

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ZnO

Рассмотрено устройство для электрических измерений параметров тонких легированных пленок ZnO. На основе использования этого зондового устройства измерена методом эффекта Холла концентрация электронов проводимости в тонких легированных индием пленках ZnO, имеющих толщину в интервале (0,065–0,3) мкм, концентрацию электронов проводимости в интервале $(2–3,4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и низкую подвижность электронов проводимости — $[4–8,5] \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Достоинством зондового устройства является возможность уменьшения напряжения асимметрии холловских зондов.

Ключевые слова: электрические измерения параметров, зондовое устройство, метод эффекта Холла, тонкие пленки ZnO.

Введение. Прозрачные токопроводящие оксиды, в том числе оксид индия-олова (ITO) широко используются в качестве материала электродов во многих типах приборов, таких как солнечные элементы на аморфном кремнии, жидкокристаллические дисплеи, тепловые зеркала и др. Однако недостатком ITO является его высокая стоимость. Благодаря своим достоинствам: высокому коэффициенту оптического пропускания в видимом диапазоне, низкому сопротивлению, низкой стоимости, распространенности и нетоксичности, оксид цинка (ZnO) является перспективным претендентом для замены ITO как материала для изготовления прозрачных электродов. ZnO с гексагональной структурой является широкозонным полупроводником (ширина запрещенной зоны — 3,3 эВ) и показывает проводимость n-типа из-за нестехиометричности состава. Удельное сопротивление не легированного ZnO не является достаточно низким для использования его в качестве материала прозрачных электродов, поэтому элементы III группы, такие как Al, Ga, In, обычно используются в качестве легирующих примесей для улучшения электрических свойств и стойкости пленок на основе ZnO. По сравнению с Al^{3+} (ионный радиус: 0,39, электроотрицательность: 1,5) и Ga^{3+} (0,47; 1,6), индий In^{3+} (0,62, 1,7) обладает ионным радиусом, близким к Zn^{2+} (0,6), и большей электроотрицательностью (1,7). Первое приведет к малым деформациям решетки, а второе — сделает его менее реактивным и более устойчивым к окислению [1]. Кроме этого, уникальные оптические, акустические и электрические свойства оксида цинка делают его привлекательным для применения в других областях микроэлектроники: в газовых сенсорах, варисторах, устройствах генерации поверхностных акустических волн. В связи

с этим выполнено большое количество работ, связанных с исследованиями электрических свойств пленок оксида цинка четырехзондовым методом [2–6], методом Ван-дер-Пау [7–11] и методом эффекта Холла [1, 12]. Известны устройства для контроля параметров полупроводниковых материалов различными методами, включая метод эффекта Холла, который получил широкое применение для контроля качества полупроводниковых материалов при измерениях концентрации и подвижности носителей заряда [13–18]. Задачей настоящей работы является разработка простого зондового устройства, которое применимо как для выполнения холловских измерений концентрации носителей заряда в тонких легированных пленках ZnO, так и при измерениях на таких пленках удельного поверхностного сопротивления оксида цинка методом Ван-дер-Пау. Кроме этого, зондовое устройство должно обладать возможностью уменьшения напряжения неэквивалентного (асимметричного) расположения холловских зондов.

Конструкция зондового устройства и методика измерений. Конструкция предложенного в настоящей работе зондового устройства для холловских измерений концентрации носителей заряда в тонких легированных пленках ZnO поясняется чертежами на рис. 1 и 2. Основными элементами зондового устройства для холловских измерений являются однозондовые головки 1–4, закрепленные на диэлектрическом основании 5 (рис. 1).

