

Безэталонный РФЭС способ определения химического состава многофазных веществ и его применение в исследовании нанопленок плазменного оксида InP

© В.М. Микушкин, С.Е. Сысоев, Ю.С. Гордеев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 26 февраля 2004 г.)

Предложена модификация метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) для анализа фазового химического состава вещества. В отличие от известного РФЭС метода К. Зигбана предлагаемый способ является безэталонным и позволяет с более высокой надежностью и точностью определять химический состав сложных многофазных соединений. Одновременно с химическим составом предложенный способ дает значения энергий связи остовных уровней атомов в химических фазах исследуемого вещества, которые ранее определялись в отдельных экспериментах на эталонных образцах. Основная идея предлагаемого подхода заключается в проведении самосогласованного разложения фотоэлектронных линий двух или более элементов. Энергии связи в этом разложении играют роль свободных параметров. Условие совпадения содержания одноименных химических фаз, определяемых из разложения спектров двух и более элементов, приводит к единственности решения задачи. Предложенный способ использован в исследовании химического состава нанопленок плазменного оксида InP, содержащего несколько химических фаз. Показано, что для улучшения качества пленки и интерфейса необходимо обогащение окисляемой поверхности фосфором.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТП России (программа „Физика твердотельных наноструктур“), Президиума РАН (программа „Низкоразмерные квантовые структуры“).

1. Введение

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) для химического анализа вещества [1–3], предложенный К. Зигбаном в 60-е годы, стал в последние десятилетия основным методом анализа химического состояния элементов твердого тела, а необходимые для его реализации фотоэлектронные спектрометры имеются практически во всех крупных научных и технологических центрах. Чувствительность к слою материала толщиной всего в 1–3 nm делает его незаменимым в разработке нанотехнологий. Метод включает в себя облучение исследуемого образца рентгеновским монохроматическим излучением и измерение спектров фотоэлектронов. Он основан на эффекте химического сдвига фотоэлектронных линий, т.е. на изменении энергии связи остовного электрона при изменении химического состояния атома. Определение химического состава материала сводится к решению задачи разделения экспериментального спектра фотоэлектронов на элементарные составляющие, соответствующие определенным химическим состояниям атомов. Искомый химический состав определяется по вкладам этих составляющих с учетом стехиометрии химических фаз.

Задача разделения спектра решается легко, надежно и точно, если элементарные составляющие спектра представляют собой отдельные (разрешенные) линии, т.е., если их ширины меньше химических сдвигов. В противном случае эти составляющие сливаются в одну линию экспериментального спектра и задача значительно усложняется. Но именно этот случай встречается все чаще в связи с появлением новых многоэлементных и

многофазных материалов, таких как купратные ВТСП, твердые растворы, оксиды соединений. Определение химического состава становится особенно сложным в процессе разработки технологий получения таких материалов, когда образуются дополнительные нежелательные химические фазы, увеличивающие число неразрешенных линий. В таких неблагоприятных случаях решение ищется путем минимизации функционала ошибок между экспериментальным фотоэлектронным спектром и суммарной огибающей набора модельных элементарных линий. Свободными параметрами являются искомые интенсивности линий. Чтобы решение было единственным, необходимо заранее установить возможное число линий (число химических состояний), а также соответствующие значения энергий связи E_b и погрешностей их определения δE_b . Энергии связи находятся из экспериментов с эталонными материалами. В большинстве прикладных работ используются опубликованные литературные данные. Точность и даже достоверность определения энергий связи E_b часто оказываются недостаточными из-за сложности или невозможности синтезировать эталоны в чистом виде и предохранить их поверхность от деградации и загрязнений. Большой вклад в погрешность δE_b вносят неконтролируемые систематические ошибки, разные в экспериментах с разными эталонами. Поэтому задача по разделению неразрешенных линий, как правило, решается ненадежно или неточно. Дорогостоящая монохроматизация рентгеновского излучения стандартных источников не всегда помогает решить проблему разделения экспериментальной линии спектра, поскольку обычно повышает разрешение спектрометра всего в 2 раза (с 0.8–0.7 до 0.5–0.3 eV), но уменьшает

потоки рентгеновских квантов более чем на порядок, уменьшая тем самым чувствительность метода. Дальнейшее повышение разрешения с использованием высокомонокроматизованного синхротронного излучения, как правило, бессмысленно из-за конечного вклада естественной ширины фотоэлектронной линии.

