измерений выполнен по истечении 3 недель после нанесения окисла на поверхность образца.

После перевода образца в «новое состояние» с помощью УФ подсветки снова проводились измерения характеристик ФП, ФМЭ, R_H и ρ . Затем окисел снимался травителем, нейтральным по отношению к самому кристаллу, и процедура измерений повторялась. В дальнейшем измерения проводились после последовательного постольного стравливания приповерхностных областей кристалла на глубину 2–3 мкм.

3. Основные результаты измерений представлены на рис. 1–3. Здесь прежде всего обращает на себя внимание эффект сильного влияния предварительной УФ подсветки окисленных поверхностей на СХ ФП и ФМЭ в образцах обоих типов проводимости (ср. зависимости 1 и 2 на рис. 1 и 2), а также на температурные зависимости R_H и ρ в кристаллах p -типа (рис. 3, кривые 1 и 2). При этом важно отметить, что влияние УФ подсветки на характеристики ФП и ФМЭ принципиально различно для образцов n - и p -типа. Так, если в первом случае (рис. 1) подсветка вызывает резкое падение величин ФП и ФМЭ в большей части спектрального диапазона, то во втором случае, наоборот, ее воздействие приводит к сильному росту этих величин (рис. 2).

Обращает также на себя внимание нестандартный вид исходной и полученной после удаления окисла СХ ФМЭ в образцах p -типа (рис. 2, б, кривые 1 и 3). В обоих случаях величина ФМЭ с ростом энергии квантов возбуждающего излучения сначала возрастает, достигает максимума и затем падает, стремясь в пределе к насыщению.

Удаление окисла с поверхностей кристаллов также существенно изменяет характеристики ФП и ФМЭ (ср. кривые 1 и 3 на рис. 1 и 2). При этом представляется принципиальным то обстоятельство, что влияние УФ подсветки на

указанные характеристики в образцах со снятым окислом практически полностью отсутствует.

Важно также отметить, что влияние УФ подсветки на зависимости R_x и ρ практически совпадает с теми их изменениями, которые наблюдаются в образцах после снятия анодного окисла (рис. 3, кривые 2 и 3). В обоих этих случаях заметно увеличение ρ в области примесной проводимости, причем в образцах p -типа постоянная Холла R_x становится положительной практически во всем низкотемпературном диапазоне.

Послойное травливание приповерхностных областей образцов приводит к росту с последующим насыщением величин ФП и ФМЭ. Глубина травливания, при которой достигается насыщение указанных величин, зависит от многих факторов (исходных параметров материала, толщины окисного слоя, времени выдержки образцов после окисления и др.) и обычно колеблется в пределах от единиц до нескольких десятков мкм. Послойное травливание кристаллов приводит также к изменению (с последующей стабилизацией) величин R_x и ρ в области примесной проводимости.

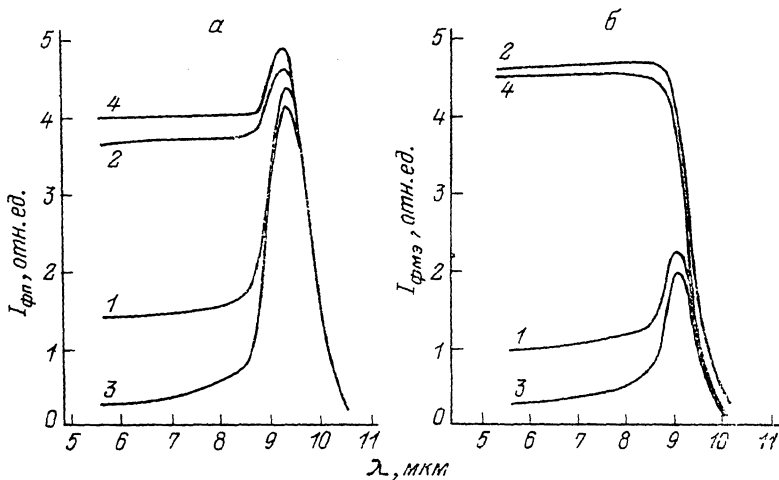


Рис. 2. Спектральные характеристики фотопроводимости (а) и фотомагнитного эффекта (б) образца p -типа.

1 — окисленная поверхность; 2 — окисленная поверхность после предварительной ультрафиолетовой подсветки; 3 — поверхность после снятия окисла; 4 — после травливания приповерхностных областей кристалла на глубину ~ 35 мкм. Измерения выполнены по истечении 6 месяцев после нанесения окисла на поверхность образца.