Однозондовая головка, предложенная в [19] и использованная в настоящей работе, показана на рис. 2 и содержит зондодержатель 6 и зонд 7, закрепленный в зондодержателе 6, установленном на корпусе 8 головки. Зондодержатель 6 и корпус 8 выполнены (из листа латуни толщиной 2 мм) в виде

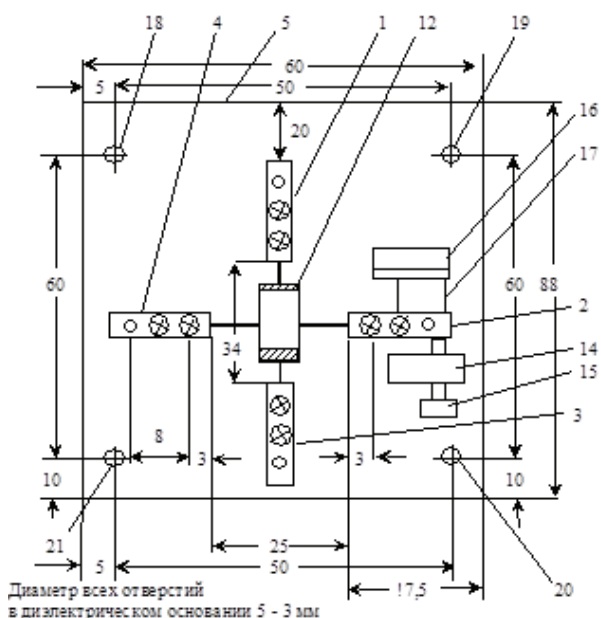


Рис. 1. Вид на зондовое устройство для электрических измерений параметров тонких легированных пленок ZnO со стороны однозондовых головок 1, 2, 3 и 4 и холловского образца 12, установленных на диэлектрическом основании 5, латунных элементов 14 и 16, закрепленных на основании 5, и регулировочного винта 15 и резинового элемента 17

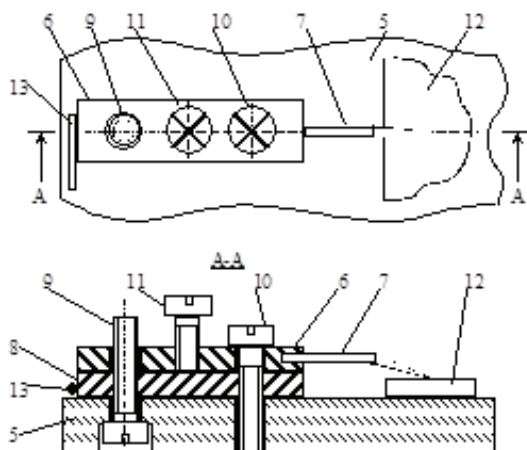


Рис. 2. Вид сверху на однозондовую головку в увеличенном масштабе и продольный разрез этой головки по плоскости А-А:

- 5 — диэлектрическое основание; 6 — зондодержатель; 7 — зонд; 8 — корпус однозондовой головки; 9 — винт крепления корпуса 8 к диэлектрическому основанию 5; 10 — винт крепления зондодержателя 6 на корпусе 8; 11 — винт для подъема зондодержателя 6 при выкрученном винте 10; 12 — холловский образец; 13 — электрический вывод корпуса 8

двух пластин, из которых первая пластина — корпус 8 имеет два отверстия с резьбой (М3) и жестко соединена первым винтом 9 с диэлектрическим основанием 5, которое имеет два отверстия и выполнено из листа стеклотекстолита толщиной 4 мм. Вторая пластина — зондодержатель 6, в которой закреплен зонд 7, имеет три отверстия и соединена вторым винтом 10 со вторым резьбовым отверстием в корпусе 8, при этом центральное отверстие в зондодержателе 6 имеет резьбу (М2,5) и снабжено третьим винтом 11. Расстояния от опорных по-