В настоящей работе предлагается модификация известного метода, которая лишена указанных недостатков, т.е. позволяет надежно и точно определять химический фазовый состав многофазных веществ. Предлагаемый метод не требует экспериментов с эталонными образцами, но позволяет одновременно с химическим составом определять энергии связи E_b в химических соединениях, составляющих исследуемое вещество, со значительно более высокой точностью, чем в отдельных экспериментах с эталонами. Существенные признаки нового способа подробно описаны в [4]. Способ был опробован в решении относительно простой задачи определения роли атомарного кислорода в процессе формирования CuO пленок [5].

2. Проблема формирования нанопленок собственного оксида на поверхности InP

Недостатки известного метода и особенности предлагаемого подхода рассмотрены в настоящей работе на примере проблемы формирования термодинамически стабильного и диэлектрически прочного собственного плазменного оксида InP с низкой плотностью состояний интерфейса, образуемого этим оксидом с поверхностью InP [6]. Как известно, преимущества полупроводников группы A_3B_5 по сравнению с кремнием в значительной мере нивелируются низкими диэлектрическими свойствами их собственных оксидов (CO), т.е. отсутствием хорошего и технологически совместимого диэлектрика, каким в кремниевой электронике является оксид кремния SiO_2 . Так, интерфейс InP с многофазным слоем CO обычно характеризуется довольно высокой плотностью состояний, низкой термодинамической и временной стабильностью параметров. Тем не менее, технологическая совместимость собственных оксидов с полупроводниковым материалом заставила исследователей в восьмидесятые–девяностые годы активно искать пути повышения качества оксидных диэлектрических слоев и их интерфейсов с использованием разнообразных диагностических средств, включая РФЭС [6–16]. Среди различных методов окисления: термическое, химическое, электрохимическое, анодное и плазменное, — два последних дают неплохие результаты [6,7]. Главным фактором, определяющим качество интерфейса, оказался химический состав оксидного слоя: чем ниже доля оксида In_2O_3 и выше доля оксидов InPO_4 и $\text{In}(\text{PO}_3)_3$, тем ниже плотность поверхностных состояний интерфейса и выше его стабильность. Таким образом, разработка

адекватной диагностики химического состава собственных оксидов InP является важной задачей проблемы формирования структур CO-InP/InP . В последние годы задача определения фазового состава CO-InP оставалась актуальной. Продолжались исследования способов химической очистки окисленной поверхности InP [17], термического [18,19], анодного [20,21] и плазменного [22–24] окисления InP с целью получения МДП структур для высокочастотных полевых транзисторов и длинноволновых лазеров. Многослойные $\text{In-tin oxide (ITO)/InP}$ структуры используются в солнечных элементах [25]. Новым направлением является получение совершенных МДП структур путем предварительной пассивации поверхности InP плазменным окислением. Диэлектрический слой получают нанесением на пассивированную поверхность тонкой металлической пленки (Al , Bi , Sb) и ее плазменным окислением [26–28]. Химическим осаждением на пассивированную поверхность молекул SiH_4 и последующим плазменным окислением получают SiO_2/InP структуры [24]. Во всех упомянутых случаях интерфейс оказывается многофазным.

