

ВЛИЯНИЕ ПАССИВИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ (Cd, Hg) Te

Беляев А. Е., Бекетов Г. В., Городничий О. П.,
Комиринко С. М., Муха Л. А.

Исследованы магнитополевые и температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления образцов твердых растворов CdHgTe с пассивирующим и сульфидным покрытиями. Наблюдался эффект влияния ультрафиолетовой подсветки на величину изгиба зон.

Существенное влияние на характеристики приборов на основе узкозонного полупроводникового соединения $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) оказывает поверхность используемых кристаллов, свойства которой определяются применяемыми методами ее пассивации. Среди этих методов в настоящее время наиболее часто используются анодное окисление (АО) и анодная сульфидизация (АС). Первый из них приводит к возникновению в приповерхностной области обогащенного электронами изгиба зон, вызванного положительными встроенными зарядами

Тип образца	α	$\mu_H, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ($T = 4.2 \text{ К}$)	$N_D - N_A$ (n-тип), $N_A - N_D$ (p-тип), см^{-3}	Коэффициент преломления в АО, АС, n	Толщина пассивирующего покрытия d , нм
n	0.17	$1.3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{14}$	АО — 2.10 АС — 2.57	115 61
p	0.218		$2.3 \cdot 10^{16}$	АО — 2.12	109

в окисле, и применяется для фоторезистивных ИК приемников, снижая скорость поверхностной рекомбинации неосновных носителей [1]. Для фотовольтаических приборов оптимальным является нулевой изгиб зон на поверхности, что может быть достигнуто применением анодной сульфидизации [2]. Изучение электрофизических свойств системы пассивирующее покрытие—кристалл КРТ проводилось главным образом вольт-емкостными методами, при этом явления переноса в приповерхностной области полупроводника почти всегда оставались за пределами внимания исследователей. Вместе с тем значение таких исследований в настоящее время особенно велико в связи с работами по созданию приборов, основанных на использовании поверхностного переноса заряда: полевых транзисторов, приборов с зарядовой связью и приборов с зарядовой инжекцией [3].

В настоящей работе ставилась задача изучения явлений переноса носителей заряда в приповерхностных областях кристаллов КРТ путем исследования гальваномангнитных явлений на образцах с пассивирующими оксидным и сульфидным покрытиями. Кроме того, для выяснения вопроса о возможном влиянии процесса анодирования на свойства приповерхностного слоя полупроводника (о чем упоминалось в [4, 5]) были исследованы исходные образцы после химического травления их поверхностей, использовавшегося в качестве пред-

пассивационной обработки, а также образцы с химически удаленным пассивирующим покрытием. На анодно окисленных образцах наблюдался эффект влияния ультрафиолетовой (УФ) подсветки на величину изгиба зон, связанный с нейтрализацией положительного встроенного заряда фотовозбужденными электронами, захваченными на ловушки в окисле [6].

Исследовались магнитополевые и температурные зависимости коэффициента Холла R_H и удельного сопротивления ρ_{\perp} образцов n - и p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.17-0.22$) в диапазоне температур 1.6—300 К. Толщина и оптические константы пассивирующих покрытий контролировались эллисометрическим методом. Результаты эллисометрических измерений и гальваномагнитные характеристики исходных образцов, рассмотренных в тексте, приведены в таблице.

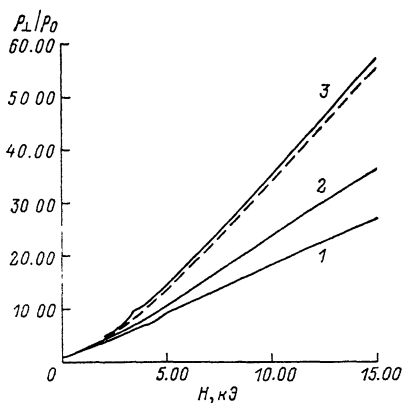


Рис. 1. Зависимости $\rho_{\perp}/\rho_0(H)$ для образцов 1—3.

1 — с АО, 2 — с АО при УФ подсветке, 3 — со снятым АО (с УФ подсветкой и без нее); штрихи — образец с АС, нанесенным после химического удаления АО (с УФ подсветкой и без нее).