верхностей головок первого 9 и второго 10 винтов до внешних концов их резьбовых частей равны сумме толщин зондодержателя 6, корпуса 8 и диэлектрического основания 5. Расстояние от опорной поверхности головки второго винта 10 до его резьбовой части равно толщине зондодержателя 6. Головка первого винта 9 полностью утоплена в диэлектрическое основание 5. Второй 10 и третий 11 винты имеют головки с крестообразными шлицами. Такие шлицы предотвращают перемещение крестообразного конца отвертки относительно головок второго 10 и третьего винтов 11 (параллельно поверхности основания 5) при *ввинчивании* и *вывинчивании* этих винтов. Зонд 7 заострен, выполнен из бериллиевой бронзы, имеет золотое покрытие и закреплен в отверстии в зондодержателе 6 с помощью припоя. Зонд 7 в рабочем положении приведен в контакт с поверхностью измеряемого холловского образца 12. Корпус 8 соединен с электрическим выводом 13 на его противоположной относительно зонда 7 стороне.

Холловский образец 12 удаляют из зондового устройства и устанавливают в него следующим образом. В исходном (рабочем) состоянии, показанном на чертеже (рис. 2), внешний конец резьбовой части третьего винта 11 не касается поверхности корпуса 8, второй винт 10 не касается опорной поверхности его головки с поверхностью зондодержателя 6, конец резьбовой части первого винта 9 выступает над поверхностью зондодержателя 6, а зонд 7 находится в контакте с поверхностью измеряемого холловского образца 12, при этом сила прижима определяется упругими свойствами материала зонда 7. Перед проведением измерений на следующем холловском образце *вывинчивают* второй винт 10 на расстояние, равное толщине зондодержателя 6. После этого путем *ввинчивания* третьего винта 11 поднимают зондодержатель 6 над поверхностью корпуса 8 на расстояние, равное толщине зондодержателя 6. При этом заостренный конец зонда 7 поднимается над поверхностью измеренного холловского образца 12. Затем вышеописанную операцию подъема конца зонда 7 над поверхностью *измеренного* холловского образца 12 выполняют для остальных трех однозондовых головок, удаляют измеренный холловский образец 12 с диэлектрического основания 5 и устанавливают на его место следующий холловский образец 12, подлежащий измерению. После этого в каждой однозондовой головке опускают зондодержатель 6 до касания зонда 7 с поверхностью следующего измеряемого холловского образца 12 путем *вывинчивания* третьего винта 11 на расстояние, равное толщине зондодержателя 6. Усилие прижима зонда 7 к поверхности следующего измеряемого холловского образца 12 создают путем *ввинчивания* второго винта 10 до касания опорной поверхности его головки с поверхностью зондодержателя 6, при этом первый винт 9, резьбовая часть которого находится в отверстиях в зондодержателе 6, препятствует повороту зондодержателя 6 относительно второго винта 10.

Для изменения положения конца одного из двух холловских зондов 7 (однозондовая головка 2 на рис. 1) на поверхности измеряемого холловского образца 12 (с целью уменьшения напряжения неэквипотенциального расположения холловских зондов) предложенное зондовое устройство снабжено латунным элементом 14, закрепленным на диэлектрическом основании 5, регулировочным

винтом 15 (с резьбой М2), упорным элементом 16 из латуни, закрепленном на основании 5, и упругим элементом 17 из вакуумной резины, который зажат между упорным элементом 16 и боковой гранью зондодержателя 6 (рис. 1). Элементы 16 и 17 обеспечивают плотное прилегание противоположной грани зондодержателя 6 к концу регулировочного винта 15 при его перемещении в результате вращения винта 15 в противоположных направлениях в резьбовом отверстии латунного элемента 14. Поэтому при вращении регулировочного винта 15 (когда винт 10 находится в незажатом состоянии) происходит поворот зондодержателя 6 относительно оси (винта 10) и изменение положения конца зонда 7 на поверхности измеряемого холловского образца 12. Для обеспечения возможности такого поворота отверстие (через которое проходит винт 9) этого зондодержателя 6 выполнено в форме овала.