3. Объекты исследования

Исследование проводилось на образцах, аналогичных полученным в работе [6]. В этой работе были достигнуты рекордно низкие плотность состояний интерфейса CO-InP/InP ($N_{ss} \sim 4 \cdot 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^2$) и гистерезис $C-V$ характеристик ($\Delta U \sim 0.2 \text{ eV}$). Метод РФЭС использован в этой работе для качественного контроля химического состава CO-InP , который осуществлялся по положению центра тяжести экспериментальной линии и по сдвигам этого центра при изменении технологических параметров. Слой собственного оксида формировался на поверхности InP плазменным окислением. Его толщина, определенная методом послойного ионного травления, составляла 3–5 nm, что согласовалось с данными эллипсометрических измерений. Ранее выполненное и настоящее исследования проводились на электронном спектрометре LHS-11, Leybold. Образцы облучались рентгеновскими квантами AlK_α ($h\nu = 1486.6 \text{ eV}$). Изменялись спектры фотоэлектронов, испускаемых из внутренних (остовных) оболочек индия и фосфора: $\text{In}3d_{5/2}$ и $2p$. На рис. 1 и 2 приведены примеры этих спектров за вычетом квазинепрерывного фона. В спектрах CO-InP наблюдается общая колоколообразная линия фотоэлектронов, которую необходимо разделить на элементарные составляющие различных химических фаз. Задача осложнена наличием нескольких оксидных фаз с очень близкими энергиями связи остовных электронов, которые и формируют одну колоколообразную линию фотоэлектронов. Известно, что возможно образование следующих термодинамически стабильных оксидов InP : $\text{In}(\text{PO}_3)_3$ (1), InPO_4 (2), InPO_3 (3), In_2O_3 (4), P_2O_5 (7). В табл. 1 и 2 для этих соединений приведены энергии связи E_b электрона $3d_{5/2}$ оболочки индия и $2p$ обо-

лочки фосфора соответственно и данные для исходного материала InP (5), металлического индия In (6) и элементарного фосфора P (8). Далее приводится решение задачи разделения экспериментальной линии на элементарные составляющие известным и предлагаемым способами. Сравнение этих решений позволяет лучше оценить возможности последнего.

4. Определение химического состава CO—InP традиционным методом РФЭС

В решаемой задаче известно количество возможных химических фаз. Форма элементарной линии индия и фосфора определялась по фотоэлектронным линиям

неокисленного InP. В качестве энергий связи индия и фосфора в указанных выше соединениях использовались значения, полученные усреднением опубликованных литературных данных (табл. 1, 2). Заметим, что определенные таким образом значения характеризуются большими погрешностями, достигающими $\delta E_b \sim \pm 0.7$ eV, несмотря на то, что обычные для каждой из работ погрешности, по оценкам авторов, как правило, не превышают ± 0.1 eV. Содержание химических фаз определялось по амплитудам элементарных составляющих, которые устанавливались, исходя из минимума разности площадей суммарной огибающей и экспериментальной кривой. На рис. 1, а и 2, а приведены результаты такого разложения, выполненного в соответствии с прототипом. Полученный вариант, однако, невозможно признать приемлемым, поскольку содержание одноименных фаз,