4. Анализ полученных результатов безусловно следует проводить с учетом наличия в окисле большого положительного заряда, который, согласно [5, 6], может сильно уменьшаться (вплоть до отрицательных значений [5]) под воздействием УФ подсветки. Исходный положительный заряд в окисле вызывает обогашающий изгиб зон у поверхностей кристаллов n -типа и обедняющий (или инверсионный) в образцах p -типа, что, согласно расчетам (см., например, [7]), обычно приводит к сильному уменьшению эффективной скорости поверхностной рекомбинации s^* в первом случае и ее росту во втором.

Исходя из вышеизложенного нетрудно понять основные закономерности изменения измеряемых характеристик. Так, в частности, УФ подсветка, вызывая спрямление зон у поверхностей окисленных кристаллов,¹ в конечном итоге приводит к росту s^* в образцах n -типа и, наоборот, к ее уменьшению в образцах p -типа. Этот вывод хорошо согласуется с характером изменения зависимостей 2 по сравнению с аналогичными зависимостями 1 на рис. 1 и 2. Кроме того, эффект спрямления зон непосредственно вытекает из сравнительного анализа кривых

¹ Возможные механизмы сильного уменьшения положительного заряда в окисленном слое и связанное с этим спрямление зон у поверхностей кристаллов под воздействием УФ подсветки рассмотрены в работах [5, 6].

1 и 2 на рис. 3. Наличие приповерхностного инверсионного слоя в образцах p -типа приводит к отрицательному значению R_H во всем исследованном температурном диапазоне (рис. 3, a , кривая 1). УФ подсветка приводит к исчезновению (или к сильному ослаблению) приповерхностного n -слоя, вследствие чего

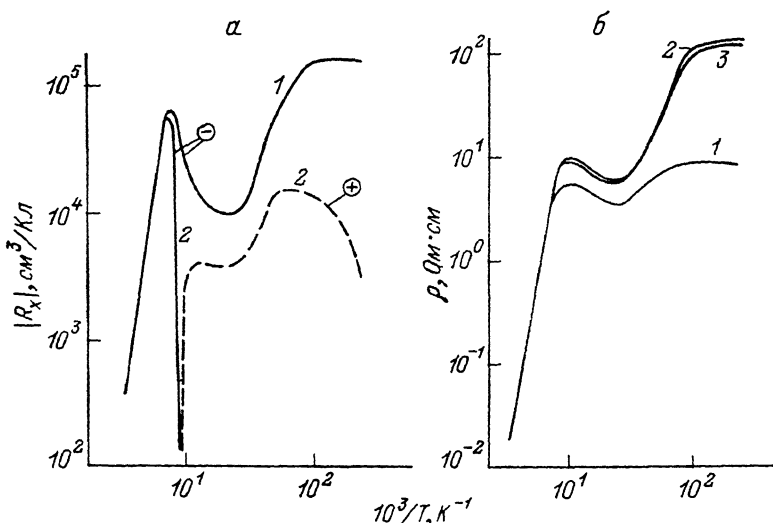


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Холла ($H=5$ кЭ) и удельного сопротивления образца p -типа проводимости.

Обозначения кривых соответствуют обозначениям кривых на рис. 2.

знак R_H становится положительным в области примесной проводимости (рис. 3, a , кривая 2).

Аналогичное спрямление зон у поверхностей кристаллов наблюдается также после удаления окисла, о чем свидетельствует практически одинаковый характер изменения зависимостей R_H и ρ в этих двух случаях (рис. 3, кривые 2 и 3). При этом, если особенности изменения СХ ФП и ФМЭ в образцах n -типа (рис. 1,

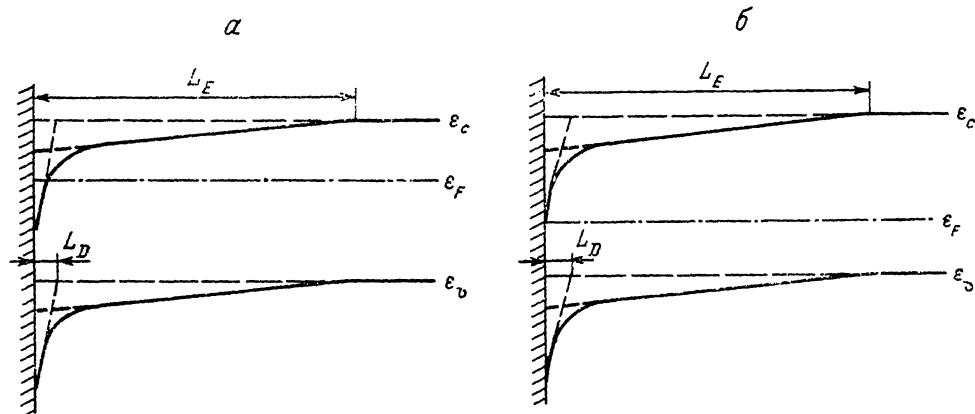


Рис. 4. Схематический вид энергетической структуры неоднородного слоя, примыкающего к окисленной поверхности образцов n - (a) и p -типа (b) проводимости.