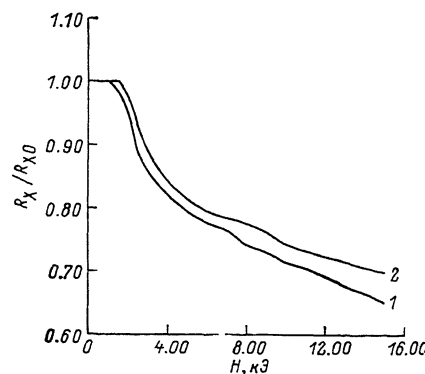


Рис. 2. Зависимость $R_x/D_{x0}(H)$ для образца 1 с АО в отсутствие УФ подсветки (1) и при ее наличии (2).

Для исходной обработки поверхности применялось химическое травление в растворе 2—4 % Br_2 в метаноле с последующей трехкратной отмывкой образца в метаноле. Анодное окисление производилось с использованием электролита состава 0.05 молей КОН в смеси H_2O и 95 % этиленгликоля в смешанном режиме, включавшем гальваностатическую стадию при плотности тока 0.1 mA/cm^2 до напряжения 22 В и потенциостатическую стадию длительностью 15 мин, в течение которой первоначальный ток уменьшался в 4 раза. Анодное сульфидирование проводилось в электролите состава 1 моль Na_2S в этиленгликоле, очищенном перегонкой в вакууме при плотности тока 0.1 mA/cm^2 . Температура электролита при сульфидировании поддерживалась около 80 °С. Для химического удаления АО использовался раствор 0.05 молей сильного фторида аммония, а для удаления АС — раствор 20 %-й соляной кислоты.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости $\rho_{\perp}(H)$ и $R_x(H)$, измеренные на одном из образцов с АО в темноте и при УФ подсветке ($T=4.2$ К). Хорошо видны увеличение магнитосопротивления и уменьшение спада R_x в области сильных магнитных полей при освещении. Объяснением этому может быть следующая модель, опирающаяся на выводы работы [6]. Анодный окисел аккумулирует положительный заряд, приводящий к приповерхностному изгибу зон в полупроводнике. Фотовозбужденные носители попадают в зону проводимости окисла с последующим захватом на глубокие ловушки, уровни которых расположены в запрещенной зоне окисла, нейтрализуя тем самым заряд окисла и уменьшая изгиб зон. Восстановление заряда в темноте происходит путем термических забросов захваченных электронов в зону проводимости окисла и их проникновения в объем полупроводника с последующей рекомбинацией. Приповерхностный слой, как показано в [7], размерно квантован. Это обстоятельство приводит к тому, что в магнитном поле его вклад в общую проводимость существенно

увеличивается (своеобразное шунтирование уменьшающейся в квантованных магнитных полях проводимости по объему), в результате чего происходит уменьшение наклона в зависимости $\rho_{\perp}(H)$ и наблюдается спадание $R_X(H)$ в сильных магнитных полях. Перезарядка окисла при УФ подсветке, уменьшающая изгиб зон, приводит к ослаблению вклада приповерхностного слоя, что и наблюдается экспериментально. Из рис. 1 (кривая 3) также видно, что после снятия АО нет влияния УФ подсветки, рост $\rho_{\perp}(H)$ максимален для данного образца и практически совпадает с исходным значением. Такое поведение характерно для образцов с минимальным (или полностью отсутствующим) изгибом зон.

Результаты, полученные на образце с АС (рис. 1), показывают, что в этом случае УФ подсветка не влияет на удельное сопротивление и коэффициент Холла. Более того по величине и наклону магнитосопротивления совпадает