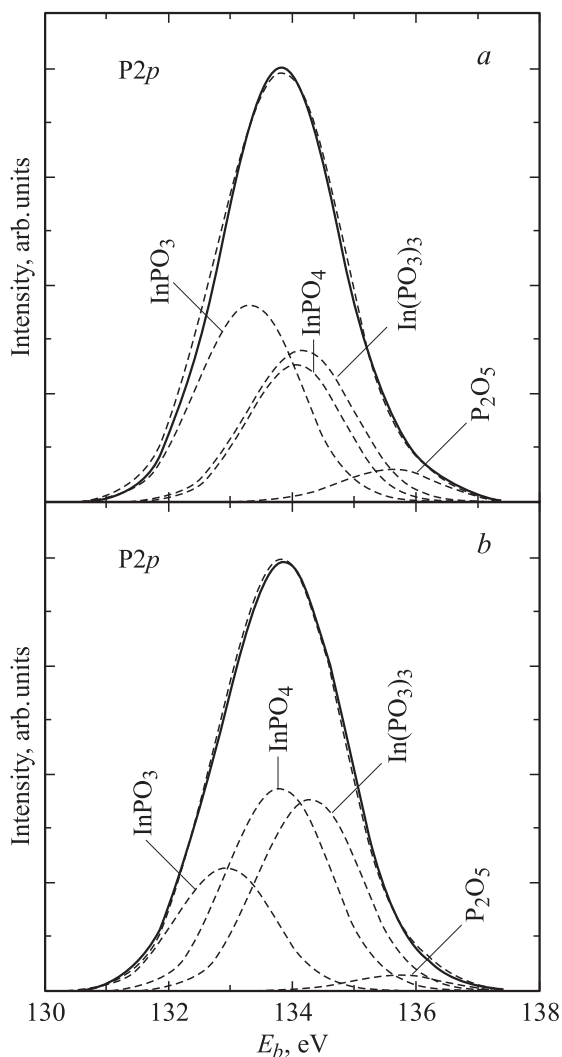


Рис. 1. Спектры фотоэлектронов P2p фосфора без непрерывной части (фона). Сплошная кривая — экспериментальный спектр. Штриховые кривые — элементарные составляющие, соответствующие определенным химическим фазам, и суммарный модельный спектр. Части а и b соответствуют разложению спектра известным и предлагаемым способом соответственно.

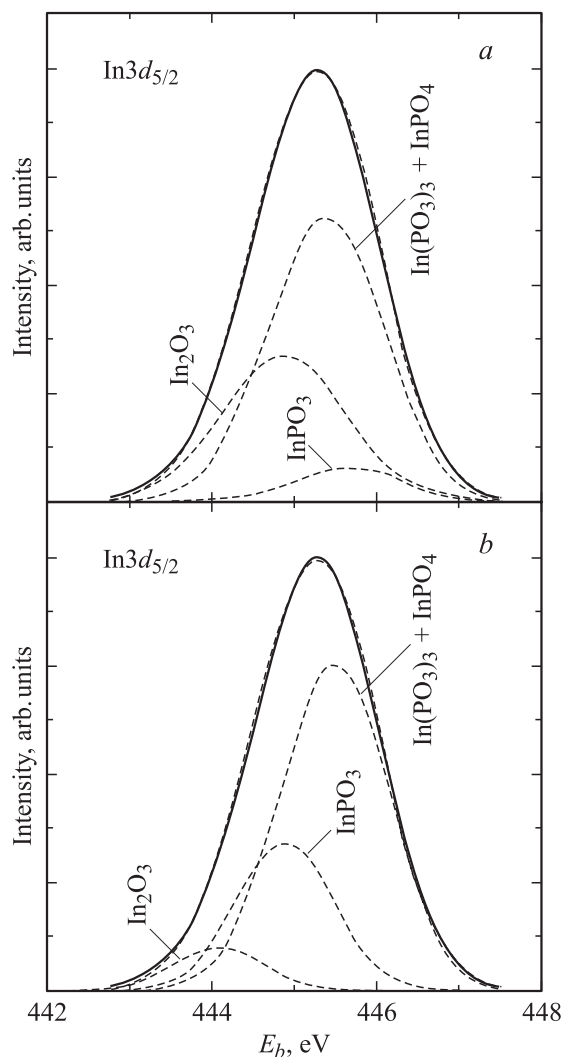


Рис. 2. Спектры фотоэлектронов In3d_{5/2} индия без непрерывной части (фона). Сплошная кривая — экспериментальный спектр. Штриховые кривые — элементарные составляющие, соответствующие определенным химическим фазам, и суммарный модельный спектр. Части а и b соответствуют разложению спектра известным и предлагаемым способом соответственно.

Таблица 1. Энергии связи остоного электрона P2p фосфора в различных химических соединениях

| 7 | 1 | 2 | 3 | 8 | 5 | Ссылка |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|------------------|
| P ₂ O ₅ | In(PO ₃) ₃ | InPO ₄ | InPO ₃ | P | InP | |
| 135.5 | 133.7 | 134.1 | — | 130.2 | 128.8 | [7] |
| — | 134.6 | 134.2 | — | — | 128.8 | [8] |
| 135.4 | — | 134.2 | — | — | 129.2 | [9] |
| — | — | 134.3 | — | — | 129.2 | [10] |
| — | — | — | — | — | 128.6 | [11] |
| 135.8 | — | 133.8 | 133.3 | — | 128.8 | [12] |
| 136.0 | — | 134.0 | 133.5 | — | 129.0 | [13] |
| — | — | 136.0 | 133.5 | — | 129.0 | [14] |
| — | — | — | — | — | — | [15] |
| 135.8 | — | 133.1 | — | — | — | [16] |
| 135.7 | 134.2 | 134.1 | 133.4 | 130.2 | 128.9 | среднее |
| ±0.3 | ±2.0 | ±0.7 | ±0.2 | — | ±0.2 | |
| 135.8 | 134.3 | 133.9 | 132.9 | — | 128.8 | настоящая работа |
| ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | — | ±0.1 | |