В угловых областях диэлектрического основания 5 выполнены четыре отверстия 18, 19, 20 и 21 (рис. 1). На основе использования этих отверстий на обратной стороне основания 5 закреплена прямоугольная крышка из медной фольги и диэлектрический элемент, выполненный из листа стеклотекстолита (толщиной 4 мм), который имеет отверстие для установки (фиксации) зондового устройства между полюсами электромагнита. Диэлектрический элемент, медная крышка, защитная алюминиевая крышка, устанавливаемая на стороне основания 5 с однозондовыми головками 1–4 и холловским образцом 12, и элементы их закрепления на основании 5 на рис. 1 и 2 не показаны.

В настоящей работе предложенное зондовое устройство было испытано при холловских измерениях концентрации электронов проводимости в тонких пленках ZnO, легированных индием. Эти пленки были получены на основе использования планарного кольцевого магнетрона (не промышленного изготовления), смонтированного в вакуумной камере установки УВН 2М1 и охлаждаемого проточной водой. Легированные индием пленки ZnO были изготовлены на стеклянных подложках (с размерами $20 \times 8 \times 1,65$ мм³) методом реактивного магнетронного распыления легированной индием цинковой мишени, которая была изготовлена из сплава цинка с индием, при этом содержание индия в сплаве составляло 4,3 вес. % (2,54 атом. %). Легированная индием мишень имела вид диска диаметром 6 см и толщиной 0,5 см. Расстояние от распыляемой поверхности мишени до рабочей поверхности стеклянных подложек было равно 6 см. Зона эрозии на распыляемой поверхности мишени имела вид кольца с диаметром его наружной окружности 2,2 см и шириной кольца 0,3 см.

Перед изготовлением легированных индием пленок ZnO стеклянные подложки подвергали химической очистке сначала в кипящем 30 % водном растворе серной кислоты в течение 5 минут, а затем в кипящей смеси соляной и азотной кислот (в царской водке) в течение 5 минут с последующими промывкой в дистиллированной воде и сушкой в воздухе при температуре 180 °С (в течение 40 минут). После этого стеклянные подложки загружали в металлическую маску, рабочая область которой имеет размеры (6×4,8) см² (рис. 3, где показаны: вид сверху на 14 подложек 1, расположенных в металлической маске 2, нумерация этих подложек (1–7 и 9–14) и наружная граница 3 зоны эрозии с диаметром 2,2 см (показанная пунктирной линией). Из рис. 3 видно, что в использованной в настоя-

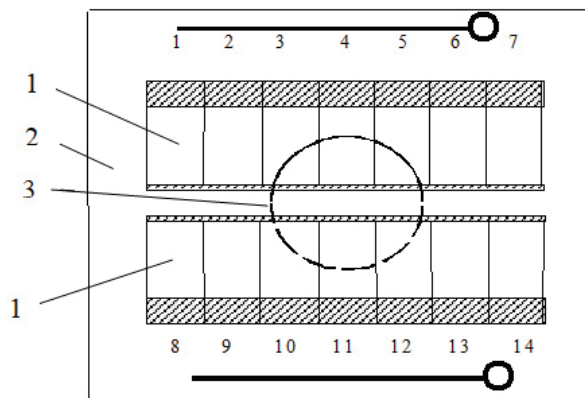


Рис. 3. Вид сверху на стеклянные подложки 1 (14 штук) с размерами 20×8 мм² в металлической маске 2 для осаждения тонких легированных индием пленок ZnO; нумерация стеклянных подложек 1 (1–7 и 8–14) в металлической маске 2 и наружная граница 3 с диаметром 2,2 см зоны эрозии на распыляемой поверхности мишени. Заштрихованные участки на каждой подложке 1 — это участки подложки 1, которые экранировались (защищались) маской 2 от осаждения легированной индием пленки ZnO

щей работе магнетронной системе рабочая область маски 2 с подложками 1 имела размеры (6×4,8) см², которые превышали максимальный размер 2,2 см распыляемой области 3 на поверхности мишени в (2,2...3) раза, что приводило к зависимости толщины осаждаемых пленок от координат как на поверхности каждой подложки 1, так и при сравнении толщины пленок на разных подложках, расположенных в различных частях рабочей области маски 1.