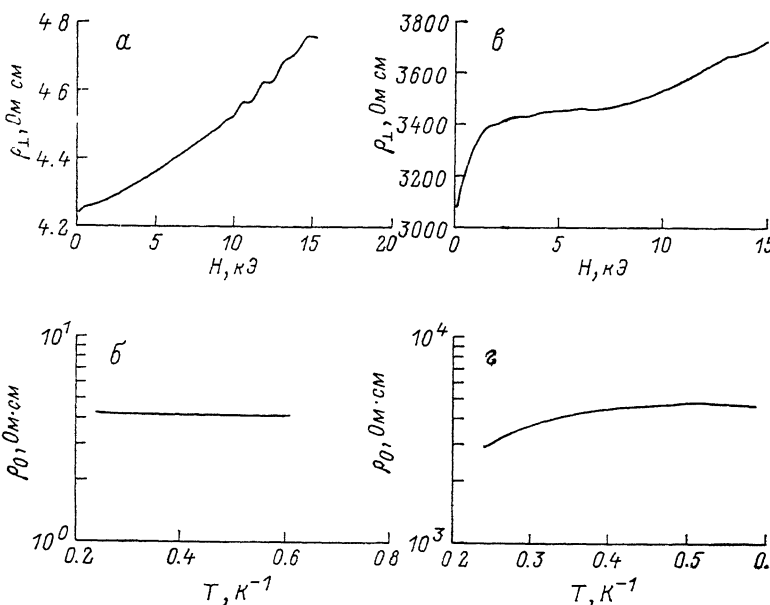


Рис. 3. Зависимости $\rho_{\perp}(H)$ (а, б) и $\rho_{\perp}(1/T)$ (в, г) для образца 2 с АО в отсутствие УФ подсветки (а, б) и при ее наличии (в, г).

с данными, полученными на образце, у которого был снят анодный окисел. Отсюда можно сделать вывод об отсутствии заметного изгиба зон в случае сульфидирования. Совокупность результатов, полученных на образцах с АО и АС, свидетельствует также об отсутствии переходного слоя на границе раздела полупроводник—окисел. Действительно, как видно из рис. 1 (кривая 3 и штриховая линия), наклон и величина магнитосопротивления для образцов с удаленным АО и с АС практически совпадают.

Чтобы получить более определенные сведения о параметрах приповерхностного слоя, были выполнены измерения ρ_0 и R_X и их температурных и магнитополевых зависимостей на образцах p -типа с АО, так как в этом случае возникает инверсный изгиб зон и при $T=4.2$ К проводимость кристалла практически полностью определяется наличием этого слоя (рис. 3, а, б). УФ подсветка оказывает сильное влияние на измеряемую проводимость, которая при освещении уменьшается на 3—4 порядка (рис. 3, в, г) и приближается к значению, полученному для свежетравленного кристалла [$\sigma \sim 1 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$].

Эффективная проводимость слоя оказалась равной $0.25 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ и практически не зависимой от температуры. Концентрация электронов в слое N_s определялась по периоду наблюдаемых осцилляций Шубникова—де-Гааза. Естественно, что носители в приповерхностном слое могут занимать несколько размерно-квантованных подуровней. Тогда $N_s = \sum N_{s,i}$, где $N_{s,i}$ — концентрация носителей на i -м уровне. Однако в этом случае осцилляционная картина должна быть значительно сложнее, чем наблюдаемая экспериментально, в ко-

горой период осцилляции остается практически постоянным для всех осцилляционных максимумов и минимумов. Поэтому в вычислениях использовалось выражение для двумерной системы $N_s = e/\pi\hbar\Delta$ ($1/H$) в пренебрежении спиновым расщеплением. При этом мы учитывали только один уровень $i=0$, для которого $N_s = 4 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$. Для этой концентрации эффективное электрическое поле F , которое возникает на границе раздела окисел—полупроводник, может быть определено в приближении треугольной ямы [8] следующим образом:

$$F = 4\pi e N_s / \epsilon_0 + 3(2\pi E_g (N_A - N_D) / \epsilon_0)^{1/2}, \quad (1)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны, N_s — поверхностная плотность зарядов, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость. Тогда электрическое поле $F = 7.26 \times 10^4$ В/см приводит к размерному квантованию состояний в потенциальной яме.

Число неподвижных зарядов в обедненном слое равно [9]

$$N_{\text{обедн}} = (N_A - N_D) d_{\text{обедн}}, \quad (2)$$

а протяженность слоя

$$d_{\text{обедн}} = \{[(E_c - E_F) \epsilon_0] / [2\pi e^2 (N_A - N_D)]\}^{1/2}. \quad (3)$$

С учетом параметров образца получаем $N_{\text{обедн}} = 2.3 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ и $d_{\text{обедн}} = 0.1$ мкм.