Таблица 2. Энергии связи остоного электрона In3d_{5/2} индия в различных химических соединениях

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Ссылка |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|
| In(PO ₃) ₃ | InPO ₄ | InPO ₃ | In ₂ O ₃ | InP | In | |
| 445.4 | 445.7 | — | 444.7 | 444.4 | 444.0 | [7] |
| 445.7 | 445.7 | — | 444.7 | 443.9 | — | [8] |
| — | — | — | — | — | — | [9] |
| — | 445.6 | — | 444.8 | 444.4 | 444.0 | [10] |
| — | — | — | 444.4 | 444.1 | 443.6 | [11] |
| — | 446.4 | 446.1 | 445.4 | 444.6 | — | [12] |
| — | 446.0 | 445.7 | 445.0 | 444.2 | — | [13] |
| — | 446.0 | 445.7 | 445.0 | 444.2 | — | [14] |
| — | — | — | 444.7 | — | — | [15] |
| — | — | — | 445.4 | 444.6 | — | [16] |
| 445.6 | 445.9 | 445.8 | 444.9 | 444.3 | 443.9 | среднее |
| ±0.7 | ±0.5 | ±0.5 | ±0.3 | ±0.2 | ±0.4 | |
| 445.5 | 445.5 | 444.9 | 444.2 | 444.0 | 443.7 | настоящая работа |
| ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | |

определенное независимо по линиям индия и фосфора, сильно различается. Так, сумма фаз „1 + 2“ (P) по линии фосфора дает 40%, а сумма „1 + 2“ (In) по линии индия — 74%. Доля фазы „3“ (InPO₃), определенная независимо по линиям индия и фосфора, различается почти на порядок: 41 и 5%. Вариации ширины элементарных линий не уменьшают указанные различия. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для сложных систем недостаточная точность определения энергий связи, погрешности измерения спектра, формы аппаратной функции и вычислений, а также погрешности, связанные с коррекцией эффектов статической зарядки диэлектрического образца под действием излучения, не позволяют решать задачу достоверного определения их химического состава.

5. Определение химического состава и энергий связи остоных электронов CO—InP новым безэталонным РФЭС способом

5.1. Определение химического состава. В методе-прототипе задача разложения фотоэлектронного спектра на элементарные составляющие имеет единственное решение, но это решение, как было показано выше, может быть совершенно невероятным из-за использования неточных или неверных значений энергий связи E_b остоных электронов в химических фазах. Основная идея предлагаемого подхода заключается в проведении самосогласованного анализа фотоэлектронных линий двух или более элементов, входящих в состав исследуемого материала [4]. При этом получение самосогласованного решения оказывается невозможным без дополнительных свободных параметров. В качестве таких параметров выбраны энергии связи E_b , поскольку надежность и точность их определения в экспериментах с эталонными веществами нередко бывают совершенно недостаточными. Условие совпадения содержания различных химических фаз из разложения спектров двух и более элементов приводит к единственности решения задачи. Важным результатом такого подхода является возможность обходиться без эталонных образцов и определять в одном эксперименте не только химический состав материала, но и энергии связи остоных электронов элементов, входящих в эти фазы. При этом, как будет показано далее, точность и достоверность определения этих энергий значительно повышаются по сравнению с литературными данными.