Магнетронное распыление легированной индием цинковой мишени осуществляли в вакуумной камере установки УВН 2М1 в среде остаточных газов, т.е. в смеси азота и кислорода, после отжига подложек в вакууме при температуре (150–200) °С в течение 20 минут. Осаждение легированных индием пленок ZnO выполняли при температуре стеклянных подложек 150 °С и давлении остаточных газов $(9-8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (ток газового разряда — 130 мА, напряжение разряда — (230–250) В, толщина осаждаемой легированной индием пленки ZnO — 0,3 мкм при осаждении в течение 1 часа и 0,065 мкм при осаждении в течении 13 минут).

После осаждения легированные индием пленки ZnO подвергали отжигу в вакууме при давлении остаточных газов $(6-7) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. и температуре 510 °С в течение 20 минут. Затем на концевых участках образцов с осажденными и отожженными в вакууме пленками ZnO формировали омические токовые контакты путем локального нанесения тонкой пленки Al с толщиной 0,4 мкм при температуре образцов 120 °С. Термовакuumное испарение и осаждение атомов Al выполняли при давлении остаточных газов $(1,5-2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. из W испарителя [20] (четыре W проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на концевых участках испарителя и расположенные в его центре на расстоянии 1 мм друг от друга).

Для измерения концентрации электронов проводимости в тонкой легированной индием пленке ZnO изготовленный холловский образец устанавливали в вышеописанное зондовое устройство и подключали его к электрической схеме, которая обеспечивала протекание и измерение регулируемого электрического тока через омические токовые контакты образца и измерение разности потенциалов на хол-

Электрические параметры тонких легированных индием пленок ZnO

№ образца	d , мкм	L , мм	R , Ом	ρ , Ом·см	I , мА	B , Тл	V_x , В	n , см ⁻³	μ , см ² /В·с
6	0,3	11,9	1759	0,0355	10,8	0,287	0,0019	$3,4 \cdot 10^{19}$	5,18
13	0,3	11,9	2302	0,0464	8,6	0,287	0,00239	$2,15 \cdot 10^{19}$	6,26
2	0,3	11,9	1723	0,0347	11,43	0,287	0,00276	$2,33 \cdot 10^{19}$	7,74
9	0,3	11,9	1145	0,0231	15,6	0,284	0,0029	$3,18 \cdot 10^{19}$	8,5
2–6	0,065	14	18400	0,0683	1,88	0,289	0,0022	$2,35 \cdot 10^{19}$	3,9
2–12	0,065	14	15460	0,0574	2,4	0,291	0,0026	$2,58 \cdot 10^{19}$	4,22

Примечание: 1) L — расстояние между омическими токовыми контактами холловского образца, R — электрическое сопротивление холловского образца между токовыми контактами, измеренное мультиметром М890С, ρ — удельное электрическое сопротивление легированной пленки ZnO, рассчитанное по формуле: $\rho = \frac{R \cdot W \cdot d}{L}$, где W — ширина холловского образца (8 мм), μ — подвижность электронов проводимости.

2) Номер холловского образца (6, 13, 2 и 9) в первом (слева) столбце указывает на положение соответствующей стеклянной подложки 1 в металлической маске 2 во время осаждения легированной индием пленки ZnO на стеклянные подложки 1 (см. рис. 3). Холловские образцы 6, 13, 2 и 9 были изготовлены из легированных индием пленок ZnO, полученных на стеклянных подложках в одном процессе осаждения пленки в течение 1 часа, а холловские образцы № 2–6 и № 2–12 были изготовлены из пленок, полученных на стеклянных подложках в другом процессе осаждения пленки в течение 13 минут.