Пунктиром показано спрямление зон под действием УФ подсветки (или после снятия окисла) в приповерхностной области, определяемой длиной Дебая.

кривая 3) по-прежнему можно интерпретировать в рамках влияния одного эффекта спрямления зон, то в случае образцов p -типа (рис. 2, кривая 3) следует по крайней мере предположить, что удаление окисла с их поверхностей сопровождается не только спрямлением зон, но и достаточно сильным увеличением истинной скорости поверхностной рекомбинации s (сравните зависимости 2 и 3 на рис. 2). Последнее предположение, как будет видно из дальнейшего, является

одним из главных условий формирования нестандартного вида СХ ФМЭ в p -об-
разцах со снятым окислом (рис. 2, б, кривая 3).

Анализ результатов, полученных при последовательном послойном страв-
ливании приповерхностных областей, свидетельствует о наличии в образцах
концентрационной неоднородности, возникающей, вероятнее всего, в процессе
окисления и с течением времени распространяющейся вглубь от поверхностей
кристалла на большие расстояния L_E , в некоторых случаях соизмеримые с би-
полярной длиной диффузионного смещения неравновесных носителей. Эта
неоднородность характеризуется повышенной (в образцах n -типа) или занижен-
ной (в p -типе) концентрацией основных носителей, и ее пространственное рас-
пределение на энергетической диаграмме может быть схематически представлено
в виде, показанном на рис. 4. Мы полагаем, что именно с этой концентрационной
неоднородностью связан нестандартный вид зависимостей 1 и 3 на рис. 2, б.
Действительно, как показано в [2], необходимым условием такого вида СХ ФМЭ
является неравенство $(\mu_n^0 + \mu_p^0)D^0 > (\mu_n^H + \mu_p^H)D^H$, где $\mu_{n(p)}^0$, D^0 и $\mu_{n(p)}^H$, D^H — по-
движности электронов (дырок) и коэффициенты биполярной диффузии нерав-
новесных носителей тока в однородной части объема и соответственно неоднород-
ной области, прилегающей к освещаемой поверхности полупроводника. Приме-
нительно к нашему случаю это неравенство может выполняться именно в образ-
цах p -типа, что непосредственно следует из аналитического вида биполярного
коэффициента диффузии, условия $\mu_n \gg \mu_p$ и рис. 4, б.

При прочих равных условиях нестандартный вид СХ ФМЭ, согласно расчету,
должен наиболее ярко проявляться в случае больших величин s^* на освещаемой
поверхности. В случае малых s^* , наоборот, СХ ФМЭ обычно имеют классический
вид при условии, что эффективная толщина приповерхностного слоя concentra-
ционной неоднородности существенно меньше длины диффузионного смещения
носителей. Этот вывод, как следует из сравнения зависимостей 1—3 на рис. 2,
также хорошо согласуется с экспериментом.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что влияние
анодного окисления поверхностей на характеристики фотоэлектрических и
гальваномангнитных эффектов в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ нельзя свести исключи-
тельно к воздействию приповерхностного изгиба зон, индуцированного зарядом
окисла. На исследованные явления существенное влияние оказывает также
приповерхностная неоднородность объема, возникающая в процессе окисления
образцов и характеризующаяся заметной нестабильностью параметров с тече-
нием времени.

Список литературы

- [1] Равич Ю. И. Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение. М., 1967. 93 с.
- [2] Бабичев Г. Г., Дякин В. В., Жадью И. П. и др. // УФЖ. 1988. Т. 33. В. 11. С. 1723—1729.
- [3] Гасан-заде С. Г., Жадью И. П., Зинченко Э. А. и др. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 1. С. 85—89.
- [4] Gatagnus P. C., Baker C. T. // Патент США. НК 4357-3. МКИ H011 29/34. 1976. № 3977018.
- [5] Schoolar R. B., Janousek B. K., Alt R. L., Carcallen R. C., Daughtery M. J., Fote A. A. // J. Vac. Sci. Techn. 1982. V. 21. N 1. P. 164—167.
- [6] Nasir F., Singleton J., Nicholas R. J. // Semicond. Sci. Techn. 1988. V. 3. N 7. P. 654—663.
- [7] Бир Г. Л. // ФТТ. 1959. Т. 1. В. 1. С. 67—76.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 25.07.1990
Принята к печати 11.01.1991