Проиллюстрируем возможности предлагаемого подхода на примере анализа фазового химического состава упомянутой выше нанопленки плазменного оксида фосфида индия. Необходимый для анализа базис разложения хорошо известен. Это пять термодинамически стабильных оксидов фосфида индия, которые упоминались выше и приведены в табл. 1 и 2. Энергии связи E_b остоных электронов индия In3d_{5/2} и фосфора P2p в этих соединениях известны, хотя и с большой погрешностью ($\delta E_b \sim \pm 0.3-0.7$) (табл. 1, 2). Однако, в отличие от прототипа в предлагаемой модификации метода эти данные не нужны. Используется только информация о последовательности этих энергий в указанных соединениях: $E_7^P > E_1^P > E_2^P > E_3^P (\gg E_8^P > E_5^P)$ и $E_1^{In} > E_2^{In} > E_3^{In} > E_4^{In} > E_5^{In}$. Более того, для указанных оксидов эта последовательность была ранее получена авторами работы [6] независимо из термодинамических оценок. В рассматриваемом примере в качестве нулевого приближения для указанных энергий связи были выбраны средние энергии, приведенные в табл. 1 и 2. Однако приводимый далее конечный результат достигается при любом выборе этих энергий из интервала экспериментальных спектров при условии соблюдения приведенного выше неравенства. В разложении экспериментальных линий-спектров использовалась гауссова

аппроксимация аппаратной функции спектрометра, которая была определена в экспериментах на неокисленном фосфиде индия. Варьирование ширины элементарных линий не приводило к переоценке результатов разложения.

Результаты конечного разложения спектров индия и фосфора приведены соответственно на рис. 1, *b* и 2, *b*. Из-за близости энергий связи фаз (1) и (2) в спектре индия приводится их суммарная элементарная огибающая. В низкоэнергетический хвост этого спектра попадает также линия неокисленного InP (5). Однако ее вклад, как это следует из спектра фосфора, мал. В спектре фосфора незначительные вклады неокисленного InP (5) и элементарного фосфора P (8) представлены отдельной малоинтенсивной линией, отстоящей от спектра оксида примерно на 5 eV. Сходимость итерационной процедуры оказалась весьма быстрой. Для получения конечного разложения потребовалось всего пять циклов. Доли химических фаз 1, 2, 3, 4 и 7 оказались равными соответственно 16, 49, 29, 4 и 2%. В последнем разложении доли химических фаз, определенные по спектрам индия и фосфора, совпадают с точностью до 1–3%. В пределах этой ошибки относительная погрешность определения долей основных фаз не превышает 5–10%.

Суммируя изложенные выше действия, можно предложить следующий алгоритм решения задачи разложения спектра по линиям, например, двух элементов.

1) Определение максимально возможного количества химических фаз, выстраивания последовательности энергий связи E_b каждого выбранного для анализа элемента и выбор в нулевом приближении любых значений E_b в пределах экспериментальной линии.

2) Описание экспериментальных спектров набором элементарных линий с центрами при энергиях $E_{b,i}^{1,2}$ и определение по каждому из анализируемых элементов относительных долей химических фаз $C_{b,i}^1, C_{b,i}^2, \dots$ (b — номер химической фазы; 1, 2 — номера исследуемых элементов или линий спектра, i — номер итерационного цикла). Под относительной долей понимается отношение площади соответствующей элементарной линии, скорректированное на стехиометрический коэффициент фазы, к сумме площадей элементарных линий фаз, общих для каждого из анализируемых элементов. Определение состава ($C_{b,i}^1, C_{b,i}^2, \dots$) осуществляется вариацией интенсивностей элементарных линий (и ширины, если ширина аппаратной функции меньше естественной ширины линии) путем минимизации разницы между экспериментальным и расчетным спектрами.

3) Установление разности $\Delta_{b,i}^{2-1} = C_{b,i}^2 - C_{b,i}^1$ относительных долей химических фаз, определенных по каждому элементу.

4) При выполнении условия $\Delta_{b,i}^{2-1} < \delta$ (заданная погрешность определения химического состава) — окончание итерационной процедуры. Определение химического состава в молекулярных процентах путем перенормировки относительных долей химических фаз на суммарную площадь элементарных линий всех присутствующих в образце химических фаз.

5) При условии $\Delta_{b,i}^{2-1} > \delta$ выбор шага $\Delta E_{b,i}^{1,2}$, направленного на минимизацию указанной разности, и осуществление нового итерационного цикла при новом наборе энергий $E_{b,i+1}^{1,2}$, т.е. возвращение ко второму пункту предлагаемого алгоритма.