Таблица 2

Измеренные методом Ван-дер-Пау и методом эффекта Холла электрические параметры тонких легированных индием пленок ZnO, полученных методом реактивного магнетронного распыления в работах [1, 8–11]

Ссылка на работу	d , мкм	Метод измерения	$\Delta T_{\text{осаж}}$, °С	$\Delta \rho \times 10^{-3}$, Ом·см	$\Delta n \times 10^{20}$, см ⁻³	$\Delta \mu$, см ² /В·с
[1, Р. 1822]		Холл	50–300	2,4–4	2,6–4	4–6
[8, Р. 1491]		ВдП	25–400	3–8	2–10	2–8
[9, Р. 67]		Холл	50–350	0,4–0,7	5–7	25–20
[10, Р. 78]	0,4	ВдП	280–300	2	4	9
[11, Р. 2253]		ВдП	100–500	200...6	0,4–0,8	1–14

Примечание: 1) Номером ссылки на источник информации в первом (слева) столбце является номер ссылки на этот источник информации, представленный в библиографическом списке настоящей работы. 2) **Холл** — измерение методом эффекта Холла концентрации электронов проводимости в легированной индием пленке ZnO; **ВдП** — измерение удельного поверхностного сопротивления методом Ван-дер-Пау и холловские измерения концентрации электронов проводимости с помощью образцов Ван-дер-Пау в легированной индием пленке ZnO. 3) $\Delta T_{\text{осаж}}$ — интервал температуры подложек во время осаждения легированных индием пленок ZnO; $\Delta \rho$ — интервал удельного электрического сопротивления материала в легированных индием пленках ZnO; Δn — интервал концентрации электронов проводимости в легированных индием пленках ZnO; $\Delta \mu$ — интервал подвижности электронов проводимости в легированных индием пленках ZnO.

ловских зондах. Затем, изменяя положение конца зонда 7 однозондовой головки 2 (рис. 1) на поверхности измеряемого холловского образца 12 (пленки ZnO) путем вращения регулировочного винта 15, получали минимальное значение напряжения неэквивалентного расположения холловских зондов 7 (однозондовых головок 2 и 4, рис. 1). После этого закрывали зондовое устройство алюминиевой крышкой, устанавливали его в магнитное поле электромагнита (магнитная индукция B которого была измерена с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8) и выполняли измерение холловского напряжения V_x ампервольтметром В7-22А. Расчет концентрации электронов проводимости n в тонких легированных индием пленках ZnO выполняли

по формуле: $|V_x| = \frac{r}{qn} \frac{IB}{d}$, где V_x — холловская

разность потенциалов, r — холл-фактор, q — заряд электрона, n — концентрация электронов в полупроводнике n -типа проводимости, d — размер образца в направлении магнитного поля (толщина образца — пленки ZnO), B — магнитная индукция, I — электрический ток, протекающий через токовые контакты холловского образца. Результаты измерений электрических параметров тонких легированных индием пленок ZnO, выполненных с использованием предложенного в настоящей работе зондового устройства, представлены в табл. 1.

Из полученных экспериментальных данных, представленных в табл. 1, следует, что в легированных индием пленках ZnO, осажденных в течение 1 часа, концентрация электронов проводимости находится в интервале $(2,15–3,4) \cdot 10^{19}$ см⁻³, подвижность электронов проводимости — в интервале $(5,18–$

8,5) $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а удельное электрическое сопротивление находится в интервале (0,0231–0,0464) Ом·см. Легированные индием пленки ZnO, осажденные в течении 13 минут и обладающие уменьшенной толщиной, имеют: концентрацию электронов проводимости — $(2,35–2,58)\cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, более высокое удельное электрическое сопротивление — (0,0574–0,0683) Ом·см и более низкую подвижность электронов проводимости — $(3,9–4,22) \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что, возможно, обусловлено увеличением вклада рассеяния электронов проводимости на границах этих более тонких пленок. Различие измеренных параметров в различных легированных индием пленках ZnO обусловлено применением в настоящей работе несовершенного планарного кольцевого магнетрона (не промышленного изготовления), имеющего максимальный размер (2,2 см) распыляемой области 3 на поверхности мишени, который в (2,2...3) раза меньше размеров рабочей области маски 2 с подложками 1, что приводило к зависимости толщины осаждаемых пленок от координат.