Для оценки собственных значений энергетических подзон E_i , в которых сосредоточены электроны, попавшие в потенциальную яму, и эффективных масс этих электронов с учетом непараболичности зоны проводимости в инверсном слое мы использовали соображения, изложенные в работе [8]. Тогда в приближении сильных полей получим $E_0 = 96$ мэВ с областью локализации волновых функций электронов на нулевом уровне $d_0 \approx 90$ Å. С учетом того что вследствие непараболичности значение эффективных масс носителей на этом уровне в направлении перпендикулярном к поверхности раздела полупроводник—окисел, изменяется от минимального (на дне зоны проводимости) до максимального (на поверхности раздела), мы оценили $\langle m_x^* \rangle \approx 0.03 m_0$, что совпадает со значением m^* на уровне Ферми для данного состава, полученным при пересчете поверхностной концентрации в объемную.

Оценка величины плотности состояний на уровне $E_0 D^F(E) = 1.25 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ эВ $^{-1}$ показывает, что все свободные электроны сосредоточены на нем.

Зная концентрацию носителей в слое, можно оценить их подвижность. Действительно, если $\sigma_{\text{темн}} = en_s \mu_s(p/s) = 0.25$ (Ом·см) $^{-1}$ (p — периметр поперечного сечения s -образца), $\mu_s \approx 5 \cdot 10^4$ см 2 /В·с.

Таким образом, на основании представленных результатов сделан вывод о том, что электрофизические свойства пассивированных поверхностей кристаллов Cd $_x$ Hg $_{1-x}$ Te определяются прежде всего параметрами пассивирующего покрытия. В процессе анодирования не возникает переходного химически детерминированного слоя, что, в частности, подтверждается обратимостью свойств кристалла по отношению к наличию пассивирующей пленки. Изгиб зон в приповерхностной области АО кристаллов хорошо описывается в рамках модели [6] и обусловлен, видимо, нескомпенсированными положительными зарядами, образованными собственными дефектами окисла — вакансиями катиона. УФ подсветка позволяет регулировать величину этого изгиба. В силу отличий механизма образования АС покрытия в нем отсутствуют собственные дефекты, способные заметно влиять на энергетику приповерхностного слоя пассивированного кристалла. Проведенные исследования позволили также определить основные параметры, характеризующие приповерхностный проводящий слой, возникающий при анодном окислении поверхности (Cd, Hg)Te.

Список литературы

- [1] Nemirovsky Y., Kidron I. // Sol. St. Electron. 1979. V. 22. N 10. P. 831—837.
- [2] Nemirovsky Y., Burstein L. // J. Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 4. P. 443—444.
- [3] Пономаренко В. П., Шиманский И. В., Стафеев В. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 62—65.
- [4] Лянская О. Г., Лиленко Е. П., Каленик В. И. // Тез. докл. Респ. конф. «Физика и химия границ раздела узкощелевых полупроводников». Львов, 1990.

- [5] Буркова Е. И., Войцеховский А. В., Корсак Т. Е., Ланская О. Г., Лиленко Е. П., Ятис А. А. // Поверхность. Физика. Химия. Механика. 1987. № 11. С. 59—64.
- [6] Scholar R. B., Janousek W. K., Alt R. L., Carscallen R. C., Daughtery M. J., Fote A. A. // J. Vac. Sci. Techn. 1982. V. 21. N 1. P. 164—167.
- [7] Балев О. Г., Баранский П. И., Бекетов Г. В., Винецкий Р. М., Городничий О. П. // ФТП. 1987. Т. 24. В. 6. С. 1024—1025.
- [8] Antcliffe G. A., Bate R. T. Reynolds R. A. // The physics of semimetals and narrow-gap semiconductors / Ed. by D. L. Carter, R. T. Bate. 1971. P. 499—509.
- [9] Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. М., 1985. 416 с.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 6.12.1990
Принята к печати 11.03.1991