Приведенный алгоритм был также успешно использован при анализе пленок оксидов меди, выращивавшихся методом магнетронного распыления с использованием источника атомарного кислорода [5].

5.2. Энергии связи E_b основных электронов в собственных оксидах InP. В результате решения задачи разложения получены значительно более точные и достоверные энергии связи. Из табл. 1 и 2 видно, что данные настоящей работы, как правило, близки к данным, усредненным по многим источникам, хотя в некоторых случаях разница достигает 0.6–0.9 eV. Важным результатом работы является то, что систематическая погрешность определения энергий связи уменьшена в несколько раз. Общая погрешность для основных фаз не превышает $\delta E_b \sim \pm 0.1$ eV. Смещение центра элементарной линии конечного разложения на величину, большую 0.1 eV, не позволяет достичь заданной ошибки разложения. Вывод о повышении достоверности определения энергий связи в описываемом примере сделан на том основании, что в случае недостаточной точности определения этой величины возможны ошибки в установлении соответствия энергии E_b и вида соединения. Так, определенная в работе [12] энергия связи In $3d_{5/2}$ для InPO₃ (446.1 eV) на 0.2 eV превышает усредненное по многим источникам значение энергии для оксида InPO₄ вместо того, чтобы быть ниже этого значения (табл. 1, 2). Определенная в работе [14] энергия связи P2*p* для InPO₄ (136.0 eV) на 0.2 eV превышает усредненное значение для P₂O₅, также меняя последовательность указанных фаз. Напротив, энергия связи P2*p* для InPO₄ (136.0 eV) из работы [16] не выше на 0.7–1.0 eV, а на 0.3 eV ниже средней энергии для InPO₃. Следовательно, при использовании этих ошибочных данных технологические процессы были бы ориентированы на получение совершенно иных веществ.

5.3. Необходимость обогащения окисляемой поверхности фосфором. Приведенный пример показывает, что в полученных плазменным окислением образцах суммарная доля наиболее стабильных и диэлектрически прочных оксидов InPO₄ и In(PO₃)₃ достигает 65%, а доля нежелательного оксида In₂O₃ не превышает 4%. Из химических формул приведенных оксидов следует, что для достижения такого результата необходимо обогащение окисляемой поверхности фосфором. По-видимому, использованная технология плазменного окисления создает благоприятные условия для диффузии этого элемента из объема материала. Можно предположить, что предварительное нанесение известного количества фосфора на окисляемую поверхность способно изменить химический состав в нужном направлении и улучшить качество оксида и интерфейса.

6. Выводы

Таким образом, предложен новый способ анализа фазового химического состава вещества и определения энергий связи электронов основных уровней, являющийся модификацией метода РФЭС. В отличие от прототипа разработанный способ является безэталонным. Способ повышает достоверность и точность количественного определения химического состава вещества и энергий связи электронов основных уровней атомов в исследуемых химических фазах. Так, в рассмотренном примере решения задачи определения фазового химического состава СО—InP относительная погрешность определения долей основных фаз не превышала 5–10%. Систематическая погрешность определения энергий связи уменьшена в несколько раз. Общая погрешность для основных фаз не превысила 0.1 eV.