Сопоставление результатов измерений электрических параметров легированных индием пленок ZnO, полученных с помощью предложенного в настоящей работе зондового устройства, с результатами, полученными другими методами, можно выполнить, если использовать, например, экспериментальные данные из работ [1, 8–11], представленные в табл. 2. Из сравнения экспериментальных данных в табл. 1 и 2 следует, что в легированных индием пленках ZnO, изготовленных в настоящей работе и измеренных с помощью предложенного зондового устройства, концентрация n электронов проводимости в 10 раз меньше, а удельное электрическое сопротивление ρ в 10 раз больше по сравнению с концентрацией электронов проводимости и удельным электрическим сопротивлением в легированных индием пленках ZnO, изготовленных и измеренных в работах [1, 8, 10, 11] (исключением является работа [9]). При этом подвижность электронов проводимости в сравниваемых легированных индием пленках ZnO, полученных и измеренных в настоящей работе и в работах [1, 8, 10, 11], находится в интервале одного порядка величины (за исключением работы [9]). Этот результат сопоставления параметров сравниваемых пленок можно объяснить тем, что легированные индием пленки ZnO, полученные и измеренные в настоящей работе, были изготовлены путем магнетронного распыления легированной индием цинковой мишени в среде остаточных газов в вакуумной камере, т.е. в смеси азота и кислорода. Однако известно [21], что азот (N) является акцепторной примесью в оксиде цинка, и вследствие этого легированные индием пленки ZnO, изготовленные распылением легированной индием цинковой мишени в смеси азота и кислорода, являются компенсированными азотом пленками. Поэтому такие пленки обладают более высокими значениями удельного электрического сопротивления и сильно сниженными значениями концентрации электронов проводимости по сравнению с пленками, изготовленными в рабочих средах, в которых азот отсутствует.

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложено зондовое устройство для электрических измерений параметров тонких легированных пленок ZnO. На основе использования этого зондового устройства измерена методом эффекта Холла концентрация электронов проводимости в тонких легированных индием пленках ZnO, име-

ющих толщину в интервале (0,065–0,3) мкм, концентрацию электронов проводимости в интервале $(2–3,4)\cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и низкую подвижность электронов проводимости — $(4–8,5) \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Достоинством предложенного зондового устройства является возможность изменения положения конца одного из двух холловских зондов на поверхности измеряемого холловского образца с целью уменьшения напряжения неэквивалентного расположения холловских зондов. Предложенное зондовое устройство может быть использовано также для измерения удельного поверхностного сопротивления тонких проводящих пленок различных материалов методом Ван-дер-Пау.