Список литературы

- [1] К. Зигбан, К. Нордлинг, А. Фальман, Р. Нордберг, К. Хамрин, Я. Хедман, Г. Йоханссон, Т. Бергмарк, С. Карлссон, И. Линдгрэн, Б. Линдберг. Электронная спектроскопия. Мир, М. (1971). 493 с.; К. Siegban, C. Nordling, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S.-E. Karlsson, I. Lindgren, B. Lindberg. Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy. Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsalien. Uppsala (1967). Ser. IV. Vol. 20.
- [2] М.П. Сих, Д. Бриггс. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фото-электронной спектроскопии. Мир, М. (1987). 598 с.
- [3] Д. Вудраф, Т. Денчар. Современные методы исследования поверхности. Мир, М. (1989). 540 с.
- [4] Ю.С. Гордеев, В.М. Микушкин, С.Е. Сысоев. Патент РФ № 2170421. Б.И. № 19 (2001).
- [5] Э.М. Шер, В.М. Микушкин, С.Е. Сысоев, Б.Т. Мелех. ЖТФ **70**, 78 (2000).
- [6] Е.Д. Белякова, А.В. Габараева, А.Т. Горелёнок, Р.В. Каржавин, В.М. Микушкин, С.Е. Сысоев, Н.М. Шмидт. Поверхность **7**, 88 (1992).
- [7] G. Hollinger, E. Berngignat, J. Joseph, Y. Robach. J. Vac. Sci. Tech. A **3**, 2082 (1985).
- [8] Maria Faur, Mircea Faur, D.T. Jayne, M. Goradia, C. Goradia. Surface and Interface Analysis **15**, 641 (1990).
- [9] H. Ishii, H. Hasegawa, A. Ishii, H. Ohno. Appl. Surf. Sci. **41/42**, 390 (1989).
- [10] S.M. Thurgate, N.E. Erickson. J. Vac. Sci. Tech. A **8**, 3669 (1990).
- [11] C.W. Wilmsen, R.W. Kee. J. Vac. Sci. Tech. **15**, 1513 (1978).
- [12] I.K. Han, E.K. Kim, J.I. Lee, S.H. Kim, K.N. Kang, Y. Kim, H. Lim, H.L. Park. J. Appl. Phys. **81**, 6986 (1997).
- [13] Y.S. Lee, W.A. Anderson. J. Appl. Phys. **65**, 10, 4051 (1989).
- [14] N. Shibata, H. Ikoma. Jpn. J. Appl. Phys. **31**, part 1, 12A, 3976 (1992).
- [15] L.L. Kazmerski, P.J. Ireland, P. Sheldon, T.L. Chu, S.S. Chu, C.L. Li. J. Vac. Sci. Tech. **17**, 1061 (1980).
- [16] A. Guivarc'h, H. L'Haridon, G. Pelous. J. Appl. Phys. **55**, 4, 1139 (1984).
- [17] Yun Sun, Zhi Liu, F. Machuca, P. Pianetta, W.E. Spicer. J. Vac. Sci. Technol. A **21**, 1, 219 (2003).
- [18] P. Legay, F. Caillet, J. Decobert, L. Leprince, G. Le Roux, M. Quillec. J. Appl. Phys. **85**, 4, 2428 (1999).
- [19] D. Pulver, C.W. Wilmsen, D. Niles, R. Kee. J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 1, 207 (2001).
- [20] J. van de Ven, J.J.M. Binsma, N.M.A. de Wild. J. Appl. Phys. **67**, 12, 7568 (1990).
- [21] Prakash N.K. Deenapanray, A. Martin, P. Lever, C. Jagadish. Electrochem. Solid State Lett. **5**, 6, G41 (2002).
- [22] Л.С. Берман, А.Д. Габараева, А.В. Каманин, И. Каримов, Л.Е. Клячкин, Л.В. Шаронова, Н.М. Шмидт. Письма в ЖТФ **22**, 2, 65 (1996).
- [23] A.T. Gorelenok, N.D. Ilyinskaya, I.A. Mokina, N.M. Shmidt. Semiconductor Technology: Processing and Novel Fabrication Techniques / Ed. by M.E. Levinstein, M.S. Shur. John Wiley & Sons Inc., N.Y. (1997). 195 p.
- [24] M.P. Besland, S. Jourba, M. Lambrinos, P. Louis, P. Viktorovich, G. Hollinger. J. Appl. Phys. **80**, 5, 3100 (1996).
- [25] J. Henry, J. Livingstone. Design, Fabrication, and Characterization of Photonic Devices II / Ed. by Marek Osinski, Soo-Jin Chua, Akira Ishibashi. Proc SPIE **4594**, 447 (2001).
- [26] R. Touhami, S. Ravelet, M.C.E. Yagoub, H. Baudrand. J. Appl. Phys. **94**, 10, 6574 (2003).
- [27] Sh. Morikita, H. Ikoma. J. Vac. Sci. Technol. A **21**, 1, 226 (2003).
- [28] T. Motegy, J. Tomita, H. Ikoma. Jpn. J. Appl. Phys. Lett. **38**, 4B, L420 (1999).