Библиографический список

1. Peng L. P., Fang L., Yang X. F. [et al.]. Characteristics of ZnO: In thin films prepared by RF magnetron sputtering // *Physica E*. 2009. Vol. 41. P. 1819–1823. DOI: 10.1016/j.physe.2009.07.006.
2. Addou M., Moumin A., El idrissi B. [et al.]. Structural, optical and electrical properties of undoped and indium doped zinc oxide prepared by spray pyrolysis // *Journal of Materials and Environmental Science*. 1999. Vol. 96. P. 232–244. DOI: 10.1051/jcp:1999133.
3. Kumar P. M. R., Kartha C. S., Vijayakumar K. P. [et al.]. On the properties of indium doped ZnO thin films // *Semiconductor Science and Technology*. 2005. Vol. 20. P. 120–126. DOI: 10.1088/0268-1242/20/2/003.
4. Zhang K., Zhu F., Huan C. H. A. [et al.]. Indium-doped Zinc Oxide Films Prepared by Simultaneous r.f. and d.c. Magnetron Sputtering // *Surface and Interface Analysis*. 1999. Vol. 28. P. 271–274. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9918(199908)28:1<271::AID-SIA592>3.0.CO;2-1.
5. Luna-Arredondo E. J., Maldonado A., Asomoza R. [et al.]. Indium-doped ZnO thin films deposited by the sol–gel technique // *Thin Solid Films*. 2005. Vol. 490. P. 132–136. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.04.043.
6. Olvera M. De la L., Gymez H., Maldonado A. [et al.]. Doping, vacuum annealing, and thickness effect on the physical properties of zinc oxide films deposited by spray pyrolysis // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91. P. 1449–1453. DOI: 10.1016/j.solmat.2007.05.007.
7. Shinde S. S., Shinde P. S., Bhosale C. H. [et al.]. Optoelectronic properties of sprayed transparent and conducting indium doped zinc oxide thin films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41. 105109. DOI: 10.1088/0022-3727/41/10/105109.
8. Lee S. J., Cho S. Effect of Deposition Temperature on the Properties of ZnO-doped Indium Oxide Thin Films // *Journal of the Korean Physical Society*. 2014. Vol. 64, no. 10. P. 1488–1493. DOI: 10.3938/jkps.64.1488.
9. Jung Y. S., Yoon S. J., Wook L. D. [et al.]. Influence of DC magnetron sputtering parameters on the properties of amorphous indium zinc oxide thin film // *Thin Solid Films*. 2003. Vol. 445. P. 63–71. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.09.014.
10. Szyszka B., Jäger S. Optical and electrical properties of doped zinc oxide films prepared by ac reactive magnetron sputtering // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1997. Vol. 218. P. 74–80. DOI: 10.1016/S0022-3093(97)00288-3.
11. Park Y. R., Kim E. K., Donggeun J. [et al.]. Growth of transparent conducting nano-structured In doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 2250–2254. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.09.008.
12. Chen K. J., Hung F. Y., Chang S. J. [et al.]. Microstructures, optical and electrical properties of In-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255. P. 6308–6312. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.02.007.
13. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. Измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970. 432 с.

14. Кучис Е. В. Методы исследования эффекта Холла. М.: Советское радио, 1974. 328 с.
15. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
16. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
17. Пилипенко В. А. и др. Физические измерения в микроэлектронике. Мн.: Научно-методический центр Электронная книга БГУ, 2003. 171 с.
18. Смирнов С. В. Методы исследования материалов и структур электроники. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. 171 с. ISBN 978-5-86889-378-0.
19. Пат. 166158 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 1/067. Однозондовая головка / Бурлаков Р. Б. № 2016109375/07; заявл. 15.03.16; опубл. 20.11.16, Бюл. № 32.
20. Пат. 188587 U1 Российская Федерация, МПК С 23 С 14/24. Испаритель с изменяемой геометрией для вакуумного нанесения тонких пленок / Бурлаков Р. Б., Кузин А. Г. № 2018125350; заявл. 10.07.18; опубл. 17.04.19, Бюл. № 11.
21. Özgür Ü., Alivov Ya. I., Liu C. [et al.]. A comprehensive review of ZnO materials and devices // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 98. 041301. DOI: 10.1063/1.1992666.

БЛЕСМАН Александр Иосифович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафе-

дрой «Физика», директор научно-образовательного ресурсного центра «Нанотехнологии» Омского государственного технического университета.
SPIN-код: 6809-3460
AuthorID (РИНЦ): 144661
ORCID: 0000-0003-2837-3469
AuthorID (SCOPUS): 11539204200
ResearcherID: В-3079-2014
Адрес для переписки: physics@omgtu.ru
БУРЛАКОВ Рудиарий Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная и медицинская физика» Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского.
AuthorID (РИНЦ): 37654
Адрес для переписки: BurlakovRB@omsu.ru

Для цитирования

Блесман А. И., Бурлаков Р. Б. Зондовое устройство для электрических измерений параметров тонких легированных пленок ZnO // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 67–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-67-72.

Статья поступила в редакцию 23.12.2019 г.
© А. И. Блесман, Р. Б. Бурлаков